

博士論文

水の浸透と中性化によるコンクリート構造物中の
鉄筋腐食に対する実態調査と影響要因の分析

轟 俊太郎

水の浸透と中性化によるコンクリート構造物中の 鉄筋腐食に対する実態調査と影響要因の分析

目次

第 1 章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 鉄筋腐食に対する照査の現状と課題	1
1.1.2 従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査の概要	2
1.1.3 鉄筋腐食深さに対する照査の概要	4
1.1.4 鉄筋腐食深さと従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査によるかぶりの比較	6
1.1.5 鉄筋腐食深さの限界値および鉄筋腐食速度における課題	8
1.2 研究の目的	12
1.3 本論の構成	13

第 2 章 鉄筋腐食によるひび割れや腐食状態の実態調査

2.1 はじめに	15
2.2 調査対象構造物	15
2.3 ひび割れ形態の実態調査	20
2.3.1 調査方法	20
2.3.2 ひび割れとはく落の状況	22
2.3.3 かぶりと変状発生率の関係	25
2.3.4 ひび割れ形態の閾値	26
2.4 はく落形状の実態調査	30
2.4.1 はく落形状計測装置	30
2.4.2 調査方法	32
2.4.3 かぶりとはく落幅の関係	35
2.4.4 かぶりとはく落角度の関係	36
2.4.5 計測装置により得られたはく落形状	37
2.5 鉄筋の腐食状態の実態調査	46
2.5.1 鉄筋形状計測装置	46
2.5.2 調査方法	51
2.5.3 目視で観察される鉄筋の腐食状態	53
2.5.4 計測装置により得られた鉄筋形状	56
2.6 まとめ	60

第3章 腐食ひび割れ形態に及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響

3.1 はじめに	61
3.2 鉄筋押抜き試験によるひび割れ形態に関する検討	62
3.2.1 鉄筋押抜き試験	62
3.2.2 試験概要	64
3.2.3 ひび割れ形態	65
3.2.4 ひび割れ性状	68
3.2.5 はく落角度	71
3.2.6 粗骨材の影響	72
3.2.7 解析方法	73
3.2.8 解析によるひび割れ形態および荷重変位関係	74
3.3 ひび割れ形態に及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響	76
3.3.1 解析概要	76
3.3.2 ひび割れ形態への影響	78
3.3.3 変状発生時の膨張変位への影響	81
3.4 まとめ	89

第4章 鉄筋腐食に及ぼす水と中性化の影響

4.1 はじめに	90
4.2 調査概要	91
4.3 中性化深さの傾向と分析	97
4.4 水と中性化残りに応じたはく離はく落発生傾向	102
4.5 鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化残りの影響	111
4.6 推定した鉄筋腐食速度と鉄筋腐食深さに対する照査に用いる鉄筋腐食速度の比較	118
4.7 はく落発生箇所のかぶりと鉄筋腐食深さに対する照査で算定されるかぶりの比較	119
4.8 まとめ	123

第5章 結論

5.1 本論により得られた成果	125
5.2 今後の課題と展望	128

参考文献	132
------	-----

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 鉄筋腐食に対する照査の現状と課題

これまで、鉄筋腐食に対する照査では、鉄筋腐食の要因と考えられるコンクリートの中性化の進行や塩化物イオンの浸入を制限する方法を用いてきた。特に、コンクリートの中性化は外気に曝される全ての鉄筋コンクリート構造物で生じるため、中性化の進行を抑制することは鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保する上で重要な事項とされ、1999年制定の土木学会コンクリート標準示方書[施工編]¹⁾において、初めて、耐久性の照査の一つとして中性化に関する照査(1.1.2項)が導入された。それ以来、設計では、「中性化残りが10mm以上では腐食しても構造物の機能を損なうような重大な鉄筋の腐食が生じた例が極めて少ない」という実態から、中性化残りが10mm以上となるように水セメント比やかぶりを定めてきた。

一方、コンクリートの中性化は、水が掛かる部位と比べて水が掛からない部位で進行しやすい(ため^{2),3)}、中性化残りのみを考えると、水が掛からない部位の方が、鉄筋腐食が進行しやすいことになる。そのため、中性化残りのみを指標として維持管理を行うと、水が掛かる部位よりも水が掛からない部位を早期に補修することになりえる。しかし、鉄筋が腐食するには「水」が必要である。これは、鉄筋腐食が原因であるコンクリート片のはく落が雨などによって水が掛かる部位で多く発生していることから明らかとなっている^{4)~7)}。

このことから、鉄筋腐食に対する水の重要性を踏まえ、2017年制定の土木学会 コンクリート標準示方書[設計編]⁸⁾(以降、コンクリート標準示方書[設計編])では、鋼材腐食深さ(以降、鉄筋腐食深さ)に対する照査(1.1.3項)として、中性化残りを指標とする従来の照査に代えて、水を鉄筋腐食の主要因とし⁹⁾、鉄筋腐食深さを指標とした照査を行うことが原則となった。また、2018年制定の土木学会 コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁰⁾(以降、コンクリート標準示方書[維持管理編])においても、中性化残りの他、水掛かりの程度を踏まえて鉄筋腐食の開始時期を判定することを原則としている。

このように、鉄筋腐食に対する水の影響を設計に反映すること、また構造物の性能に関わる鉄筋腐食深さで照査を行うことは、設計と維持管理の連携を深め、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を確保する上で重要である。この鉄筋腐食深さに対する照査は、実態を十分な精度で評価し得る鉄筋腐食速度と鉄筋腐食深さの限界値を用いて行う必要がある。これは、鉄筋腐食によって生じるコンクリート片のはく落による第三者災害の防止や構造物の性能低下の抑止、また変状が発生した場合にかかる維持管理の負担を考えれば、十分な精度の照査式を用いて設計時に適切に水セメント比やかぶりを設定した方が合理的であることから明らかである。また、維持管理においても、予め立てたシナリオに基づき計画的に維持管理していくことが合理的であるが、鉄筋腐食や変状

の発生と進行を予測するために、同様に鉄筋腐食速度と変状発生時の鉄筋腐食深さの評価が必要となる。しかし、現状では、従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査で定まるかぶりと同程度となるように十分余裕を持った鉄筋腐食深さの限界値を用いて照査を行っているため(1.1.4項)、鉄筋腐食速度と鉄筋腐食深さの限界値が各々必ずしも実態に表したものとなっていない可能性がある。

以上より、今後、基本的な考え方はコンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さに対する照査に拠りつつ、より実態に即した鉄筋腐食速度および鉄筋腐食深さの限界値の算定式を構築することが課題であると考えられる(1.1.5項)。

1.1.2 従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査の概要¹⁾

(1) 照査式

中性化深さを照査指標として、限界値と設計値の比に構造物係数を乗じた値が 1.0 以下であることを確認する。

$$\gamma_i \cdot y_d / y_{lim} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (1.1.1)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数。一般に、1.0～1.1としてよい。

y_{lim} : 鉄筋腐食発生限界深さの限界値(mm)。

y_d : 中性化深さの設計値(mm)。

(2) 鉄筋腐食発生限界腐食深さ

「中性化残りが 10mm 以上では腐食しても構造物の機能を損なうような重大な鉄筋の腐食が生じた例が極めて少ない」という実態から、中性化残り 10mm 以上を制限値とされる。

$$y_{lim} = c - \Delta c_e - c_k \quad \dots\dots\dots (1.1.2)$$

ここに、 c : かぶり (mm)。

Δc_e : かぶりの施工誤差 (mm)。

c_k : 中性化残り (mm)。一般に通常環境下では10mmとしてよい。

(3) 中性化深さの設計値

中性化深さの設計値は、 \sqrt{t} 則に基づき、環境の影響の程度を表す係数 β_e やコンクリートの係数

γ_c , セメント種毎の有効水結合材比 W/B に応じた中性化速度係数を用いて算定する. 表 1.1.1 に鉄道ラーメン高架橋を例として, β_e, γ_c を示す. β_e, γ_c は, W/B が明確なブリーディングのない供試体を用いた暴露試験で得られた中性化速度係数式(1.1.5)¹²⁾を基本とし, 実態調査^{例えば 3, 13)}で得られた実構造物の中性化に対する環境の影響やブリーディング等によるコンクリートの品質低下の影響を考慮して定められた係数である. β_e, γ_c により実態に即した中性化深さが推定される.

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{t} \dots\dots\dots (1.1.3)$$

ここに γ_{cb} : 中性化深さの設計値 y_d のばらつきを考慮した安全係数. 一般に1.15としてよい. ただし, 高流動コンクリートを用いる場合には, 1.1としてよい.

t : 耐用年数(年). 一般に式(1.1.3)で算出する中性化深さに対しては, 100年を上限とする.

α_d : 中性化速度係数の設計値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$).

$$\alpha_d = \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \dots\dots\dots (1.1.4)$$

β_e : 環境作用の程度を表す係数. 乾燥しやすい環境の場合1.6, 乾燥しにくい場合1.0としてよい.

γ_c : コンクリートの材料係数. 一般に1.0としてよい. ただし, 上面の部位に関しては1.3とするのがよい.

α_k : 中性化速度係数の特性値(mm/ $\sqrt{\text{年}}$). 式(1.1.5)により予測してよい.

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/B \dots\dots\dots (1.1.5)$$

$$W/B: \text{有効水結合材比. } W/(C_p + k \cdot A_d) \dots\dots\dots (1.1.6)$$

W : 単位体積あたりの水の質量

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

k : 混和材の種類により定まる定数

フライアッシュの場合, $k=0$

高炉スラグ微粉末の場合, $k=0.7$

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量

表 1.1.1 鉄道ラーメン高架橋で一般的に用いる部位毎の β_e, γ_c の例

項目	部位		
	柱, 橋脚	梁, スラブ下面	高欄
β_e	1.6	1.6	1.0
γ_c	1.3	1.0	1.3

1.1.3 鉄筋腐食深さに対する照査の概要^{8),9)}

(1) 照査式

鉄筋腐食深さを照査指標として、限界値と設計値の比に構造物係数を乗じた値が 1.0 以下であることを確認する。

$$\gamma_i \cdot s_d / s_{lim} \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (1.1.7)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数. 一般に 1.0~1.1 としてよい.

s_{lim} : 鉄筋腐食深さの限界値(mm).

s_d : 鉄筋腐食深さの設計値(mm).

(2) 鉄筋腐食深さの限界値

鉄筋腐食深さの限界値は、設計で想定していない様々な環境の影響や、施工による品質の相違、照査式の信頼性などから、コンクリートにひび割れやはく離等が生じた場合の構造物の性能への影響などを踏まえて、十分に余裕を持ったものとされている。

式(1.1.8)に鉄筋腐食深さの限界値の算定式を示す。本式は、弾塑性 FEM によって求められる腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さが $10 \sim 100\text{mg}/\text{cm}^2$ とされるため、安全側の値として $10\text{mg}/\text{cm}^2$ を用い、それを単位換算した $1.27 \times 10^{-2}\text{mm}$ を基準としている。そして、照査の不確実性を考慮して十分な余裕をみることとし、これの 0.3 倍を限界値としている。これより、 $1.27 \times 10^{-2} \cdot 0.3$ ($1/2 \cdot 1/1.5$ の小数 2 位以下の切り捨て) $\cdot 0.1$ (かぶりが 10mm の時に 1.0 となるように設定) $\cdot c$ (かぶり) と定式化されている。

なお、変状時の鉄筋腐食深さは、かぶりの他、鉄筋径や鉄筋間隔などの影響を受けると考えられるが、本式を安全側に設定しているため、また設計の簡便化するために最も主要な要因であるかぶりのみを変数に定式化されている。

$$s_{lim} = 3.81 \times 10^{-4} \cdot c \quad \dots\dots\dots (1.1.8)$$

$c > 35\text{mm}$ の場合、 $s_{lim} = 1.33 \times 10^{-2}$

ここに、 c : かぶり(mm).

(3) 鉄筋腐食深さの設計値

式(1.1.9)に、鉄筋腐食深さの設計値の算定式を示す。鉄筋腐食深さの設計値は、1 年あたりの

鉄筋腐食深さ(以降, 鉄筋腐食速度 式(1.1.10))に設計耐用期間を乗じることにより算定する. この鉄筋腐食速度式は, 水掛かりの要因が降水である場合を想定し, 水がしばしばかかるが水の供給が止めばすぐに乾燥が始まる部位を対象として定式化されたものである. 定式化の概要は以下となる. まず主に水分浸透下での試験¹⁴⁾から鉄筋位置への水到達時の鉄筋腐食速度 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ ($0.5 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$)を参考に, それを単位換算した $5.8 \cdot 10^{-8}\text{mm}/\text{h}$ を基準とする. そして, 鉄筋位置への水到達 1 回あたりに, 10h は腐食が継続するとし, その 1.2 倍として $5.8 \cdot 10^{-8} \cdot 10 \cdot 1.2 \approx 7.0 \cdot 10^{-7}\text{mm}/\text{回}$ とする. さらに, 1 年あたりの降雨回数を, 5 大都市の降雨記録から 3 時間以上雨が中断した場合に降雨終了としてカウントし, 雨の継続時間 T を用いて $262 \cdot \exp(-0.068 T)$ 回/年とする. これより, 式(1.1.10)は, $7.0 \cdot 10^{-7}\text{mm}/\text{回} \times 262 \cdot \exp(-0.068 T)$ 回/年 $\approx 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.068 \cdot T)$ と定式化された. T は, 水分浸透速度係数 q_d を用いて, $c - \Delta c_e = q_d \cdot \sqrt{T}$ から $(c - \Delta c_e)^2 / q_d^2$ で表される. 本式は, 普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種, フライアッシュセメント B 種が対象とされる.

$$s_d = \gamma_w \cdot s_{dy} \cdot t \dots\dots\dots (1.1.9)$$

ここに, γ_w : 鉄筋腐食深さの設計値 s_d のばらつきを考慮した安全係数.

t : 耐用年数(年). 一般に耐用年数 100 年を上限とする.

s_{dy} : 1 年あたりの鉄筋腐食深さの設計値(mm/年).

$$\text{一般に, } s_{dy} = 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-0.068 \cdot (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2) \dots\dots\dots (1.1.10)$$

Δc_e : かぶりの施工誤差(mm).

q_d : コンクリートの水分浸透速度係数の設計値(mm/ $\sqrt{\text{時間}}$). $q_d = \gamma_c \cdot q_k$

γ_c : コンクリートの材料係数. 一般に 1.3 としてよい.

q_k : コンクリートの水分浸透速度係数の特性値(mm/ $\sqrt{\text{時間}}$). 実験あるいは既往のデータに基づき, コンクリートの水結合材比および結合材の種類から推定される予測値 q_p を用いて設定してよい.

q_p : コンクリートの水分浸透速度係数の予測値(mm/ $\sqrt{\text{時間}}$). 普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種, フライアッシュセメント B 種である場合には, 式(1.1.11)によりコンクリートの水結合材比 W/B から予測してもよい.

$$q_p = 31.25 \cdot (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \dots\dots\dots (1.1.11)$$

1.1.4 鉄筋腐食深さと従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査によるかぶりの比較

図 1.1.1 に、鉄筋腐食深さに対する照査で定まるかぶり(鉄筋腐食深さによるかぶり)と従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査で定まるかぶり(中性化深さによるかぶり)の比較を示す。セメント種は普通ポルトランドセメント、かぶりの施工誤差 Δc_e は 10mm、耐用年数は 100 年である。中性化深さによるかぶりは、表 1.1.2 に示す β_e 、 γ_c の組合せで算出した。 $\beta_e \times \gamma_c$ が大きいほど、中性化深さによるかぶりは大きく、 W/B が小さいほど、中性化速度係数の予測値 α_p が小さいため、 $\beta_e \times \gamma_c$ による差が小さくなる。図より、 W/B が 40~45%程度であると、中性化深さによるかぶりよりも鉄筋腐食深さによるかぶりの方が大きい。ただし、例えば、鉄道 RC 構造物で一般的な $W/B=50\sim55\%$ 程度では鉄筋腐食深さによるかぶりは、 $\beta_e=1.6$ 、 $\gamma_c=1.0$ の時の中性化深さによるかぶりと大きく変わらない。なお、鉄筋腐食深さによるかぶり c と W/B の勾配がかぶり 35mm で異なるが、これは、式(1.1.8)に示す鉄筋腐食深さの限界値がかぶり 35mm で上限に至るためである。

図 1.1.2 に、セメント種毎のかぶりの比較を示す。なお、N は普通ポルトランドセメント、B は高炉スラグ微粉末で 50%置換したセメント、F はフライアッシュで 15%置換したセメントである。中性化深さによるかぶりは、普通に比べて高炉、フライアッシュの方が大きい。対して、鉄筋腐食深さによるかぶりは、セメント種によらず同一である。このことから、従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査から鉄筋腐食深さに対する照査とすることにより、耐久性の観点においては、混合セメントを使用しやすい状況となる。

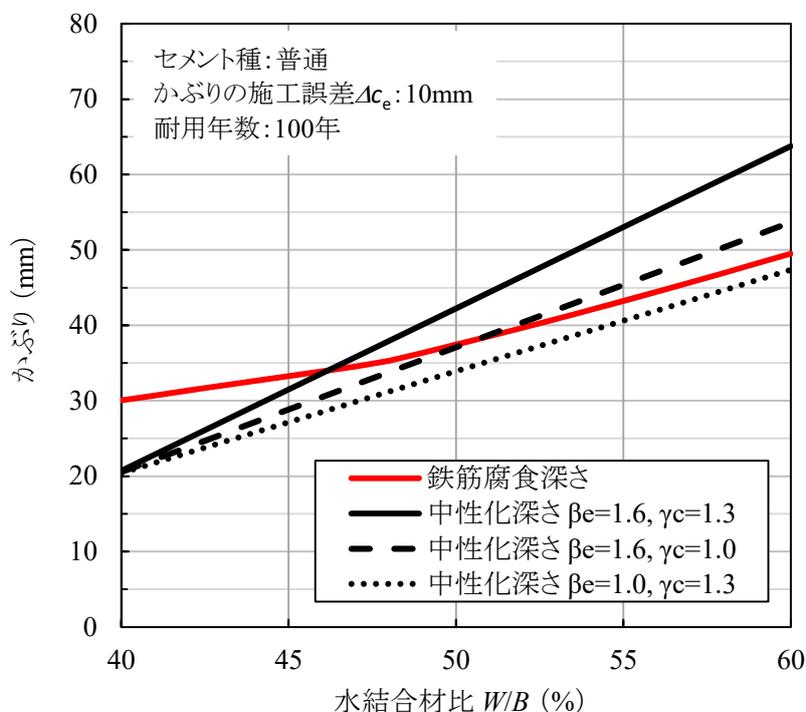


図 1.1.1 鉄筋腐食深さまたは中性化深さに対する照査で定まるかぶりの比較

表 1.1.2 かぶりの算定で用いた各照査のばらつき, 品質, 環境等に関する係数

照査	係数	
鉄筋腐食深さ	構造物係数 γ_i	1.0
	s_d のばらつきを考慮した安全係数 γ_w	1.15
	コンクリートの材料係数 γ_c	1.3
中性化深さ	構造物係数 γ_i	1.0
	y_d のばらつきを考慮した安全係数 γ_{cb}	1.15
	コンクリートの材料係数 γ_c	1.3, 1.0
	環境作用の程度を表す係数 β_e	1.6, 1.0

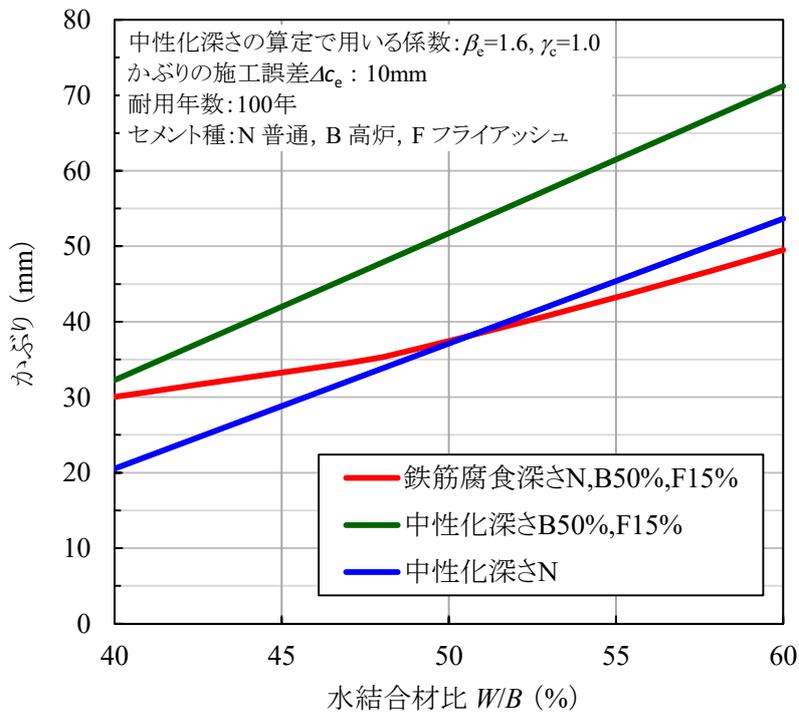


図 1.1.2 セメント種毎のかぶりの比較

1.1.5 鉄筋腐食深さの限界値および鉄筋腐食速度における課題

(1) 鉄筋腐食深さの限界値における課題

a) 鉄筋腐食によるひび割れや腐食状態の実態評価

鉄筋腐食によるひび割れやはく落などの発生機構の解明^{15)~33)}や変状発生時の鉄筋腐食深さ^{34)~42)}などに関する数多くの研究が行われているが、現地調査データを基に、ひび割れやはく落に関して論じた研究^{6),15)}が少ないのが実状である。鉄筋腐食深さの限界値の設定には、室内実験や短期暴露、FEM 等から得られた知見と共に、実構造物を対象とした実績データとの比較検討が必要である。また、腐食によるコンクリートのひび割れやはく落を FEM で再現しようとする場合、実態調査で得られた鉄筋の腐食範囲や破壊面の大きさおよび角度、形状などの基礎的データは、モデル化やその妥当性の検証などに有益な情報であると考えられる。しかし、実構造物を対象としたこれらの情報は少ない。

以上より、実態調査により、鉄筋腐食によるひび割れや鉄筋の腐食状態などの基礎的データの取得、分析を行うことが課題であると考えられる。

b) 腐食ひび割れ形態に及ぼすかぶりや鉄筋間隔の影響評価

腐食ひび割れの発生機構に着目した研究^{15),19),20),23)}により、かぶりが大きい場合には、鉄筋に沿ったひび割れとなり、かぶりが小さい場合には、鉄筋に沿ったひび割れが発生する前に、鉄筋から斜め方向へひび割れが進展してはく離するひび割れになるとされる。Browne¹⁵⁾や松島ら^{19),20),23)}は、これらの形態の閾値をかぶり c と鉄筋径 ϕ で表し、Browne は $c/\phi > 1.5$ の時に、松島らは、 $(2c+\phi)/\phi > 3.0$ の時に鉄筋に沿ったひび割れとなり、それ以外のはく離ひび割れとなるとしている。実態調査⁶⁾においても、概ねこの閾値を境にはく離やはく落が発生していることが確認されている。ただし、これは、鉄筋が単一で配置される場合を対象としており、鉄筋が密に複数配置される場合には、かぶりや鉄筋間隔に応じてひび割れ形態等が異なってくると考えられる。特に、兵庫県南部地震を背景に鉄筋量が増加し鉄筋間隔が狭くなってきているのに対して高度経済成長期の構造物の早期劣化を背景にかぶりは増加しているため、鉄筋間隔がひび割れ形態等に影響を及ぼす可能性がある。

一方で、式(1.1.8)に示す鉄筋腐食深さの限界値は、十分に安全側の設定であるため、また設計の簡便化から、かぶりのみを変数とした式とされる。これまで、鉄筋腐食に関する変状に対し、かぶり、鉄筋径、コンクリートの収縮およびクリープ、コンクリートの諸物性、腐食生成物やその諸物性の影響に着目した研究がなされている。しかし、鉄筋が複数配置された場合に、鉄筋間隔が腐食ひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼす影響に着目した検討は少ない^{44),45)}。

以上より、鉄筋間隔が腐食ひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼす影響を明らかにすること、また鉄筋間隔に影響を受けるのであれば式(1.1.8)に示す鉄筋腐食深さの限界値の適用条件を明らかにすることが課題であると考えられる。

(2) 鉄筋腐食速度における課題

a) 鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化の影響評価

図 1.1.3 に、式(1.1.10)による鉄筋腐食速度を示す。横軸はかぶりとした。安全係数は 1.0、かぶりの施工誤差 Δc_c は 0mm、 γ_w は 1.15 として算定した。 γ_c は 1.3 である。図より、鉄筋腐食速度は、最大でも 0.20×10^{-3} mm/年程度である。本鉄筋腐食速度は、主に水分浸透下での試験¹⁴⁾で得られた鉄筋位置への水到達時の鉄筋腐食速度に基づいて定式化されている。この試験は、促進中性化後、鉄筋位置の含水率が 3%とコンクリート内部が乾燥している状態から、鉄筋位置の含水率が 10%となるまでコンクリート表面から水分を浸透させ、その時の鉄筋腐食速度を分極抵抗から求めるものである。図 1.1.4 に、この試験から得られた鉄筋腐食速度と中性化残りの関係を示す。図より、中性化残りが小さいほど、鉄筋腐食速度が増加すると考えられる。

一方で、式(1.1.10)の鉄筋腐食速度は、図 1.1.4 に示す鉄筋位置の含水率 10%および中性化残り 10mm で得られた鉄筋腐食速度 0.51×10^{-3} mm/年 ($0.4\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)に基づいて定式化され⁹⁾、中性化残りを考慮した鉄筋腐食速度にはなっていない。これは、本式が想定する湿潤環境にある部位では中性化が進みにくいことを考えての判断とされている。本図に従って一般環境に置かれる構造物の水の供給と中性化、鉄筋腐食速度の関係を考えると、通常、水が供給される部位では、中性化の進行が遅く、鉄筋腐食速度は遅い状態を保つと考えられる。対して、水が供給されない部位では、中性化の進行が早く、中性化残りが小さくなりやすいが、水が供給されないため、鉄筋腐食速度は遅いと考えられる。また、現状では、従来の中性化深さに対する照査で定まるかぶりとの大きな差がでないように(図 1.1.1)、限界値に十分な余裕を持たせているため(1.1.3(2))、結果的に耐用年数 100 年を経ても中性化残りが 10mm 程度以上となるかぶりが確保されていると考えれば、中性化残り 10mm 時の鉄筋腐食速度を用いて定式化することは妥当であると考えられる。しかし、かぶりの大小や乾湿繰り返しの程度により、鉄筋位置の pH が低下するほど中性化残りが小さくなれば、中性化残りが鉄筋腐食速度に影響を及ぼす可能性もある。また、維持管理との連携をより強化することを考えれば、従来、鉄筋腐食に対する指標の一つとなっていた中性化残りが鉄筋腐食速度に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。

以上より、今後、より精度良く鉄筋腐食速度を評価するには、実態調査に基づき、水と中性化残りが鉄筋腐食速度に及ぼす影響を明らかにすることが課題であると考えられる。

b) 供用中の構造物を対象とした鉄筋腐食速度の推定法の構築

鉄筋周辺まで促進中性化させた後の鉄筋腐食に対しては、恒温恒湿実験や暴露実験から鉄筋腐食速度の推定式^{46)~51)}が提案されているが、コンクリートの中性化と水の両面に着目して鉄筋腐食速度を論じた研究は少ない。また、実態調査による検証が必要であると考えられるが、特に実構造物を対象として鉄筋腐食速度を検討したものは極めて少ない⁵²⁾。これは、供用中の構造物の鉄筋腐食速度を推定するのが容易ではないためであると考えられる。鉄筋腐食速度を推定する方法には、腐食反応の電気化学的な特性に基づく分極抵抗法^{53),54)}等による推定法や鉄筋のはつり出し等から鉄筋腐食量を計測して推定する方法⁵⁵⁾がある。分極抵抗法は非破壊で鉄筋腐食速度を推定できるが、推定した値を水掛かりや温度、湿度などの環境の影響に応じて補正が必要があること、限定された範囲での結果であることなど様々な環境に置かれる膨大な構造物に対して分極抵抗法を実施することは容易ではない。また、鉄筋腐食量から腐食速度を推定する方法は、鉄筋を切り出して鉄筋腐食量を計測する必要があるが、供用中の構造物からの鉄筋の切り出しは、構造物の性能に影響を及ぼすため、容易ではない。

以上より、供用中の構造物を対象とし、鉄筋を切り出すことなく、これまで受けてきた環境履歴など構造物の実態に即した鉄筋腐食速度を推定する方法を確立することが課題であると考えられる。

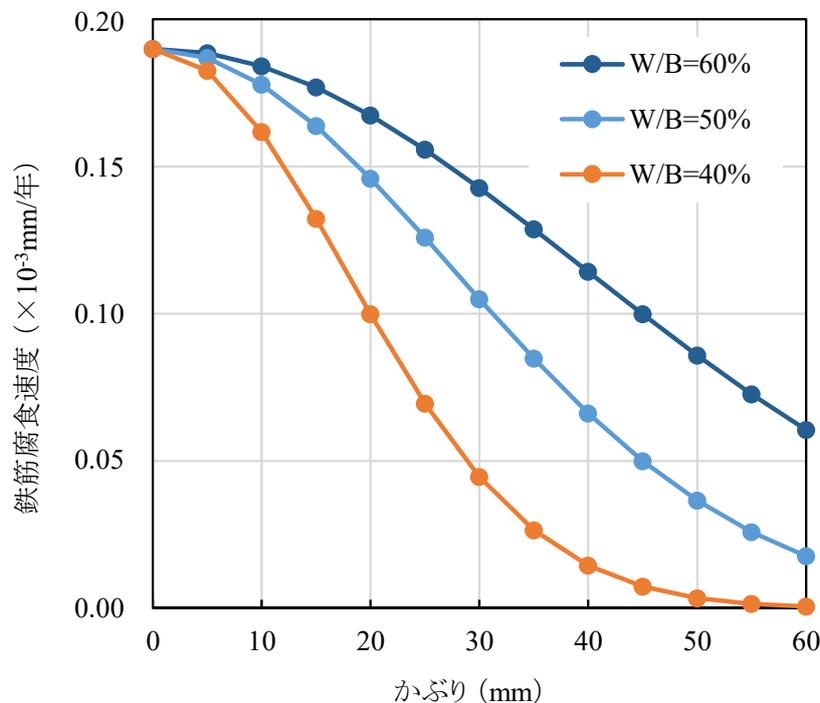


図 1.1.3 式(1.11)による鉄筋腐食速度

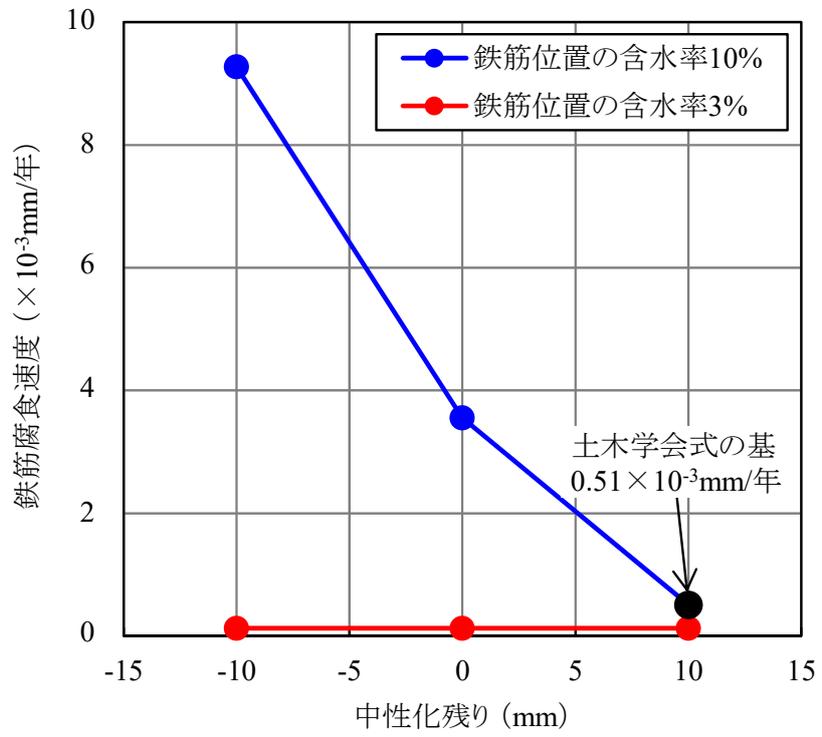


図 1.1.4 鉄筋腐食速度と中性化残り¹⁴⁾

1.2 研究の目的

本論では、主に、塩害等がない一般環境に置かれるコンクリート構造物中の鉄筋腐食を対象とした実態調査から、1.1.5 で示した鉄筋腐食深さの限界値および鉄筋腐食速度の各課題に対して、検討を行った。

(1) 鉄筋腐食深さの限界値

- a) 腐食によるひび割れ形態や腐食状態の実態評価(第2章)
- b) 腐食ひび割れ形態に及ぼすかぶりや鉄筋間隔の影響評価(第3章)

(2) 鉄筋腐食速度

- a) 鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化の影響評価(第4章)
- b) 供用中の構造物を対象とした鉄筋腐食速度の推定法の構築(第4章)

1.3 本論の構成

図 1.3.1 に、本論の構成フローを示す。本論は、5章で構成される。以下に、その概要を示す。

「第 1 章 序論」では、鉄筋腐食に対する照査の現状と課題、従来の中性化に伴う鉄筋腐食に対する照査、鉄筋腐食深さに対する照査の概要とそこで用いられる鉄筋腐食深さの限界値および鉄筋腐食速度に対する課題、本論の目的を示した。

「第 2 章 鉄筋腐食によるひび割れや腐食状態の実態調査」では、かぶりコンクリートのひび割れやはく落の発生機構の解明や FEM に基づく変状発生時期の予測に資する基礎的データとして、実績の乏しい、ひび割れ形態、はく落形状、鉄筋の腐食状態等について、これらを現地で計測する装置を開発し、鉄道 RC 構造物を対象に調査を行い、データの取得および検討を行った。

「第 3 章 腐食ひび割れ形態に及ぼすかぶりや鉄筋間隔の影響」では、腐食による膨張を模擬した試験により得られた荷重変位関係やひび割れ形態といった結果を用いて FEM の再現性を確認し、その後、FEM に基づき、鉄筋を複数配置したモデルを用いてひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼすかぶりや鉄筋間隔の影響を検討した。

「第 4 章 鉄筋腐食に及ぼす水と中性化の影響」では、鉄筋腐食によるはく離はく落が発生した供用中の鉄道 RC 構造物を対象に調査を行い、水掛かりの異なる部位毎にかぶりコンクリートのはく離はく落の発生に及ぼす水と中性化の影響を検討した。また、供用中の構造物を対象として鉄筋腐食速度を推定する方法を用いて、鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化の影響を検討した。さらに、調査結果に基づき、コンクリート標準示方書〔設計編〕に示される照査式の検証を行った。

「第 5 章 結論」では、各章で得られた成果を総括して述べるとともに、今後の課題と展望を示して結論とする。

「参考文献」は、各章ではなく、まとめて論末に示した。

水の浸透と中性化によるコンクリート構造物中の鉄筋腐食に対する実態調査と影響要因の分析

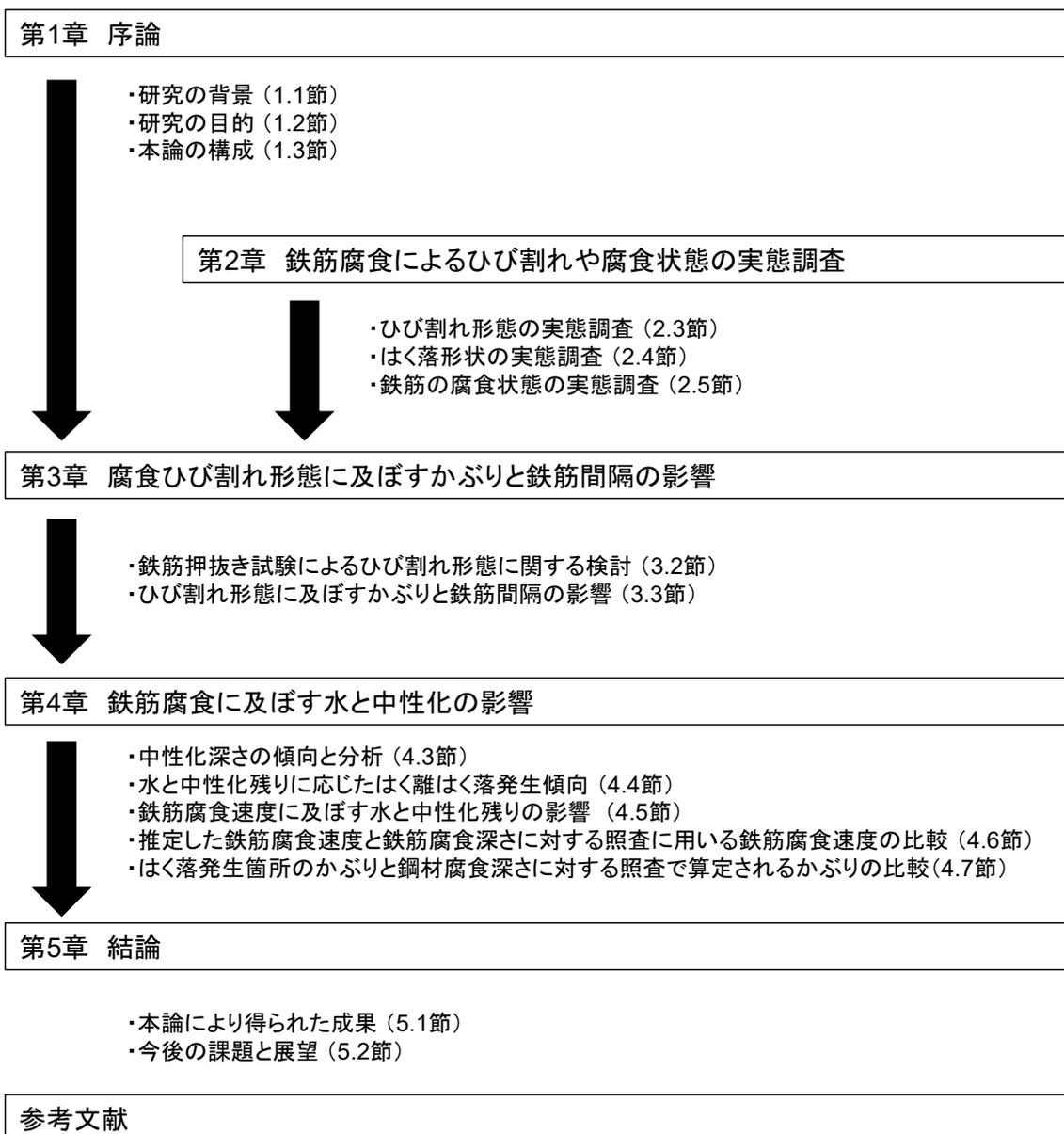


図 1.3.1 本論文の構成フロー

第 2 章 鉄筋腐食によるひび割れや腐食状態の実態調査

2.1 はじめに

本章では、かぶりコンクリートのひび割れやはく落の発生機構の解明や FEM の検証に資する基礎的データとして、実績の乏しい、はく落幅やはく落角度、ひび割れ形態、鉄筋の腐食状態等について、これらを現地で計測する装置を開発し、鉄道 RC 構造物を対象に調査を行い、データの取得および検討を行った。本章の構成の概略は以下のとおりである。

(1) 調査対象構造物 (2.2 節)

調査の対象とした構造物の概要を示した。

(2) ひび割れ形態の実態調査 (2.3 節)

目視によるひび割れ状況やかぶりと変状発生率の関係から、ひび割れ形態について検討した。

(3) ひび割れ形状の実態調査 (2.4 節)

目視によりはく落幅やはく落角度について検討すると共に、レーザー変位センサを用いてはく落の形状を計測する装置を開発し、それについて定量的かつより詳細に検討した。

(4) 鉄筋の腐食状態の実態調査 (2.5 節)

鉄筋のはつり出しにより腐食が生じた範囲について検討すると共に、レーザー変位センサを用いて鉄筋の形状を計測する装置を開発し、それについてより定量的かつより詳細に検討した。

2.2 調査対象構造物

表 2.2.1 に、調査対象構造物の諸元を示す。調査対象構造物は、しゅん功後 26～45 年が経過し、ひび割れおよびはく離はく落が生じた高架橋 A, B, C, D である。

(1) 高架橋 A

高架橋 A は鉄道ラーメン高架橋であり、調査の対象部材は高欄である。高欄内部(中性化の濃縮を受けていないと考えられる表面から 70mm～100mm の深さ)から 1.21～2.21kg/m³(データ数: 50 箇所)の塩化物イオンが検出された。高架橋 A は、離岸距離が 2.5km の位置にあり、飛来塩分の影響は小さいと考えられることから、建設時の段階から海砂などの使用によってコンクリートに塩

化物イオンが混入したと考えられる。また、中性化深さは、6.7mm～13.7mm(データ数:50箇所)であった。写真 2.2.1 に高架橋 A の概況、図 2.2.1 に高欄の配筋を示す。高欄の収縮目地間の長さは標準 8000mm で、高さは 1700～1900mm、幅は 160mm である。この 8000mm 間隔で区切られた高欄を 1 枚と定義した。使用鉄筋は鉛直方向鉄筋、水平方向鉄筋ともに D10 である。鉛直方向鉄筋の間隔は 250mm、水平方向鉄筋の間隔は 300mm である。鉛直方向鉄筋が外側に配置されており、鉛直方向鉄筋のかぶりは 30mm である。既設鉄道高架橋の RC 高欄としては最も一般的な構造である。

(2) 高架橋 B

高架橋 B は鉄道ラーメン高架橋であり、調査の対象部材は柱である。柱内部(中性化の濃縮を受けていないと考えられる表面から 80mm～100mm の深さ)から 0.16～0.30kg/m³(データ数:3箇所)の塩化物イオンが検出された。データ数は少ないものの、内的塩害の影響は小さいと考えられる。また、飛来塩分が少ないと考えられる地域に位置し、離岸距離は 1.0km 以上であることから、飛来塩分の影響は小さいと考えられる。中性化深さは、8.4～31.6mm(データ数:17箇所)であった。写真 2.2.2 に高架橋 B の概況、図 2.2.2 に柱の配筋を示す。鉄筋径は、軸方向鉄筋 D29、帯鉄筋 D13 である。軸方向鉄筋の間隔は 160mm、帯鉄筋の間隔は 300mm である。帯鉄筋のかぶりは 33mm である。

(3) 高架橋 C

高架橋 C は鉄道ラーメン高架橋であり、調査の対象部材は高欄の内側(線路内部)である。離岸距離は、外的塩害も想定される 160m であるが、海岸線と高架橋の間には自然林が広がっており、過去の調査から飛来塩分は少ないと考えられる。柱内部(コンクリート表面から 80mm の深さ)から 0.45、0.54kg/m³(データ数:2箇所)の塩化物イオンが検出された。中性化深さは、7.0～14.7mm(データ数:10箇所)であった。なお、配筋図がなく、詳細な配筋は不明であるが、調査より、高欄の使用鉄筋は鉛直方向鉄筋、水平方向鉄筋ともに D10 であった。鉛直方向鉄筋の間隔は 250mm 程度、水平方向鉄筋の間隔は 300mm 程度であった。写真 2.2.3 に、概況および調査を行った高欄内側の状況を示す。

(4) 高架橋 D

高架橋 D は鉄道 RC ボックスカルバートあり、調査の対象部材は側壁内空面である。塩化物イオン濃度は、1.18kg/m³～1.65kg/m³(データ数:4箇所)、中性化深さは 13.0～65.0mm(データ数:21箇所)であった。写真 2.2.4 に高架橋 D の概況、図 2.2.3 に側壁内面の配筋を示す。内空幅 2.5m×内空高 2.5m の人道用ボックスカルバートであり、鉄道の施工基面からの土被りは 2.33m である。軸方向鉄筋および配力鉄筋ともに D16 である。軸方向鉄筋の間隔は 300mm、配力鉄筋の間隔は、上下端ではそれぞれ 290mm、330mm であり、その他中央部では 500mm である。

表 2.2.1 高架橋諸元

調査項目	高架橋	しゅん功年	調査時経年	対象部材	中性化深さ mm	塩化物イオン濃度 kg/m ³
2.3 ひび割れ形態 2.4 はく落形状 2.5 鉄筋腐食状態	A	1979, 1980	27, 26	高欄 (13, 6 枚)	6.7~13.7 (50 箇所)	1.21~2.21 (50 箇所)
2.3 ひび割れ形態 2.4 はく落形状	B	1973	36	柱 (4 本)	8.4~31.6 (17 箇所)	0.16~0.30 (3 箇所)
2.3 ひび割れ形態 2.4 はく落形状 2.5 鉄筋腐食状態	C	1986	26	高欄 (4 枚)	7.0~14.7 (10 箇所)	0.45, 0.54 (2 箇所)
2.3 ひび割れ形態	D	1972	45	ボックスカルバート 側壁内空面 (2 側壁)	13.0~65.0 (21 箇所)	1.18~1.65 (4 箇所)

※()内は調査箇所数



写真 2.2.1 高架橋 A の概況

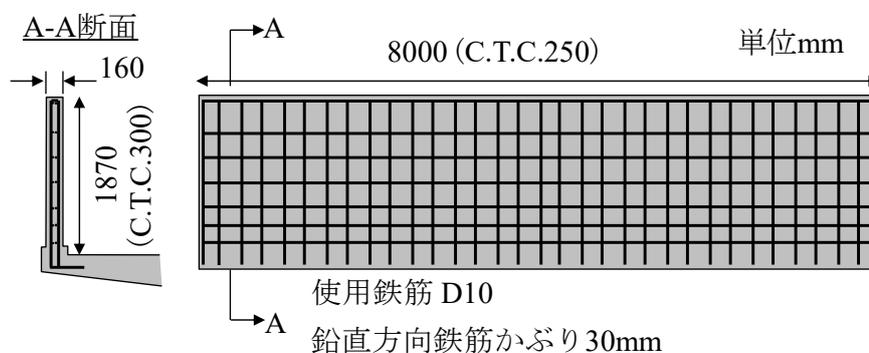


図 2.2.1 高架橋 A の高欄の配筋図

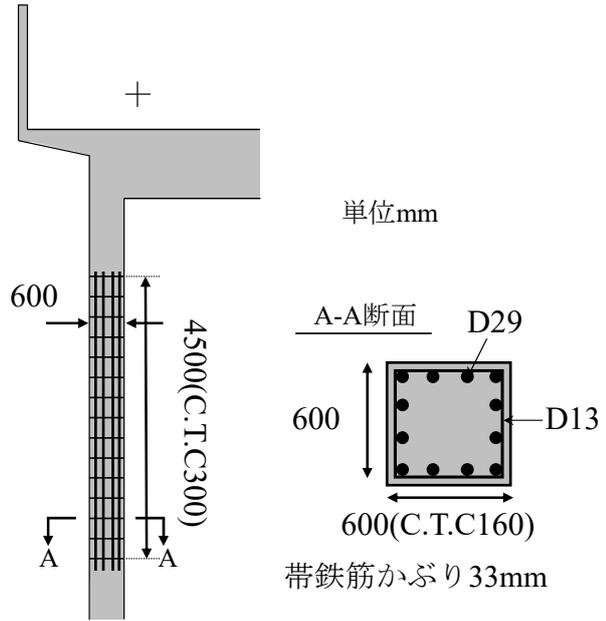


写真 2.2.2 高架橋 B の概況

図 2.2.2 高架橋 B の柱の配筋図



(a) 概況

(b) 線路内部

写真 2.2.3 高架橋 C の概況



写真 2.2.4 高架橋 D の概況

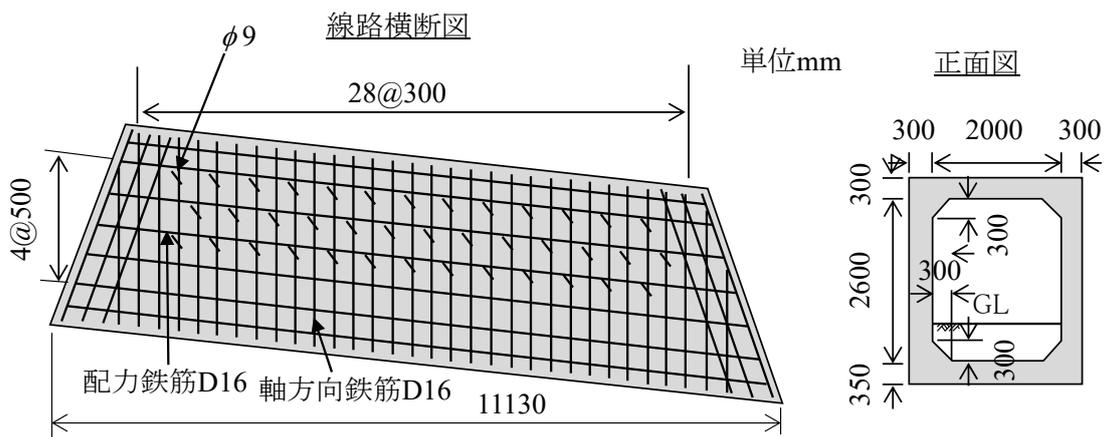


図 2.2.3 高架橋 D の側壁内空面の配筋図

2.3 ひび割れ形態の実態調査

2.3.1 調査方法

目視および打音を基本に、ひび割れ、はく離、はく落を抽出した。はく離は、打音により、浮きと判定された箇所とし、はく落は、かぶりコンクリートが完全に剥がれ落ち、鉄筋が露出している箇所とした。また、かぶりを電磁誘導法により計測した。

図 2.3.1 に、高架橋 A の高欄を例として、かぶりの算出方法を示す。併せて、2.4.2(1)で示すはく落幅の算出方法も示す。高欄では、変状が生じていた最外縁の鉄筋(鉛直方向の鉄筋)について、高さ方向に 3 測線でかぶりを計測した。これら 3 測線で計測したかぶり(図 2.3.1 中の実線)を用いて、2 次補間によって 100mm ピッチで計測箇所以外のかぶり(図 2.3.1 中の点線)を算出した。また、図 2.3.2 には、高架橋 B の柱を例として、かぶりの算出方法を示す。併せて、2.4.2(1)で示すはく落幅の算出方法も示す。柱では、2 測線でかぶりを計測して、100mm ピッチで計測箇所以外のかぶりを算出した。これら 100mm ピッチ毎に得たかぶりの箇所で、ひび割れ、はく離、はく落が発生しているか、または健全であるかを判定して、100mm ピッチ毎のかぶりと変状を調査した。

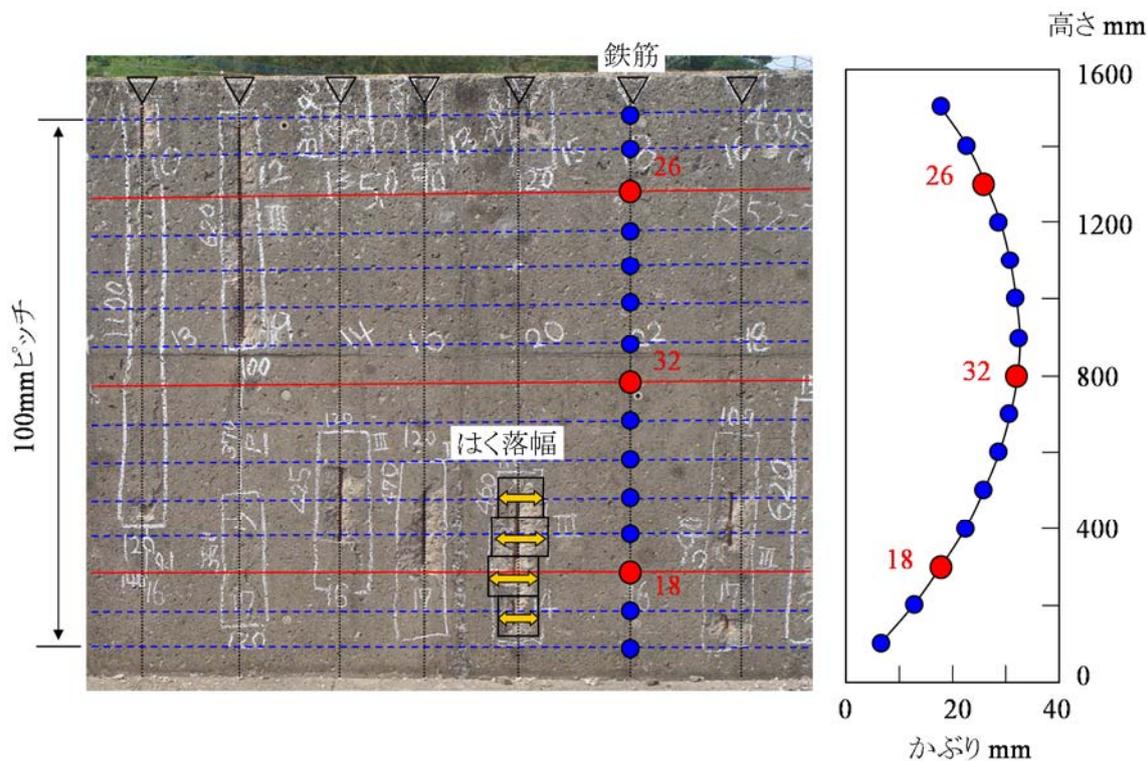


図 2.3.1 鉛直方向の鉄筋のかぶりとはく落幅の算出

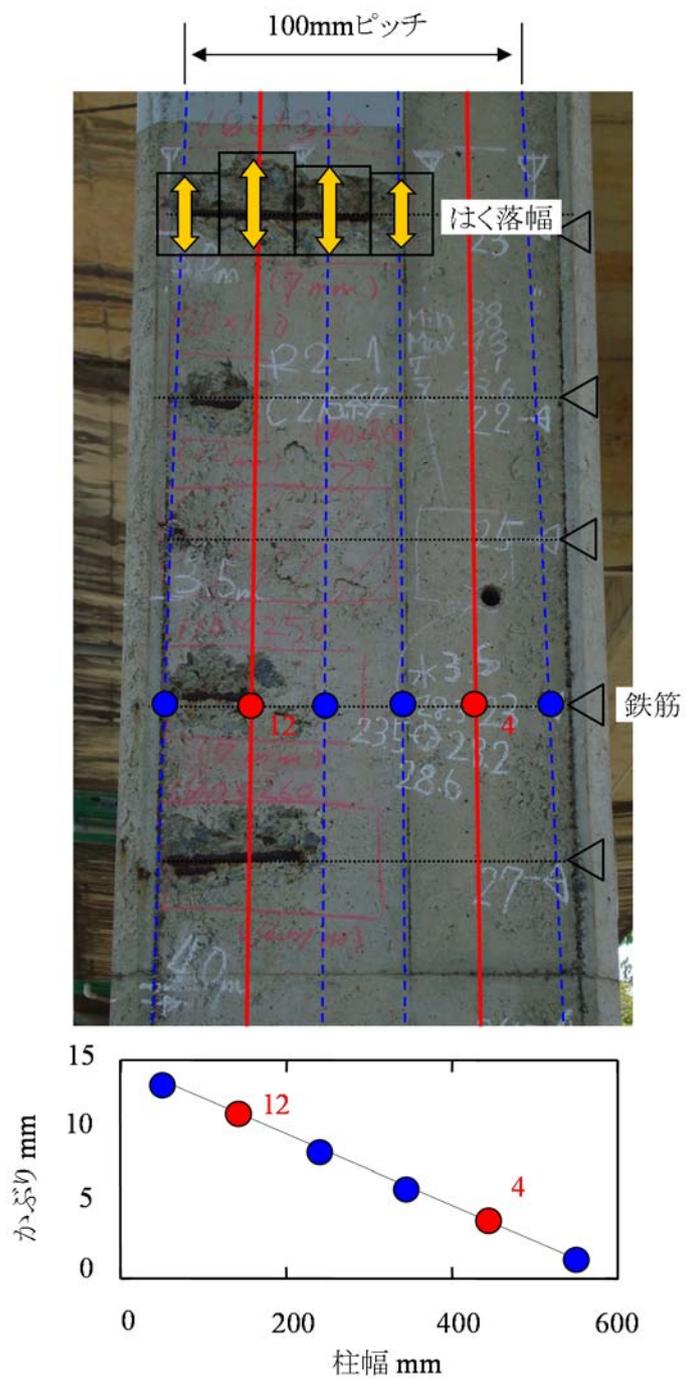


図 2.3.2 帯鉄筋のかぶりとはく落幅の算出

2.3.2 ひび割れとはく落の状況

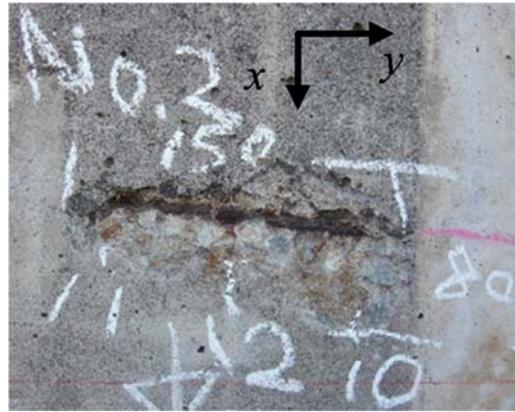
写真 2.3.1 に高架橋 A の高欄上部のはく落状況を、写真 2.3.2 に高欄下部のはく落状況を示す。また、写真 2.3.3 に、かぶりと変状状況を示す。目視および打音により、高欄上部および高欄下部に、はく離やはく落が多数観察された。これは、コンクリート打設時における鉄筋の据え付けや型枠の管理不足等によるかぶり不足が原因であると考えられる。写真 2.3.3 に示すように、かぶりが小さい箇所で、はく落が生じており、かぶりが大きい箇所では、ひび割れが生じていた。ひび割れやはく離、はく落は、全て最外縁に配置される鉛直方向鉄筋に沿って生じていた。写真 2.3.4 に、高架橋 B のはく落状況を示す。帯鉄筋の直上ではく落が生じている。高欄のように、はく落箇所端部から連続したひび割れはなかった。写真 2.3.5 に、高架橋 C のはく落状況を示す。No.1～No.3, No.5 は、水平方向鉄筋, No.4 は鉛直方向鉄筋上のはく落である。はく落形状は、全てコーン状のはく落であった。No.1 および No.2 では、はく落箇所端部から連続して鉄筋に沿ったひび割れが発生していた。



写真 2.3.1 高欄上部のはく落状況(高架橋 A)



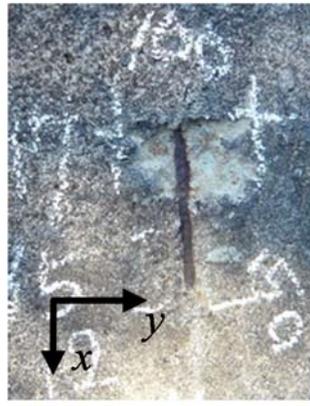
(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3



(d) No.4



(e) No.5

写真 2.3.5 高欄のはく落状況(高架橋 C)

2.3.3 かぶりと変状発生率の関係

図 2.3.3 に、変状箇所数が多い順に、高架橋 A の 6 つの高欄 RA4, RA5, RA8, RA13, RB2, RB3 の変状発生率を示した。なお、 c/ϕ を 0.5 毎に 1 区間とし、1 区間において変状の発生率を 100%として表示した。また、図 2.3.4 に、全高欄の変状箇所を集計し、度数分布、変状発生率を示す。図 2.3.3 から、全ての高欄で、かぶりが小さいほどはく離、はく落の発生する確率が高い。全高欄の変状箇所を集計した図 2.3.4 から、同じ傾向が見られた。

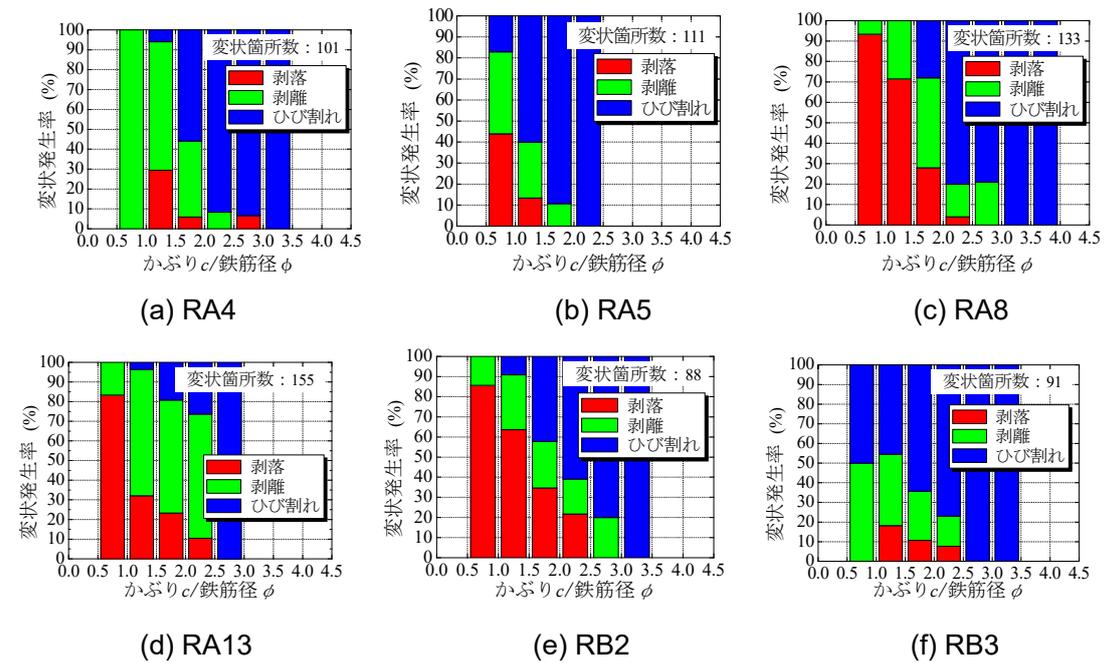


図 2.3.3 変状発生率(高架橋 A)

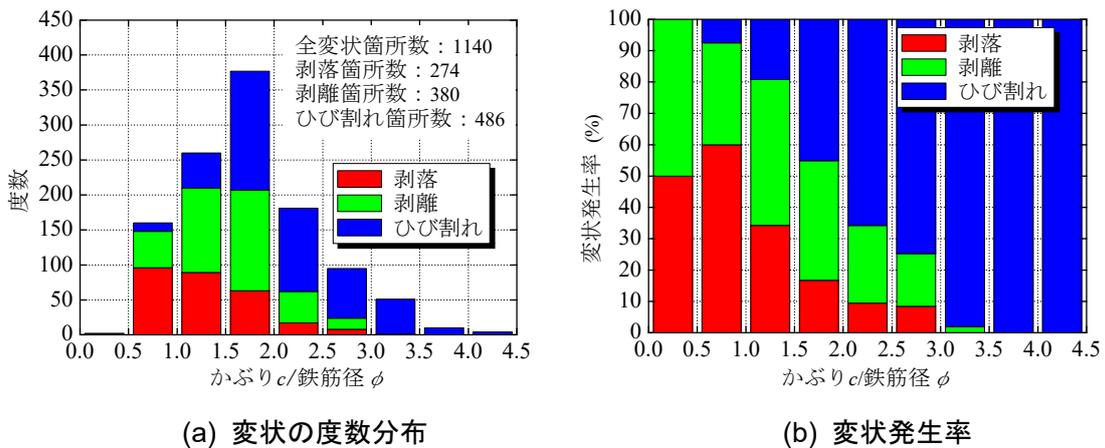


図 2.3.4 変状の度数分布と変状発生率(高架橋 A)

2.3.4 ひび割れ形態の閾値

図 2.3.5 に示すように、堤、松島^{19),20),23)}は、鉄筋に沿ったひび割れ(以降、鉄筋軸ひび割れ)と鉄筋から斜め方向へひび割れが進展してはく離するひび割れ(以降、はく離ひび割れ)の発生関係を薄肉円筒モデル¹⁹⁾や応力集中問題²³⁾として弾性論から導いている。その結果、かぶり c と鉄筋径 ϕ で表される $(2c+\phi)/\phi > 3.0$ の場合 ($c/\phi > 1.0$) には鉄筋軸ひび割れ、3.0 以下の場合 ($c/\phi < 1.0$) には鉄筋軸ひび割れが生じる前にはく離ひび割れが発生するとしている。実態調査においても、コンクリート片がはく落している箇所が $c/\phi < 1.0$ となっていることが確認されている⁶⁾。

本調査では、図 2.3.4 から、高架橋 A では、 $c/\phi < 3.0$ ($\phi=10\text{mm}$, $c=30\text{mm}$) ではく落が生じていた。既往の調査⁶⁾と比べて c/ϕ が大きな箇所でもはく落が生じていた。高架橋 B では、後に示す図 2.4.5 から、高架橋 A よりも小さく既往の調査⁶⁾と比較的近い $c/\phi < 1.5$ ($\phi=13\text{mm}$, $c=19.5\text{mm}$) ではく落が生じていた。高架橋 D では、かぶりコンクリートのはく落により、鉄筋露出はしていないが、打音で浮きを確認された。そこで、写真 2.3.6 に示す箇所ではく落をはずり出し、ひび割れ状況を確認した。写真 2.3.7 に、はずり出し後の状況と鉄筋腐食度を示す。鉄筋腐食度は、鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) コンクリート構造物⁵⁶⁾に従って評価した。写真 2.3.8, 写真 2.3.9 に、 c/ϕ とひび割れ状況を示す。 $c/\phi=2.6$ ($\phi=16\text{mm}$, $c=41.6\text{mm}$) で一部鉄筋軸ひび割れが観察できるが、その他最外縁の鉛直方向鉄筋の背面に配置される水平方向鉄筋において $c/\phi=3.0$ ($\phi=16\text{mm}$, $c=48\text{mm}$) でもはく離ひび割れが生じていた。高架橋 A や D は高架橋 B と比べて塩分の含有量が多く、高架橋 D はさらに高架橋 B と比べて経年も進んでいるため、鉄筋腐食が進行し、より c/ϕ が大きな箇所ではく離、はく落が発生したと考えられる。これを踏まえると、調査時点においては、既往の研究^{6),19),20),23)}による $c/\phi < 1.0$ と比べて大きな $c/\phi < 3.0$ の場合に、はく離、はく落の発生率が大きくなる傾向であったが、今後さらに腐食が進行すればより c/ϕ が大きな箇所ではく離、はく落が発生する可能性が考えられる。

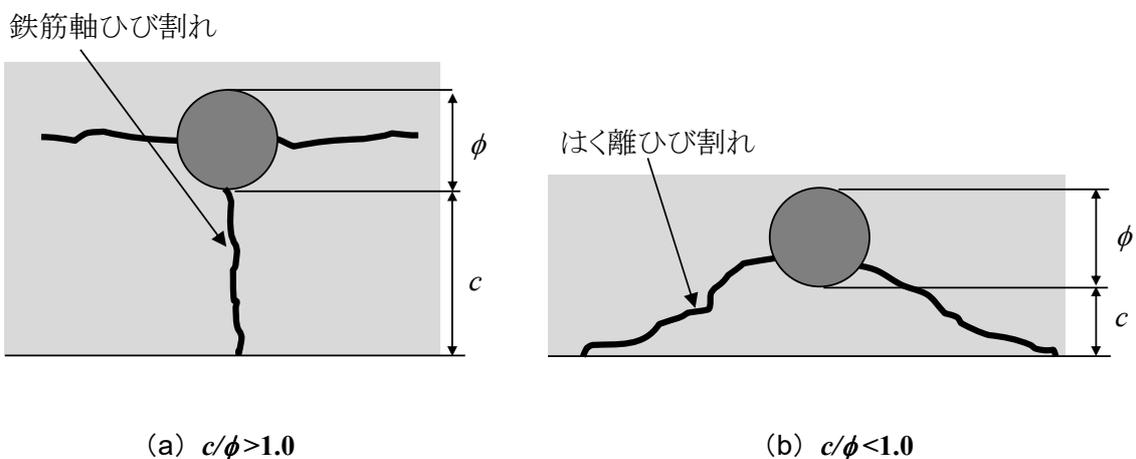


図 2.3.5 既往の研究によるひび割れ形態の模式図²³⁾

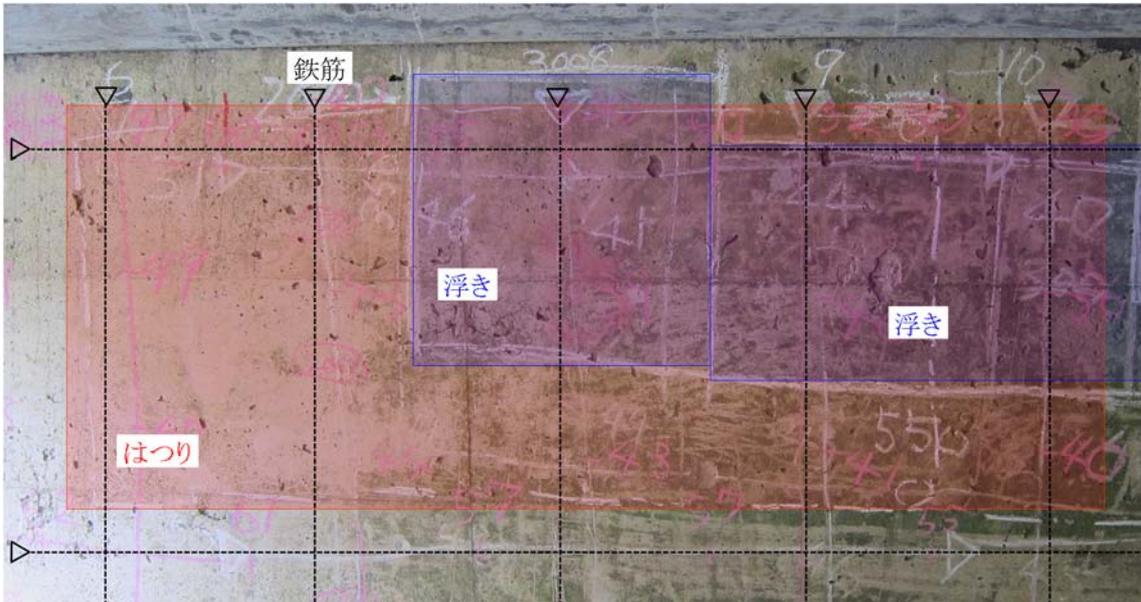


写真 2.3.6 鉄筋はつり出し箇所と浮き箇所(高架橋 D)

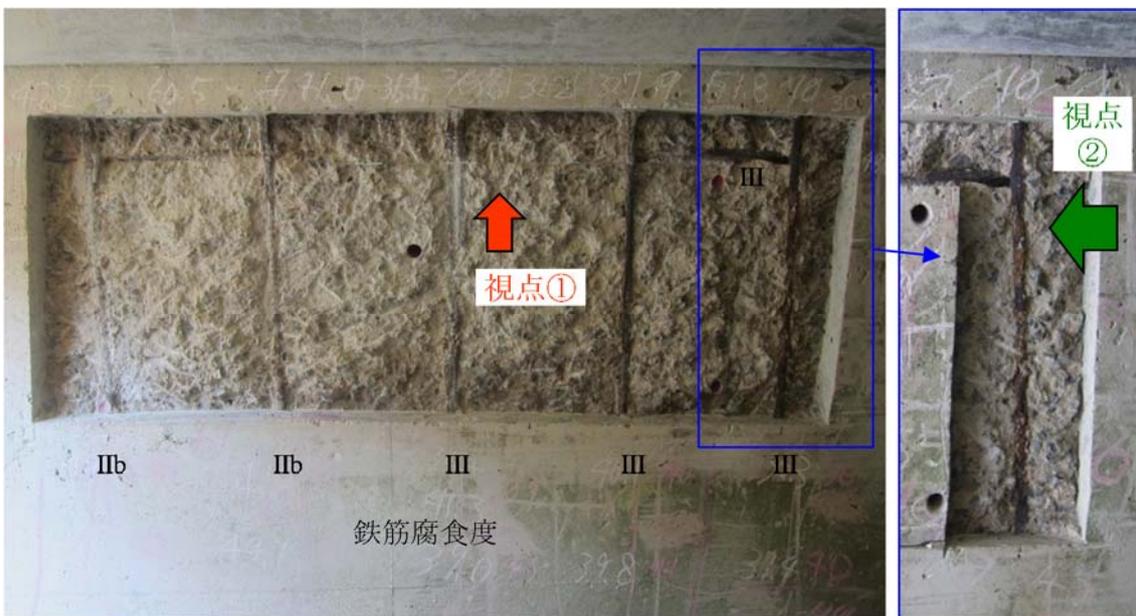


写真 2.3.7 はつり出し後の状況と鉄筋腐食度



写真 2.3.8 c/ϕ とひび割れ状況(視点①)

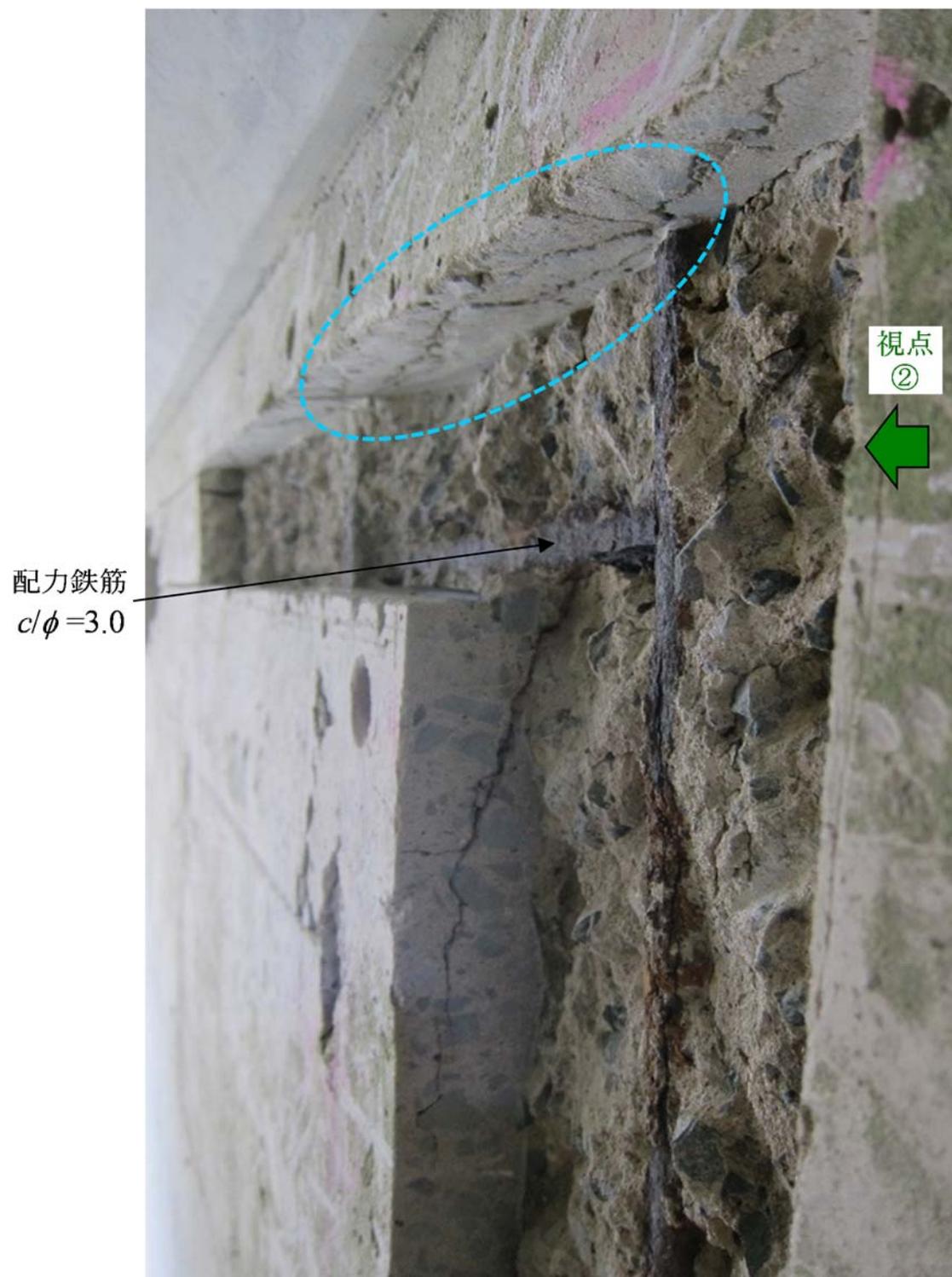


写真 2.3.9 c/ϕ とひび割れ状況(視点②)

2.4 はく落形状の実態調査

2.4.1 はく落形状計測装置の開発

写真 2.4.1 に、はく落形状計測装置を示す。計測システムには、レーザー変位センサから得られたデータをリアルタイムでモニタリング可能なシステムを用いた。レーザー変位センサは、二次元高精度レーザー変位センサである。図 2.4.1 に、レーザー変位センサの概要を示す。高さ方向(z 方向)に 200mm を基準とし、 $\pm 48\text{mm}$ の範囲で計測可能である。また、計測幅(x 方向)は、高さ位置に依存して、51mm \sim 73mm であり、0.1mm 毎に z 値を計測する。計測精度は、 z 方向に $2\mu\text{m}$ 、 x 方向に $20\mu\text{m}$ である。このレーザー変位センサは、鉄筋直角方向断面を瞬時に二次元スキャン可能であり、スキャン結果はリアルタイムでモニターに写される。このモニター画像により妥当性を確認しながら、計測結果を PC に取り込むこととなる。図 2.4.2 に示す取り付け治具を 10mm 程度の間隔で移動させながら、前述のスキャンを連続して実施し、対象とするはく落の三次元形状を得ることができる。取り付け治具の移動は、手動となるが、剛性の基準ガイドをはく落面の近傍に設置しておくことにより、スキャン断面の基準点を確保して連続データを得ることができる。



写真 2.4.1 はく落形状計測装置

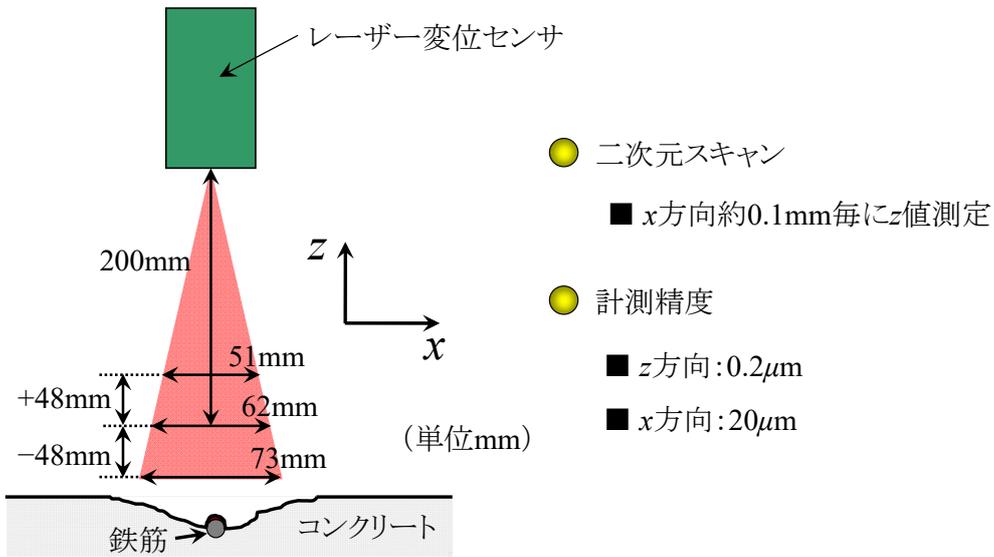


図 2.4.1 レーザー変位センサの概要

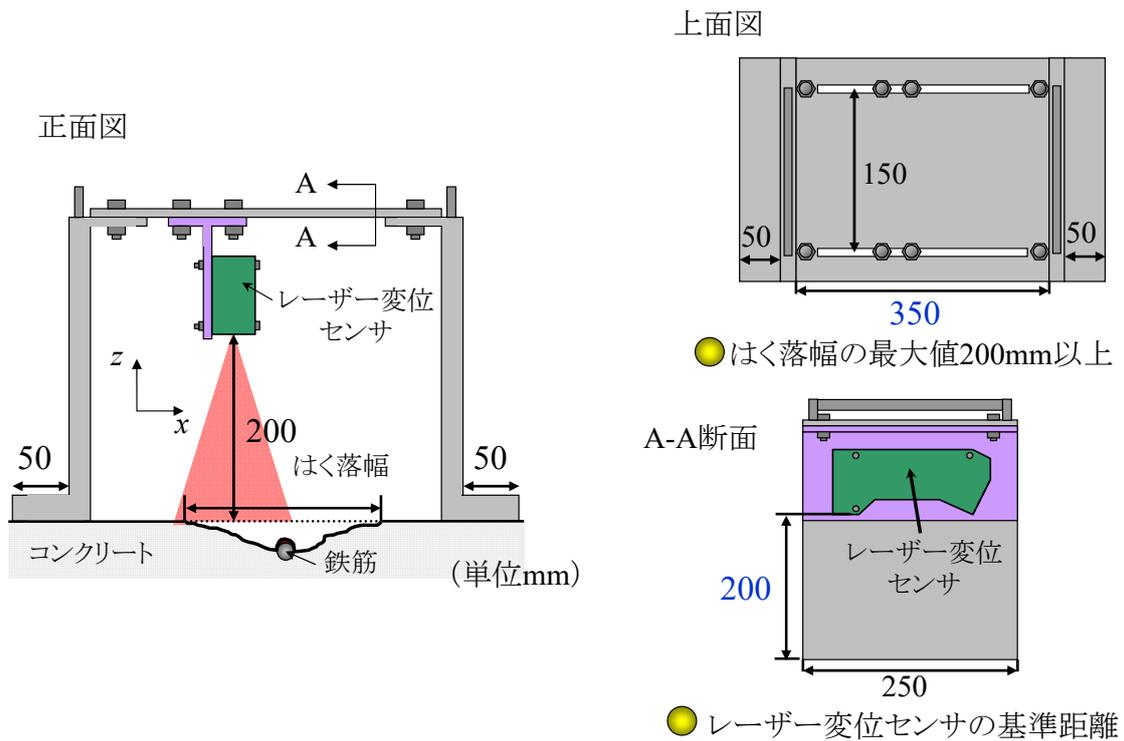


図 2.4.2 レーザー変位センサの取り付け治具

2.4.2 調査方法

(1) 目視によるはく落幅の計測

図 2.3.1, 図 2.3.2 に示すように, 100mm ピッチではく落幅を計測した. はく落幅は 100mm ピッチ内のはく落幅の最大値と最小値を計測し, それらの平均の値と定義した. かぶりも同じく 2.3.1 に示すように 100mm ピッチで算出して, 100mm ピッチ毎にかぶりとはく落幅の関係を調査した.

(2) はく落形状計測装置を用いたはく落形状の計測

はく落形状計測装置を用いたはく落形状の計測は, 写真 2.3.5 に示す No.1~No.5 の計 5 箇所を対象として行った. また, 比較のため, 図 2.4.3 に示す方法で, 目視によりはく落形状を計測した. 目視による方法では, かぶり, はく落幅, 露出した鉄筋の幅, はく落の鉄筋軸方向の幅を計測した. かぶりは, ノギスを用いて, 露出した鉄筋からコンクリート表面までの距離を計測した. なお, 露出した鉄筋の軸方向に 3 点計測した. なお, はく落幅は, 露出した鉄筋位置での最大はく落幅と最小はく落幅を計測し, その平均とした. はく落の鉄筋軸方向の幅は, はく落領域での最大の幅とした.

図 2.4.4 に, はく落形状計測装置を用いたはく落形状の計測概念図を示す. No.1 および No.2 では, レーザー変位センサから照射されるレーザーの中心が露出した鉄筋の中心となるように, 図 2.4.4(a)に示すはく落幅の方向(x 方向)に一定としてはく落形状を計測した. また, No.3~No.5 では, はく落幅がスキャン可能幅を上回ったため, 図 2.4.4(b)に示すように, 露出した鉄筋を中心にレーザー中心を計測線 A と B に分別して, はく落形状を計測し, 基準ガイドを介して合成した. なお, 鉄筋軸方向の計測ピッチは 10mm とした.

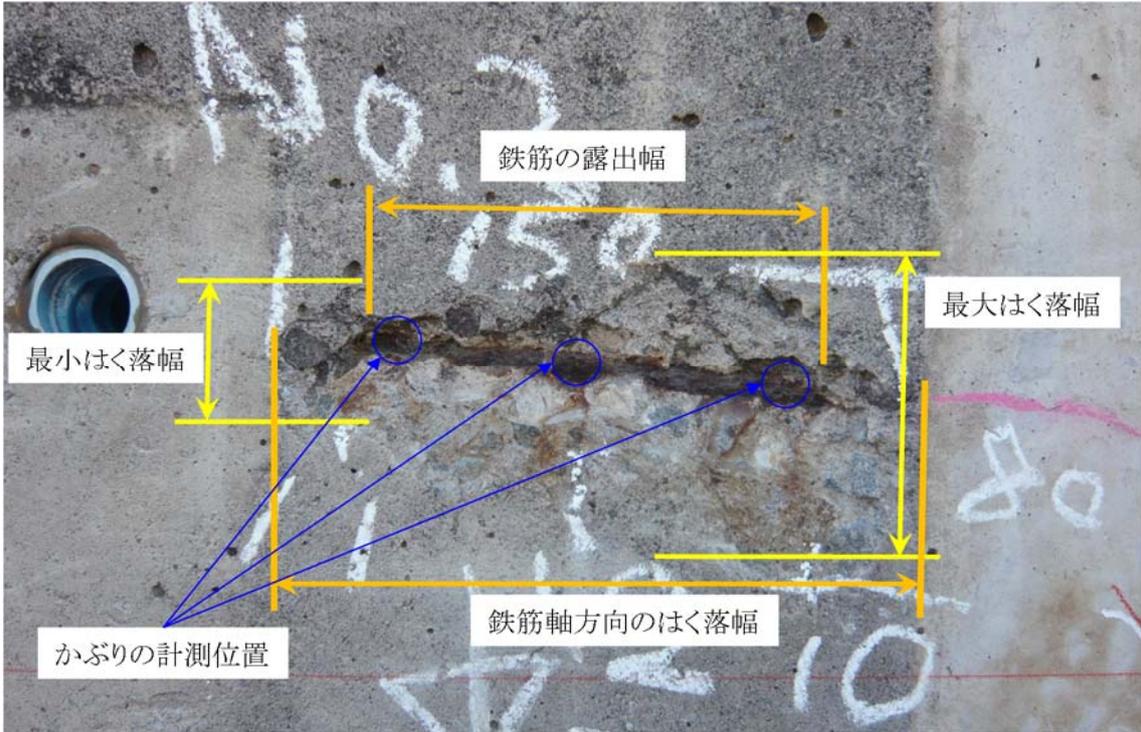
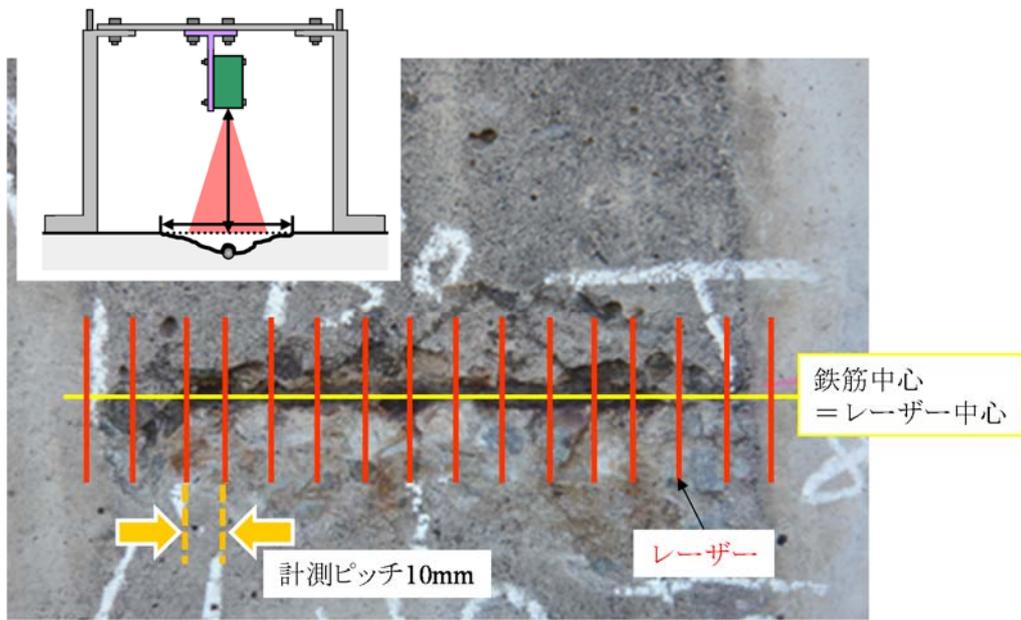
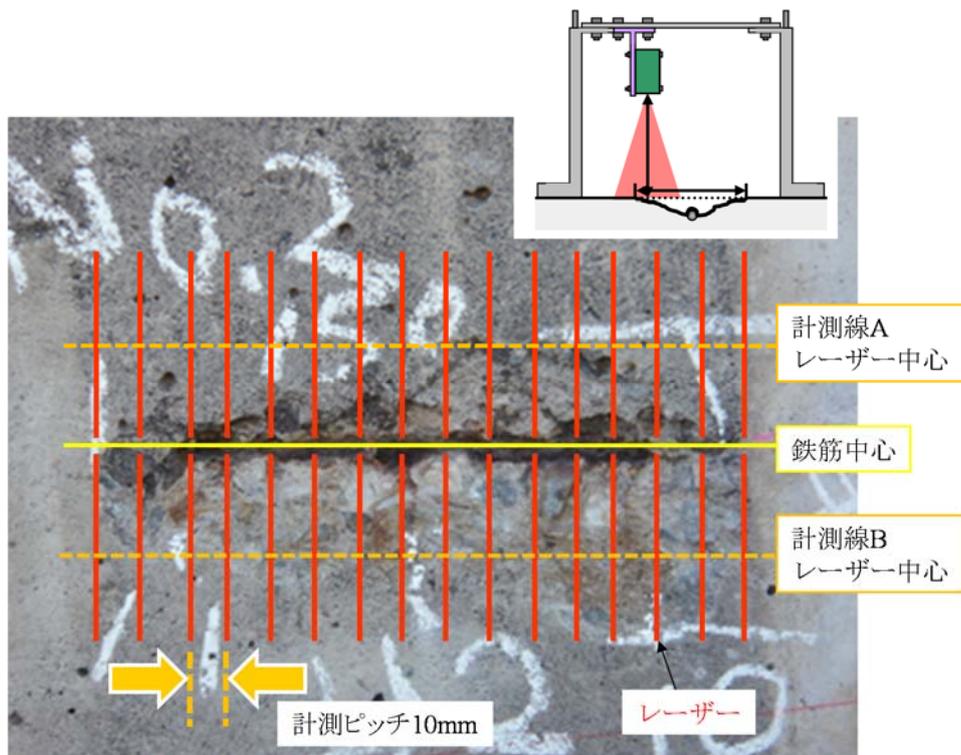


図 2.4.3 目視による計測



(a) No.1, No.2



(b) No.3~No.5

図 2.4.4 計測概念図

2.4.3 かぶりとはく落幅の関係

図 2.4.5 に、高欄 A のかぶりとはく落幅の関係を示す。かぶり c を鉄筋径 ϕ で無次元化した c / ϕ を横軸とした。かぶりが大きいとはく落幅が大きくなる傾向に見えるが明確ではない。高欄毎のかぶりとはく落幅の関係を見るために、例として、高欄 RB6(高架橋 A の起点方から 6 枚目)を図中に示したが、同一高欄においても、かぶりとはく落の関係は明確ではない。高架橋 B や C の場合、高架橋 A の場合と比べると、かぶりが大きいほどはく落幅が大きい傾向にある。はく落幅は、概ね 180mm 以下であった。

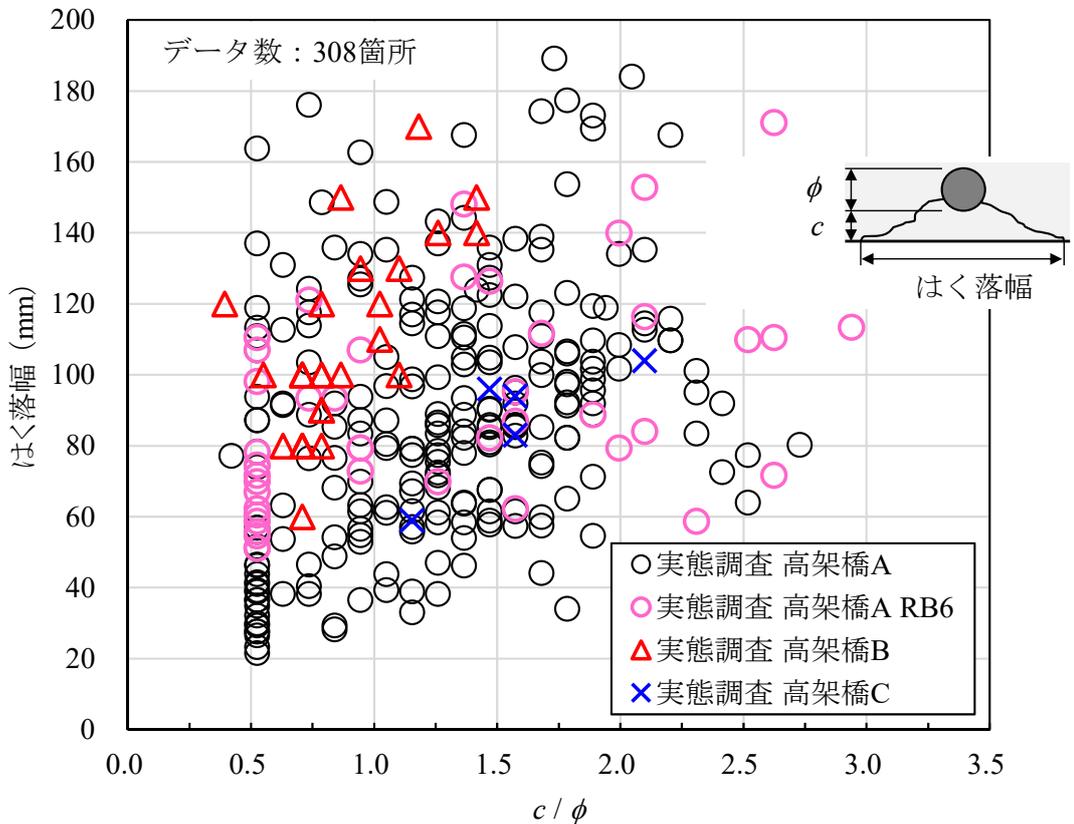


図 2.4.5 かぶりとはく落幅の関係

2.4.4 かぶりとはく落角度の関係

図 2.4.6 に、かぶりとはく落角度の関係を示した。横軸は、 c/ϕ とした。縦軸のはく落角度 θ は、図中の位置とし、 c とはく落幅 B から以下の式(2.4.1)のように定義した。 c/ϕ が大きいほど、はく落角度が小さい。はく落角度は、概ね 55～85 度であった。

$$\tan \theta = \frac{B - \phi}{2 \cdot c} \dots\dots\dots \text{式 (2.4.1)}$$

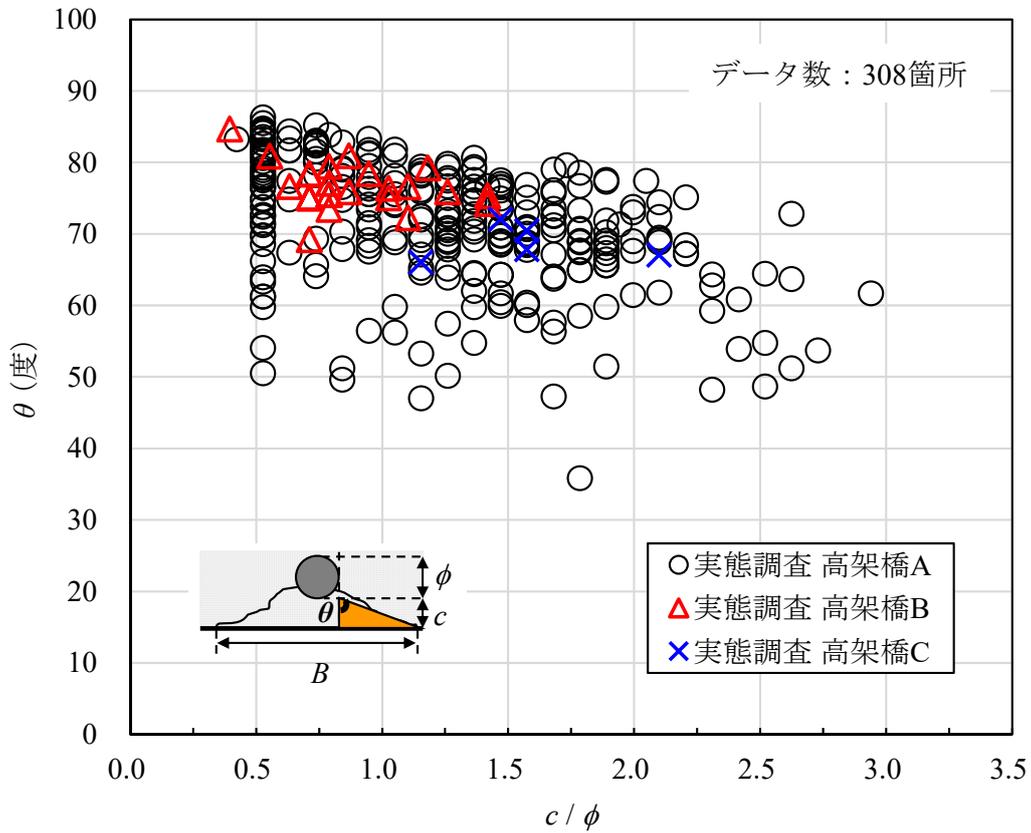


図 2.4.6 かぶりとはく落角度の関係

2.4.5 計測装置により得られたはく落形状

(1) 目視により得られたはく落形状

表 2.4.1 に、目視により得られたはく落形状の概要を示す。左、中、右 3 点で計測したかぶりは、鉄筋の露出幅が No.2, No.4, No.5 と比べて小さい No.1, No.3 では、ほぼ同一な値であった。鉄筋の露出幅が大きい No.4, No.5 では、左中右 3 点で計測したかぶり値の最小値と最大値の差がそれぞれ 5mm, 3mm であり、左から右になるに従い、計測値が小さくなることから、鉄筋が傾いて配筋されていることがわかる。No.2 では、鉄筋の露出幅が比較的大きいものの、かぶりは中央部で計測したものが最大であり、湾曲していると考えられる。

表 2.4.1 目視によるはく落形状の概要(高架橋 C)

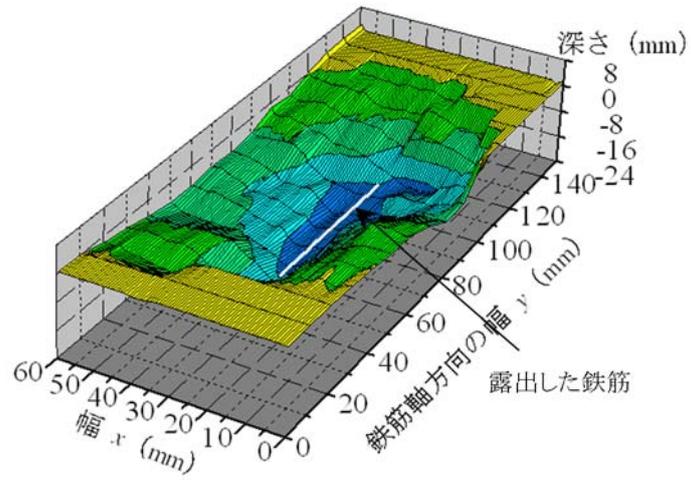
No	かぶり(mm)				かぶりの平 均値/鉄筋径	はく落 幅 (mm)	鉄筋の 露出幅 (mm)	はく落の 鉄筋軸方向幅 (mm)	はく落 角度 (°)
	左※	中	右※	平均値					
1	13	14	14	14	1.4	96	52	125	72
2	11	12	10	11	1.1	59	115	150	66
3	15	16	15	15	1.5	94	62	120	70
4	17	15	12	15	1.5	83	128	150	68
5	22	20	19	20	2.0	104	106	200	67

※No.4 は左⇒上, 右⇒下

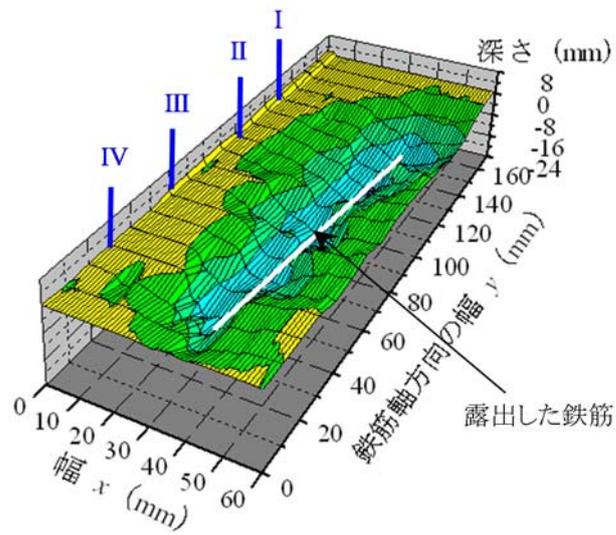
(2) 計測装置により得られたはく落形状の概要

図 2.4.7 に、はく落形状計測装置を用いたはく落形状を示す。なお、写真 2.4.1 に示す計測幅方向(x 方向)、鉄筋軸方向の計測幅方向(y 方向)に従って計測した。また、No.1 および No.2 は鉄筋を中心に幅方向に一定に計測し、No.3~No.5 は鉄筋を中心に A, B の計測ラインで計測した。鉄筋軸方向(y 方向)には 10mm ピッチで計測し、計測間は線形補間した。

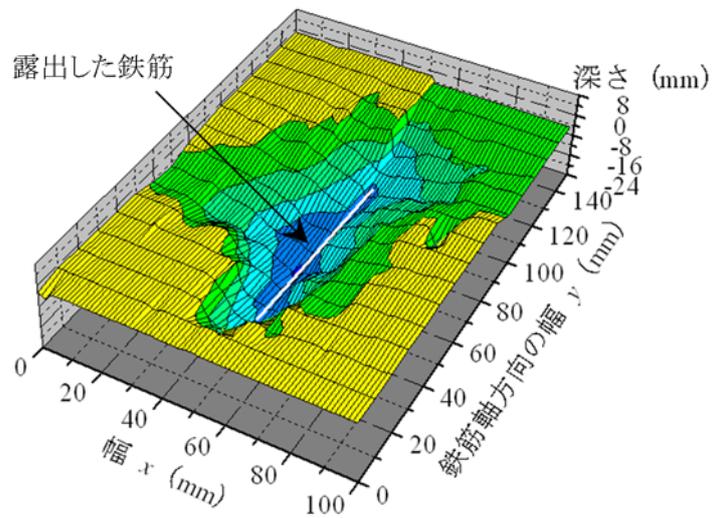
No.1 では、幅 $x = 0 \sim 20\text{mm}$ 、鉄筋軸方向の幅 $y = 20\text{mm} \sim 60\text{mm}$ 位置で急なはく落面が観察される。一方で、幅 $x = 40\text{mm} \sim 60\text{mm}$ 、鉄筋軸方向の幅 $y = 40\text{mm} \sim 120\text{mm}$ 位置にコンクリート表面の薄いはく落層が観察され、はく落面は緩やかな勾配となっている。露出した鉄筋端部から鉄筋軸方向に緩やかにはく落面が形成され、露出した鉄筋を中心にコーン状にかぶりコンクリートがはく落していた。No.2 では、露出した鉄筋を中心に幅 x 方向に対称なはく落面が形成されていることがわかる。幅 $x = 10 \sim 30\text{mm}$ 、鉄筋軸方向の幅 $y = 100\text{mm} \sim 140\text{mm}$ 位置付近で、コンクリート表面に薄いはく落層が観察できる。No.3 では、鉄筋軸方向の幅 $y = 20\text{mm} \sim 40\text{mm}$ 近傍の露出した鉄筋の端部では急勾配なはく落面となっている。一方、鉄筋軸方向の幅 $y = 100\text{mm} \sim 140\text{mm}$ 近傍の露出した鉄筋の端部では、幅 $x = 60 \sim 100\text{mm}$ 位置で、広範囲にコンクリート表層のはく落面が形成され、露出した鉄筋を中心に非対称なはく落面となっている。全体的に露出した鉄筋を中心として非対称なはく落面となっている。No.4 では、露出した鉄筋を中心として幅 x 方向に対称なはく落面が形成されている。鉄筋軸方向の幅 $y = 40\text{mm} \sim 100\text{mm}$ 位置の鉄筋のかぶりと比べ、鉄筋軸方向の幅 $y = 100\text{mm} \sim 160\text{mm}$ ではかぶりが小さい、それに伴いはく落幅が小さくなっていることがわかる。No.5 では、鉄筋軸方向の幅 $y = 40\text{mm} \sim 100\text{mm}$ 位置では露出した鉄筋を中心に幅 x 方向に対称なはく落面を形成しているが、鉄筋軸方向の幅 $y = 100\text{mm} \sim 160\text{mm}$ 位置では、幅 $x = 60 \sim 100\text{mm}$ でコンクリート表面のはく落層を伴う勾配の緩いはく落面、幅 $x = 40 \sim 60\text{mm}$ で勾配の急なはく落面となり、非対称なはく落面を形成している。なお、表 2.4.1 に示す目視によって得られたかぶりと比べて、レーザー変位センサで計測したかぶりは最大でも 2mm 程度の誤差であった。No.4 のみ鉄筋を中心として対称となっているが、No.4 とそれ以外の鉄筋の違いは、No.4 が鉛直方向鉄筋であるのに対して、それ以外が水平方向の鉄筋であるということである。水平方向の鉄筋は、コンクリート打ち込み時に鉄筋下に沈下ひび割れが生じやすいことや鉄筋下のブリーディングによる品質低下や空隙等が生じやすいことにより、それらの影響を受けて鉄筋腐食の発生箇所が偏り、はく落面が鉄筋を中心として左右非対称な形状となると考えられる。



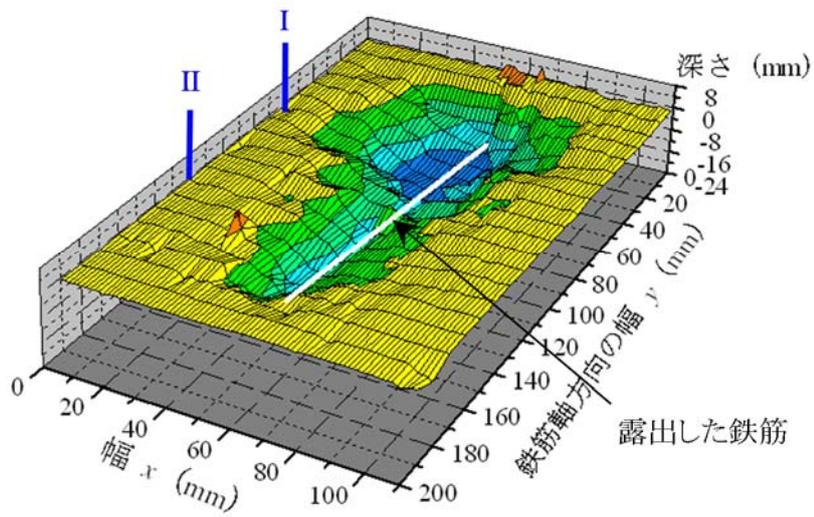
(a) No.1



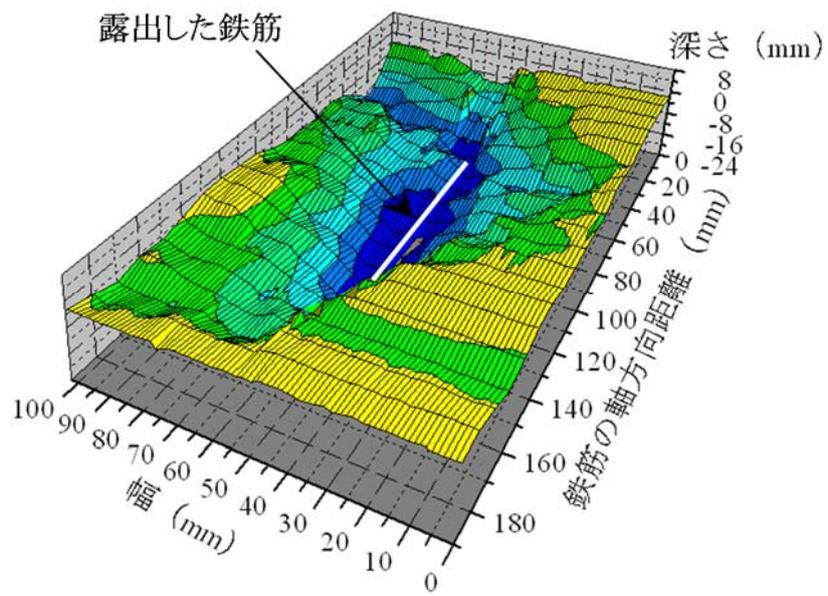
(b) No.2



(b) No.3



(d) No.4



(e) No.5

図 2.4.7 レーザー変位センサを用いたはく落形状

(3) 計測断面毎のはく落形状

目視により計測したはく落幅には、コンクリート表面の薄いモルタル層のはく落によるものが含まれていると考えられる。また、露出した鉄筋を中心に左右非対称なはく落面を形成する原因には、同様にコンクリート表面の薄いモルタル層のはく落が考えられる。そこで、計測したはく落形状からはく落角度を算出し、はく落形状に与えるコンクリート表面の薄いモルタル層の影響を検討した。図2.4.8に、はく落角度の算出方法を示す。はく落角度は、鉄筋位置から幅*x*方向に5mmピッチで求めた勾配から算出した。併せて、はく落形状について検討を実施した。はく落形状の議論には、図2.4.9にはく落面とはく落角度の関係を用いた。はく落形状が上に凸の場合、はく落角度も上に凸となり、はく落形状が下に凸の場合、はく落角度も下に凸となる。図2.4.10、図2.4.11に、例として、No.2, No.4のはく落面とはく落角度を示す。なお、検断面は、図2.4.7(b), (d)にローマ数字で示す断面とした。

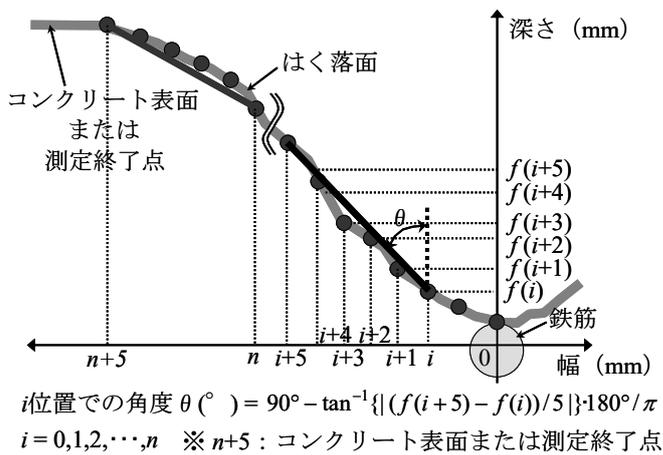


図2.4.8 はく落角度の算定方法

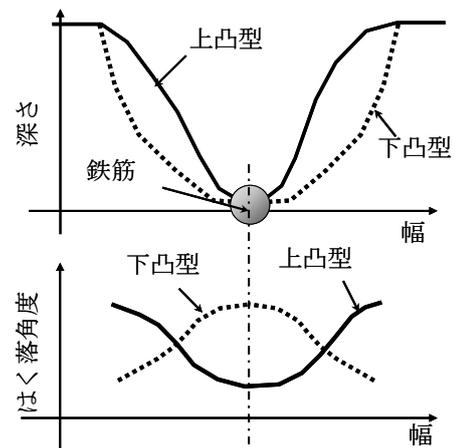


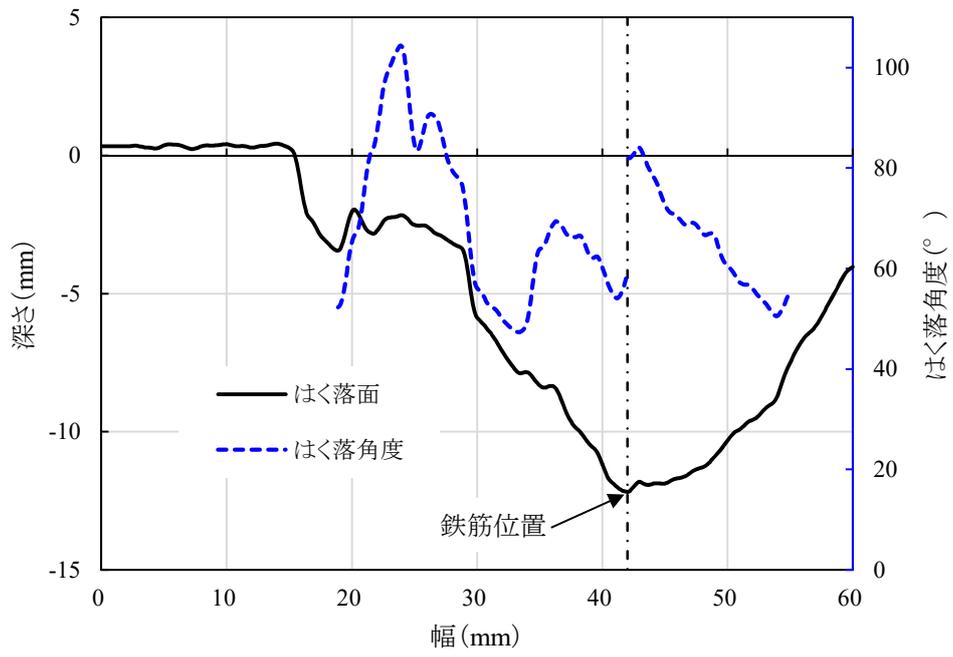
図2.4.9 はく落面とはく落角度の関係

図2.4.10(a)~(d)から、露出した鉄筋の端部にあたるⅠ断面では、幅20mm~30mmにコンクリート表面の薄いモルタル層によるはく落面があると考えられる。幅30mm~鉄筋位置まではく落角度の平均は概ね60度であった。鉄筋の右側では、コンクリート表面までのデータが採取されていないものの、はく落角度がコンクリート表面に近づくにつれ、急になることから、下に凸のはく落形状であると考えられる。はく落の勾配が一定に近づく幅50mm~60mmでは、はく落角度は60度程度であった。Ⅱ断面では、鉄筋を中心にほぼ左右対称なはく落面が形成されていた。鉄筋の左側では、はく落角度がコンクリート表面に近づくにつれ緩やかとなることから、上に凸の形状であった。鉄筋の右側では、はく落角度にばらつきがあるものの、ほぼ一定のはく落角度である。はく落角度は、左右共に70度程度であった。Ⅲ断面では、鉄筋の右側と比べ、左側が急なはく落面となっている。左側では、急な箇所25度程度である。右側では、上に凸の形状となり、鉄筋位置とコンクリ

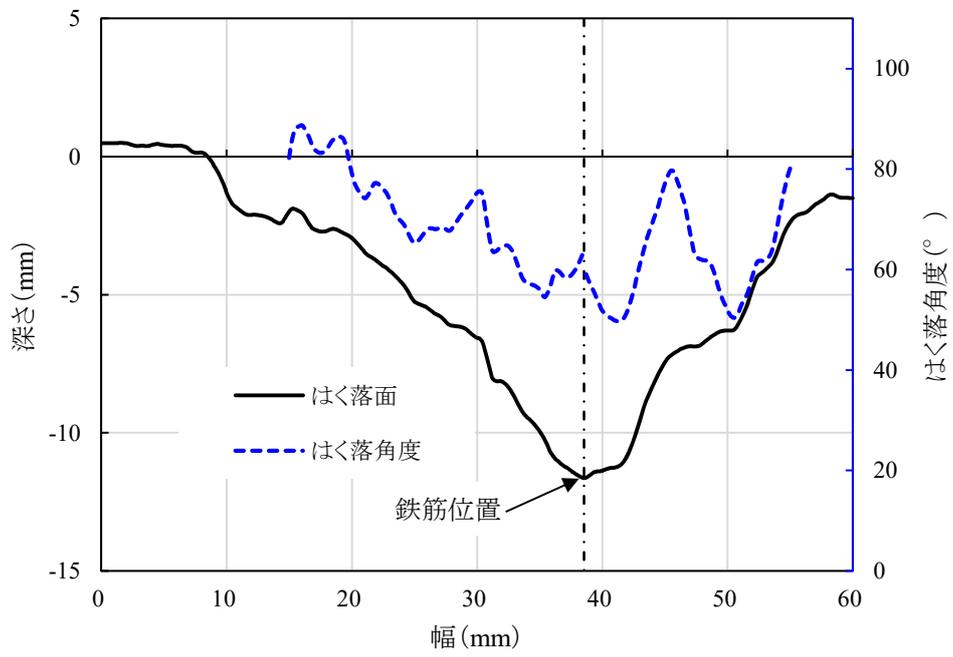
ート表面位置を結ぶ勾配は、概ね65度である。Ⅳ断面では、Ⅲ断面と同様に鉄筋の右側と比べ、左側が急なはく落面となっている。Ⅲ断面およびⅣ断面では、鉄筋の腐食が鉄筋右側(写真2.3.5(b)の下側)に偏って進行していると考えられる。鉄筋を中心としてほぼ左右対称であったⅠ断面およびⅡ断面では、はく落角度は、60～70度程度であった。目視によって得られたはく落角度は70度であることから、同様な値となった。

図2.4.11(a), (b)から、Ⅰ断面では、鉄筋中心としてほぼ左右対称のはく落面を形成している。鉄筋中心からコンクリート表面に近づくにつれ、左右共に下に凸の形状となり、勾配が徐々に急になり、最大勾配は、鉄筋の左側36度、鉄筋の右側33度である。その後、上に凸の形状となる。左右共に概ね70度のはく落角度となった。Ⅱ断面では、鉄筋の右側において、鉄筋位置近傍ではく落角度40度と急勾配であるが、はく落面は上に凸の形状であり、徐々に緩やかなはく落角度となった。一方、鉄筋の左側では、上に凸の形状であるが、ほぼ一定のはく落角度であった。はく落角度は、概ね67度であった。かぶりの違いによるはく落角度の違いはみられなかった。目視によって得られたはく落角度は70度であることから、同様な値となった。

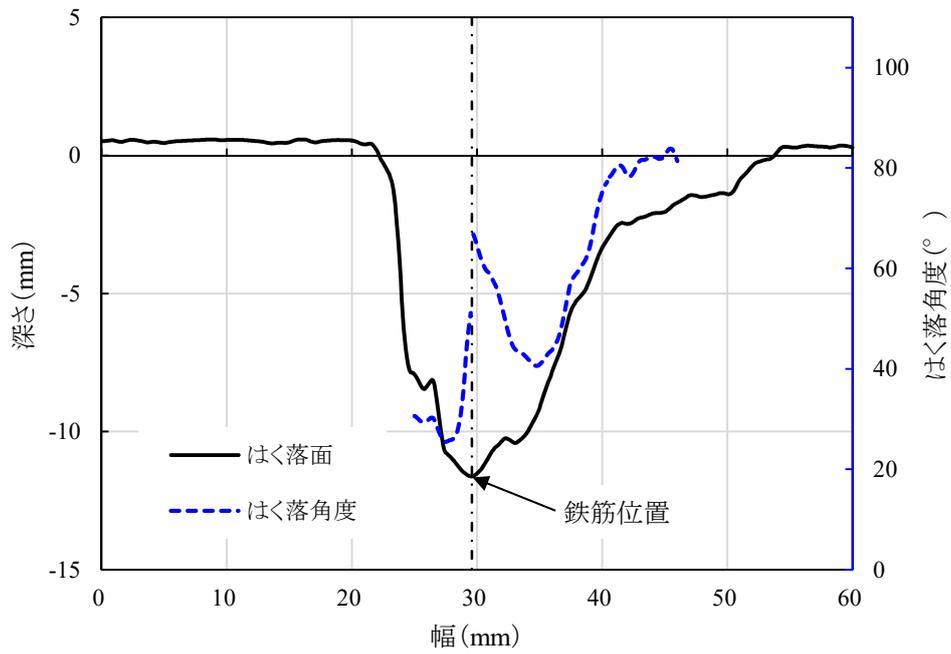
各はく落面は、いずれも概ね上に凸の形状であった。また、鉄筋を中心として左右対称のはく落面を形成している場合には、コンクリート表面の薄いモルタル層を除く領域ではく落角度は、70度程度であった。目視によって得られたはく落角度は概ね70度であり、同様な値となった。



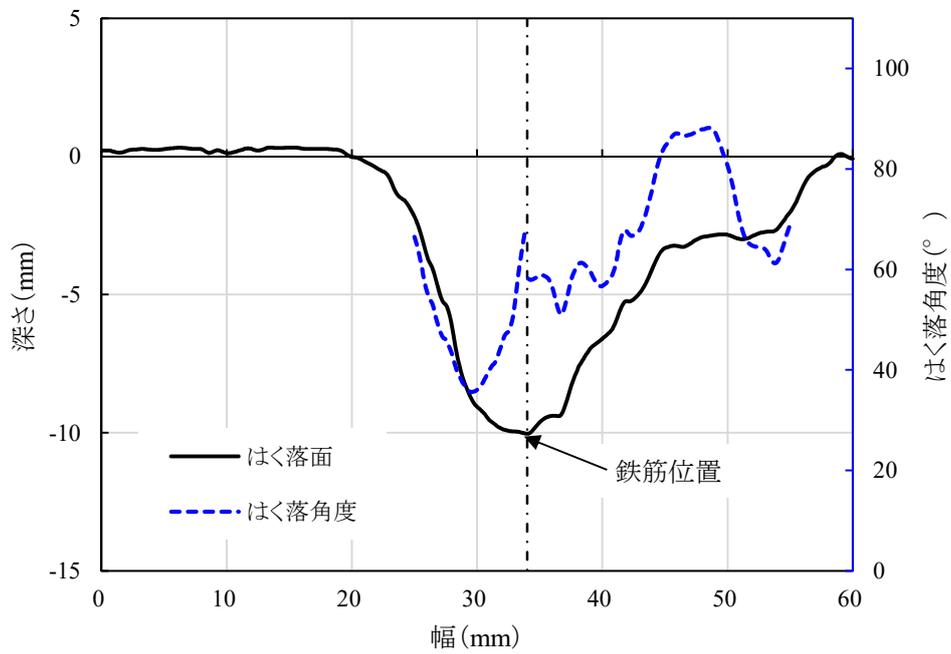
(a) I 断面



(b) II 断面

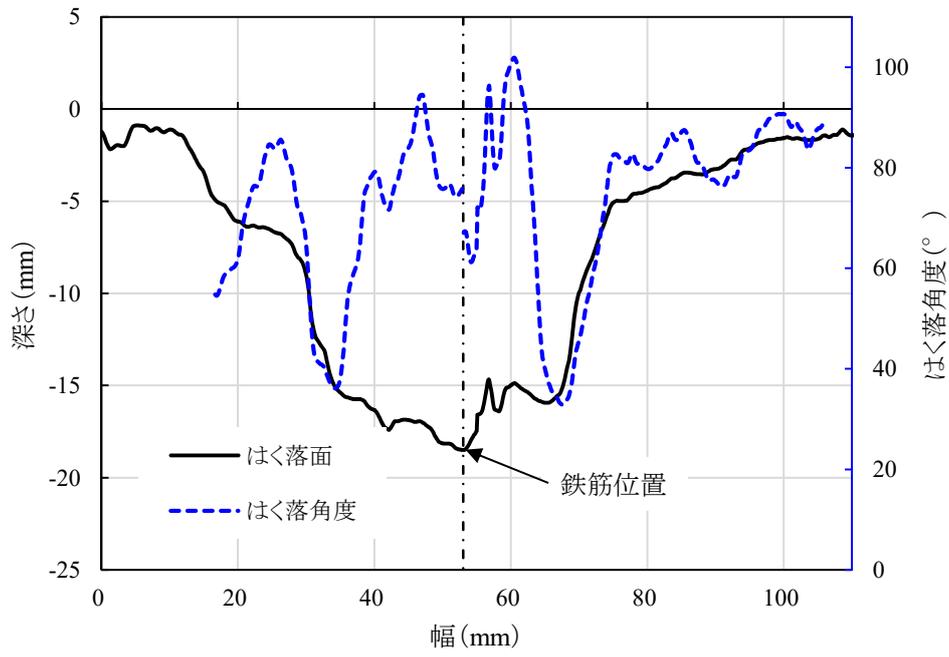


(c) III断面

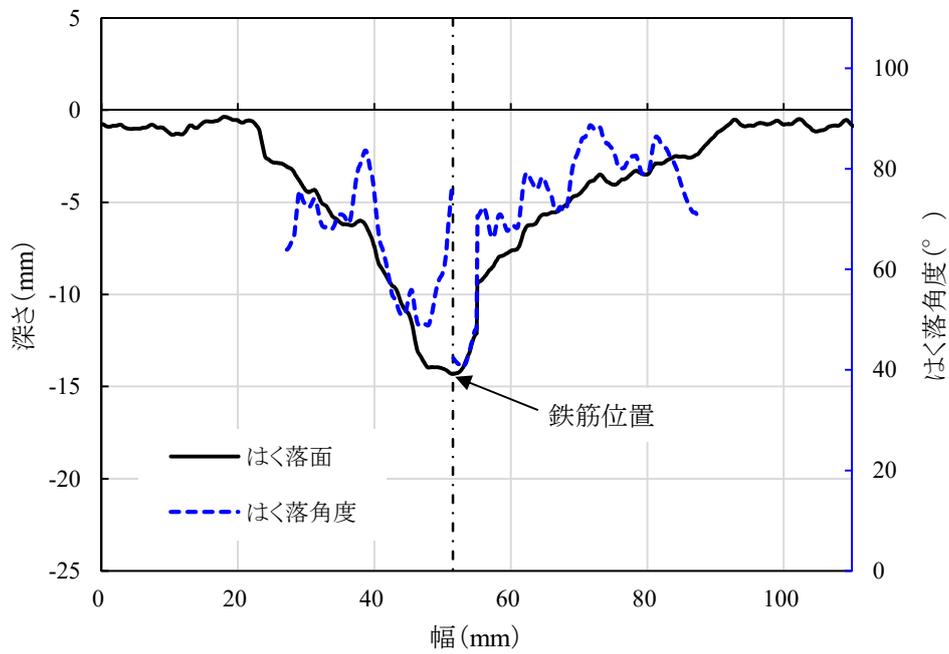


(d) IV断面

図 2.4.10 はく落面とはく落角度 (No.2)



(a) I断面



(b) II断面

図 2.4.11 はく落面とはく落角度 (No.4)

2.5 鉄筋の腐食状態の実態調査

2.5.1 鉄筋形状計測装置

(1) 装置の概要

写真 2.5.1 に鉄筋形状計測装置の概要を、写真 2.5.2 に現地での装置の設置状況を示す。鉄筋形状計測装置はセンサ部、反射鏡、および計測中に鉄筋を保持する鉄筋固定治具で構成され、パソコンでこれを操作する構成である。センサには、距離を直線状で計測可能なレーザー変位センサを使用した。計測する鉄筋の径に対して、照射範囲が異なる 2 種類のレーザー変位センサを用意した。図 2.5.1 に、それぞれの計測原理を示す。すなわち、 $\phi 10\sim 18\text{mm}$ を対象とした「細径用」(照射距離:152~248mm, 照射幅:最大 73mm)、および $10\sim 32\text{mm}$ を対象とした「太径用」(照射距離:57~103mm, 照射幅:最大 39mm)、である。いずれも反射鏡を使用することで、鉄筋の全周を一度に計測するものである。図 2.5.1(a)では、2 台のレーザー変位センサが鉄筋の断面の 1/4 ずつ計測でき、センサ部を盛り替えることでさらに残りの断面を計測する仕組みである。一方、図 2.5.1(b)では、表側は直接、裏側は反射鏡によりレーザーを照射することで、1 台のレーザー変位センサで、一度に鉄筋の断面全周を取得できるものである。

センサ部および反射鏡は、ガイドレールにより鉄筋軸方向に一体的に可動することで、任意の間隔での計測が可能である。なお、この可動長さは、供用中の RC 橋りょう構造物における鉄筋の間隔を考慮して約 200mm とした。

計測手順は、初めにコンクリートを除去し計測対象とする鉄筋を露出させる。除去する範囲は、鉄筋軸方向に約 220~420mm、直角方向に約 200mm(「細径用」)または 300mm 程度(「太径用」)、深さ方向に鉄筋位置から約 40mm である。鉄筋の表面の腐食生成物を除去した後、計測対象の鉄筋に取付け治具を固定し、センサ部および反射鏡をガイドレールに沿って移動させることで、必要とする位置で鉄筋の断面形状を計測する。なお、レーザーの受信精度を高めるために、外環境から遮光する。計測結果はレーザーが鉄筋に照射した箇所ごとに分割して得られるため、図 2.5.2(a),(b)に示すように x, y 方向に計測結果の位置を調整して合成することで、鉄筋の断面形状を表示するものである。なお、合成の際に、あらかじめ鉄筋ごとに直径を把握しておくことや、計測断面の任意の 2 点(直径)をノギスなどで計測しておくことで、より精度を高めることが可能となる。

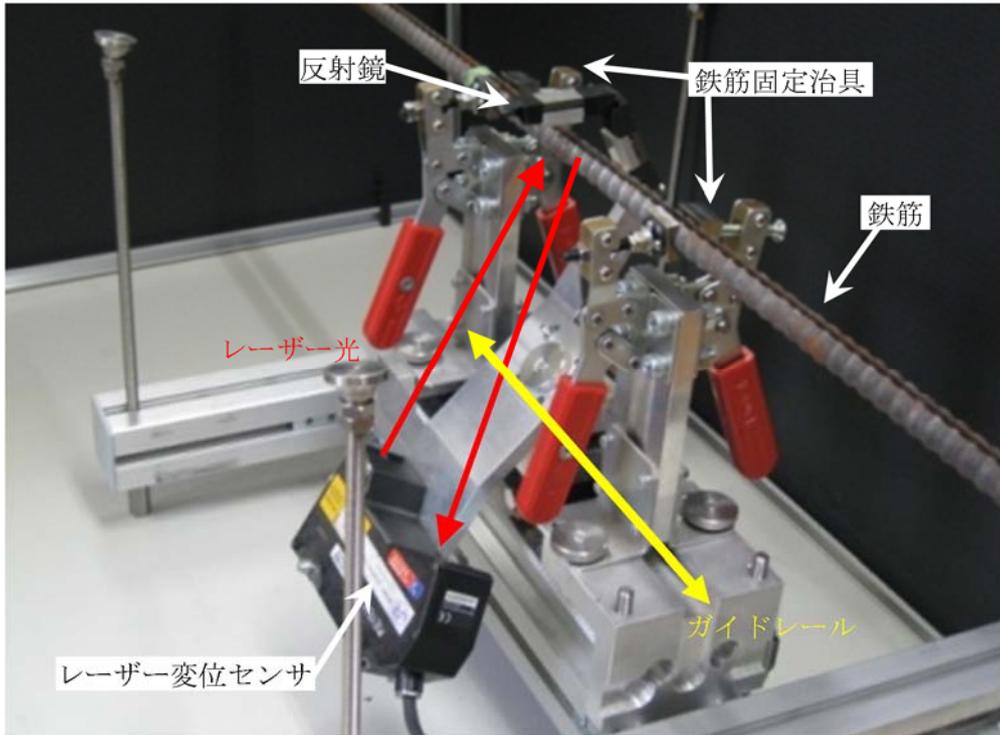


写真 2.5.1 鉄筋形状計測装置の概要



写真 2.5.2 鉄筋形状計測装置の概要

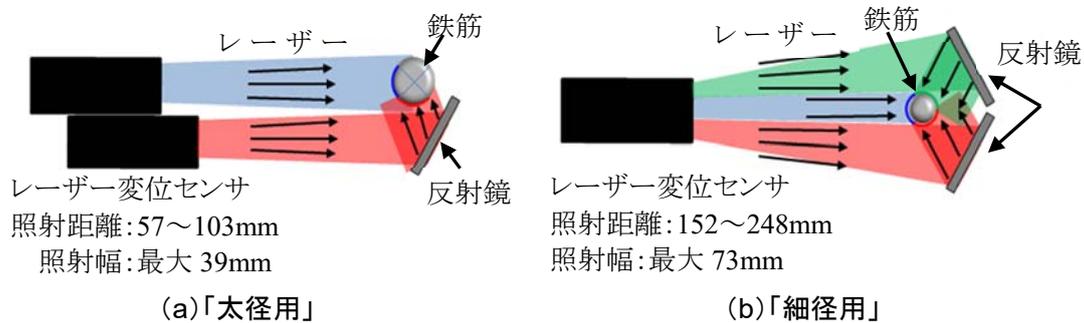


図 2.5.1 計測原理

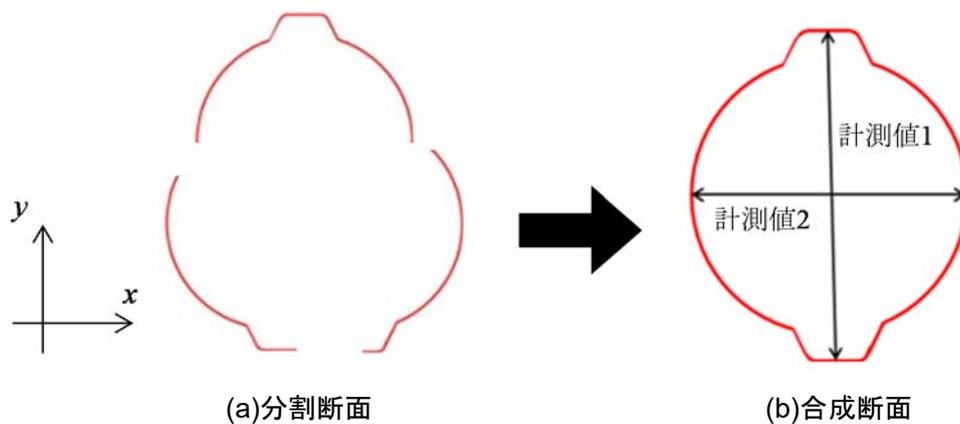


図 2.5.2 計測した分割断面を用いた合成例

(2) 精度検証

開発した鉄筋形状計測装置による、断面形状の計測精度を検証するため、寸法形状が明確な、加工した丸鋼棒の断面形状および断面積を計測した。

検証に用いた丸鋼棒は、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 14\text{mm}$ （一部加工）である。図 2.5.3 に、鉄筋の断面形状寸法を示す。断面 D では丸鋼棒の断面を保持しているが、断面 A, B, C では人工的に切欠を設けることとした。なお、計測の際には、図 3.5.4 に示すように、センサ部に対する鉄筋の加工部の位置について検討するために、 $\phi 20$ 鋼棒では鉄筋中心から加工部に下ろした軸が、水平軸に対して 45° および 90° 、 $\phi 14$ 鋼棒では 30° および 90° で計測した。

表 2.5.1, 表 2.5.2 に、計測結果を示す。なお、表 2.5.1, 表 2.5.2 に示す値は、図 2.5.3 に示した各断面形状を座標から算出した値を基準値とし、各計測値からの差を基準値で除したものを誤差としてとして算出したものである。計測した断面積は、「太径用」では断面形状から算出した基準値に対して $-0.68\% \sim +0.87\%$ 、「細径用」では $-0.30\% \sim +2.05\%$ であった。「太径用」および「細径用」で違いがみられたが、概ね 1% 程度の誤差であった。

また、図 2.5.5, 図 2.5.6 に断面の計測結果を示す。概ね図 2.5.3 に示した形状を再現している

が、図 2.5.5(c)では、溝の上部角部分により照射されるレーザーが遮られたために死角が生じたことで、溝の底部の形状を正確に捉えることができていない。ただし、図 2.5.5(b)に示す通り、直接レーザーが到達する角度に溝があれば、高い精度で計測可能であることがわかる。したがって、局部的に顕著に腐食するなど形状が顕著に変化した鉄筋は、誤差が増加する可能性がある。

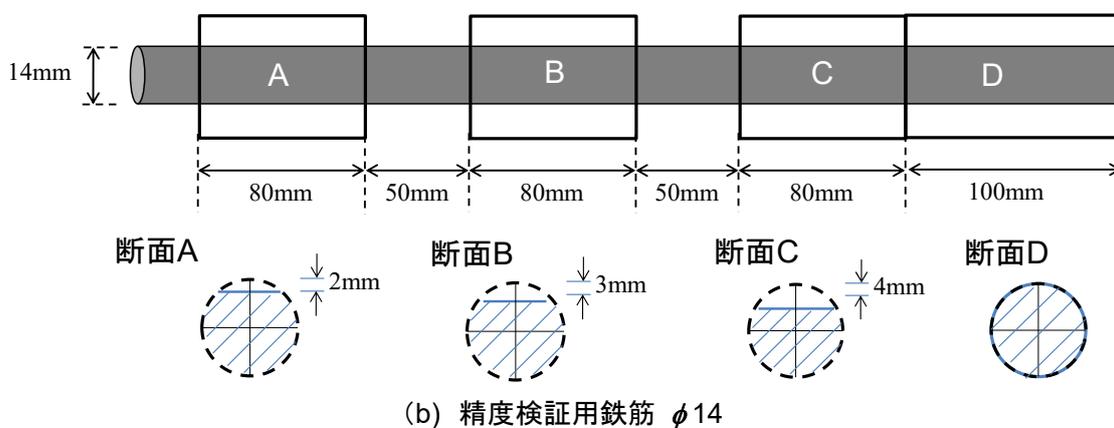
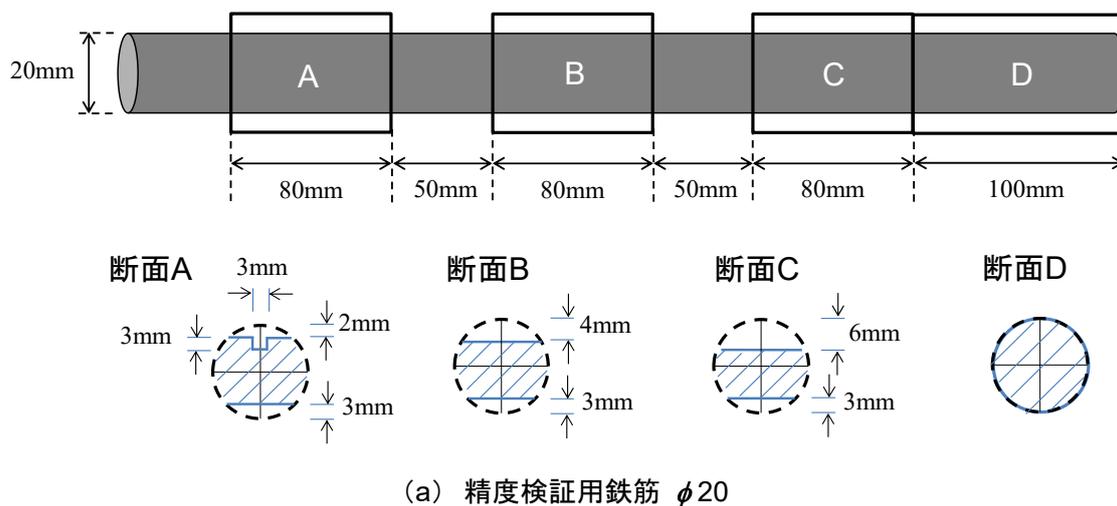


図 2.5.3 精度検証用鉄筋

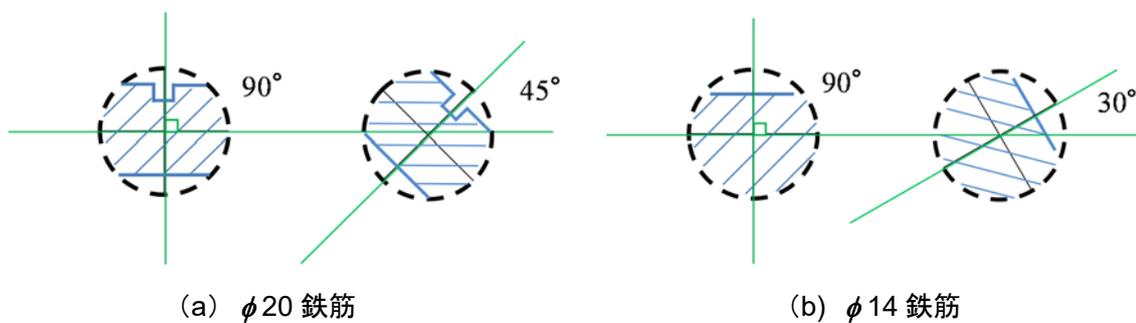


図 2.5.4 計測角度

表 2.5.1 精度検証結果(太径用)

角度	断面	計測値	基準値	誤差	図 2.5.5
		(mm ²)	(mm ²)	(%)	
-	D	312.21	314.16	-0.62	図 2.5.5(a)
45°	A	259.11	259.26	-0.06	図 2.5.5(b)
	B	240.27	239.88	0.16	
	C	204.66	205.34	-0.33	
90°	A	260.28	259.26	0.39	図 2.5.5(c)
	B	238.24	239.88	-0.68	
	C	207.13	205.34	0.87	

表 2.5.2 精度検証結果(細径用)

角度	断面	計測値	基準値	誤差	図 2.5.6
		(mm ²)	(mm ²)	(%)	
-	D	156.09	153.93	1.40	図 2.5.6(a)
30°	A	141.92	140.45	1.05	図 2.5.6(b)
	B	130.67	129.75	0.71	
	C	118.97	117.65	1.12	
90°	A	142.25	140.45	1.28	図 2.5.6(c)
	B	132.41	129.75	2.05	
	C	117.3	117.65	-0.30	

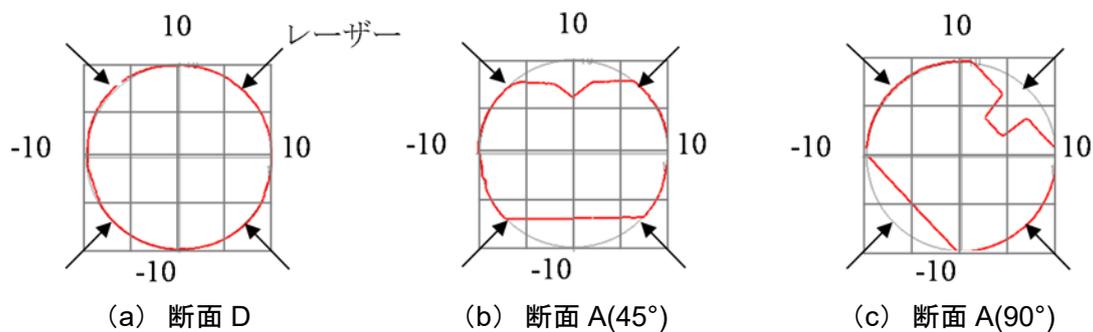


図 2.5.5 精度検証結果(太径用)(単位:mm)

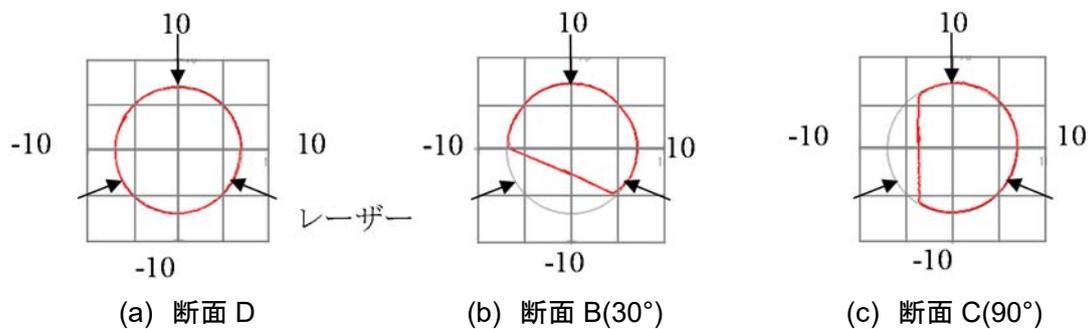


図 2.5.6 精度検証結果(細径用)(単位:mm)

2.5.2 調査方法

高架橋 A を対象として、健全、ひび割れ、はく離箇所の鉄筋はつり出しを実施した。また、高架橋 C を対象として、1 箇所鉄筋断面形状を計測した。写真 2.5.3、写真 2.5.4 に、鉄筋断面形状の計測箇所および計測状況を示す。露出した鉄筋の長さは 110mm、はく落の幅は最大で約 140mm である。鉄筋は D10、かぶり厚は 20mm である。この鉄筋が露出していた露出部、および鉄筋がコンクリートに埋設され表面にはひび割れが観察されなかった埋設部に区分けするものの、同一の鉄筋を計測することとした。これは、腐食していない鉄筋の断面積を計測し比較することで、断面減少率を把握することを目的としたものである。また、異形鉄筋の場合、節の影響で長手方向の断面が随時変化するが、計測時には節間で、鉄筋の全周が腹となる断面(図 2.5.7)に絞って計測した。

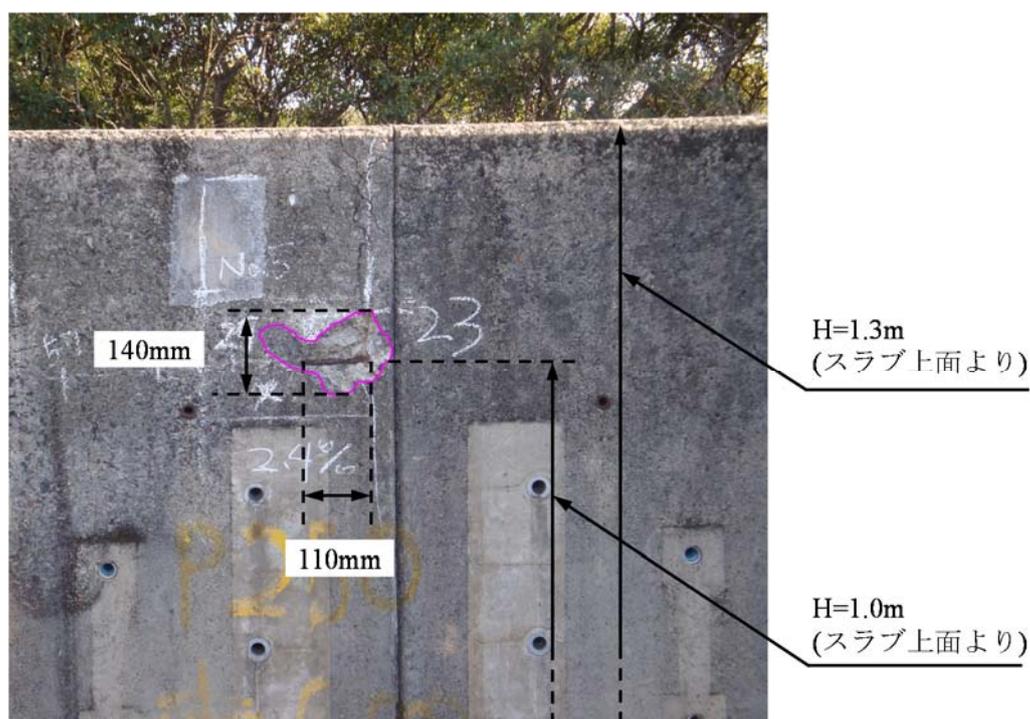


写真 2.5.3 計測箇所

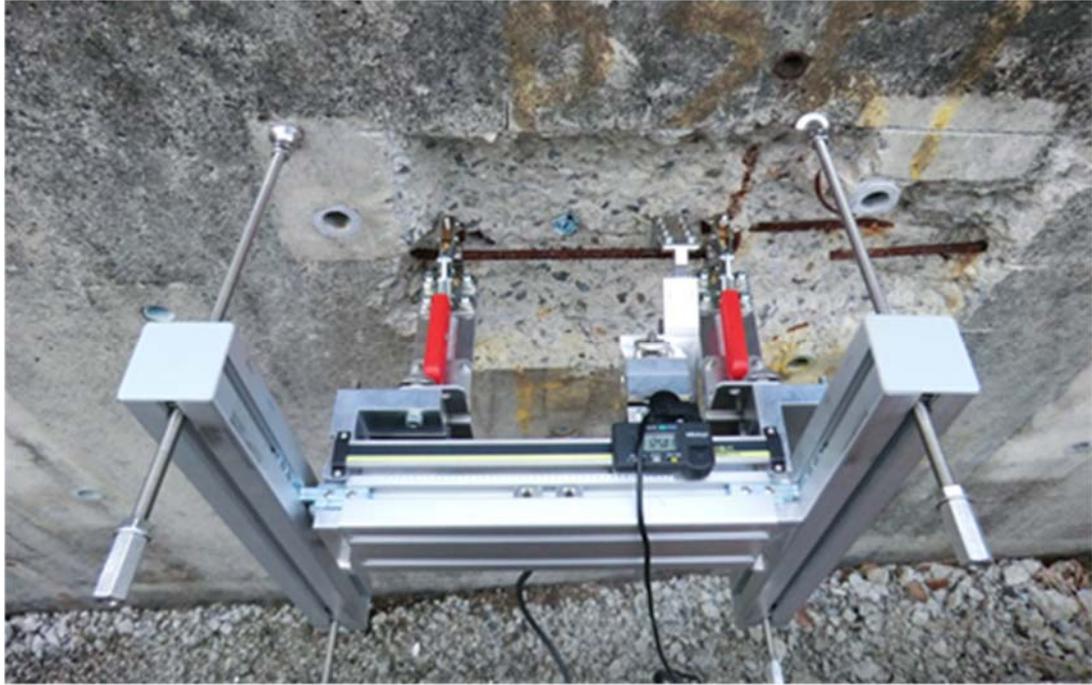


写真 2.5.4 計測状況

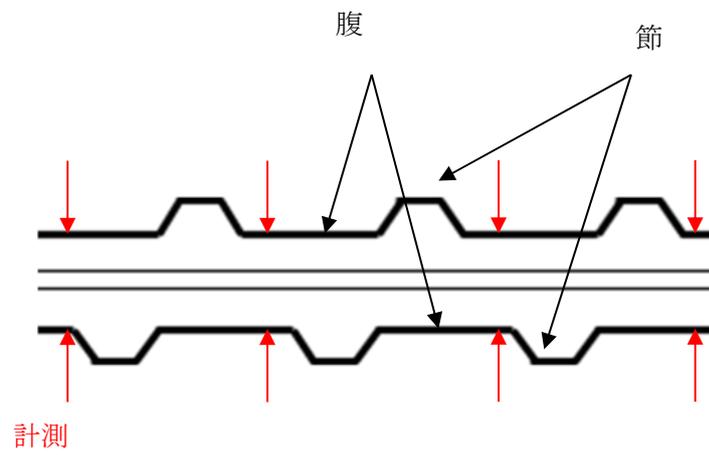


図 2.5.7 節-節間計測箇所

2.5.3 目視で観察される鉄筋の腐食状態

図 2.5.8 に、コンクリート表面に発生していた変状箇所毎の鉄筋腐食度を示す。鉄筋腐食度の評価基準は、鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物⁵⁶⁾に従った。コンクリート表面が健全な 14 箇所、コンクリート表面にひび割れが発生していた 10 箇所、かぶりコンクリートがはく離していた 4 箇所、で鉄筋をはつり出した。ひび割れおよびはく離箇所では、ほぼ腐食度Ⅱ以上となっていた。また、コンクリート表面が健全であっても、部分的ではあるが腐食が進んでいるものが 14 箇所中 4 箇所あった。

写真 2.5.5 に、目視により、ひび割れと判定された箇所の鉄筋の腐食状況を示す。かぶり側で主に鉄筋が腐食している傾向が観察された。なお、鉛直方向の鉄筋であるため、ブリーディングの影響はないと考えられる。写真 2.5.6 に、ひび割れとはく離が鉄筋材軸方向に連続して発生している箇所の鉄筋の腐食状況を示す。はく離部ではかぶり側に集中して断面欠損を伴う腐食が確認された。一方、ひび割れ部でははく離箇所に近い位置で腐食が観察されたものの、はく離箇所から離れた位置（写真上部）ではひび割れが発生していたにも関わらず、腐食がほとんど進行せず健全な状態であった。写真 2.5.7 に、点検ハンマーにより、浮き（はく離）と判断された箇所の鉄筋の腐食状況を示す。ここでもかぶり側に集中して全体的に腐食が進行していた。なお、目視で健全と判定された箇所の鉄筋の腐食は、部分的かつ軽微であったため、腐食の発生傾向を把握できなかった。

ひび割れ箇所およびはく離箇所において、鉄筋の腐食は、かぶり側に集中して発生している状態が確認された。

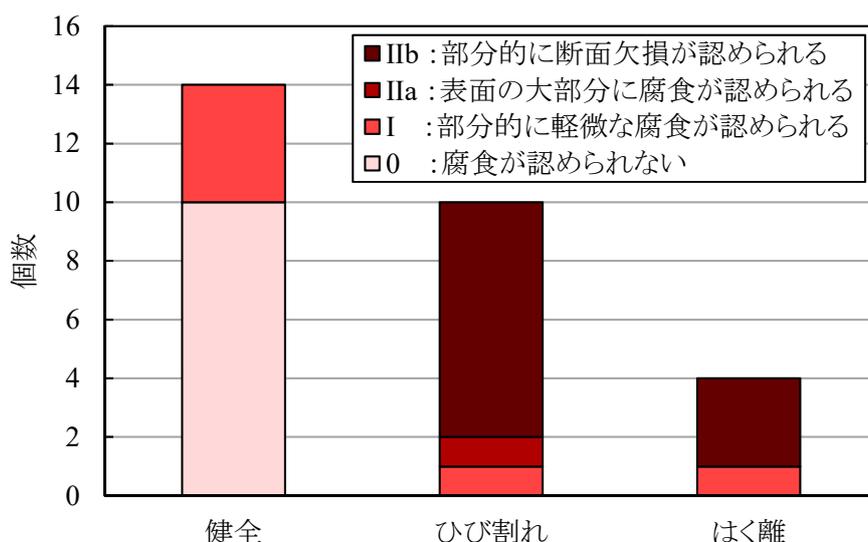


図 2.5.8 コンクリート表面に生じた変状箇所毎の鉄筋腐食度



写真 2.5.5 ひび割れ箇所の鉄筋腐食

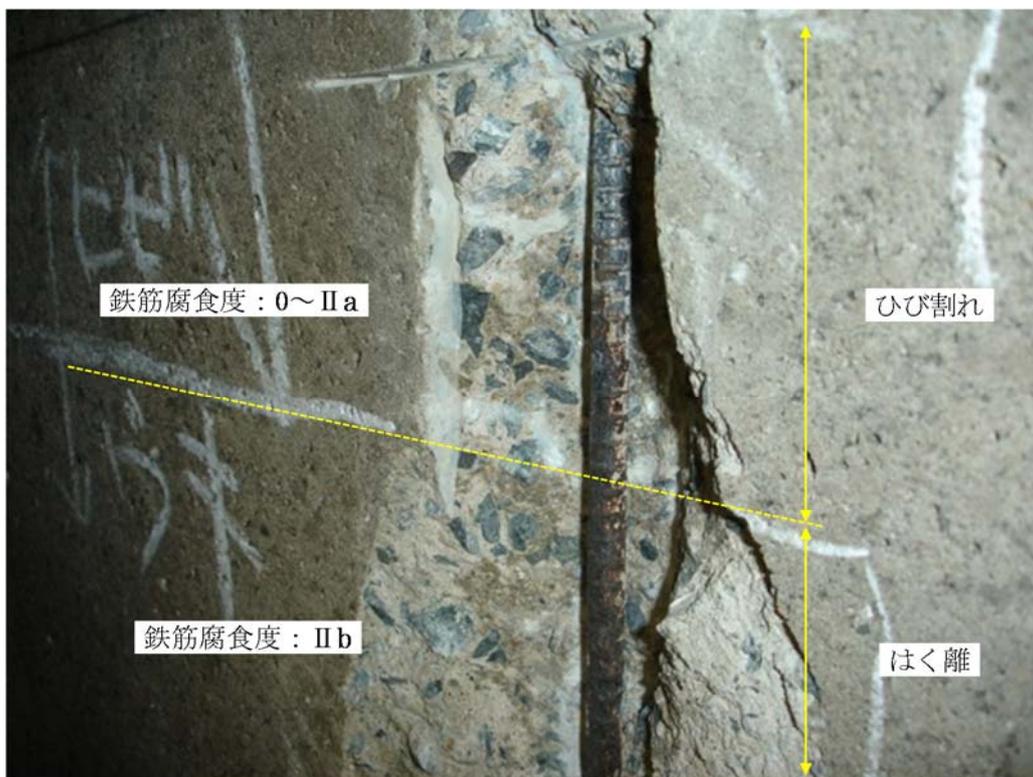


写真 2.5.6 ひび割れ, はく離箇所の鉄筋腐食



写真 2.5.7 はく離箇所での鉄筋はつり出し

2.5.4 計測装置により得られた鉄筋形状

写真 2.5.8 に計測した箇所における、(a) かぶりの状況、(b) コンクリートを除去した後 1 年間放置した鉄筋、(c) さびを除去した鉄筋を示す。目視観察の結果、埋設部においても、鉄筋に腐食した箇所もみられた。ただし、節やリブといった異形鉄筋に特徴的な形状が明確に認められ、腐食は比較的軽微である。一方、露出部では節やリブが認められず、特にかぶり側で腐食による断面欠損が顕著であった。

図 2.5.9 に、ケレン前後の断面積の計測結果、およびその差分を示す。ケレン後の断面積は、埋設部における平均値が 61.9 mm^2 、露出部における平均値が 56.3 mm^2 であり、露出部は埋設部と比較し 9.1%の断面積が減少していた結果となった。また、計測箇所における断面積の最大値に対する断面の減少率を算出すると、露出部は平均で 14.0%であった。埋設部においても腐食が進行していることを考慮すると、本計測箇所における腐食による断面減少率はそれ以上である可能性がある。

図 2.5.10(a)に、断面 A(埋設部)、断面 B(露出部)のケレン後の断面形状を示す。なお、図 2.5.10 の断面 A、B は写真 2.5.8、図 2.5.9 の断面 A、B に対応している。断面 A ではリブの形状を捉え、また鉄筋の裏側は円形に近い形状を有している。一方、かぶり側ではやや凹凸が生じている。この計測箇所ではかぶり 20mm に対し、中性化深さは 40mm であり、コンクリートの表面にひび割れなどは観察されなかったものの、先に中性化が進んだかぶり側から腐食が進行したものと考えられる。一方、断面 B では、かぶり側が大きく断面欠損している様子を捉えていることが分かる。これは、かぶりのはく落後に露出したかぶり側から鉄筋が急速に腐食し、その結果、断面が大きく欠損したと考えられる。一方で、鉄筋の裏側は、埋設部である断面 A と比較して大きな差異は認められない。この計測結果は目視観察の傾向と一致しており、鉄筋の腐食がかぶり側から進行することや、断面欠損が認められる程度に腐食が進行しても、コンクリートと接している鉄筋裏側では腐食が軽微であることを示している。

これらを定量的に把握するため、腐食深さをそれぞれの方向において算定した。ここでは鉄筋中心から、鉄筋表面までの距離に関して断面 A、B の差分を腐食深さとした。図 2.5.11 に腐食深さの概念を、図 2.5.12 に腐食深さの円周方向の分布を示す。なお、断面 A の断面積は 61.9 mm^2 であり、埋設部の平均断面積と一致している。その結果、鉄筋裏側では 0.049 mm (上側平均)、 0.017 mm (下側平均)に対し、かぶり側では 0.089 mm (上側平均)、 0.722 mm (下側平均)、となり、最大で 1.17 mm であった。これは、全周分の平均値 0.235 mm に対し、かぶり下側ではその 3.1 倍断面減少が進行していることを示している。

図 2.5.10(b)に、断面 A におけるケレン前後の形状を示す。断面 A では、腐食生成物が鉄筋の全周にわたり発生しており、ケレン後は各位置で断面が減少している様子を捉えている。ケレン前後の断面積を比較すると、それぞれ平均値は、ケレン前： 61.1 mm^2 、ケレン後： 58.6 mm^2 であり、ケレン前後の断面積の差分は、 2.5 mm^2 である。暴露した鉄筋の腐食速度が 0.008 mm/年 ⁵⁶⁾であると仮定すると、1 年間の腐食量は 0.24 mm^2 になるが、これを用いると、腐食による鉄筋の体積膨張倍

率は 10.4 倍という計算になる。体積膨張倍率については、腐食生成物に依存した見解が報告されており⁴³⁾、本計測結果から得た 10.4 倍という倍率は、これらの値と比較して大きいものの、今後、経時的に計測を行うことで、対象とした構造物における腐食速度や膨張量に対する見解が得られると考える。また、その結果を用いることで、腐食膨張解析時の適切な膨張量の与え方や、FEM のモデル化等に活用できるものと考えられる。

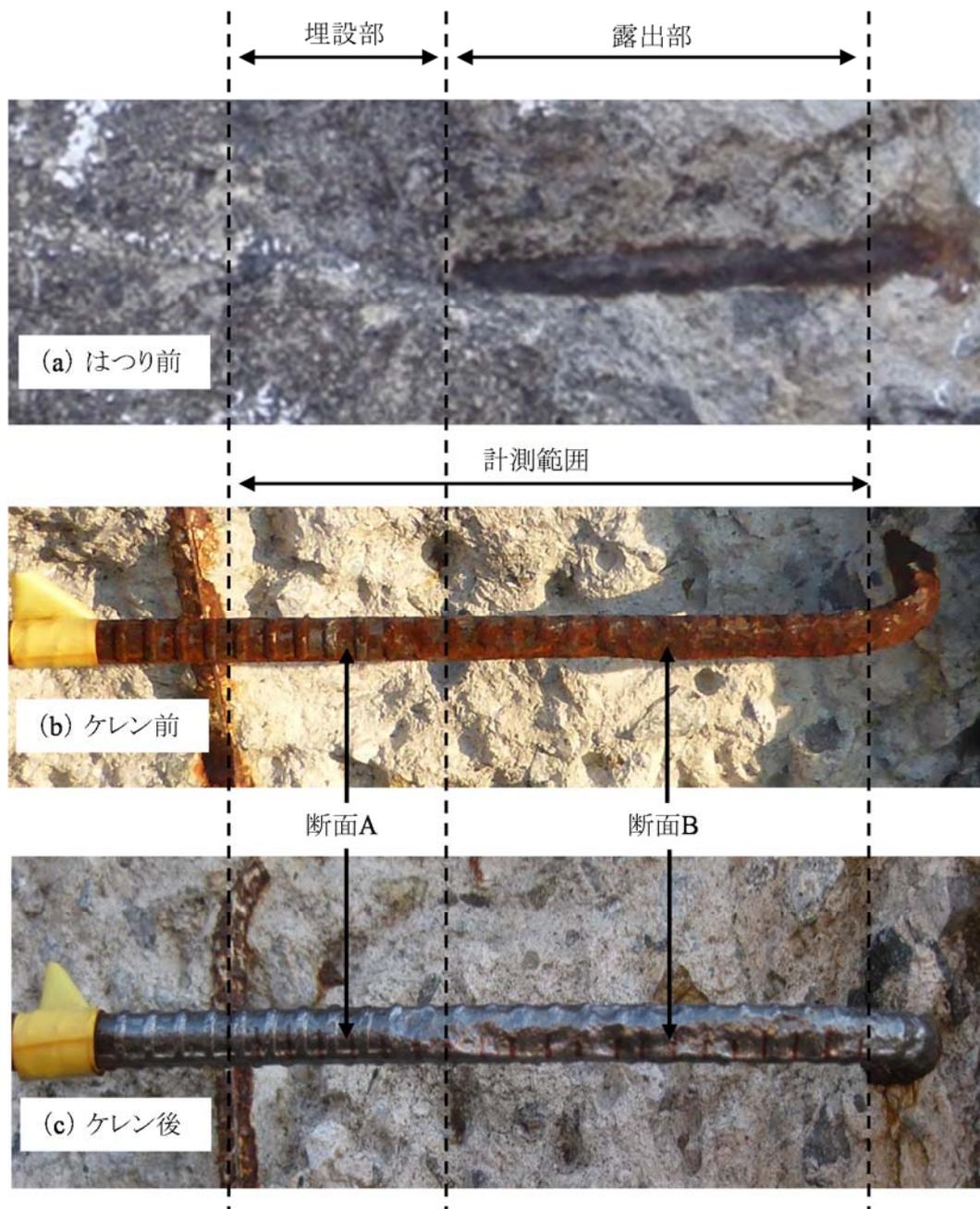


写真 2.5.8 計測鉄筋の状況

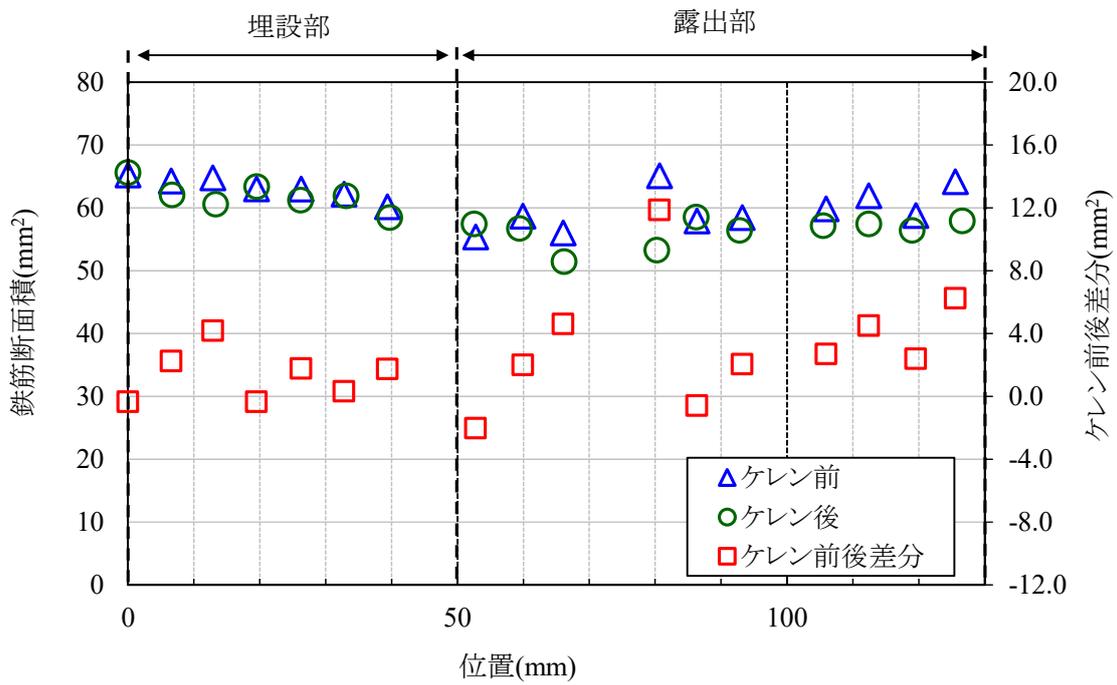
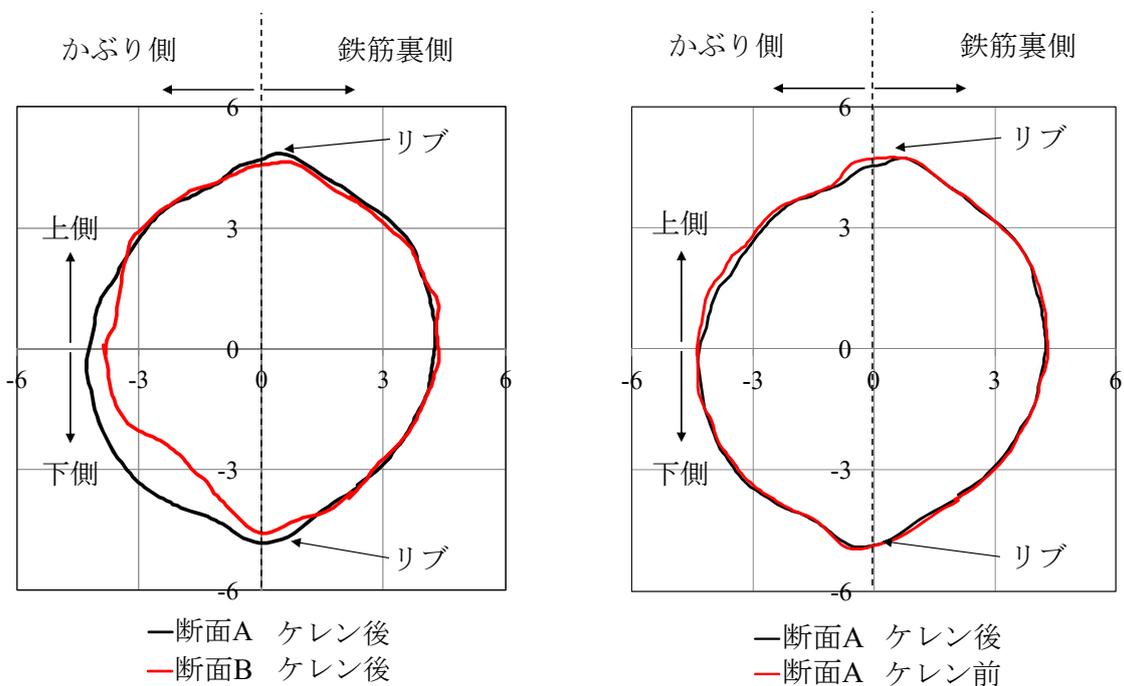


図 2.5.9 断面積



(a) 断面 A, B ケレン後の比較

(b) 断面 A ケレン前後

図 2.5.10 鉄筋形状

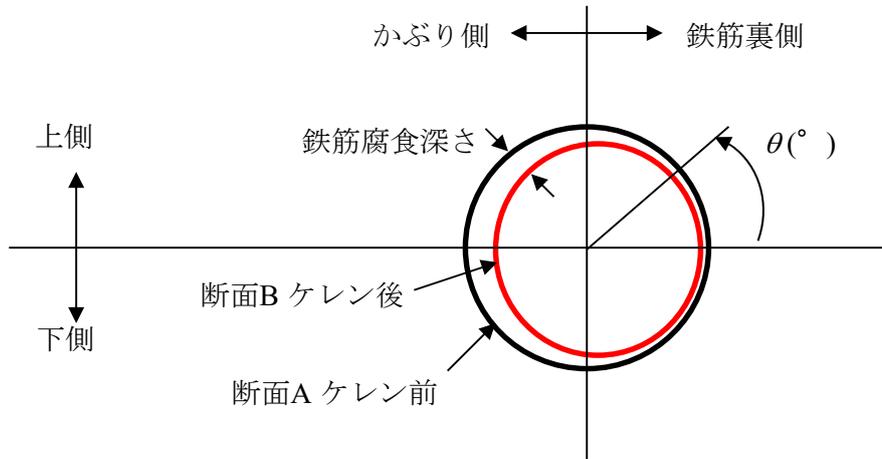


図 2.5.11 腐食深さの概念

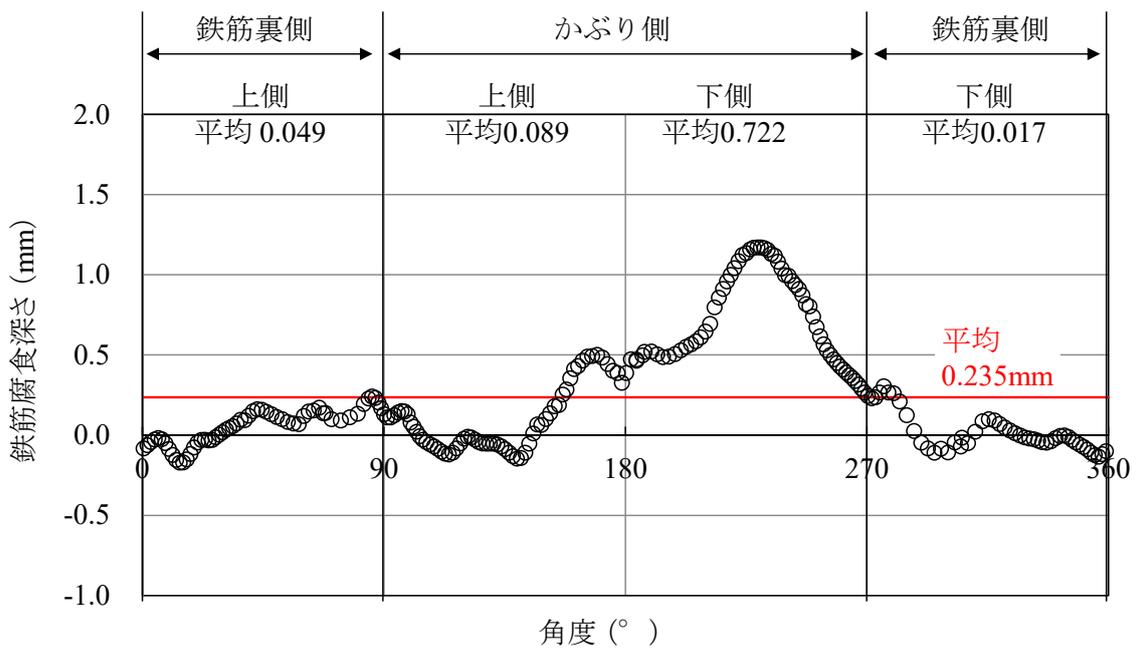


図 2.5.12 腐食深さの円周方向の分布

2.6 まとめ

かぶりコンクリートのひび割れやはく落の発生機構の解明や FEM に基づく変状発生時期の予測に資する基礎的データとして、実構造物を対象とした実績データに乏しい、ひび割れ形態、はく落形状、鉄筋の腐食状態について、これらを現地で計測する装置を開発し、鉄道 RC 構造物を対象として調査を行い、データの取得および検証を行った。

- (1) 既往の研究からかぶり c と鉄筋径 ϕ の比 c/ϕ が 1.0 以下ではく離が生じるとされるが、本調査では、 c/ϕ が 3.0 以下の場合に、はく離はく落の発生率が大きくなる傾向であった。ただし、今後、腐食がさらに進行すれば、より大きな c/ϕ でもはく離はく落が発生する可能性がある。
- (2) はく落幅は概ね 180mm 以下であり、はく落角度は概ね 55～85 度であった。レーザー変位センサを用いてはく落形状を計測した結果、鉄筋を中心として左右対称のはく落面を形成している場合には、コンクリート表面の薄いモルタル層を除く領域ではく落角度は、70 度程度であった。
- (4) 健全箇所およびひび割れ箇所、はく離箇所の全てにおいて、鉄筋腐食は、かぶり側に集中して発生していた。レーザー変位センサを用いて腐食した鉄筋の形状を計測した結果、腐食は断面内で均一に発生せず、かぶり側から進行することを定量的に把握した。

第 3 章 腐食ひび割れ形態に及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響

3.1 はじめに

本章では、第 2 章において、コンクリート片のはく落が多数発生していた 30mm 以下のかぶりを対象とし、腐食による膨張を模擬した試験により得られた荷重変位関係やひび割れ形態といった結果を用いて FEM の再現性を確認し、その後、FEM に基づき、鉄筋を複数配置したモデルを用いて、ひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響を検討した。本章の構成の概略は以下のとおりである。

(1) 鉄筋押抜き試験によるひび割れ形態に関する検討 (3.2 節)

供試体に配置した鉄筋を押し抜くことで、腐食による膨張を模擬した試験を提案し、かぶりコンクリートのひび割れ性状の評価、はく落角度、ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さ、粗骨材の影響について検討した。また、本試験結果から FEM の妥当性を検証した。

(2) ひび割れ形態に及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響 (3.3 節)

FEM に基づき、鉄筋を複数配置したモデルを用いて、かぶりおよび鉄筋間隔、鉄筋径がひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼす影響について検討した。また、かぶりのみを変数として定式化された鉄筋腐食深さに対する限界値の鉄筋間隔に対する適用範囲を検討した。

3.2 鉄筋押抜き試験によるひび割れ形態に関する検討

3.2.1 鉄筋押抜き試験の提案

図 3.2.1 に、提案した鉄筋押抜き試験の試験状況を示す。本試験は、鉄筋の膨張圧を鉛直ジャッキにより入力する強制変位として制御し、剛棒を押抜く方法である。本試験は、丸鋼および吊上げ鉄筋を配置した供試体、反力フレーム、載荷治具、載荷装置で構成されている。

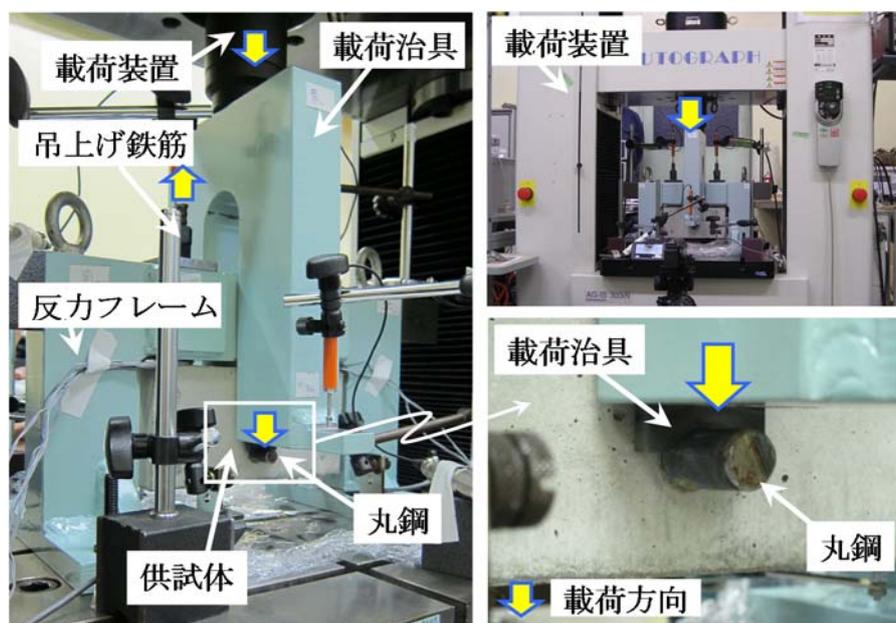


図 3.2.1 試験状況

図 3.2.2 に、供試体の寸法および配筋を示す。寸法は、載荷装置の諸元から、幅 200mm × 奥行 50mm × 高さ 100mm と決定した。ただし、幅 200mm は、RC 高欄を対象とした現地調査⁵⁾より得られたはく落幅の最大値 180mm 以上としたものである。また、高さは、供試体の曲げ変形が試験結果に及ぼす影響を低減するために、可能な限り大きくしている。奥行きは、丸鋼に曲げが発生しないように、極力小さくするとともに、丸鋼の鉄筋径以上のかぶりを確保するため、50mm とした。丸鋼の使用は、劣化が顕在化している古い年代の高架橋を対象としたこと、および異形鉄筋のふし・リブが実験結果に及ぼす影響除去し、荷重を明確にすることを目的としている。

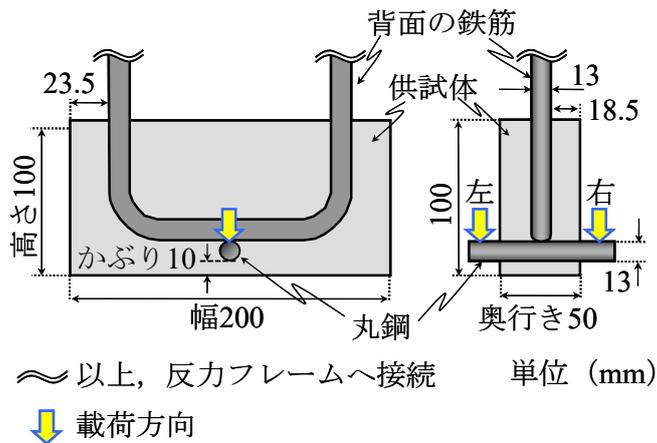


図 3.2.2 供試体の寸法および配筋 (かぶり 10mm)

鉄筋は、供試体幅中央の貫通した丸鋼、その背面に異形鉄筋(以降、背面の鉄筋)を配置した。図 3.2.3 に RC ラーメン高架橋の高欄および柱を例とした、本試験の対象領域を示す。高欄では、丸鋼が鉛直方向鉄筋、背面の鉄筋が水平方向鉄筋を、柱では丸鋼が帯鉄筋、背面の鉄筋が軸方向鉄筋を模擬している。

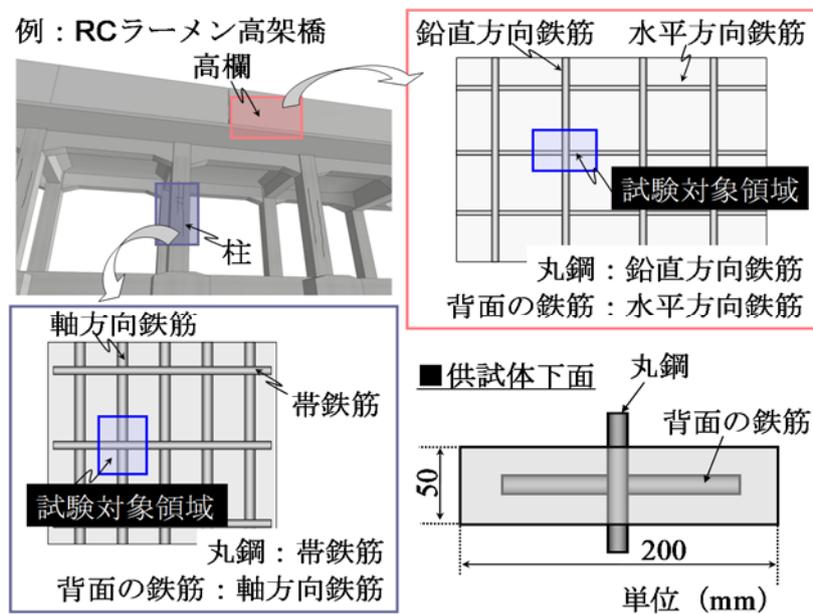


図 3.2.3 試験対象領域

載荷方法は、載荷装置に取付けた門型の載荷治具を通して、丸鋼の左右端に鉛直荷重を作用させる。反力は、背面の鉄筋を反力フレームに固定することで確保する。丸鋼と載荷治具の接着面は、回転を拘束しない構造とした。2.5 節において、コンクリート表面近傍に集中して腐食が進行していたことから、載荷方向を鉛直とした。

3.2.2 試験概要

(1) 試験パラメータ

表 3.2.1 に、供試体諸元を示す。パラメータは、材質、丸鋼のかぶりである。材質は、粗骨材の影響を確認するため、モルタルおよびコンクリートとした。また、丸鋼のかぶりは、かぶり不足を対象として 5, 10, 20, 30mm とした。表 3.2.2 に、コンクリートの配合を示す。なお、モルタルは、コンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングして採取した。最大骨材寸法は、20mm である。

丸鋼および背面の鉄筋の径は、既設 RC 高欄を参考に 13mm とした。圧縮強度の目標値は、鉄筋径と同様に既設 RC 高欄を参考に、材質によらず 24.0N/mm^2 とした。なお、圧縮強度の試験値はコンクリート 23.0N/mm^2 、モルタル 25.3N/mm^2 である。圧縮試験に用いた供試体は、コンクリートが直径 100mm×高さ 200mm、モルタルが直径 50mm×高さ 100mm の円柱である。

表 3.2.1 供試体諸元

No.	材質	かぶり mm	圧縮強度 N/mm^2
C5	コンクリート	5	23.0
CR10		10	
CR20		20	
C30		30	
M5	モルタル	5	25.3
M10		10	
M20		20	
M30		30	

表 3.2.2 コンクリートの配合

スランプ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 kg/m^3			
				W	C	S	G
8	5.7	75	50	171	228	915	947

※ W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材

(2) 荷重速度および測定項目

荷重速度は $0.250\text{mm}/\text{min}$ とした。なお、使用した荷重装置は、 0.001mm の変位制御が可能である。測定項目は、荷重、供試体上面中央および丸鋼の鉛直変位である。図 3.2.7 に、変位計の設置位置を示す。供試体上面中央に設置したカンチレバ型変位計の仕様は容量 5mm 、感度 $1000 \times 10^{-6} / \text{mm}$ である。また、丸鋼の変位計測のため荷重治具に設置した高感度変位計の感度は、 $2000 \times 10^{-6} / \text{mm}$ である。

供試体上面中央：カンチレバ型変位計

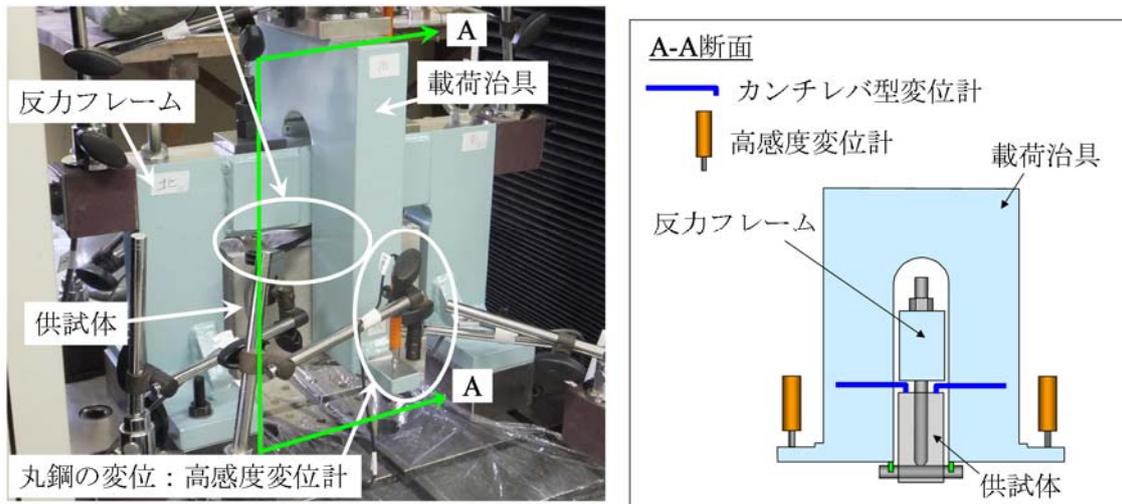


図 3.2.7 変位計設置状況

3.2.3 ひび割れ形態

表 3.2.3 にコンクリート、表 3.2.4 にモルタルの最終的なひび割れ状況を示す。コンクリートの場合、かぶり c が $5 \sim 20\text{mm}$ では、丸鋼端部から斜めひび割れが発生・進展し、荷重の低下とともに最終的に斜めひび割れがコンクリート下面に到達した。 c が 30mm では、鉄筋直下にひび割れが発生・進展し、荷重の低下とともに最終的に水平方向のひび割れが発生した。なお、斜めひび割れは発生したが進展することなく、鉄筋直下のひび割れと水平方向のひび割れが開口した。モルタルの場合もコンクリートと同様なひび割れ発生・進展状況であった。図 3.2.8 に示すひび割れの概念図²³⁾に従い、ひび割れを定義すると、本試験では、 c と鉄筋径 ϕ の比 c/ϕ が 1.5 以下ではく離ひび割れが発生し、 $c/\phi=2.3$ で鉄筋軸ひび割れとなった。

表 3.2.3 ひび割れ状況 (コンクリート)

材質	c	c/ϕ	ひび割れ状況
コンクリート	5	0.4	
	10	0.8	
	20	1.5	
	30	2.3	

※ c : かぶり (mm), ϕ : 鉄筋径 (mm)

材質	c	c/ϕ	ひび割れ状況
モルタル	5	0.4	
	10	0.8	
	20	1.5	
	30	2.3	

表 3.2.4 ひび割れ状況 (モルタル)

※ c : かぶり (mm), ϕ : 鉄筋径 (mm)

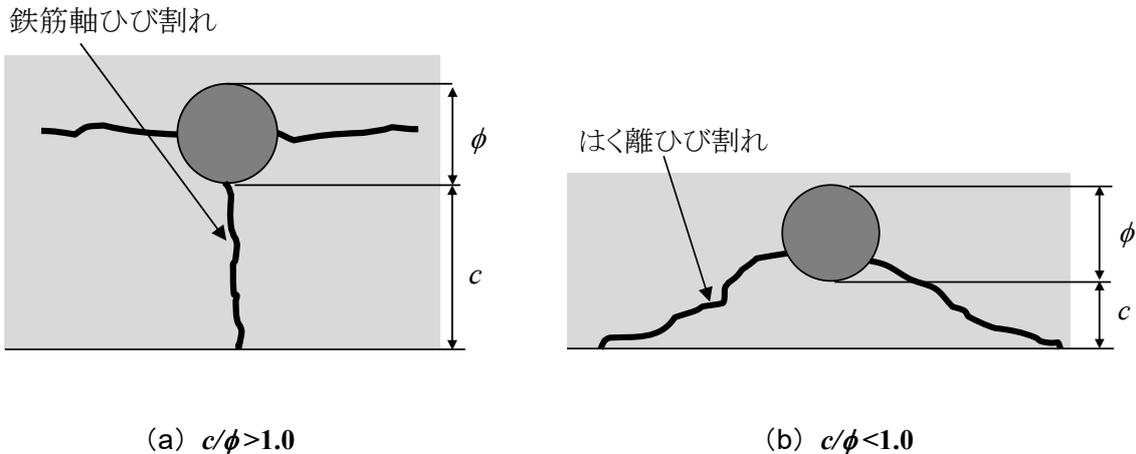


図 3.2.8 既往の研究によるひび割れ形態の模式図²³⁾

3.2.4 ひび割れ性状

図 3.2.9, 図 3.2.10 に, 荷重と丸鋼の鉛直方向変位(以下, 変位)の関係を示す. また, 図 3.2.11 にコンクリートのかぶり 5mm (C5), 30mm (C30) を例としてひび割れ進展状況を示す. なお, 変位は, 丸鋼の変位から供試体の曲げおよび背面の鉄筋の抜出しによる変位にあたる供試体上面中央の変位を差し引くことで算出した. 図 3.2.12 に, 供試体に生じる変形を示す. ここで, 丸鋼の曲げ変形は, 丸鋼の端部に载荷しているため, 小さいものとした. コンクリートの初期剛性は, かぶりに関わらず概ね一定である. C5 は, 変位 0.1mm 程度で図 3.2.11 (a) に示す斜めひび割れが鉄筋側から発生し, 剛性が低下した. 斜めひび割れがコンクリート表面に達し, 開口するに従い荷重が低下した. 図 3.2.11 (b) に荷重低下後のひび割れ状況を示す. なお, 载荷以前に鉄筋直下に収縮ひび割れが生じていたが, 载荷終了までひび割れが大きく開口することはなかった. かぶり 10mm (CR10) では, 変位計のずれにより計測ができなかったが, 鉄筋側から斜めひび割れが C5 と比べ長く発生して, 荷重が低下した. かぶり 20mm (CR20) は, 最大荷重時までほぼ直線的に荷重が増加し, 鉄筋側から斜めひび割れが発生し, 荷重が低下した. C30 は, 鉄筋直下のコンクリート表面側に図 3.2.11 (c) に示すひび割れ発生し, 一旦荷重が低下した. その後, 変位の増加とともに再び荷重が増加し, 水平方向のひび割れが生じて荷重が低下した. 斜めひび割れ 45 度方向に生じたが, 水平方向のひび割れ発生後, 大きく進展することはなかった. モルタルも同様な傾向である.

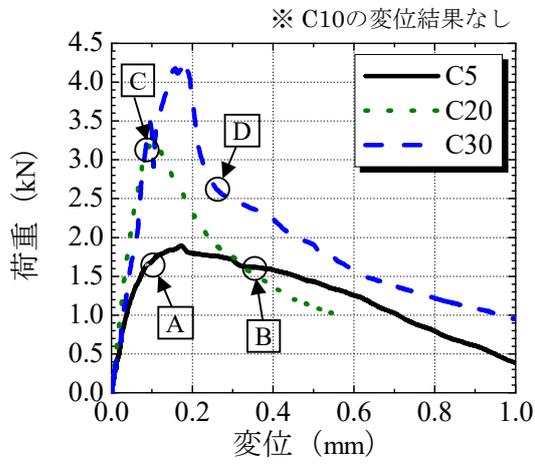


図 3.2.9 荷重変位関係 (コンクリート)

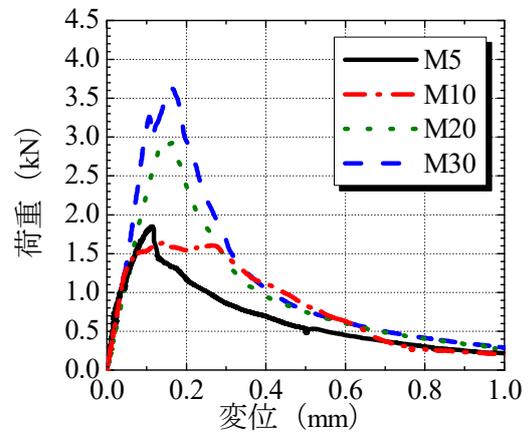
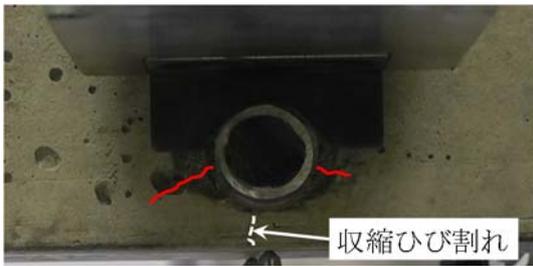
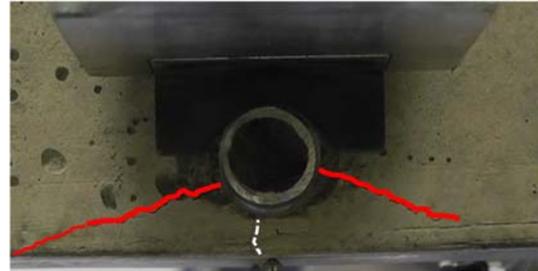


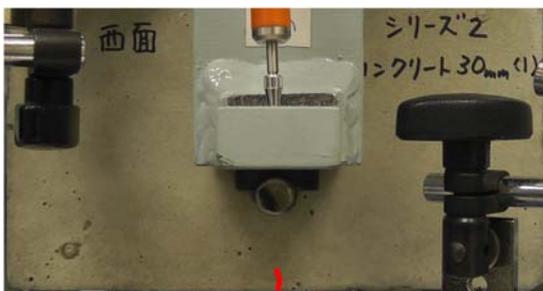
図 3.2.10 荷重-変位関係 (モルタル)



(a) 図 3.2.9 中の A 点 (C5)



(a) 図 3.2.9 中の B 点 (C5)



(c) 図 3.2.9 中の C 点 (C30)



(d) 図 3.2.9 中の D 点 (C30)

図 3.2.11 各ステップでのひび割れ進展状況 (C5, C30)

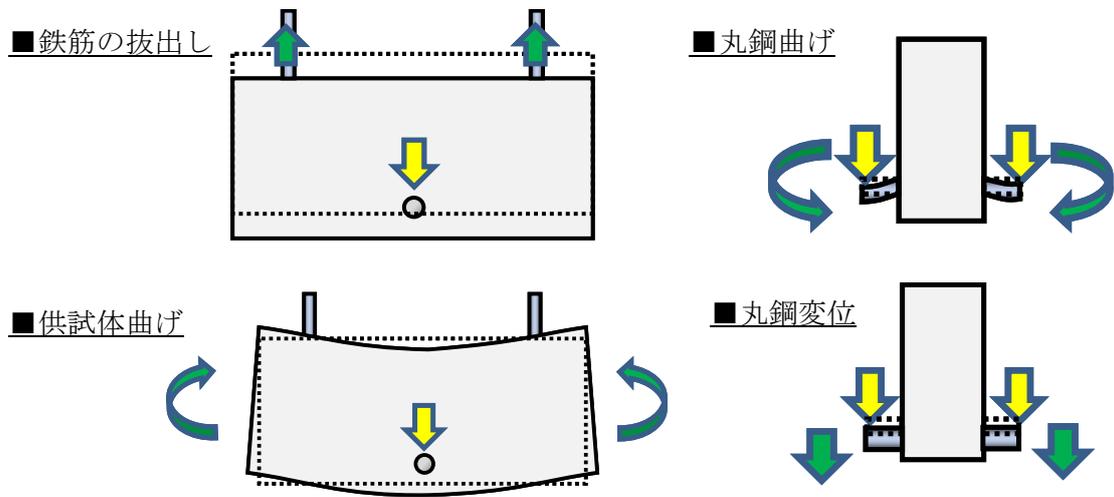


図 3.2.12 供試体に発生する変形

3.2.5 はく落角度

図 3.2.13 に、かぶりとはく落角度の関係を示す。2.4 節では、供用中の構造物を対象として、目視およびはく落形状計測装置により得られたはく落幅とかぶりから、はく落角度を算出し、かぶりとはく落角度の関係を示している。同様な手法によりはく落角度を算出し、2.4 節で得られた結果と共に整理した。なお、斜めひび割れが発生・進展したかぶり 5~20mm を対象とした。既往の研究と同様に、横軸は、 c/ϕ とした。なお、縦軸のはく落角度 θ は、図 3.2.13 中の位置とし、図 2.4.6 と同じく、式(2.4.1)で算定した。はく落角度は、 $55\sim 85^\circ$ であり、 c/ϕ が小さいほど、減少する傾向にあった。この傾向は、供用中の構造物と同様な傾向である。

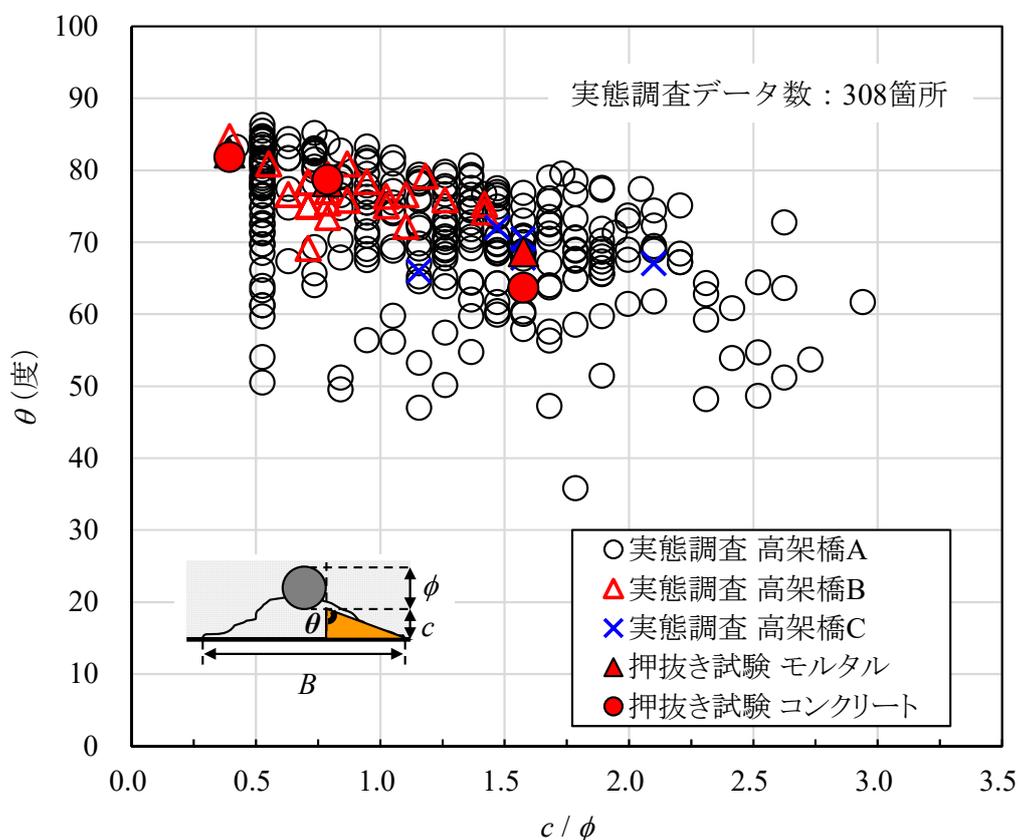
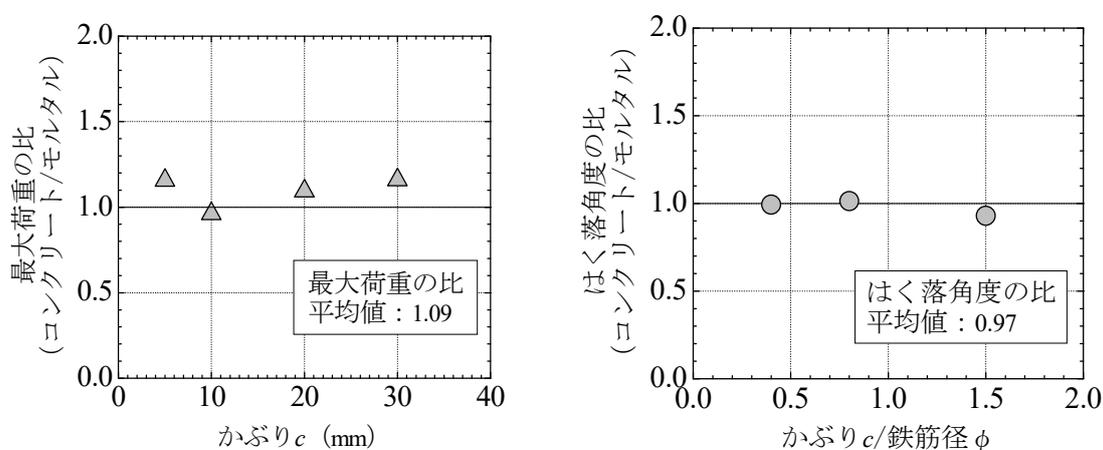


図 3.2.13 かぶりとはく落角度

3.2.6 粗骨材の影響

図 3.2.14 にコンクリートとモルタルの比較を示す。(a)は最大荷重、(b)ははく落角度である。両図ともに縦軸はコンクリートとモルタルの比とした。最大荷重は、モルタルと比べコンクリートが大きい。表 3.2.1 に示すように、材質に関わらず、圧縮強度が同等であったことを踏まえると、この荷重の差は、粗骨材の噛み合わせの影響であると考えられる。一方、はく落角度は、 c/ϕ によらず、コンクリートとモルタルは同様である。ひび割れ進展状況も同様であったことから、本試験のかぶり 5~20mm, 粗骨材 20mm の条件下では、粗骨材の影響はみられない。



(a) 最大荷重

(b) はく落角度

図 3.2.14 コンクリートとモルタルの比較

3.2.7 解析方法

解析モデルは2次元とし、荷重は鋼棒位置に強制変位とし、拘束は上面全体を鉛直と水平方向に固定としてモデル化した。図 3.2.15 に、コンクリートの構成則を示す。圧縮側には Thorenfeldt モデル、引張側には Hordijk モデルを用いた。引張強度⁸⁾、引張破壊エネルギー⁸⁾は圧縮強度から算定した。圧縮強度は 28N/mm^2 、引張強度は 1.8N/mm^2 、引張破壊エネルギーは 0.08N/mm である。メッシュサイズは 2.8mm である。コンクリートのひび割れモデルは、固定ひび割れモデルとし、ひび割れ後のせん断剛性低減係数は 0.005 とした。なお、本検討で用いた有限要素プログラムは、DIANA (Ver9.4.4) である。

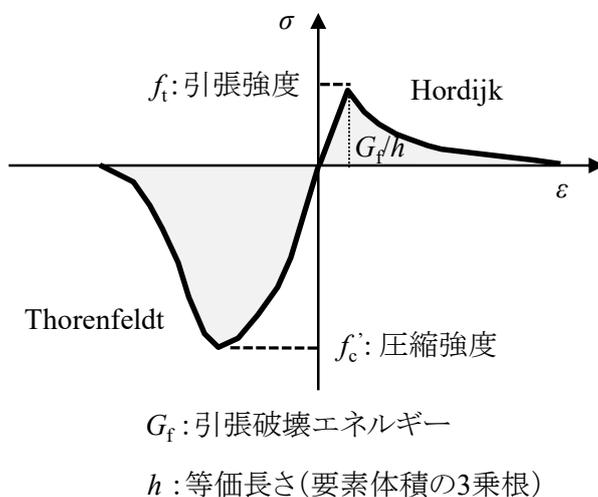


図 3.2.15 コンクリートの構成則

3.2.8 解析によるひび割れ形態および荷重変位関係

表 3.2.5 に、試験のひび割れ状況と FEM の最大主ひずみを示す。FEM により、 $c/\phi = 1.5$ 以下において、はく離ひび割れ形態となることを再現することができている。図 3.2.16 に、荷重変位関係を示す。試験と比べて解析の最大荷重までの剛性が大きい。この要因には、丸鋼の曲げ変形や供試体の変形が、微小な変位であった計測結果に含まれていた可能性が考えられる。本試験を用いて鉄筋腐食深さを議論する場合にはこの影響について十分に留意する必要があるが、全ての試験体で最大荷重が概ね一致していること、それ以降の軟化勾配が概ね一致していること、また次項の解析では、丸鋼や供試体の変形は生じることからこれらは大きく影響しないと考えられるため、本項の構成則を用いて検討を行った。

表 3.2.5 試験のひび割れ状況と FEM の最大主ひずみ比較

c	c/ϕ	試験 ひび割れ状況	FEM 最大主ひずみ
5	0.4		
10	0.8		
20	1.5		
30	2.3		

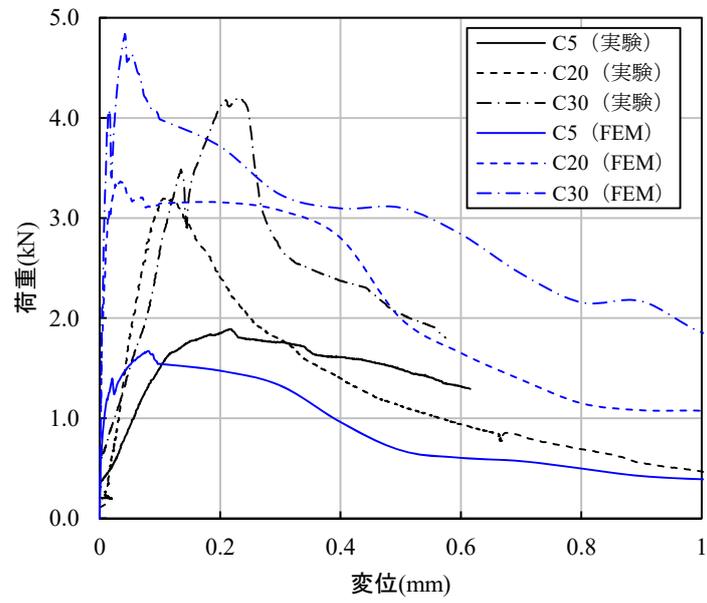


図 3.2.16 実験と解析の荷重変位関係の比較

3.3 ひび割れ形態に及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響

3.3.1 解析概要

図 3.3.1 に、解析モデルを示す。解析対象は実構造物における複数本の鉄筋配置を模擬して、コンクリート中にかぶり、鉄筋間隔を変数として鉄筋を 4 本配置した 2 次元モデルである。表 3.3.1 に、解析パラメータを示す。拘束条件は、モデル上面の鉛直方向に固定とし、中央部一点のみ水平方向も固定とした。解析領域は、鉄筋背面からモデル上面までの距離を 120mm とし、解析結果が鉄筋背面の境界条件の影響を受けないようにした。かぶり部分の要素寸法は 2mm とし、8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。鉄筋腐食による膨張圧は、図 3.3.1 に示す鉄筋の下面側 90° の領域を温度膨張させることにより模擬した。供用中の RC 構造物において、はく離・はく落部位の鉄筋をレーザー変位計で計測した結果、かぶりコンクリートに近い領域が集中して断面欠損していたため、本検討では、下面側 90° を鉄筋腐食範囲と設定した。

コンクリートの構成則は、3.2.7 と同じく、圧縮側には Thorenfelt モデル、引張側には Hordijk モデルを用いた。材料定数も同じく、圧縮強度は 28N/mm^2 、引張強度は 1.8N/mm^2 、引張破壊エネルギーは 0.08N/mm とした。また、コンクリートのひび割れモデルは、固定ひび割れモデルとし、ひび割れ後のせん断剛性低減係数は 0.005 とした。鉄筋は弾性である。鉄筋とコンクリート間には接触要素（インターフェース要素）を挿入した。インターフェース要素の剛性は、鉄筋表面に対する法線方向を接触した場合（圧縮）には剛として 10^5N/mm^3 、離れる場合（引張）にはノーテンションを模擬して $1/10^{10}\text{N/mm}^3$ とした（図 3.3.2）。

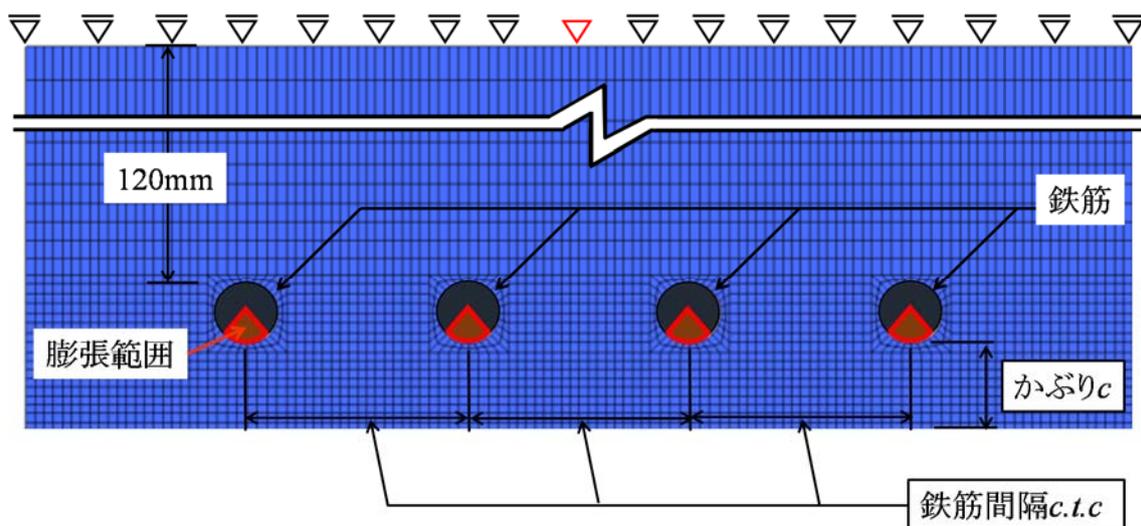


図 3.3.1 解析モデル

表 3.3.1 解析パラメータ

鉄筋間隔 $c.t.c$ mm	かぶり c mm	鉄筋径 ϕ mm	c/ϕ
50, 100, 150, 200	10	13	0.8
	20		1.5
	30		2.3
50, 100, 150	10	19	0.5
	20		1.1
	30		1.6
50, 100, 150, 200	10	29	0.3
	20		0.7
	30		1.0

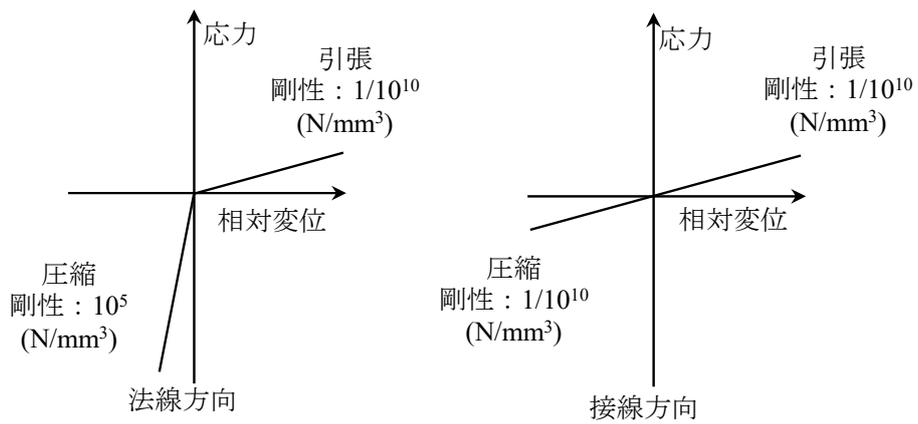


図 3.3.2 鉄筋とコンクリート間に配置するインターフェース要素の剛性

3.3.2 ひび割れ形態への影響

図 3.3.3～図 3.3.5 に、かぶりと鉄筋間隔に応じて生じたひび割れ形態の代表例を示す。解析で得られたひび割れ形態は、主に 3 つに区分した。後述するが、この区分は、変状発生時の膨張変位の傾向の違いからも整理できる。図 3.3.3 は、鉄筋から斜め方向にひび割れが進展し、表層にひび割れが達する形態となった(以降、はく離ひび割れ)。はく離ひび割れ形態は、鉄筋間隔が大きく、かぶりが小さい場合に生じた。図 3.3.4 は、鉄筋から斜め方向へのひび割れの進展は見られず、隣接する鉄筋からそれぞれ進展する水平方向のひび割れが繋がり、水平方向にひび割れが貫通する形態となった(以降、水平ひび割れ)。鉄筋間隔が小さく、かぶりが大きい場合に、水平ひび割れ形態となった。このように、かぶりのみではなく、かぶりと鉄筋間隔により、ひび割れ形態は変化する。図 3.3.5 は、はく離ひび割れと同様に鉄筋から斜め方向にひび割れが進展するが、斜めひび割れが表層に到達する前に、隣接する鉄筋からそれぞれ進展する水平方向のひび割れが繋がり、ひび割れが貫通する形態となった(以降、はく離水平ひび割れ)。鉄筋のあき(鉄筋中心間隔から鉄筋径を差し引いた値)の $1/2$ がかぶりと同程度以上の場合に、はく離水平ひび割れ形態となった。最終的に水平方向のひび割れが貫通するという点で図 3.3.4 と共通するが、ここでは、はく離ひび割れ形態(図 3.3.3)と水平ひび割れ形態(図 3.3.4)の遷移領域の形態として区分した。

図 3.3.6 にかぶり c および $(c.t.c-\phi)/2$ で示す鉄筋のあきの $1/2$ とひび割れ形態の関係を、図 3.3.7 にかぶりおよび鉄筋径とひび割れ形態の関係を示した。なお、図 3.3.5 に示すはく離水平ひび割れは、水平方向にひび割れが貫通するものとして、水平ひび割れと同一で扱った。これより、ひび割れ形態がかぶりと鉄筋径よりもかぶりと鉄筋のあきにより変化することは明らかである。本解析では、 $c=0.6\cdot(c.t.c-\phi)/2$ を閾として、 $c \leq 0.6\cdot(c.t.c-\phi)/2$ の場合にははく離ひび割れ形態となり、 $c > 0.6\cdot(c.t.c-\phi)/2$ の場合には水平ひび割れ形態となった。

水平ひび割れ形態は、目視調査において変状が生じていなくても、はく落に繋がるひび割れがコンクリート内部で生じている可能性があることを示唆し、鉄筋のあきの $1/2$ がかぶりよりも小さく、鉄筋が腐食する環境にある場合には、調査時に打音を併用するなど留意が必要である。

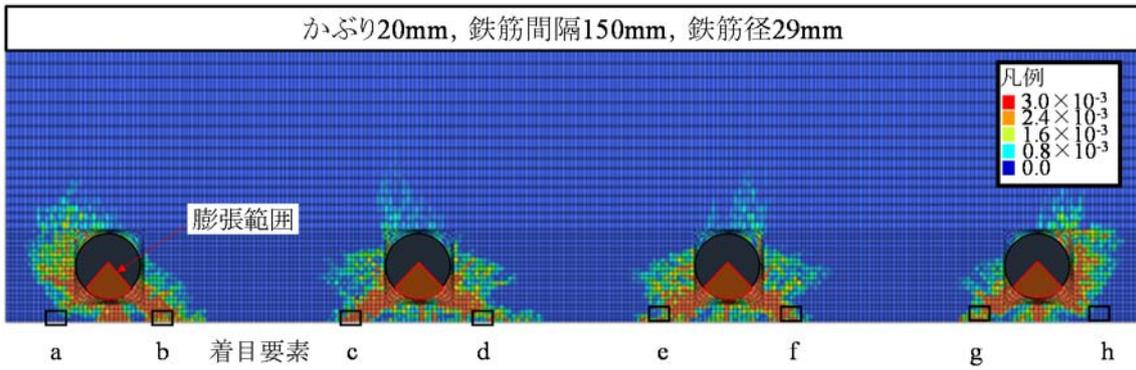


図 3.3.3 はく離ひび割れ時の最大主ひずみ

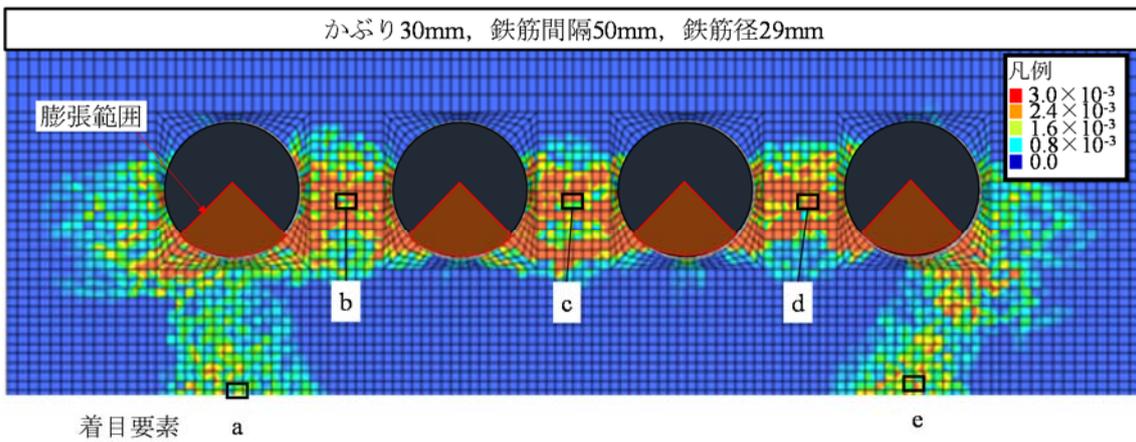


図 3.3.4 水平ひび割れ時の最大主ひずみ

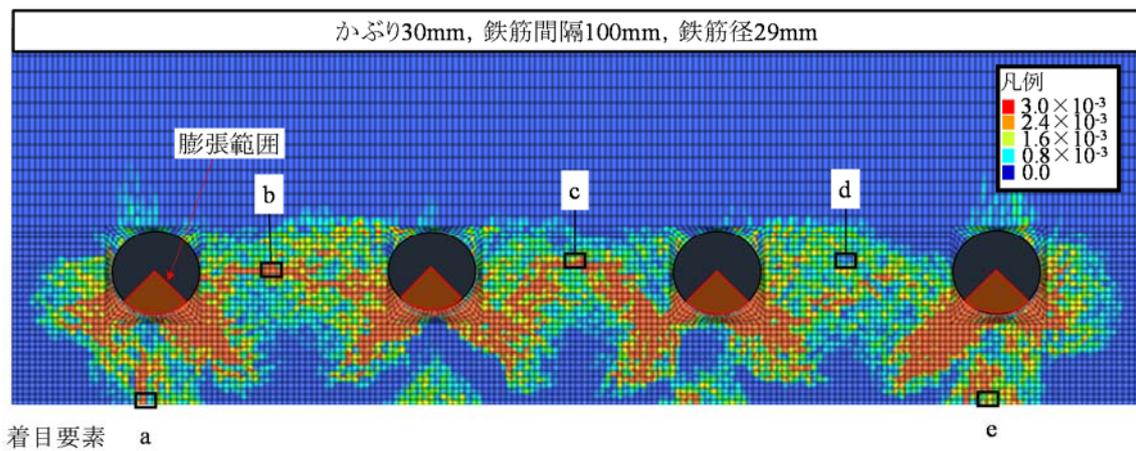


図 3.3.5 はく離水平ひび割れ時の最大主ひずみ

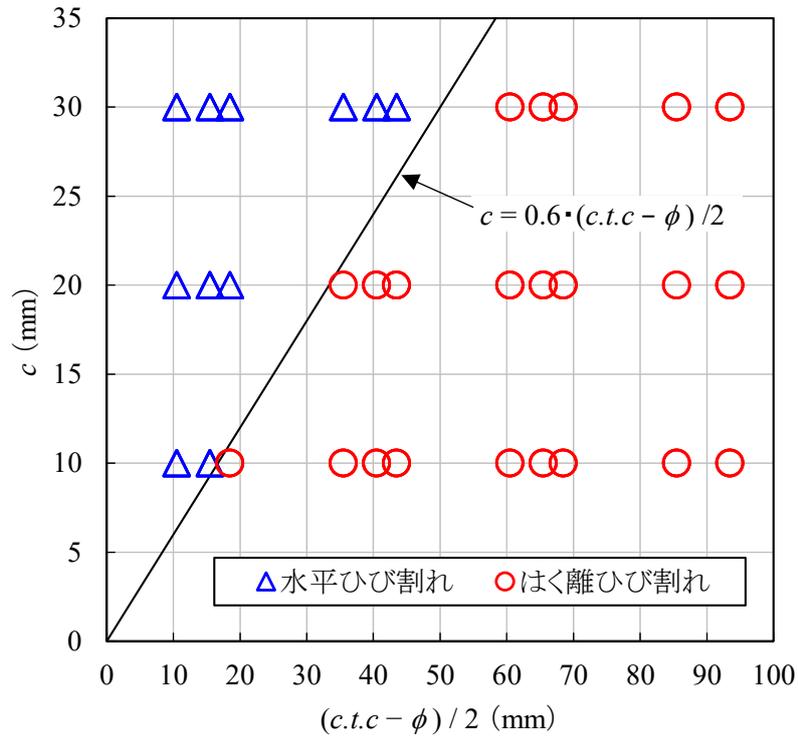


図 3.3.6 かぶりおよび鉄筋のあきの 1/2 とひび割れ形態

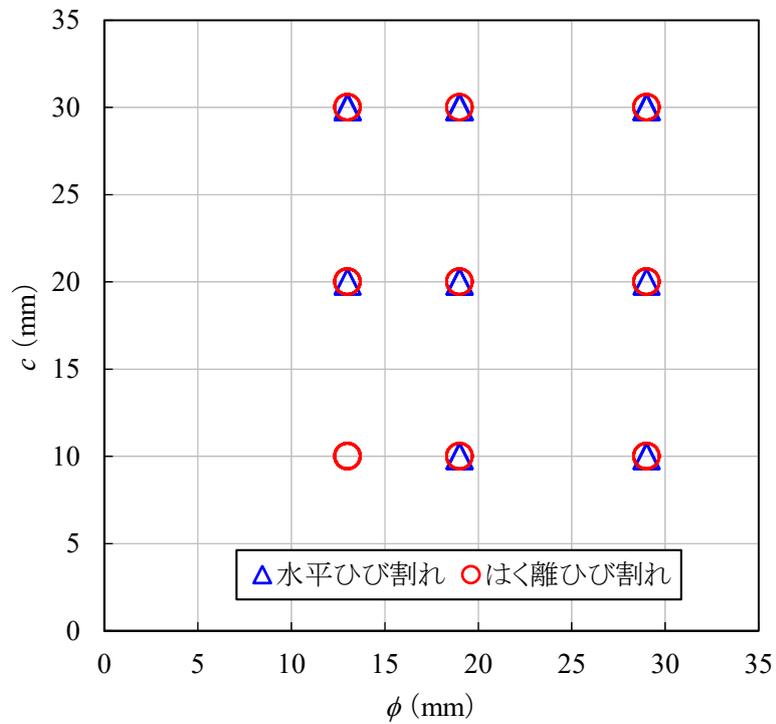


図 3.3.7 かぶりおよび鉄筋径とひび割れ形態

3.3.3 変状発生時の膨張変位への影響

(1) 変状発生および膨張変位の定義

本解析においては、変状発生は、図 3.3.8 に示すように、斜めひび割れが到達するコンクリート表面の要素あるいは隣り合う鉄筋から進展したひび割れが合流する要素に着目し、その要素の最大主ひずみが急変した時とした。ひび割れ形態毎の着目要素は、図 3.3.3～図 3.3.5 に示す a～h または a～e である。また、膨張変位は、図 3.3.9 に示すように鉄筋全周を均一に膨張させた場合に膨張面積が同等となる時の変位とした。ひび割れ形態毎に、変状の判断基準を以下に示す。

a) はく離ひび割れ形態の場合のひび割れ、はく落の判断基準

ひび割れ発生時の膨張変位(以降、 Δl_{cr1})は、斜めひび割れが到達するコンクリート表面の左右要素のいずれかの最大主ひずみが急増した時の変位とした。はく落発生時の膨張変位(以降、 Δl_{sp1})は、斜めひび割れが到達する表面の要素の左右両方の最大主ひずみが急増した時の変位とした。なお、4本の鉄筋のうち、最も早く各変位に達した時とした。図 3.3.8 を例にすると、d 点が最も早く最大主ひずみが急増したため、 Δl_{cr1} はその時の変位とし、d 点で既に最大主ひずみが急増し、さらに c 点の最大主ひずみが急増したため、 Δl_{sp1} はその時の変位とする。

b) 水平ひび割れ形態の場合のひび割れ、はく落の判断基準

ひび割れ発生時の膨張変位(以降、 Δl_{cr2})は、隣接する鉄筋からそれぞれ進展する水平ひび割れが合流する要素の内、最も早く最大主ひずみが急増した時の変位とした。はく落発生時の膨張変位(以降、 Δl_{sp2})は、隣接する鉄筋からそれぞれ進展する水平ひび割れが合流する要素の内、最も遅く最大主ひずみが急増した時の変位とした。すなわち、隣接する鉄筋間全てで水平方向のひび割れが貫通した時の変位を Δl_{sp2} とした。

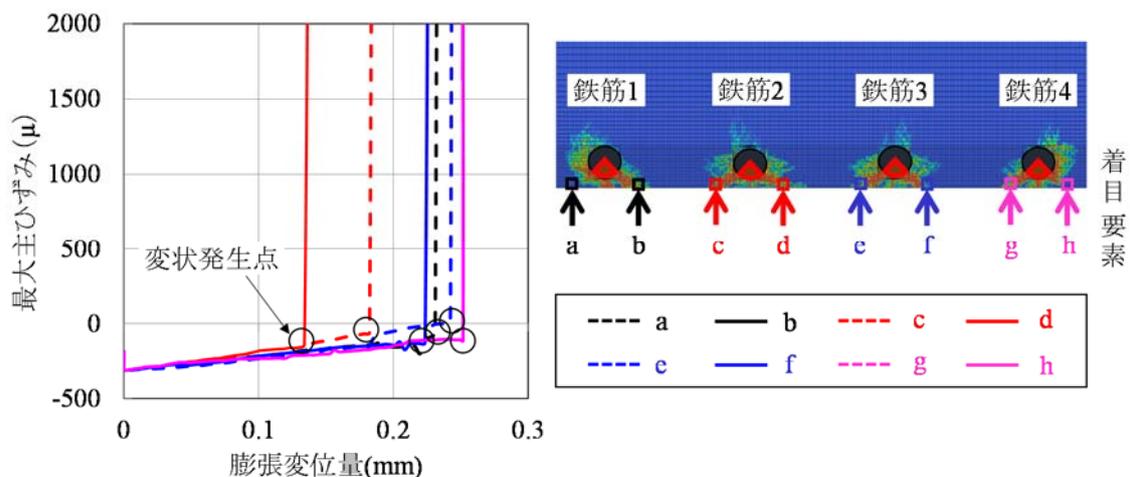


図 3.3.8 着目要素毎の最大主ひずみの推移

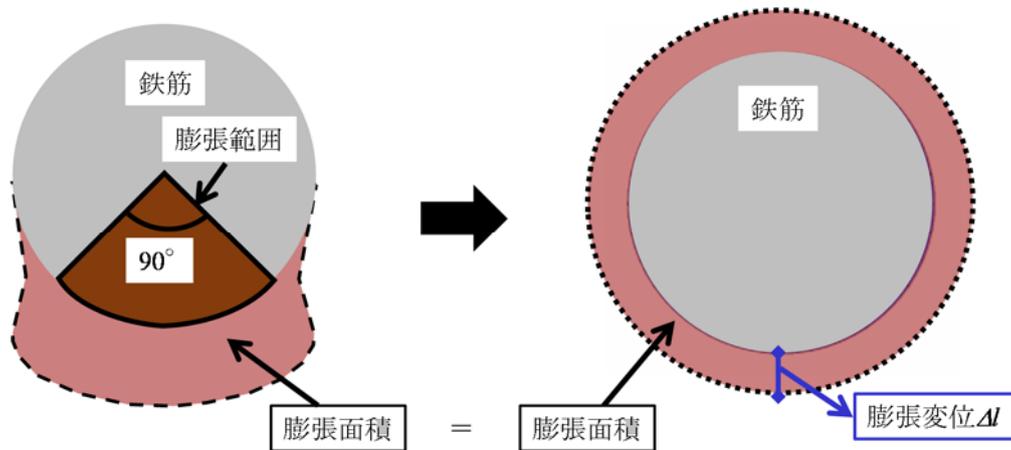


図 3.3.9 膨張変位

(2) かぶりの影響

図 3.3.10 にかぶり c と変状発生時の膨張変位 Δl の関係を、図 3.3.11 にかぶりと鉄筋径の比 c/ϕ と変状発生時の膨張変位 Δl の関係を示す。なお、図 3.3.10 にはコンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さの限界値 S_{lim} (式(1.1.8))および安全余裕度を乗じない $S_{lim}/0.3$ を併記した。かぶり 35mm 以上の上限は考慮していない。 S_{lim} は、膨張変位量ではなく、鉄筋腐食深さであるが、腐食生成物の体積膨張倍率を 2.0 と仮定すると、膨張変位量は鉄筋腐食深さと近い値となると考えられる。図より Δl_{cr1} および Δl_{sp1} は、かぶりが大きいほど増加する。 S_{lim} は、はく離ひび割れ形態の変状発生時の膨張変位を安全側に評価していることがわかる。

参考に、 Δl_{cr1} および Δl_{sp1} の切片を 0 として最小二乗法による一次回帰式を示す。既往の研究では、ひび割れおよびはく落発生時の鉄筋腐食深さは、簡略化され c/ϕ を用いて定式化されることが多いが、本解析では、 c/ϕ と Δl の関係は明確ではない。

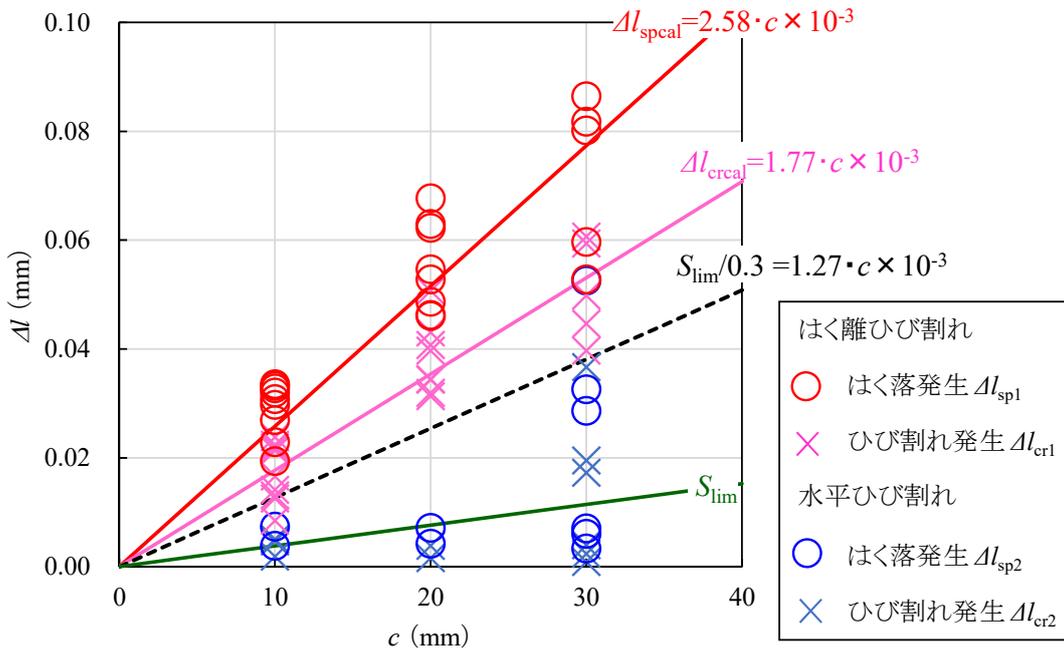


図 3.3.10 かぶりと変状発生時の膨張変位の関係

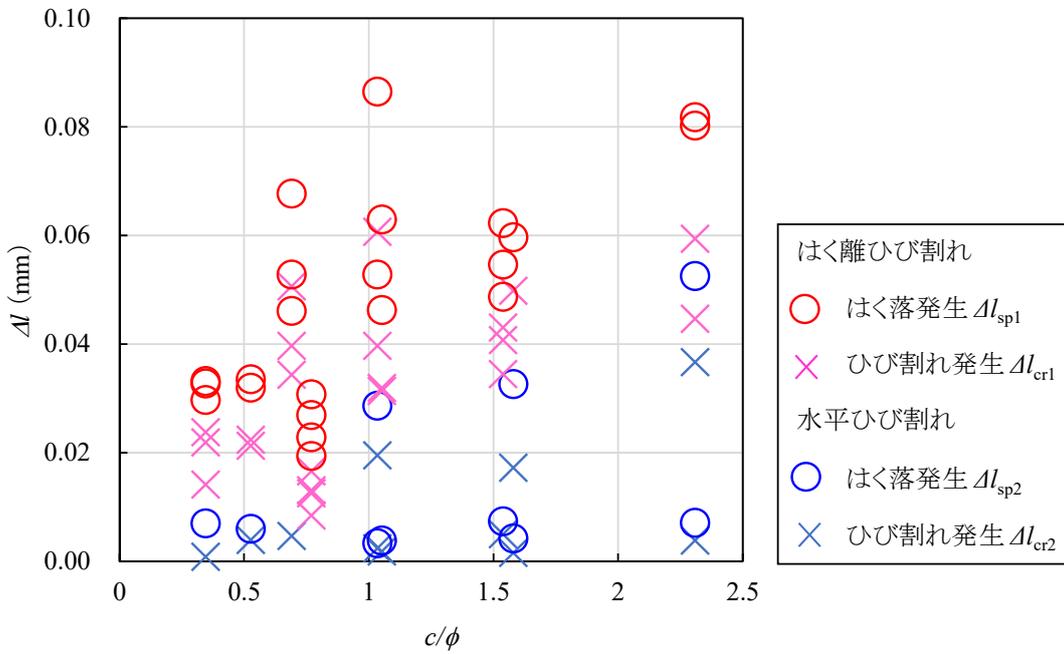


図 3.3.11 かぶりと鉄筋径の比と変状発生時の膨張変位の関係

(3) 鉄筋のあきの影響

図 3.3.12 に、変状発生時の膨張変位 Δl と鉄筋のあきの 1/2 の関係を示す。また、図 3.3.13～図 3.3.15 には、かぶり 10, 20, 30mm 毎の変状発生時の膨張変位 Δl と鉄筋のあきの 1/2 の関係を示した。図 3.3.13～図 3.3.15 には、図 3.3.6 より得られたはく離ひび割れ形態と水平ひび割れ形態の閾値 $c/0.6 = (c.t.c - \phi)/2$ 、および c を示した。また、併せて、コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さの限界値 S_{lim} (式 (1.1.8)) および安全余裕度を乗じない $S_{lim}/0.3$ を併記した。図 3.3.13～図 3.3.15 より、全てのかぶりにおいて、はく離ひび割れ形態となる $c/0.6 \leq (c.t.c - \phi)/2$ の場合には、 Δl は、 $(c.t.c - \phi)/2$ によらずほぼ一定であり、鉄筋のあきの影響よりも図 3.3.10 からわかるようにかぶりの影響を受けることがわかる。図 3.3.15 に示すかぶり 30mm の結果に着目すると、 $(c.t.c - \phi)/2 < c/0.6$ の場合、 $(c.t.c - \phi)/2$ が小さいほど Δl が低下する。さらに、 $(c.t.c - \phi)/2 < c$ となると、図 3.3.16 に示す水平ひび割れ形態におけるかぶりと変状発生時の膨張変位の関係から、 Δl はかぶりの影響を受けなくなることがわかる。これは、 $(c.t.c - \phi)/2 < c$ の場合には図 3.3.4 に示す水平ひび割れ形態となり、 $c \leq (c.t.c - \phi)/2 < c/0.6$ の場合には図 3.3.5 に示すはく離ひび割れと水平ひび割れ形態の推移帯であるはく離水平ひび割れ形態となるためであると考えられる。

参考に、ひび割れ形態毎に、はく落発生時の膨張変位を基に線形回帰した式 (3.3.1)～(3.3.3) に、ひび割れ発生時の膨張変位を基に線形回帰した式 (3.3.4)～(3.3.6) に示す。また、図 3.3.13～図 3.3.15 に、式 (3.3.1)～(3.3.6) による算定値 ($k_\alpha=1$) を示す。なお、本式は、 k_α により変状発生時の鉄筋腐食深さとしている。図 3.3.17 に示すように、腐食深さは、鉄筋断面に対して腐食が極微小であることを考えると、体積膨張倍率 α を用いて、膨張変位の $1/(\alpha-1) = k_\alpha$ で近似できると考えられる。

$$c/0.6 < (c.t.c - \phi)/2$$

$$\Delta r_{\text{spcal}} = k_\alpha \cdot 2.58 \cdot c \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.1)$$

$$c \leq (c.t.c - \phi)/2 < c/0.6$$

$$\Delta r_{\text{spcal}} = k_\alpha \cdot 1.69 \cdot \{(c.t.c - \phi) - 1.80 \cdot c\} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.2)$$

$$(c.t.c - \phi)/2 < c$$

$$\Delta r_{\text{spcal}} = k_\alpha \cdot 0.17 \cdot (c.t.c - \phi) \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.3)$$

$$c/0.6 < (c.t.c - \phi)/2$$

$$\Delta r_{\text{creal}} = k_\alpha \cdot 1.77 \cdot c \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.4)$$

$$c \leq (c.t.c - \phi)/2 < c/0.6$$

$$\Delta r_{\text{creal}} = k_\alpha \cdot 1.17 \cdot \{(c.t.c - \phi) - 1.82 \cdot c\} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.5)$$

$$(c.t.c - \phi)/2 < c$$

$$\Delta r_{\text{creal}} = k_\alpha \cdot 0.11 \cdot (c.t.c - \phi) \times 10^{-3} \dots\dots\dots (3.3.6)$$

ここに、 Δr_{scal} : はく落発生時の腐食深さ(mm)
 Δr_{creal} : ひび割れ発生時の腐食深さ(mm)
 c : かぶり(mm)
 $c.t.c$: 鉄筋間隔(mm)
 ϕ : 鉄筋径(mm)
 k_α : 体積膨張倍率の影響を表す係数 $k_\alpha=1/(\alpha-1)$
 α : 体積膨張倍率

S_{lim} と本算定式($k_\alpha=1$)を比較すると、本算定式は、 $c/0.6 \leq (c.t.c - \phi)/2$ 以上の場合には、 S_{lim} と同様にかぶりのみを変数とする。図 3.3.10より、本算定式より S_{lim} の方が小さく、 S_{lim} を用いてはく離ひび割れ時の鉄筋腐食深さを安全側に評価できることがわかる。対して、 $c/0.6 \leq (c.t.c - \phi)/2$ の場合には、本式は、鉄筋間隔が小さいほど鉄筋腐食深さが小さくなるが、図 3.3.13～図 3.3.15により、概ね $c \leq (c.t.c - \phi)/2$ であれば、 S_{lim} を用いて水平ひび割れ時の鉄筋腐食深さを概ね評価できることがわかる。さらに、 $c/0.9 \leq (c.t.c - \phi)/2$ であれば、安全側に評価できると考えられる。

ここで、 $c/0.6 \leq (c.t.c - \phi)/2$ であり、水平方向にひび割れが貫通する場合には、本算定式の変状発生定義は、 S_{lim} と異なり、3.3.3(1)b)に示す通り、水平ひび割れが貫通した時であることに留意が必要である。 S_{lim} は、部材表面のひび割れが発生した時である。物質透過に対する抵抗という観点では水平ひび割れの発生と部材表面のひび割れの発生とは異なる。しかし、水平ひび割れの発生がはく落等の危険性を持つことや目視では捉えられないことを考えると、設計において同様に防止すべきひび割れであると考えられる。そのため、水平ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さも S_{lim} で安全側に評価できることを確認することは重要であると考えられる。

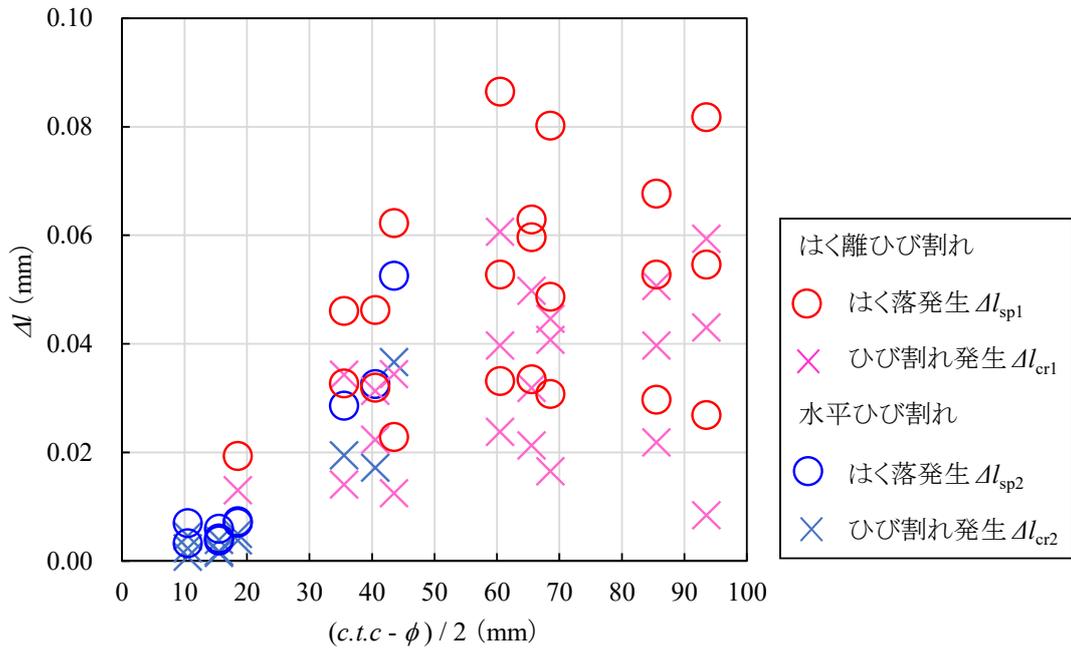


図 3.3.12 変状発生時の膨張変位と鉄筋のあきの 1/2 の関係

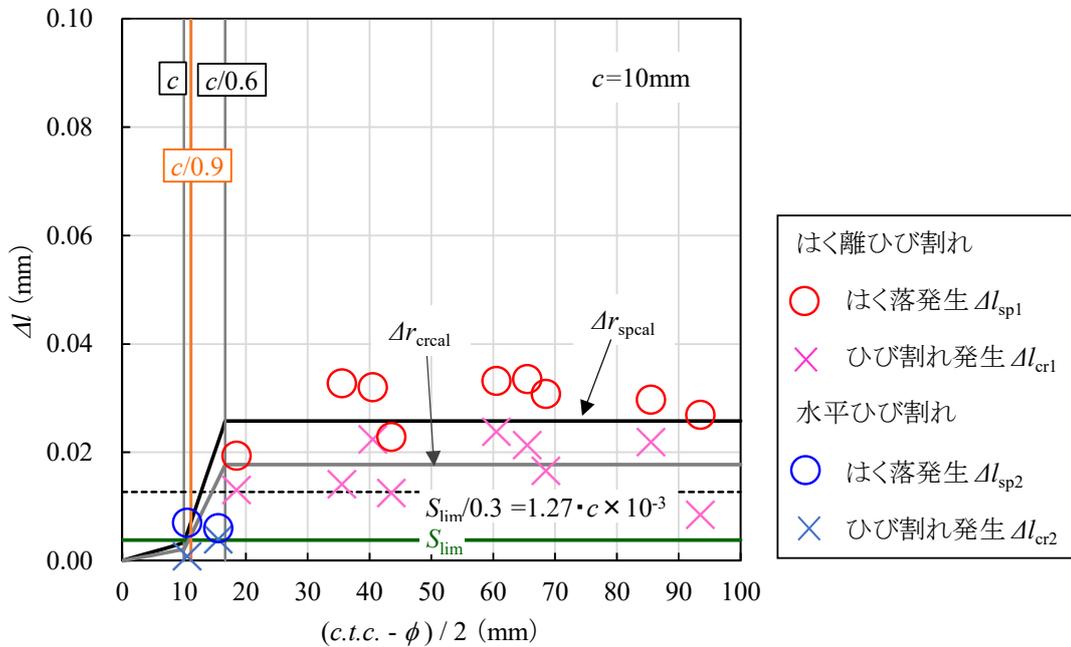


図 3.3.13 かぶり 10mm 変状発生時の膨張変位と鉄筋のあきの 1/2 の関係

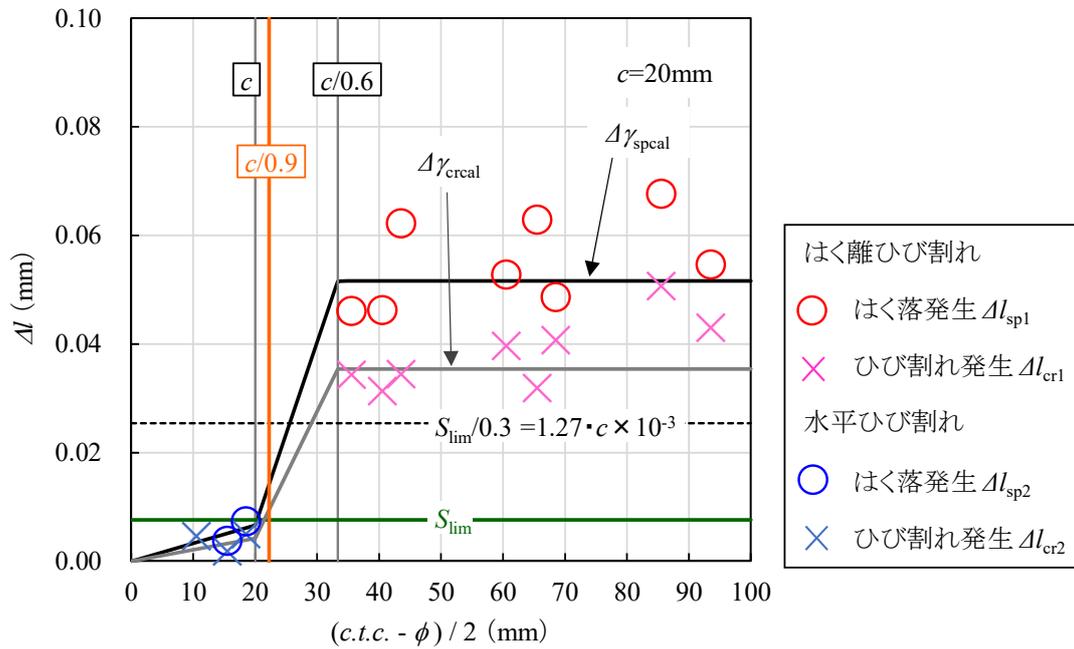


図 3.3.14 かぶり 20mm 変状発生時の膨張変位と鉄筋のあきの 1/2 の関係

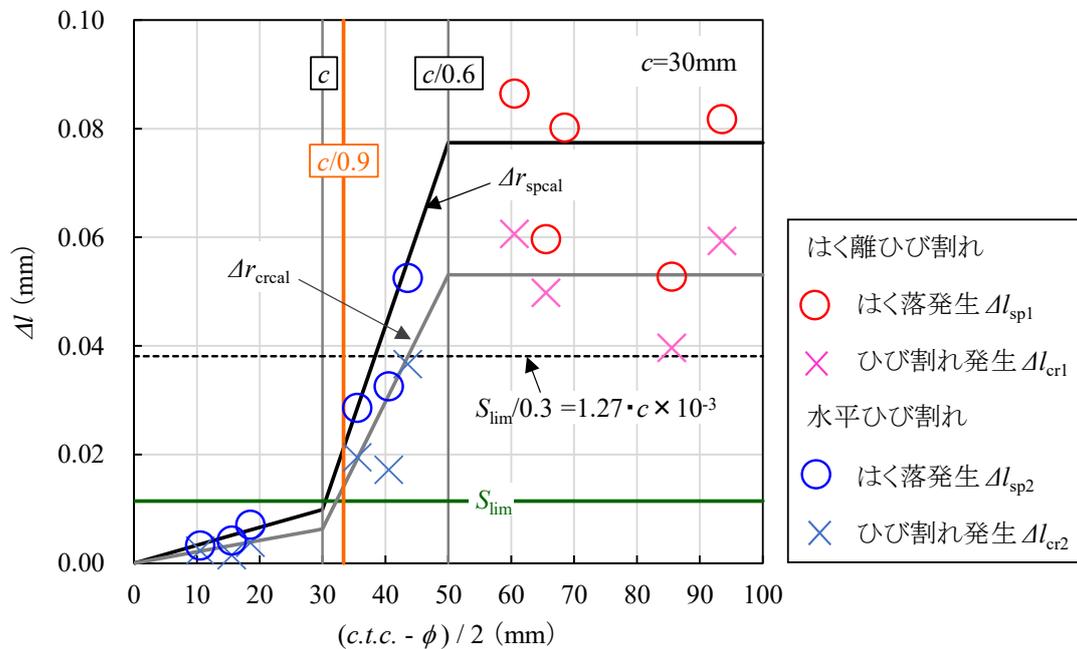


図 3.3.15 かぶり 30mm 変状発生時の膨張変位と鉄筋のあきの 1/2 の関係

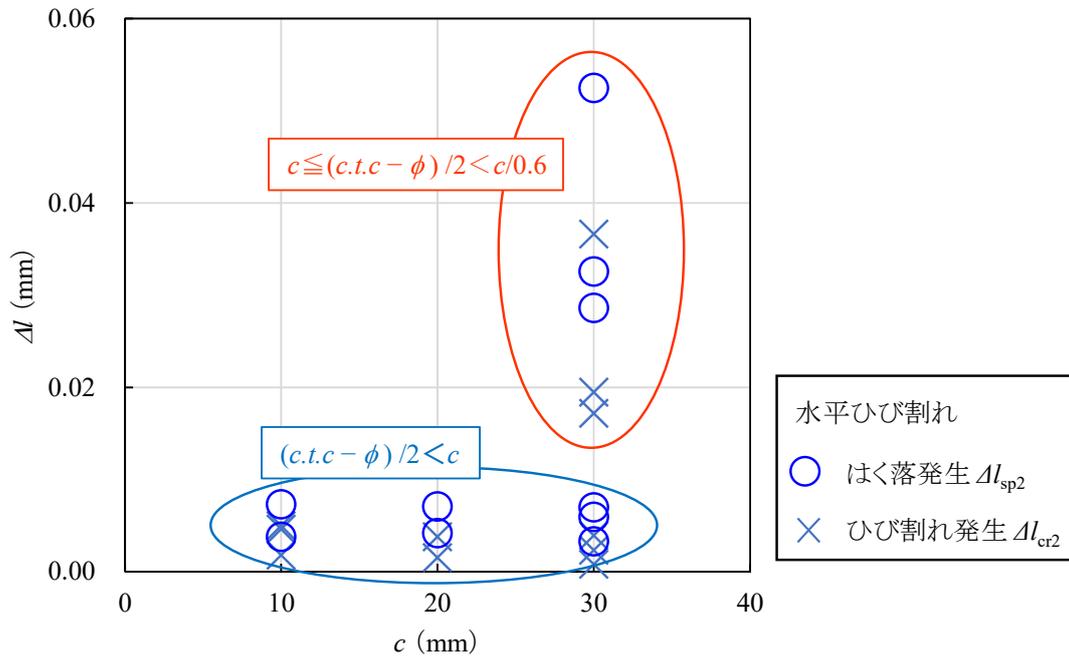


図 3.3.16 水平ひび割れ形態におけるかぶりと変状発生時の膨張変位の関係

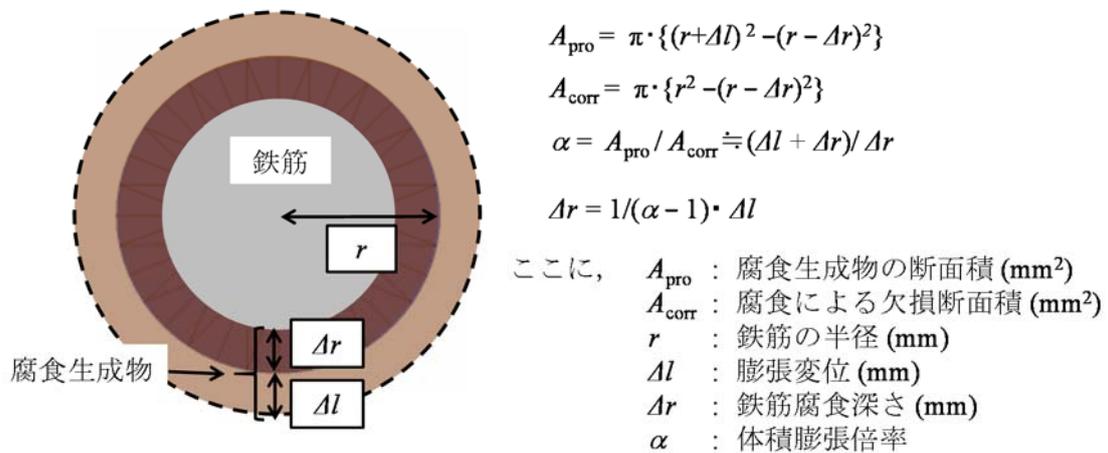


図 3.3.17 膨張変位から鉄筋腐食深さへの近似

3.4 まとめ

コンクリート片のはく落が多数発生していた 30mm 以下のかぶりを対象とし、FEM に基づき、鉄筋を複数配置したモデルを用いて、ひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼすかぶりや鉄筋間隔の影響を検討した。また、FEMの結果とコンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さの限界値との比較検証を行った。

- (1) ひび割れ形態について、かぶりが鉄筋のあきの $1/2$ の 0.6 倍よりも小さい場合には、鉄筋表面から斜め方向にひび割れが隣接する鉄筋から生じたひび割れに影響を受けずにコンクリートの表層に達するはく離ひび割れ形態となり、それ以外の場合には、隣接する鉄筋のそれぞれから進展する水平方向のひび割れが繋がる水平ひび割れ形態となることを明らかとした。
- (2) 変状発生時の鉄筋腐食深さは、はく離ひび割れ形態の場合には、かぶりに依存するが、水平ひび割れ形態の場合には、鉄筋のあきの影響が大きくなり、鉄筋のあきの $1/2$ がかぶりよりも小さい場合には、鉄筋のあきに依存することを明らかとした。
- (3) 上記(1)(2)より、鉄筋のあきの $1/2$ がかぶりよりも小さい場合には、隣接する鉄筋を跨ぐ水平方向のひび割れが発生した。この水平方向のひび割れは、コンクリート内部で発生するため、目視では捉えられない。一方で、これは、はく落を引き起こす可能性があるため、鉄筋に沿ったひび割れやはく離ひび割れ等と同様に防止すべきひび割れである。そのため、変状発生時の鉄筋腐食深さを定式化する場合には、鉄筋のあきの $1/2$ とかぶりの関係を考慮し、水平ひび割れ発生時の鉄筋腐食深さも他のひび割れと同様に、適切に評価できる式とすることが重要である。かぶりのみを変数として定式化されたコンクリート標準示方書[設計編]の鉄筋腐食深さの限界値に対しては、鉄筋のあきの $1/2$ がかぶりの $1/0.9$ よりも大きい条件下において、本解析で得られた変状発生時の鉄筋腐食深さを安全側に評価できた。

第4章 鉄筋腐食に及ぼす水と中性化の影響

4.1 はじめに

本章では、かぶり30mm以下、中性化残り10mm以下で鉄筋腐食によりはく離はく落が発生していた供用中の鉄道RC構造物を対象に調査を行い、中性化深さの傾向を分析すると共に、水掛かりの異なる部位毎にかぶりコンクリートのはく離はく落の発生に及ぼす水と中性化の影響を検討した。また、鉄筋腐食速度を推定する方法を提案し、鉄筋腐食速度に影響を及ぼす要因を検討した。さらに、調査結果に基づき、コンクリート標準示方書[設計編]に示される照査式の検証を行った。本章の構成の概略は以下のとおりである。

(1) 調査概要 (4.2 節)

調査の対象とした構造物の概要や、調査方法、計測位置を示した。

(2) 中性化深さの傾向と分析 (4.3 節)

部位毎に異なる水掛かり等が中性化深さに及ぼす影響を検討した。

(3) 水と中性化残りに応じたはく離はく落発生傾向 (4.4 節)

かぶりコンクリートのはく離はく落の発生傾向から、はく離はく落の発生に及ぼす水と中性化残りの影響を検討した。

(4) 水と中性化残りが鉄筋腐食速度に与える影響 (4.5 節)

供用中の構造物を対象として鉄筋腐食速度を推定する方法を提案し、鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化残りの影響を検討した。

(5) 推定した鉄筋腐食速度と鉄筋腐食深さに対する照査で用いる鉄筋腐食速度の比較 (4.6 節)

推定した鉄筋腐食速度とコンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さに対する照査に用いる鉄筋腐食速度との比較を行った。

(6) はく離はく落発生箇所のかぶりと鉄筋腐食深さに対する照査で算定されるかぶりの比較 (4.7 節)

はく離はく落発生箇所のかぶりとコンクリート標準示方書[設計編]の設計編に示される鉄筋腐食深さに対する照査で算定されるかぶりとの比較から、コンクリート標準示方書[設計編]に示される照査式の検証を行った。

4.2 調査概要

(1) 調査対象構造物

表 4.2.1 に調査対象とした鉄道 RC 高架橋の諸元を示す。調査対象とした鉄道高架橋は、離岸距離 1km 程度であるが飛来塩分の影響が少ない S2 地域⁵⁶⁾に立地し、かつコンクリート内部塩化物イオン濃度が 0.4kg/m^3 以下のコンクリートが使用された、鉄道では一般的な高架橋 A～D である。凍害やアルカリシリカ反応による変状、豆板などは見られなかった。しゅん功後 36～87 年が経過し、鉄筋の腐食により、かぶりコンクリートのはく離はく落が一部に見られた。

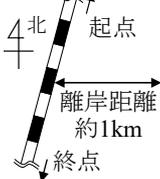
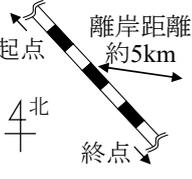
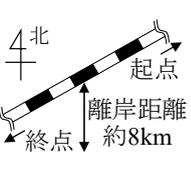
図 4.2.1 に、高架橋 A の概略を示す。調査対象とする部材はラーメン高架橋 2 基 R1, R2 の柱である。R1, R2 は起点方から連続しており、構造形式は 1 層 2 柱 3 径間のビームスラブ式である。年代は不明であるが線増により、3 柱式複線高架橋に拡幅されている。そのため、左柱は雨や日射などを受けるが、調査時には右柱は線増部により雨や日射が遮られていた。なお、設計図書からコンクリートの最大水セメント比は 55%、設計圧縮強度は 24N/mm^2 、粗骨材の最大寸法は 25mm であった。

図 4.2.2 に、高架橋 B の高欄の概略を示す。対象部位は、ラーメン高架橋の高欄の外面である。H 鋼支柱式の RC 高欄であるが、図中の地覆部と H 鋼支柱部を除く高欄上端から 1500mm の RC 部を対象とした。軸方向鉄筋が最外縁に配置される。本高架橋は市街地に立地するが、住宅等は高架橋の側道や空き地を跨ぎ立地し、地表面から片持ちスラブ下面までの高さは約 6m であることから、高欄周辺に雨や日射を遮るものはない。なお、設計図書から設計圧縮強度は 24N/mm^2 、粗骨材の最大寸法は 25mm であった。最大水セメント比の記載はなかった。

図 4.2.3 に、高架橋 C の概略を示す。対象部位は、ラーメン高架橋の中間スラブの下面である。ビームスラブ式のラーメン高架橋であるが、本高架橋の特徴は、起点を背にして右側に片持ちスラブおよび縦梁が設置されていないことである。一般的に片持ちスラブおよび縦梁により中間スラブ下面に雨が掛かる可能性は低いですが、右側の中間スラブ下面の端部付近には、地覆外面から流れ落ちる雨などから水が供給される可能性がある。なお、設計図書が現存しないため、配筋、水セメント比および設計圧縮強度、粗骨材の最大寸法などの設計条件は不明である。配筋は、現地調査から橋軸直角方向の鉄筋が最外縁に配置され、鉄筋径は $\phi 19$ で、鉄筋間隔は 300mm であった。

図 4.2.4 に、高架橋 D の概略を示す。対象部位は、単線並列単純 T 形 2 主桁の主梁下面である。本高架橋は市街地に立地するが、片持ちスラブの幅が 2.14m であることから主梁下面に雨が掛かることは少ないと考えられる。また、桁間の遊間部からの水の供給もないため、主梁下面への水の供給は少ないと考えられる。なお、スターラップの設計かぶりは図面が不鮮明で読み取れなかった。また、水セメント比や粗骨材の最大寸法などの設計条件は不明である。

表 4.2.1 調査対象とした鉄道 RC 高架橋の諸元

高架橋	A	B	C	D
しゅん功年	1973	1979	1927	1962
調査時経年	36	36	87	48
構造種別	ビームスラブ式ラーメン高架橋			RC 桁
部材	柱	高欄	中間スラブ	主梁
部位	4 面 ^{※1}	外面	下面	下面
中性化深さ 平均, [計測箇所数]	0.0~32.2 mm 20.2mm, [140]	1.3~17.3 mm 9.1mm, [34]	27.0~105.3 mm 59.5mm, [169]	10.4~32.2 mm 20.1mm, [6]
塩化物イオン濃度 ^{※2} 平均, [計測箇所数]	0.16~0.30 kg/m ³ 0.23 kg/m ³ , [3]	0.23 kg/m ³ 以下 0.23 kg/m ³ , [19]	—	0.19~0.40 kg/m ³ 0.33 kg/m ³ , [6]
圧縮強度 ^{※3} 平均, [計測箇所数]	32, 38 N/mm ² 35 N/mm ² , [2]	—	23.8 N/mm ²	30~41 N/mm ² 38 N/mm ² , [6]
対象とする最外縁の鉄筋 径, 間隔 設計かぶり	せん断補強鉄筋 D13, 150 or 300mm 32.5mm	軸方向鉄筋 D10, 300mm 30mm	橋軸直角方向鉄筋 φ19, 300mm —	スターラップ D13, 200 or 300mm 30mm
かぶり 平均, [メッシュ数]	0~90mm 38mm, [10764]	0~43mm 16mm, [602]	10~49mm 32mm, [848]	2~41mm 19mm, [3943]
日平均気温 ^{※4}	16.2 °C	16.6 °C	16.2 °C	15.8 °C
平均湿度 ^{※4}	71.4 %	71.6 %	69.3 %	71.6 %
年合計降水量 ^{※4}	3347.9 mm	1921.8 mm	1536.2 mm	2098.3 mm
線路方向の方位 および 離岸距離				
周辺状況 (起点を背に左右)	住居, 空き地	市街地	市街地	市街地

※1 柱の起点面・終点面・外面・内面の 4 面。

※2 塩化物イオン濃度は、集塵装置付きドリルを用いて、中性化による塩分濃縮の影響を受けていないと考えられるコンクリート内部(高架橋 A, D ではコンクリート表面からの深さ 60~80mm, 高架橋 B では 80~100mm)で試料を採取し、電位差滴定法 (JIS A 1154) により測定。

※3 高架橋 A は現地採取した φ50mm のコンクリートコアによる圧縮試験値, 高架橋 D は東京都建築材料検査局式⁵⁷⁾による反発度からの推定値, 高架橋 C は同一高架橋である文献⁵²⁾に示される表-4 中の C 高架橋の値を参考。

※4 日平均気温, 平均湿度, 年合計降水量は高架橋近傍における気象庁の観測データの過去 5 年平均。

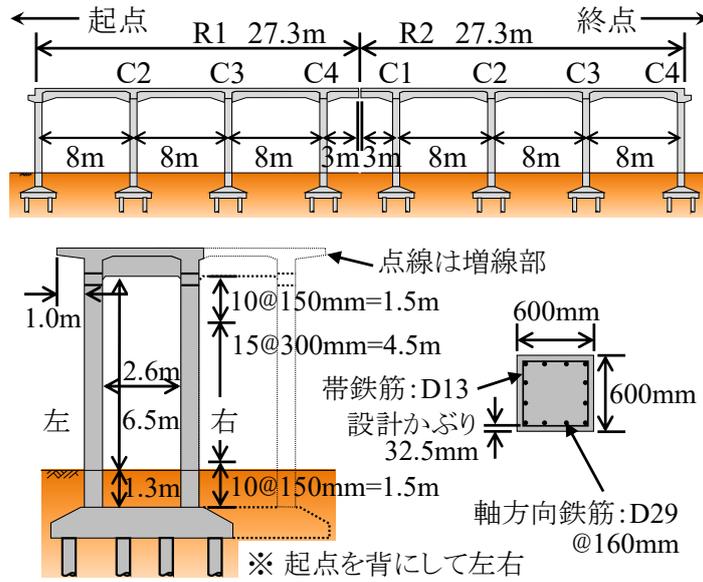


図 4.2.1 高架橋 A の概略

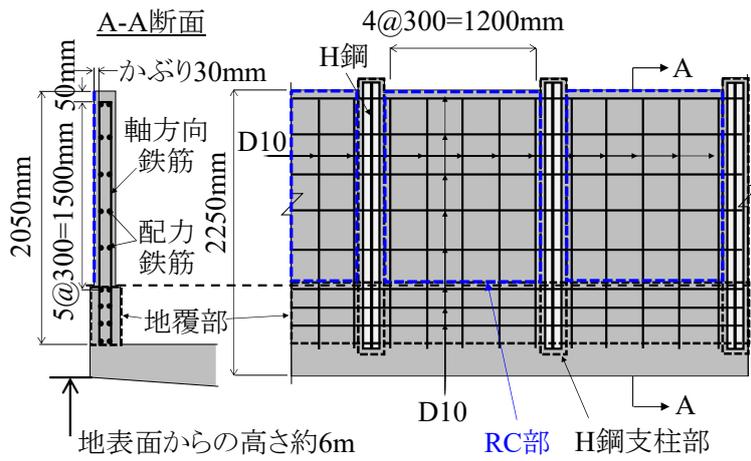


図 4.2.2 高架橋 B の高欄の概略

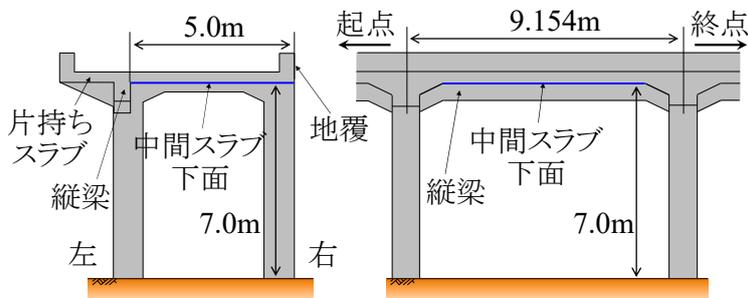


図 4.2.3 高架橋 C の中間スラブ下面の概略

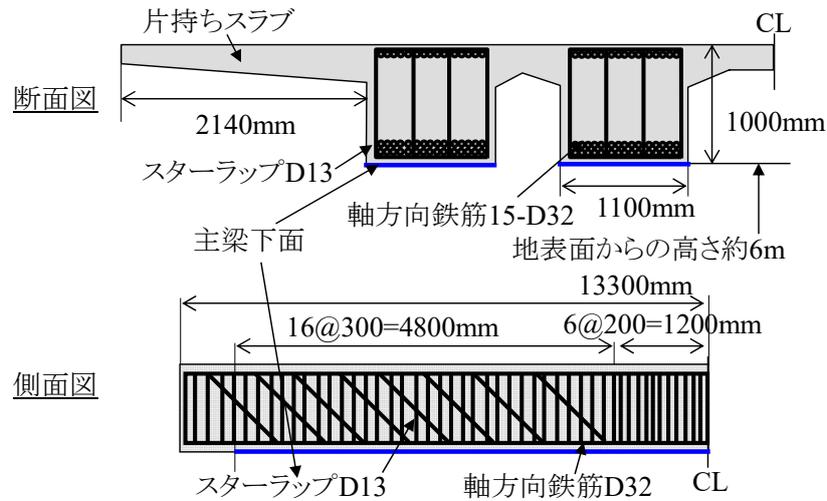


図4.2.4 高架橋Dの主梁下面の概略

(2) 調査方法

図4.2.5に、高架橋Aの柱を例として調査概要を示す。本調査では、最外縁の鉄筋の直上にメッシュを作成し、目視と打音からメッシュ毎にはく離はく落の有無を整理した。メッシュの幅は、かぶりの施工誤差や配筋状況を踏まえて、柱では40mm、中間スラブでは150mm、他では100mmとした。

かぶりは、電磁波レーダー法を用いて鉄筋位置を確認した後に、最外縁の鉄筋を対象として、背面の鉄筋の影響を受けない位置に測線を設け、電磁誘導法を用いて計測した。測線下以外の単位メッシュ毎のかぶりは、既往の研究⁵⁸⁾を参考に補間式を用いて算定した。

中性化深さは、ビット径 24mm の集塵装置付きドリルを用いて削孔を行い、フェノールフタレイン 1%溶液を噴霧して 1 孔につき孔内の上下左右 4 箇所 でコンクリート表面から発色点までの距離を計測し、その平均を計測 1 箇所あたりの中性化深さとした。単位メッシュ毎の中性化深さは、最もメッシュに近い箇所で計測した中性化深さとした。

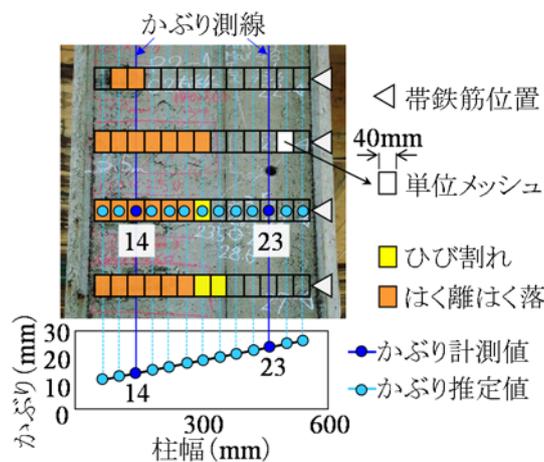


図 4.2.5 調査概要(高架橋 A の例)

(3) 計測位置

図4.2.6に、高架橋Aの計測位置を示す。柱の高さ方向の調査を詳細調査とし、柱下部のみの調査を簡易調査とする。詳細調査は、コンクリートのはく離はく落が多数観察されたR1C4, R2C1～C3の左柱計4本で実施した。詳細調査における中性化深さの計測位置および箇所数は、R1C4, R2C3では横梁下面0.5mから0.75m間隔で計8箇所とし、R2C1, R2C2では横梁下面0.5mから1.5m間隔で計4箇所とした。簡易調査における中性化深さの計測位置および箇所数は、詳細調査対象以外の左柱3本、右柱7本に対して、横梁下面5.0mの位置(地上1.5m)で1箇所とした。なお、中性化深さは、所定の柱の高さにおいて、内面、終点面、起点面、外面の各方向4面で計測した。かぶりは、詳細調査では横梁下面0.5m～地表面付近で、簡易調査では地表面付近～地表面上2.0m付近で、軸方向鉄筋の影響を受けない図に示す柱側面部から140mm位置の2測線で計測した。なお、単位メッシュ毎のかぶりは、2測線での計測結果を基にかぶりが直線上に変化していると仮定して1次補間式を用いて算定した。

図4.2.7に、高架橋Bの計測位置を示す。中性化深さは、詳細調査として高欄上部下部の計4箇所で、簡易調査として高欄上部1箇所で計測した。かぶりは、上中下の3測線で計測した。なお、単位メッシュ毎のかぶりは、3測線での計測結果を基に2次補間式を用いて算定した。表4.2.1の線路方向の方位に示すように、南面と北面を向く面があることから、北面で詳細調査4枚、簡易調査6枚を、南面で詳細調査2枚、簡易調査3枚を対象とした。

図4.2.8に、高架橋Cの計測位置を示す。中性化深さは、領域Aでは2測線において約50mmピッチで、領域B, Cでは2箇所で計測した。かぶりは、スラブ毎に5測線で計測した。なお、単位メッシュ毎のかぶりは、4測線での計測結果を基に4次補間式を用いて算定した。

図4.2.9に、高架橋Dの計測位置を示す。名称は、起点を背にして、右からG1, G2, G3, G4とした。中性化深さは、主梁1本に付き1箇所を基本として計測した。かぶりは、2測線で計測した。なお、単位メッシュ毎のかぶりは、2測線での計測結果を基に1次補間式を用いて算定した。

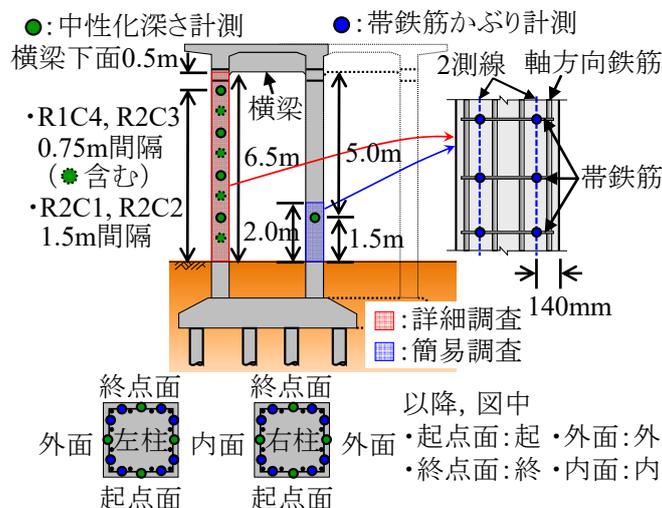


図 4.2.6 高架橋 A の柱の計測位置

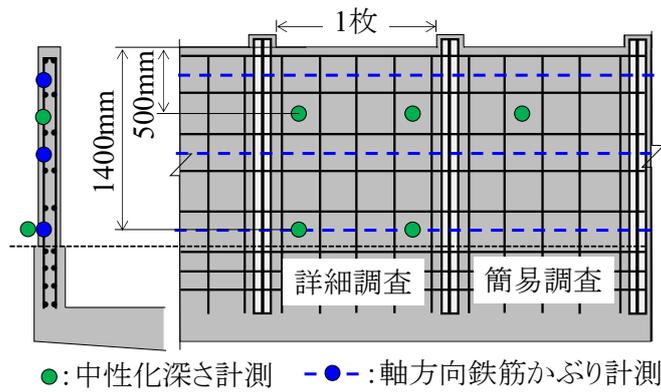


図 4.2.7 高架橋 B の高欄外面の計測位置

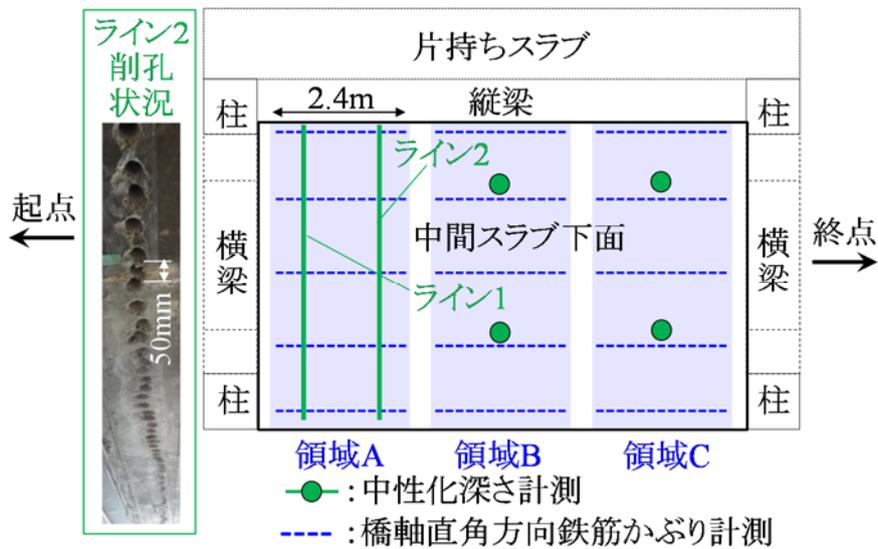


図 4.2.8 高架橋 C の中間スラブ下面の計測位置

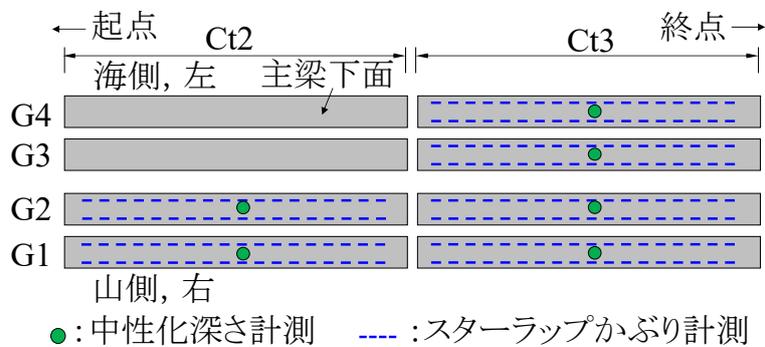


図 4.2.9 計測位置(高架橋 D の主梁下面)

4.3 中性化深さの傾向と分析

(1) 高架橋 A, 柱 4 面

図4.3.1に、横梁下面5.0mで計測した中性化深さを示す。併せて、中性化深さの推定式(式(1.1.3))による値を示した。推定において、水セメント比は設計図書に従い55%とし、コンクリートの材料係数 γ_c はブリーディングによる品質低下がない場合の1.0とし、環境の影響の程度を表す係数 β_e は乾燥しやすい環境の1.6とした。なお、安全係数は1.0とした。R1, R2の違いはなく、本高架橋は同等の材料、施工および環境条件にあると考えられる。

図4.3.2に、柱下部と打継目直下の中性化深さの関係を示す。なお、柱下部は横梁下面5.0m、打継目直下は横梁下面0.5mの値である。打継目直下でのブリーディングによるコンクリートの品質低下と柱下部の自重による締固め等により、柱下部と比較し、打継目直下では中性化深さが増加する傾向が報告されているが³⁾、本調査では柱下部と打継目直下の中性化深さに上記の傾向は認められなかった。雨が降った後に、柱の上端を観察すると、写真4.3.1のように、片持ちスラブの水切り不良により、片持ちスラブ下面から縦梁、柱上端に至るまで流水跡があった。打継目直下の中性化の進行が低下した理由の一つに、片持ちスラブの水切り不良により、地覆に掛かる雨が片持ちスラブをつたって柱上部にまで至り、打継目直下において流水による水の供給があった可能性が考えられる。柱下部では直接雨が掛かると考えられるが、柱下部と比べて柱上部は日射を受けにくいいため、柱上部に水が供給された場合には、柱下部と柱上部では水の影響が異なると考えられる。

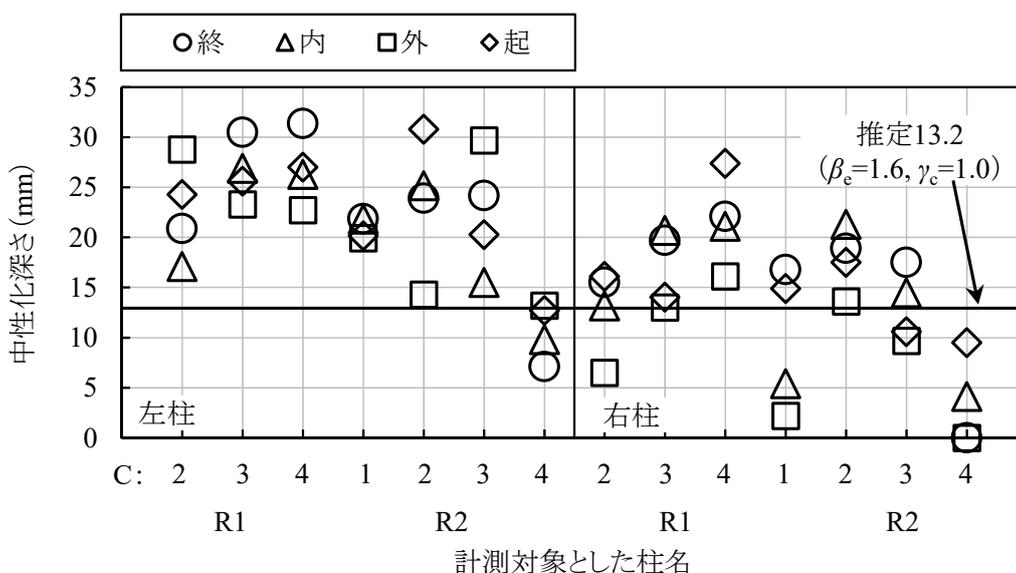


図 4.3.1 中性化深さ(横梁下面 5.0m)

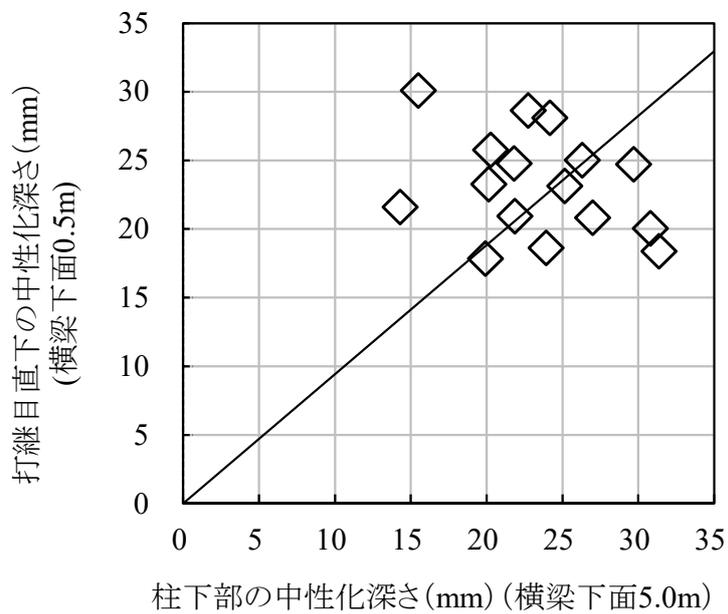


図 4.3.2 柱下部と打継目直下の中性化深さの比較



写真 4.3.1 柱上端の流水跡

(2) 高架橋B, 高欄外面

図4.3.3に、北面と南面の中性化深さを示す。高欄上部・下部それぞれで測定した中性化深さの平均値を比較すると、高欄上部では北面11.5mm、南面8.6mm、高欄下部では北面6.7mm、南面5.5mmとなり、南面よりも北面で中性化深さが大きい。

図に併せて、中性化深さの推定式(式(1.1.3))による値を示した。推定に用いた水セメント比は55%とした。安全係数は1.0である。高欄上部の計測値の平均は10.1mmであり、 $\beta_e=1.0$ (乾燥しにくい環境)、 $\gamma_e=1.3$ とした推定値10.8mmに近い。一方で、高欄下部の計測値の平均は6.1mmであり、 $\beta_e=1.0$ (乾燥しにくい環境)、 $\gamma_e=1.0$ とした推定値8.3mmに近い。これらの推定値と計測値の差は最大で7.0mmであるが、推定式¹²⁾の誤差が10.0mm程度となる場合があること³⁾、また $\beta_e=1.6$ (乾燥しやすい環境)では計測値の平均をいずれも上回る事、高欄の周辺に雨を遮るものはないことから、高欄外面は、湿潤に近い環境にあると考えられる。

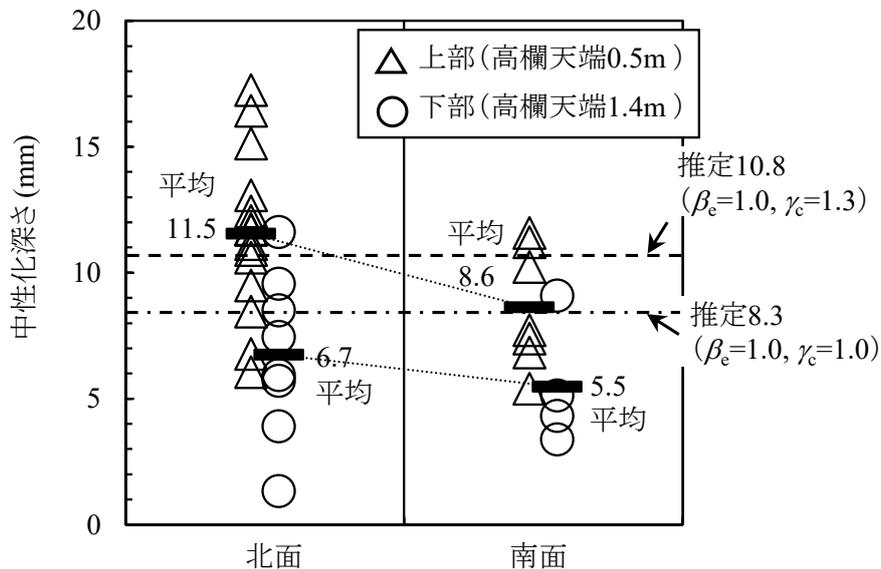


図 4.3.3 北面と南面の中性化深さ

(3) 高架橋 C, 中間スラブ下面

図4.3.4に、中性化深さを示す。横軸は縦梁側面からの距離とした。中間スラブ中央の中性化深さと比べて中間スラブ端部の中性化深さが小さい。縦梁側面から4.4~5.0mでは、写真-2に示すように流水跡があったことから雨水の影響を受けていることが考えられる。

図に併せて、中性化深さの推定式(式(1.1.3))による値を示した。水セメント比55%、 $\beta_e=1.6$ 、 $\gamma_e=1.0$ 、安全係数は1.0とした推定値と比べて、計測された中性化深さは大きい。領域Aのライン1の中性化深さは平均で60.9mmであるが、推定値との違いが水セメント比であるとすると、水セメント比を85%とした場合の計算値60.9mmとなる。そのため、水セメント比の高いコンクリートが使用された可能性がある。

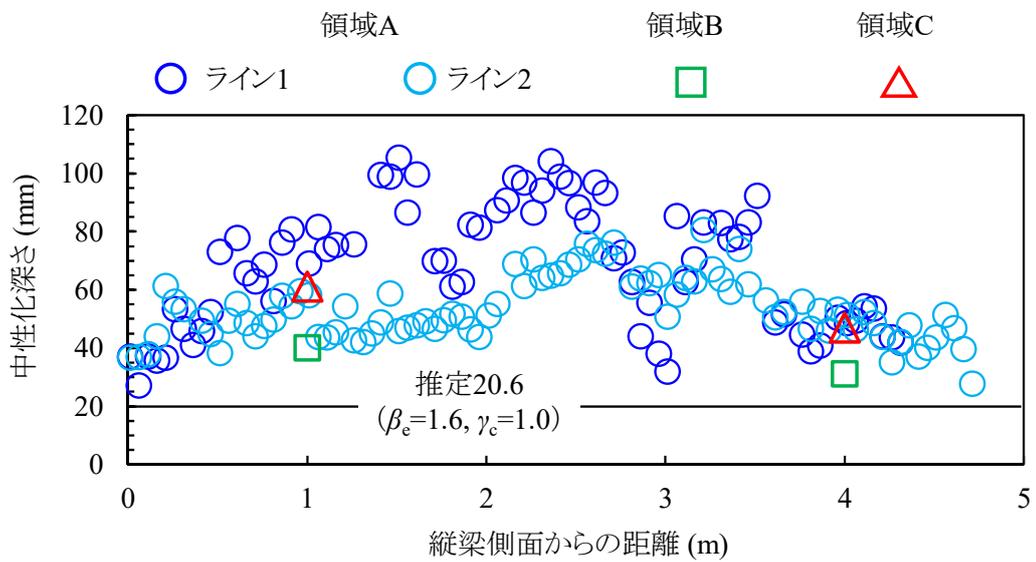


図 4.3.4 中間スラブ下面の中性化深さ

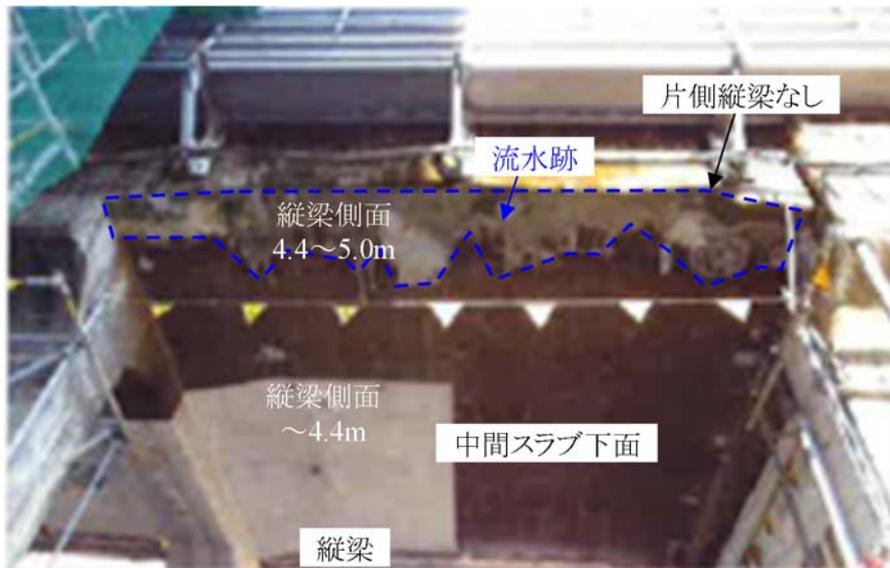


写真 4.3.2 中間スラブ下面(縦梁側面 4.4~5.0m)の流水跡

(4) 高架橋 D, 主梁下面

図 4.3.5 に、主梁下面の中性化深さを示す。平均値は、17.7mm であった。図に併せて、中性化深さの推定式(式(1.1.3))による値を示した。水セメント比 55%, $\beta_e=1.6$, $\gamma_c=1.0$, 安全係数は 1.0 とした推定値は 15.3mm と計測された中性化深さに近い値を示す。また、主梁下面は、片持ちスラブ先端の水切りがあり、桁間の遊間部からの水の供給も目視では観察できない。このことから、主梁下面は乾燥に近い環境にあると考えられる。

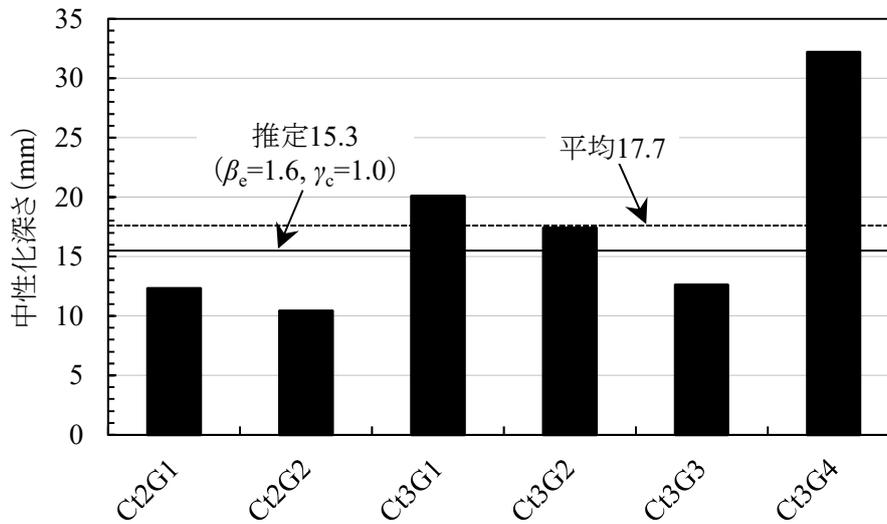


図 4.3.5 主梁下面の中性化深さ

4.4 水と中性化残りに応じたはく離はく落発生傾向

各部位の水掛かりの環境を、4.3 節で示す中性化の進行および目視による水掛かりの状態から、**図 4.4.1**に示すように雨掛かり有、雨掛かり無、流水跡の3つに部位を区分し、部位毎にはく離はく落の発生傾向を分析する。ここでいう雨掛かり無の部位は、雨掛かり有の部位と比べて降雨の影響を受ける可能性が低い部位であり、ここで扱う部位は全て外気に曝された部位である。**図 4.4.2**に、各部位のはく離はく落の発生傾向を示す。図中の凡例の()内に水掛かりの区分を示した。縦軸は中性化残り、横軸はかぶりとした。(a)に示す柱は、雨が掛かる外面での結果を示した。なお、(a)柱外面と(b)高欄外面は雨が掛かる部位であり、(c)中間スラブ下面(縦梁側面～4.4m)と(d)主梁下面は雨が掛からない部位である。(a)柱外面では、横梁下面 1.5m～と片持ちスラブの水切り不良によって水の供給の可能性のある柱上部の横梁下面 0.5～1.5m に区分した。(b)高欄では、南面よりも北面で中性化深さが大きく、日射等の影響が異なる可能性もあることから、北面と南面で区分した。(c)中間スラブ下面では、縦梁側面～4.4m と片持ちスラブと縦梁がなく水の供給がある縦梁側面 4.4～5.0m に区分した。(d)主梁下面では、断面修復など鉄筋腐食が要因で発生した変状に対して施されたと考えられる補修跡があったことから、はく離はく落とは別に整理した。ひび割れは、鉄筋腐食以外の要因で発生している可能性もあることから、はく離はく落のみで整理した。

はく離はく落は、全ての部位で中性化残り10mm以下で発生していた。コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁰⁾では、一般的な水掛かり環境にある部位では腐食開始を中性化残り10mm以下と考え、湿潤状態が長く続く部位では中性化残り10mm以上の時点で腐食が開始していると考えてよいとしている。また、比較的乾燥状態で中性化速度は大きくなるがコンクリートが腐食に必要な水分量以下の含水状態となるような部位または常時湿潤状態で乾湿繰返しがない部位では重大な腐食は生じないと考えてよいとしている。また、建築学会⁵⁹⁾では、既往の研究⁶⁰⁾により、雨が掛かる部位と雨が掛からない部位で鉄筋腐食の程度が等価になるように、中性化残りの制限値を雨が掛かる部位では0mm、雨が掛からない部位では-20mmと定められている。一方で、本調査からはく離はく落が発生する最大の中性化残りに着目すると、雨掛かりの有る柱外面と高欄外面、中間スラブ下面(縦梁側面4.4～5.0m)では中性化残り1～10mmであるのに対し、雨掛かりが無い中間スラブ下面(縦梁側面～4.4m)と主梁下面では中性化残り-5mm、3mmであった。雨掛かり有の部位において、中性化残り10mmではく離はく落が発生しているということは、中性化残り10mm程度となった時には既にはく離はく落するほど腐食が進行し、中性化していなくても水が供給されれば腐食が進行することを示している。また、本章で対象とした部位ははく離はく落が顕在化したものを選定しているため、目視からは雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、結露や吸湿、他部位からの水の浸透などにより一般的な雨掛かりが無い部位よりも水が供給されていると考えられる。

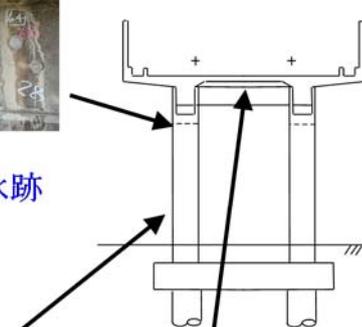
いずれの部位もかぶりや中性化残りが小さいほど変状が発生する傾向にあるが、雨が掛かる柱外面と高欄外面と比べ、雨が掛からない中間スラブ下面と主梁下面ではかぶりや中性化残りが小さくても健全な箇所が多く存在する。かぶりと変状に着目すると、かぶりが小さいほど、変状が発生する傾向にある。なお、**図 4.4.2(c)**に示す中間スラブ下面の変状発生傾向において、かぶり35mm

程度、中性化残り-30mm~-45mmに一部傾向が異なるものがみられる。図4.4.3~図4.4.5に示す中間スラブ下面(図4.2.8に示す領域A~C)の状況とかぶりから、端部においては、かぶりが小さい箇所ではく離はく落しているのに対して、中間部においては、他と比べてかぶりが大きいにも関わらずく離はく落しているものがある。中間部においてはく離はく落したものが、他と傾向が異なる箇所である。経年が87年であり、過去の記録は不明であるが、過去には高架下に家屋があった可能性があり、ケーブル等を吊り下げる金具の腐食によるものである可能性がある。また、セパレータなどの腐食、その他過去の調査・修繕などによるものである可能性がある。一方で、本調査で対象とした鉄筋の腐食であることも否定できない。そのため、ここでは鉄筋の腐食として図中に示すこととした。また、図4.4.2(d)に示す主梁下面の補修跡で中性化残りが10mm以上の箇所があるが、これは、断面修復が変状発生範囲よりも余裕を持って広い範囲で行われるためであると考えられる。

● 柱外面(高架橋A)



● 高欄外面(高架橋B)



● 主梁下面(高架橋C)



● 中間スラブ下面(高架橋D)

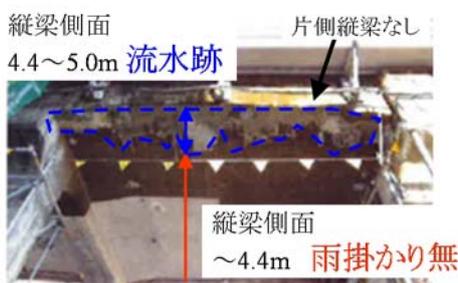
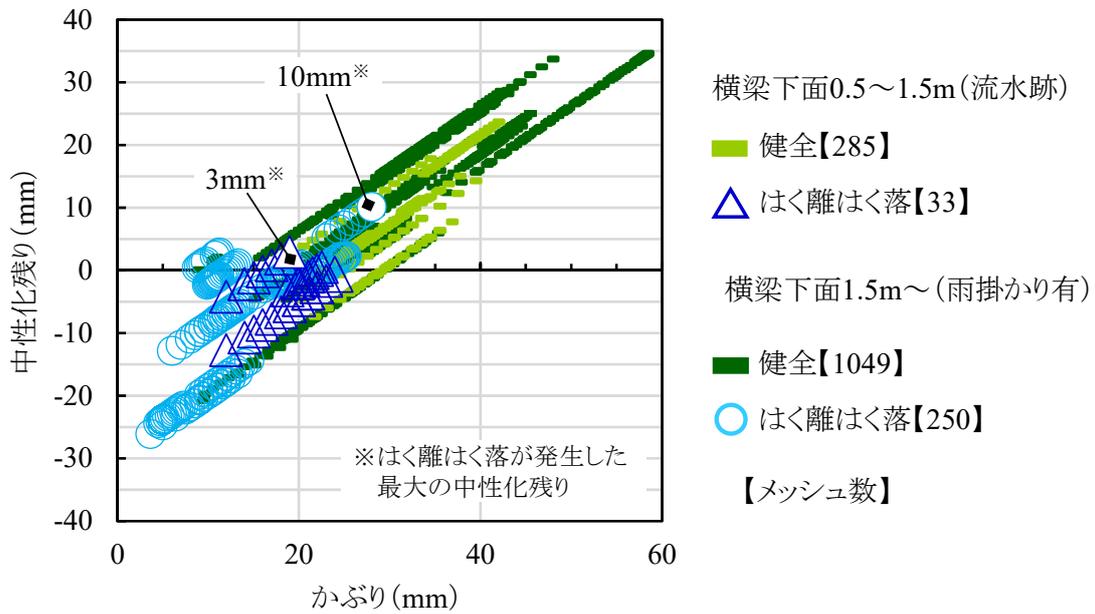
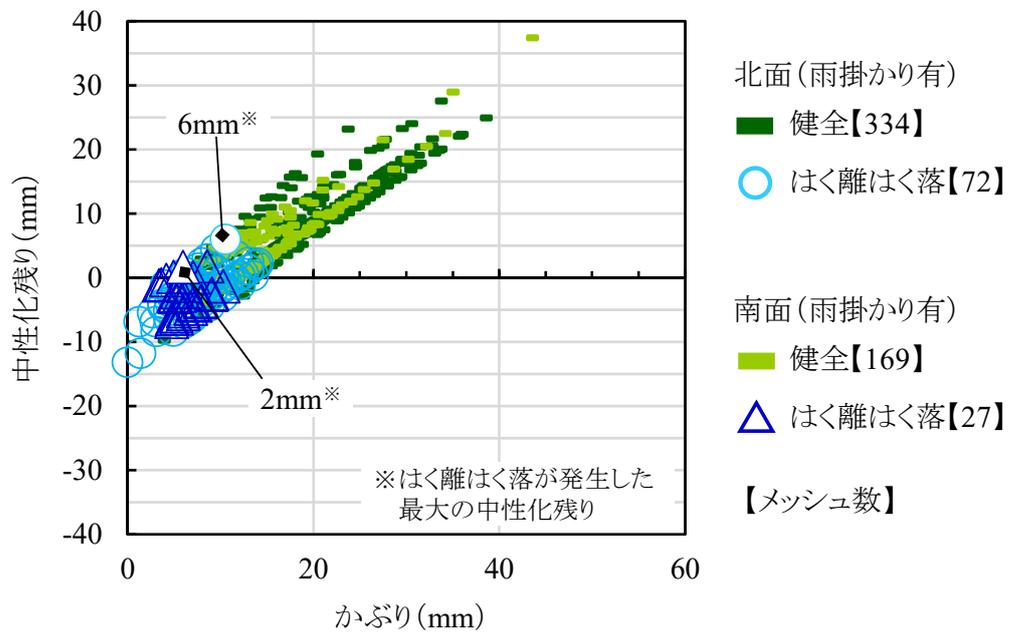


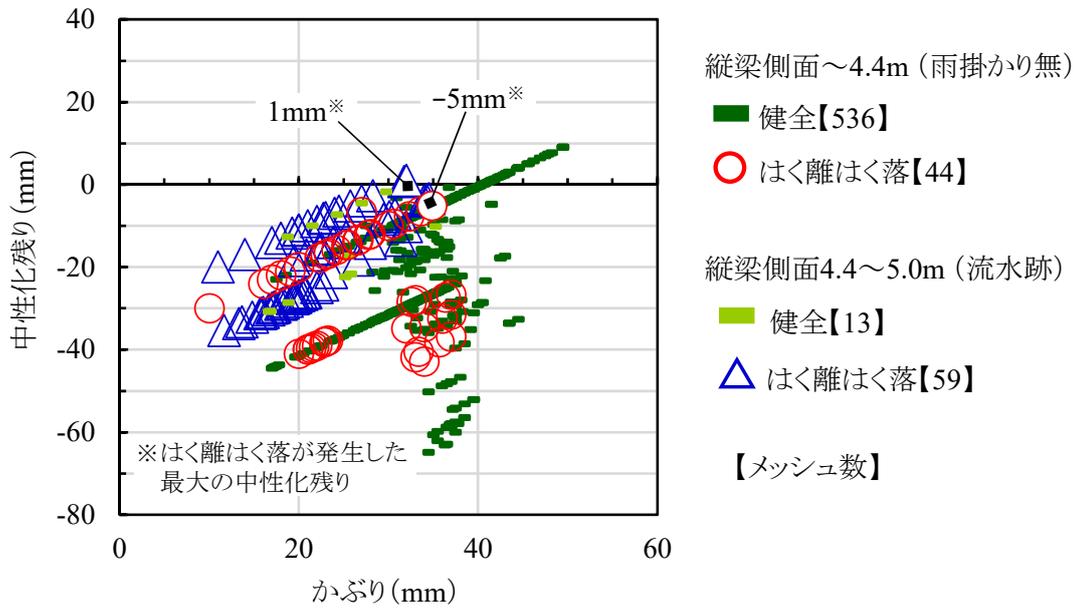
図4.4.1 部位毎の水掛かりの区分(雨掛かり有, 雨掛かり無, 流水跡)



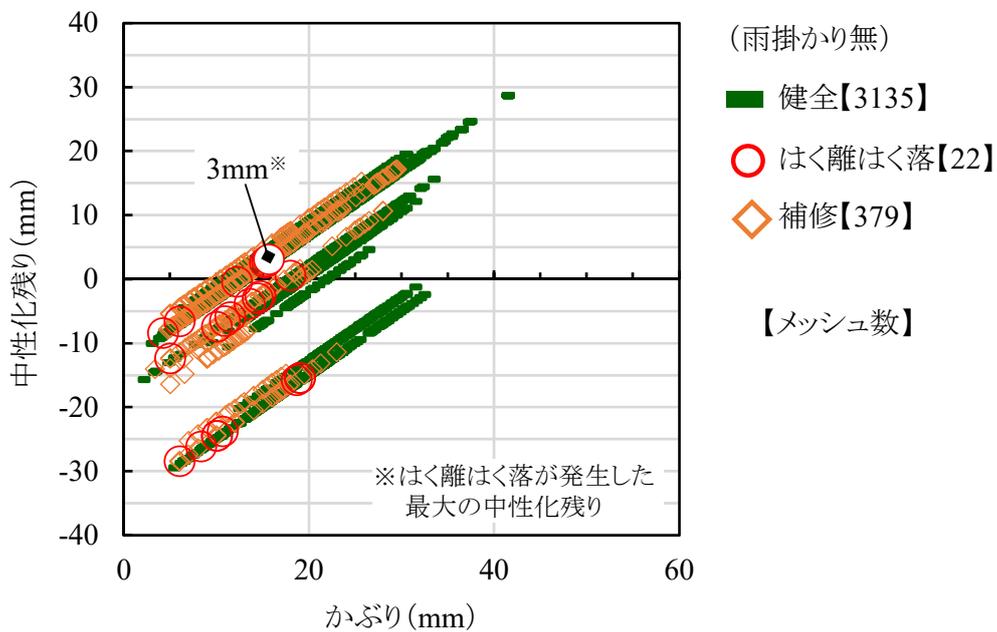
(a) 柱外面(高架橋 A)



(b) 高欄外面(高架橋 B)



(c) 中間スラブ下面(高架橋 C)



(d) 主梁下面(高架橋 D)

図 4.4.2 各部位のはく離はく落の発生傾向



■ はく離はく落
■ ひび割れ ■ 計測不可

-	27	-	30	-	27	-	32	36	33
-	28	-	31	-	28	-	32	36	33
-	29	-	32	-	29	-	33	36	33
-	30	-	32	-	30	-	33	36	32
-	31	-	33	-	31	-	34	35	32
-	32	-	33	-	32	-	34	35	32
-	33	-	34	-	33	-	35	35	31
-	34	-	35	-	34	-	35	35	31
-	35	-	35	-	35	-	36	34	30
33	36	35	36	34	36	34	36	34	30
33	37	35	36	34	36	35	35	35	31
33	38	35	37	34	35	35	35	35	32
34	38	36	37	35	36	36	34	36	33
34	38	36	37	36	36	36	33	36	33
35	37	37	36	36	37	37	33	37	34
35	37	37	36	37	37	37	32	37	35
37	37	38	36	38	37	38	33	37	35
38	37	39	37	39	38	39	33	37	36
40	37	40	37	40	38	40	34	37	36
41	37	41	37	41	38	40	35	37	36
43	37	42	38	42	39	41	35	37	37
44	37	43	38	43	39	42	36	37	37
-	-	-	-	-	38	-	35	37	36
-	-	-	-	-	36	-	33	37	36
-	-	-	-	-	35	-	32	36	35
-	-	-	-	-	34	-	31	36	35
-	-	-	-	-	32	-	29	36	34
-	-	-	-	-	31	-	28	36	33
-	-	-	-	-	29	-	26	35	33
-	-	-	-	-	28	-	25	35	32
-	-	-	-	-	27	-	24	35	31
-	-	-	-	-	25	-	22	35	31
-	-	-	-	-	24	-	21	34	30
-	-	-	-	-	23	-	20	34	30

(a) 状況

(b) かぶり

図 4.4.3 中間スラブ下面(高架橋 C) 領域 A



■ はく離はく落
■ ひび割れ
■ 計測不可

23	-	25	-	23	-	17	-	10	-	17	-	22
25	-	27	-	24	-	18	-	12	-	18	-	24
26	-	28	-	25	-	19	-	14	-	19	-	25
27	-	29	-	27	-	20	-	16	-	20	-	26
28	-	30	-	28	-	21	-	18	-	21	-	27
29	-	31	-	29	-	22	-	20	-	22	-	28
30	-	32	-	30	-	23	-	22	-	23	-	29
32	-	34	-	31	-	24	-	24	-	24	-	31
33	36	35	31	33	21	25	29	26	31	25	27	32
34	36	36	31	34	21	26	29	28	31	26	27	33
35	36	37	31	35	21	27	29	30	31	27	27	34
35	36	38	32	36	23	28	30	30	32	28	28	35
36	36	38	33	37	25	28	31	31	34	29	29	36
36	35	39	34	37	27	29	32	31	35	30	30	37
36	35	39	35	38	29	30	33	31	36	31	32	38
36	35	40	36	39	31	31	34	31	37	32	33	38
37	35	40	37	40	33	31	35	32	39	33	34	39
37	34	41	38	40	35	32	37	32	40	34	35	40
37	34	41	39	41	37	33	38	32	41	35	36	41
37	35	41	41	40	39	33	39	33	43	35	36	41
36	36	42	42	40	41	34	40	33	44	35	36	40
36	37	42	44	39	43	35	41	33	45	36	37	40
36	38	42	46	38	45	36	42	33	46	36	37	39
35	39	43	47	38	47	36	43	34	48	36	37	39
35	40	43	49	37	37	37	44	34	49	36	37	38
33	40	40	49	36	37	-	44	34	49	34	37	35
32	-	38	-	35	-	-	-	34	-	32	-	32
30	-	35	-	33	-	-	-	33	-	30	-	29
28	-	32	-	32	-	-	-	33	-	28	-	26
26	-	29	-	31	-	-	-	33	-	26	-	23
25	-	27	-	30	-	-	-	33	-	24	-	20
23	-	24	-	28	-	-	-	32	-	22	-	17
21	-	21	-	27	-	-	-	32	-	20	-	14
19	-	18	-	26	-	-	-	32	-	18	-	11

(a) 状況

(b) かぶり

図 4.4.4 中間スラブ下面(高架橋 C) 領域 B



■ はく離はく落
■ ひび割れ — 計測不可

17	15	29	23	—	33	—	35	—	34
19	17	29	24	—	34	—	34	—	34
21	19	29	24	—	34	—	34	—	34
23	21	29	24	—	34	—	34	—	34
25	23	29	25	—	35	—	33	—	34
27	25	29	25	—	35	—	33	—	34
28	28	28	26	—	36	—	33	—	34
30	30	28	26	—	36	—	32	—	34
32	32	28	27	33	37	33	32	34	34
34	34	28	27	33	37	33	32	34	34
34	34	29	28	33	36	33	32	34	34
35	34	30	30	32	35	34	31	33	33
35	34	31	31	32	34	34	31	33	33
35	35	31	33	31	32	34	31	33	32
35	35	32	34	31	31	34	30	33	32
36	35	33	36	30	30	35	30	32	31
36	35	34	37	30	29	35	30	32	31
35	34	33	35	30	28	35	29	32	30
34	33	32	33	30	28	35	29	32	29
33	32	31	30	30	27	35	28	32	28
32	31	30	28	30	26	35	27	32	27
32	31	29	26	30	26	35	26	32	26
31	30	28	24	—	25	—	25	—	25
30	29	27	21	—	24	—	24	—	24
29	28	26	19	—	24	—	23	—	23
28	27	25	17	—	23	—	22	—	22
27	26	23	17	—	22	—	21	—	22
27	25	22	17	—	21	—	21	—	21
26	23	20	17	—	20	—	20	—	21
25	22	18	16	—	18	—	19	—	21
25	21	17	16	—	17	—	19	—	20
24	20	15	16	—	16	—	18	—	20
23	18	13	16	—	15	—	17	—	20
23	17	12	16	—	14	—	17	—	19

(a) 状況

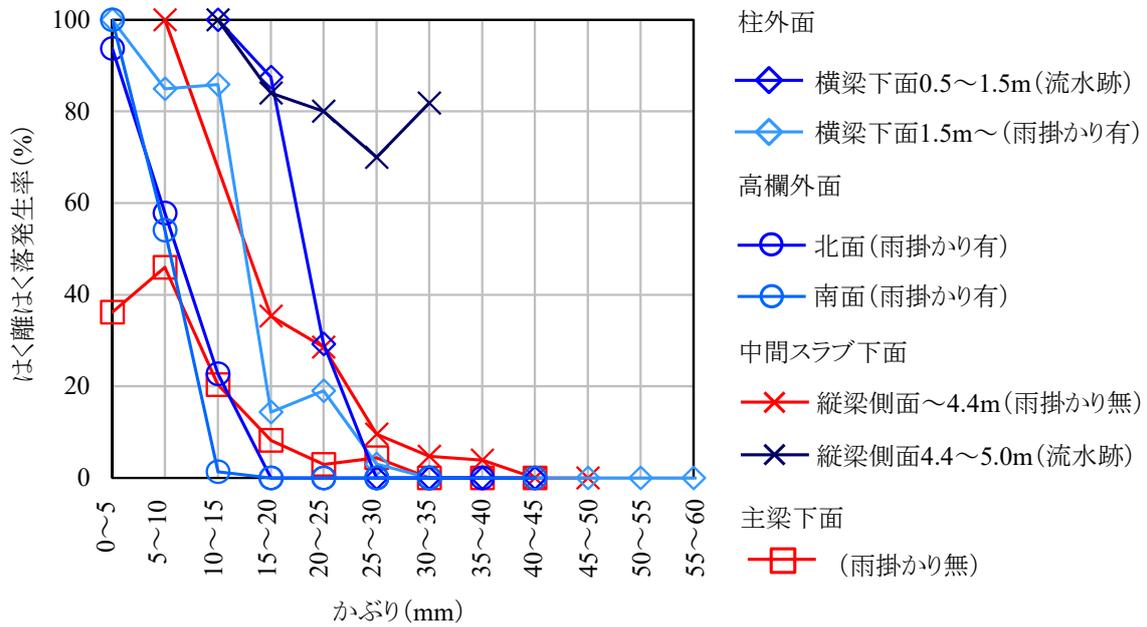
(b) かぶり

図 4.4.5 中間スラブ下面(高架橋 C) 領域 C

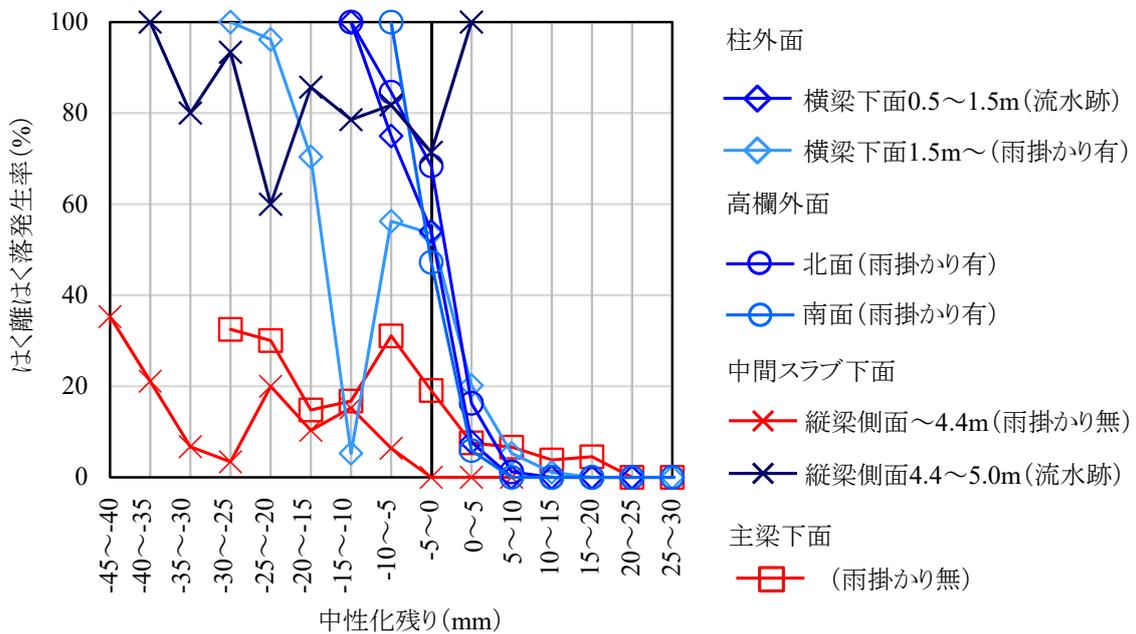
図4.4.6に、各部位のはく離はく落発生率を示す。はく離はく落発生率とは、かぶりと中性化残りを0～5mm、5mm～10mmのように5mm区分に整理し、はく離はく落箇所のメッシュ数を健全箇所とはく離はく落箇所を合計したメッシュ数で割ったものである。ひび割れは、鉄筋腐食以外の要因で発生している可能性もあることから、はく離はく落のみで整理した。はく離はく落の中には、鉄筋腐食以外の要因からひび割れが生じて、その後にはく離はく落したものもあると考えられるが、調査時に観察されたひび割れではあるがその幅は全て0.3mm以下であったため、鉄筋腐食に及ぼすひび割れの影響は小さく⁶¹⁾、はく離はく落の主要因は鉄筋腐食であると考えられる。なお、主梁下面の補修箇所は、全てはく離はく落とした。

かぶりに着目すると、かぶりが小さいほどはく離はく落が発生する確率が増加する。本調査ではかぶりが30mm以下となるとはく離はく落が発生する傾向にあるが、第2章2.3.4でも述べたように、今後、鉄筋の腐食が進行すれば、よりかぶりが大きい箇所ではく離はく落が発生する可能性があることに留意が必要である。一方で、コンクリート表面における含水率の調査から、降雨によるコンクリート表面の乾湿繰返しはコンクリート表面から50mm程度以内で生じ、コンクリート表面に近いほど含水率の増減が大きいことが明らかとなっている⁶²⁾。これを踏まえると、かぶりが小さいほど降雨の影響を受けて腐食が進行し、早期にはく離はく落する可能性が高く、今後かぶりが50mm程度まではく離はく落が生じる可能性があると考えられる。このことから、コンクリートの品質を確保すると共に、50mm程度のかぶりを確保すれば、降雨により表面から水が供給される部位において、鉄筋腐食によるはく離はく落の発生を抑制できると考えられる。

中性化残りに着目すると、雨が掛かる部位である柱外面と高欄外面では、中性化残りが5～10mm以下となるとはく離はく落が発生する確率が増加する。これに対して、雨が掛からない部位である中間スラブ下面の縦梁側面～4.4mと桁下面では、雨が掛かる部位と同様に中性化残りが0～10mm以下となるとはく離はく落発生率が増える傾向にはあるが、雨が掛かる部位と比べてはく離はく落発生率が低い。中間スラブ下面の縦梁側面～4.4mと流水跡がある縦梁側面4.4～5.0mを比較すると、縦梁側面4.4～5.0mの方が、同一かぶりでのはく離はく落発生率が高い。同様に、横梁下面1.5m～と片持ちスラブの水切り不良による水の供給の可能性のある柱外面の横梁下面0.5～1.5mを比較しても、中間スラブと比べて明確ではないが、横梁下0.5～1.5mの方が同一かぶりでのはく離はく落発生率が高い。これらのことから、降雨により水が供給される部位と比べて、水が供給されない部位では中性化残りが10mm以下であってもはく離はく落が発生する可能性が低いことを示していると考えられる。



(a)かぶり



(b)中性化残り

図 4.4.6 各部位のはく離はく落発生率

4.5 鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化残りの影響

(1) 目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法

図-4.5.1に、高架橋Aを例として、推定法の概要を示す。本方法は、調査時に発生していたはく離はく落の状況を手掛かりに、それと整合する鉄筋腐食速度を推定するものである。はく離はく落発生時の供用年数が個々の箇所にて特定できれば、予測モデル(図-4.5.2)を用いて鉄筋腐食速度を推定できる。しかし、はく離はく落発生時の供用年数が不明なことが多い。そこで、はく離はく落発生時の供用年数ではなく、調査時に観察されたはく離はく落発生箇所と健全な箇所で形成される面的なパターンが合うように、鉄筋腐食速度を推定する本方法を用いた。

本方法の手順を以下に示す。目視から、調査時に、はく離はく落が発生していた箇所(図-4.5.1(i))に該当するメッシュをはく離はく落と判定する(図-4.5.1(ii))。その他のメッシュは健全である。メッシュは、4.2 調査概要(2)で示したものと同一である。一方で、1つのメッシュが実環境に暴露された鉄筋コンクリート試験体であるとみなして、予測モデルに基づき、個々のメッシュの鉄筋腐食速度は同一であるとして、ある鉄筋腐食速度を用いてメッシュ毎にはく離はく落予測を行い(図-4.5.1(iii))、調査時のはく離はく落の発生状況を予測する(図-4.5.1(iv))。予測に必要なメッシュ毎のかぶりおよび中性化深さは、4.2 調査概要(2)、(3)で示すように与える。そして、調査時に得られた目視によるはく離はく落の発生状況(図-4.5.1(ii))と予測によるはく離はく落の発生状況(図-4.5.1(iv))を比較して、目視によるはく離はく落の発生状況(図-4.5.1(ii))に最も整合する鉄筋腐食速度を推定する(図-4.5.1(v))。

図-4.5.1(ii)と図-4.5.1(iv)の比較では、ある範囲を設けて(図中では帯鉄筋5本分)、その範囲内で、図-4.5.1(ii)と図-4.5.1(iv)のはく離はく落とされるメッシュ数が同一であることを確認する。この範囲を材料、施工、環境が同様と考えられる範囲に設定することで、この範囲における個々のメッシュの鉄筋腐食速度や中性化深さは同一であるとする。そのため、設定した範囲における個々のメッシュの違いはかぶりのみであり、かぶりが均一である場合には本方法を用いて鉄筋腐食速度を推定することができず、本方法はかぶりのばらつきを利用して鉄筋腐食速度を推定するものであるとも考えることができる。ここでは、この範囲を鉄筋1本毎に設定することを基本とした。ただし、中間スラブ下面のみ、縦梁側面～4.4mと4.4m～5.0mで環境が異なると考えられることから、鉄筋1本毎ではなく、鉄筋軸方向に0.6m×A～Cの各スラブ幅2.4mの範囲を設定した。

はく離はく落予測モデル(図-4.5.2)は、鉄筋腐食速度と、はく離はく落発生時の鉄筋腐食深さ Δr_{sp} を用いてはく離はく落を予測するものである。予測モデルには、図-4.5.2(a)に示す水が供給されれば中性化残りに関わらず腐食が進行するとしたモデルを用いた。これは、4.4節から、水が供給されれば中性化が進行していなくても腐食が進行すると考えられるためである。また、参考に従来の考え方にに基づき、図-4.5.2(b)に示す中性化残り10mm以下で鉄筋腐食が発生するとしたモデルも用いた。腐食発生後の鉄筋腐食速度は一定であると仮定した。なお、はく離はく落に至る前に鉄筋に沿った腐食ひび割れ等が生じて腐食速度が増加する可能性がある。ただし、本章では塩害がない構造物を対象としていること、既往の研究^{48),61)}からひび割れ発生後の腐食速度の増加は

小さいと考えられることから、腐食発生後からはく離はく落まで腐食速度は一定とした。図-4.5.2(b)のモデルでは、中性化の進行は、 \sqrt{t} 則に従うとし、現地で計測した中性化深さ y_g と経過年数 t から算定した中性化速度係数 $\alpha (= y_g / \sqrt{t})$ を用いて予測した。 Δr_{spcal} の推定においては、かぶり、鉄筋間隔、鉄筋径、コンクリートのクリープや収縮、腐食生成物の組成などを考慮する必要があるが、 Δr_{spcal} の推定式には、本調査のはく落箇所と同程度の 30mm 以下のかぶりを対象として、鉄筋間隔に応じたひび割れ形態からはく落発生時の鉄筋腐食深さを定式化した式(3.3.1)を用いた。なお、はく離はく落が発生していた箇所のかぶりは 30mm 以下と表 4.2.1 に示す各部位の鉄筋間隔 150mm~300mm と比べて小さく、鉄筋間隔の影響は小さいと考えられる。また、目視のはく落状況からも鉄筋間隔の影響を受けているひび割れは生じていなかった。そのため、鉄筋間隔の影響を受けない場合の式(3.3.1)を用いた。なお、式(3.3.1)中の体積膨張倍率は 2.0 とした。後述するように推定した鉄筋腐食速度(図 4.5.4, 図 4.5.6 の中間スラブ下面(雨掛かり無))が、同一構造物の鉄筋を切り出して断面減少量から推定した鉄筋腐食速度(図 4.5.4, 図 4.5.6 の No.11 中間スラブ下面(雨掛かり無))と同程度であったことから妥当であると考えられる。

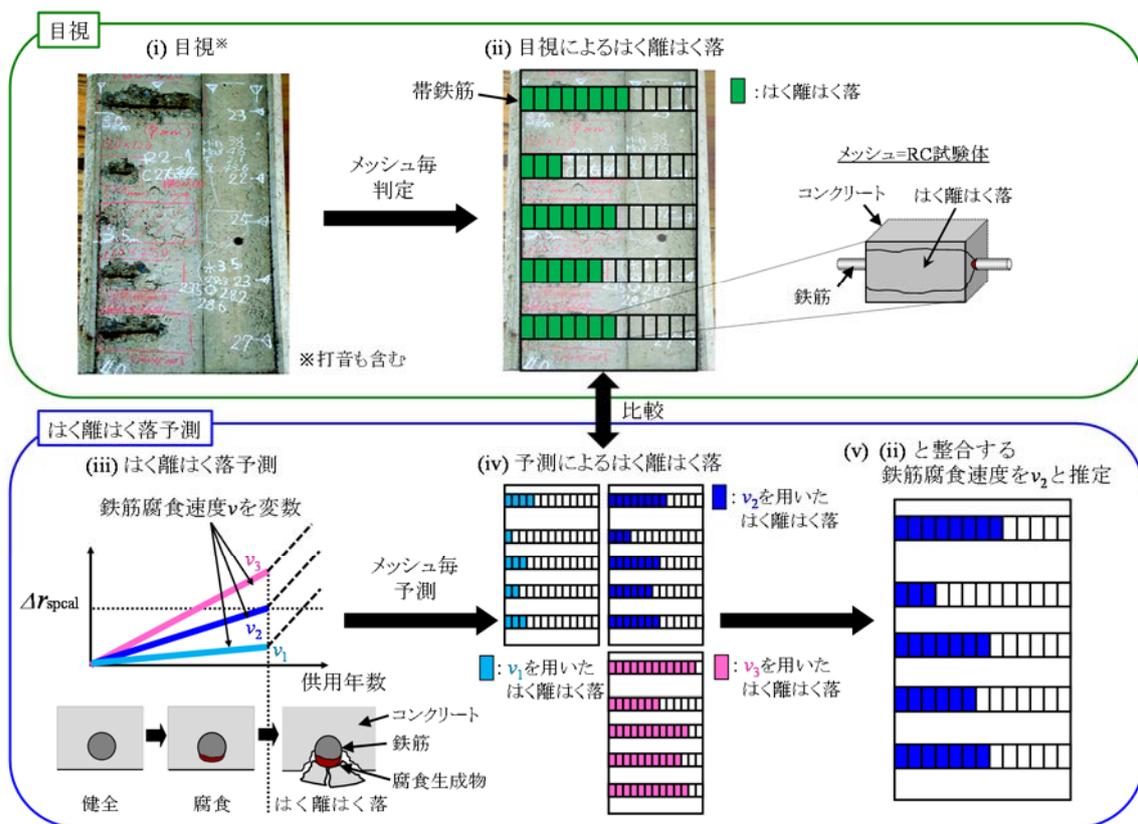
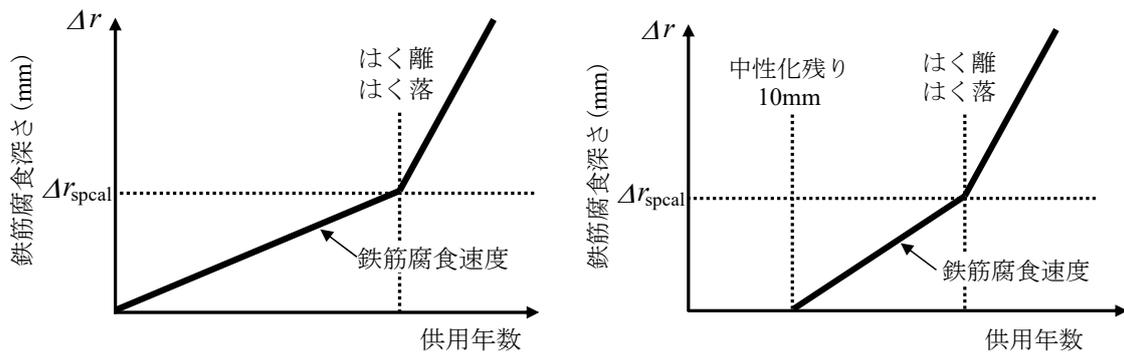


図4.5.1 目視に基づく鉄筋腐食速度の推定法



(a) 中性化残り非考慮

(b) 中性化残り考慮

図 4.5.2 鉄筋腐食速度の推定に用いるはく離はく落予測モデル

(2) 推定した鉄筋腐食速度

図 4.5.3 および図 4.5.4 に、図 4.5.2(a)を用いて推定した腐食速度を示す。また、参考として図 4.5.5 および図 4.5.6 に、図 4.5.2(b)を用いて推定した腐食速度を示す。横軸は、中性化残りとした。なお、中性化残りは、はく離はく落面積を算出した範囲における平均値である。図 4.5.3 には、図 4.5.2(b)を用いて推定した腐食速度(図 4.5.5)も併せて示している。図 4.5.4、図 4.5.6 には、表 4.5.1 に示す既往の研究も含めた腐食速度を示す。表 4.5.2 には、対象部位の諸元および図 4.5.2(a)を用いて推定した腐食速度を示す。対象部位はく離はく落発生箇所とし、柱は雨が掛かる外面のみを対象とした。また、前節と同様に、水掛かりの区分を部位毎に雨掛かり有、雨掛かり無、流水跡の3つに区分した。

図 4.5.3 から、図 4.5.2(a)を用いた場合、図 4.5.2(b)により推定した腐食速度が $1.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 程度以上であったものは、腐食速度が小さくなっていることがわかる。それよりも腐食速度が遅いものはかぶりが小さく図 4.5.2(b)を用いても早期に中性化残りが 10mm 以下となり腐食が発生するものであるため、図 4.5.2(a)を用いた腐食速度とほぼ変わらない。雨掛かり無の中間スラブ下面における腐食速度は、図 4.5.2(a)を用いた場合に $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であり、図 4.5.2(b)を用いた場合にも同様の $0.5 \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ である。本調査後に前原ら⁵²⁾が同一範囲で $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度の試験体を切り出して鉄筋の断面減少量から腐食速度を推定した $0.7 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ (表 4.5.1 中の No.11)といずれも同等であった。そのため、図 4.5.1 で示す方法により、腐食速度を概ね推定できると考えられる。

図 4.5.3、図 4.5.4 より、雨掛かりの有る高欄外面や柱外面の腐食速度は $0.4 \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった。対して、雨掛かりの無い比較的乾燥していると考えられる主梁下面や中間スラブ下面の腐食速度は、それよりも遅く $0.3 \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった。排水不良により流水跡が見られた柱外面や中間スラブ下面の腐食速度は、それらよりも早く $0.8 \sim 1.8 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ であった。本調査の範囲では、中性化残りと腐食速度の関係も明確ではなかったため、鉄筋腐食の主要因は、水で

あると考えられる。ただし、雨掛かりが有る部位と雨掛かりが無い部位の腐食速度にそれほど差がなかった。この要因には、本章で対象とした部位はあく離はく落が顕在化したものを選定しているため、かつ腐食速度を推定した箇所のかぶりが 30mm 以下と薄いため、目視からは雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、吸湿や結露、他部位からの水の浸透などにより一般的な雨掛かりが無い部位よりも水が供給されていると考えられる。そのため、中性化の進行からみても雨掛かりが有る部位と比べて水の供給が比較的少ないものの、中性化が進行しやすく、中性化により腐食速度が増加し、結果的に雨掛かりが有る部位と同程度の腐食速度となった可能性がある。

ところで、鈴木らの No.2~4 は、鉄筋位置の含水率が 3%の時の腐食速度(No.8)と、鉄筋位置の含水率が 10%となった時の腐食速度(No.9, 10)である。これらは、乾燥下での腐食速度と、水および溶存酸素が十分に供給される湿潤下での腐食速度と考えられる。一方で、実環境下の腐食速度は、水掛かりの程度に応じて、水と溶存酸素が供給されるため、常に水と溶存酸素が供給される環境にはない。そのため、実環境下の腐食速度は、乾湿繰り返しの程度に応じて、No.8とNo.9, 10の間に包含されると考えられる。図 4.5.4 から、雨掛かりの有る部位は No.9, 10 に、雨掛かりの無い部位は No.8 に近いことがわかる。これらは、鉄筋腐食の進行は水の供給程度に依存することを示し、水が供給されれば鉄筋腐食が進行しやすくなり、対して、中性化残りが 10mm 以下であっても水が供給されなければ鉄筋腐食が進行しにくいことを表している。

表 4.5.1 から、中性化残り 10mm 以下で、かつ No.1, 3, 5, 6, 9, 12 など水の供給が有る場合および 95%以上の高湿度条件下では 0.2~9.3mm/年であり、促進中性化後に水が供給される場合には実態と比べて腐食速度が速い。それ以外の水が供給されない No.2, 4, 7, 8 では、中性化に関わらず 0.2~2.7mm/年と腐食速度が比較的遅い。また、No.12 は、45 年間雨が掛からない環境にあった中間スラブ下面を切り出した後に 10 年間雨が掛かる状態として暴露した後の腐食速度である。中性化残りが -20mm 以下であることから鉄筋位置の pH が下がりきっている状態であると考えられ、腐食速度のばらつきは、中性化ではなく、かぶりやコンクリートの品質等の影響によるものであると考えられる。いずれにおいても中性化後に水が供給されると実態と比べて腐食速度が速い。このように、中性化後に水が供給される場合には腐食速度が増加すると考えられる。ただし、実態は、一般的に水が供給されるほど中性化が進行しにくいいため、中性化後に水が供給される場合とは異なる。例えば、水掛かりが無く、中性化が既に進行している部位に、防水・排水工の経年劣化により水が供給されるようになった場合には、腐食速度が増加する可能性がある。

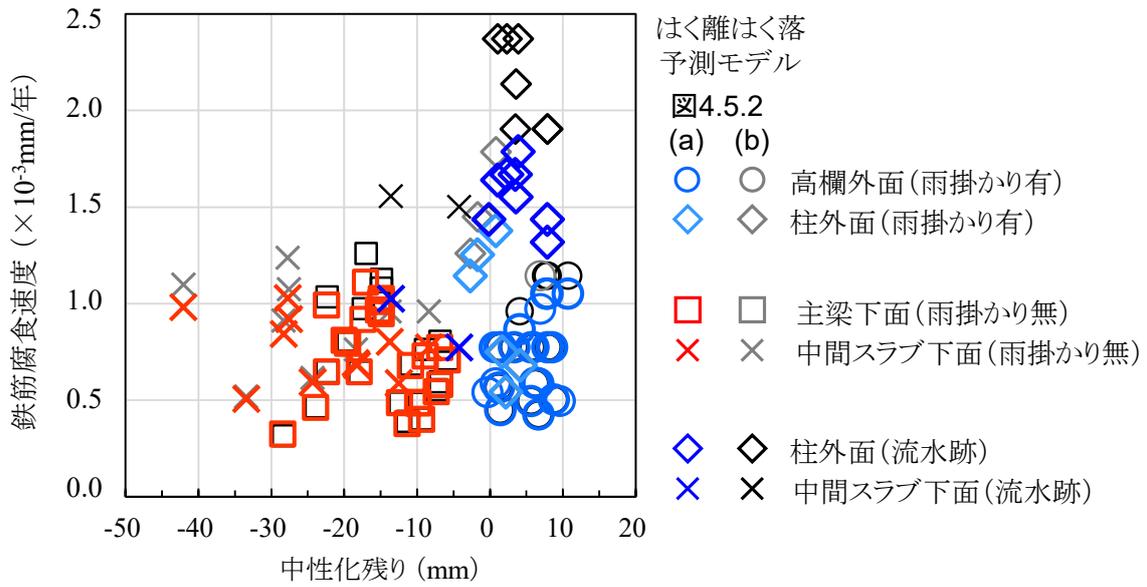


図 4.5.3 図 4.5.2(a)を用いて推定した鉄筋腐食速度と中性化残り

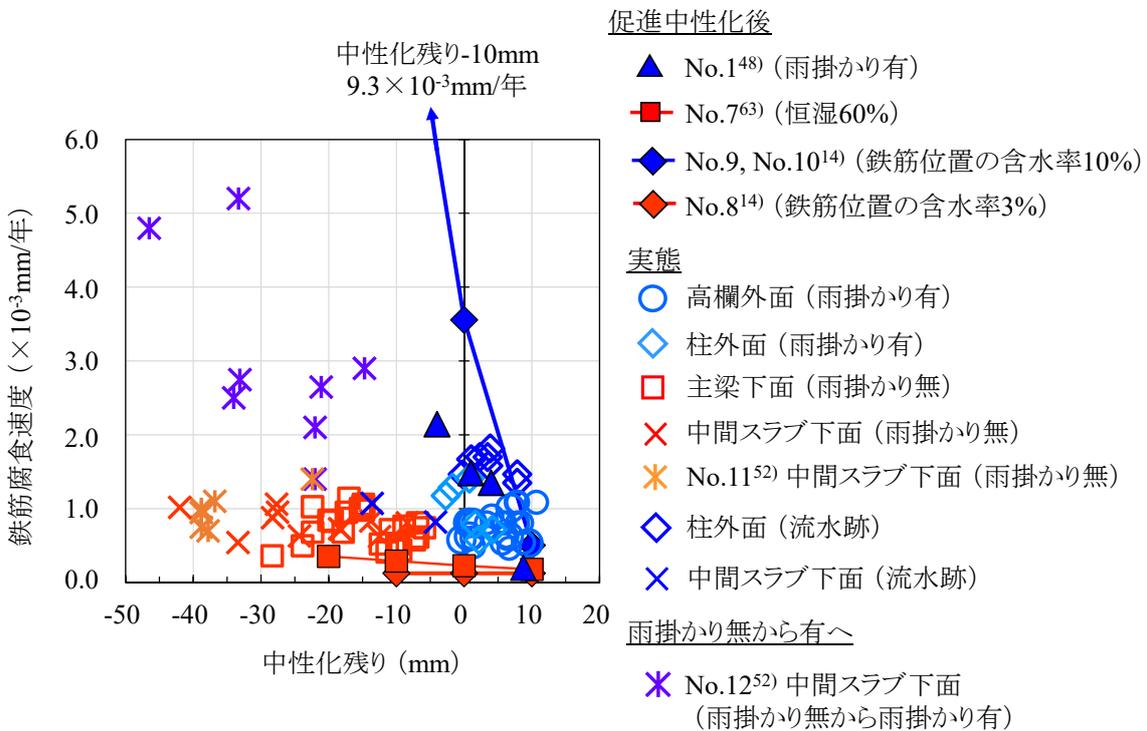


図 4.5.4 既往の研究も含む, 図 4.5.2(a)を用いて推定した鉄筋腐食速度と中性化残り

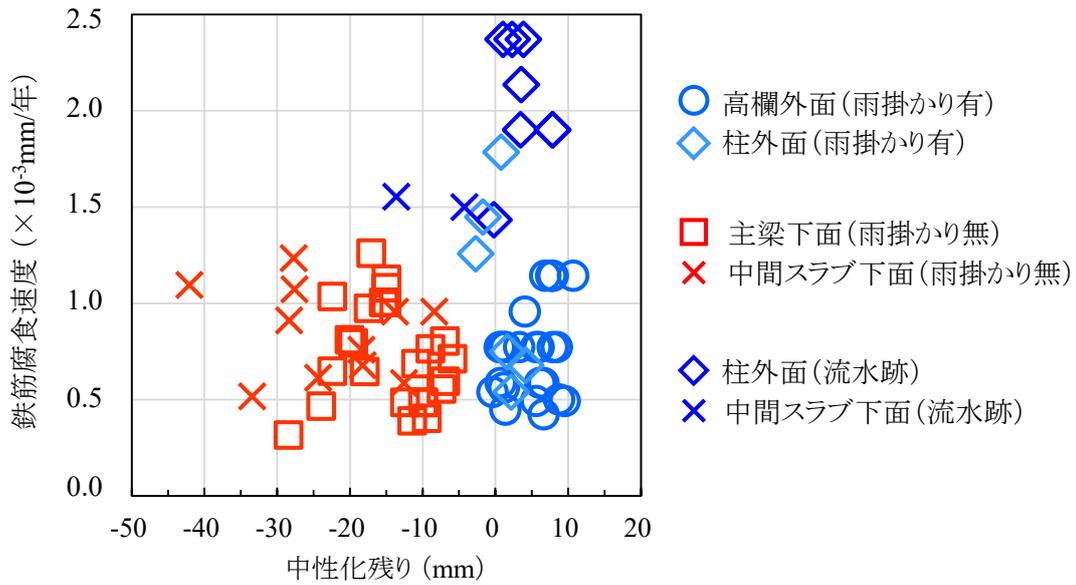


図 4.5.5 図 4.5.2(b)を用いて推定した鉄筋腐食速度と中性化残り

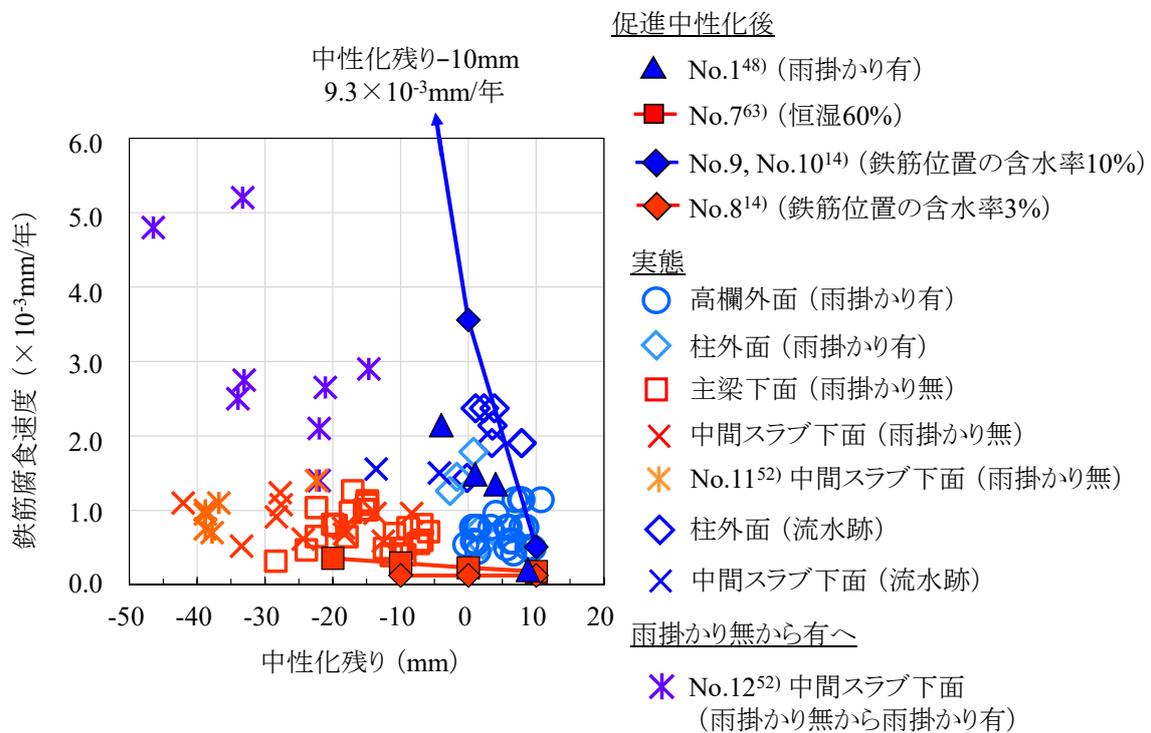


図 4.5.6 既往の研究も含む, 図 4.5.2(b)を用いて推定した鉄筋腐食速度と中性化残り

表 4.5.1 既往の研究による鉄筋腐食速度

No.	既往研究	試験方法	環境条件	かぶり mm	中性化深さ mm	中性化残り mm	鉄筋腐食速度 $\times 10^{-3}$ mm/年	水結合材比 %	鉄筋腐食速度/式(1.1.10)の鉄筋腐食速度			
1	鳥取ら ⁴⁸⁾	促進中性化後暴露	屋外 雨掛かり有	15, 24	11~19	-4~9	0.2~2.2	60, 70	8~12			
2	森永 ⁴⁶⁾	促進中性化後暴露	湿度 50~80% 温度 20℃	5	全断面 中性化	0 以下	0.3~2.7 ^{※2}	55	-			
3			湿度 95% 温度 20℃				3.8 ^{※2}					
4	米澤ら ⁵¹⁾	促進中性化後暴露	湿度 40~60% 恒温 20℃	40, 60	全断面 中性化	0 以下	0.2~0.8 ^{※2}	55	-			
5			屋外				0.6~1.4 ^{※2}					
6	佐伯ら ⁴⁷⁾	促進中性化後	20℃24 時間 水中浸漬後	5, 10	-	-5~7	0.5~6.0	55, 65	-			
7	飯島ら ⁶³⁾	促進中性化後暴露	恒湿 60% 恒温 20℃	20	pH8~11 ^{※1}	-	0.2~0.4	-	-			
8	鈴木ら ¹⁴⁾	促進中性化後 水分浸透試験	鉄筋位置の含 水率 3%	10	0~20	-10~ 10	0.1	60	0.7			
9									20	-10	9.3	52
10									10	0	3.6	20
10									0	10	0.5	3
11	前原ら ⁵²⁾	実構造物 中間スラブ下面 経年 87 年で切出し	雨掛かり無	25~30 平均 26	42~57	-34~ -22	0.7~1.4	87~ 104 ^{※3}	4~8			
12		実構造物 中間スラブ下面 経年 45 年で切出し後 10 年雨掛かり有で暴露試験	雨掛かり無 から 雨掛かり有	4~36 平均 19	52, 64	-47~ -15	1.4~5.2	80~ 93 ^{※3}	8~28			

※1 図 4.5.4, 図 4.5.6 では, pH8, pH9, pH10, pH11 を中性化残り-20mm, -10mm, 0mm, 10mm と仮定

※2 提案式より算定

※3 4.6 節に示す式(4.6.1)により推定した水セメント比

表 4.5.2 腐食速度の推定箇所の概要

対象部位	環境条件	調査時経年 (しゅん功年)	かぶり ^{※1} mm	中性化深さ mm	中性化残り mm	推定鉄筋腐食速度 $\times 10^{-3}$ mm/年	推定水結合材比 ^{※2} %	推定鉄筋腐食速度/式(1.1.10)の鉄筋腐食速度	高架橋名
高欄外面	雨掛かり有	36(1979)	7~24	4~13	-0.4~11	0.4~1.1	47~64	3~7	B
	雨掛かり有		10~20	8~19	-3~4	0.5~1.4	55~75	3~8	
柱外面	排水不良による流水跡	36(1973)	23~29	16~25	-0.2~8	1.3~1.8	70~85	8~11	A
主梁下面	雨掛かり無	48(1962)	6~20	19~34	-28~-6	0.3~1.1	59~74	2~6	D
中間スラブ下面	雨掛かり無	86(1927)	22~38	40~79	-42~-8	0.5~1.0	70~99	3~6	C
	排水不良による流水跡		27, 28	31, 42	-14, -4	0.8, 1.0	63, 71	6, 7	

※1 鉄筋腐食速度を算定した各範囲内の平均値, ※2 式(4.6.1)により推定した水セメント比

4.6 推定した鉄筋腐食速度と鉄筋腐食深さに対する照査に用いる鉄筋腐食速度の比較

コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食速度式(1.1.10)は、水が供給されれば、中性化残りに関わらず腐食が進行することを表している。そのため、図 4.5.2(a)に示すモデルを用いて推定した腐食速度と比較を行った。

図 4.6.1 に、図 4.5.2(a)を用いて推定した鉄筋腐食速度と式(1.1.10)で算定される鉄筋腐食速度との比較を示す。式(1.1.10)に用いた各値は、かぶりは鉄筋腐食速度を算定した範囲内の平均値とし、かぶりの施工誤差 Δc_e は0とした。水結合材比 W/B は計測した中性化深さと計測時の経年から、式(4.6.1)に基づき推定した表 4.5.2 に示す値を用いた。なお、柱外面や高欄外面では、ブリーディングによるコンクリートの品質低下の影響を γ_c で考慮するのが一般的であるが、ここでは γ_c を1.0とし、推定した W/B にその影響を反映させた。併せて、図中には、表 4.5.1 のうち、中性化深さもしくは水セメント比が明確であった No.1, No.8~12 に示す既往の研究による鉄筋腐食速度と式(1.1.10)との比較も示す。

$$W/B = 1/9 \cdot \{y / (\beta_e \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t}) + 3.57\} \quad (4.6.1)$$

ここに、 y : 計測した中性化深さ(mm)。

β_e : 環境作用の程度を表す係数。主梁下面および中間スラブ下面は乾燥しやすい環境であるため 1.6 とし、高欄外面および柱外面は乾燥しにくい環境であるため 1.0 とした。

γ_c : コンクリートの材料係数。ここでは 1.0。

t : 中性化深さの調査時の経年(年)。

推定された鉄筋腐食速度は、雨掛かりの有る高欄外面や柱外面では、式(1.1.10)で算定した鉄筋腐食速度と比べて3~8倍であった。対して、雨掛かりの無い主梁下面および中間スラブ下面では、2~6倍程度であった。流水跡が見られた柱外面や中間スラブ下面では、6~11倍であった。

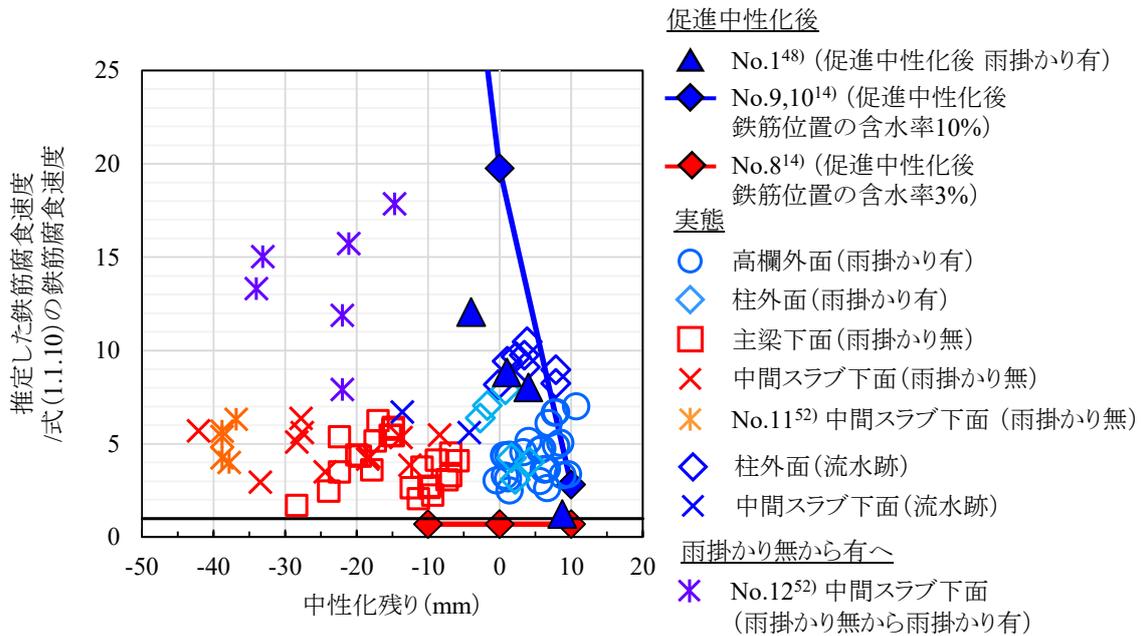


図 4.6.1 図 4.5.2(a)を用いて推定した鉄筋腐食速度と式(1.1.10)との比較

4.7 はく離はく落発生箇所のかぶりと鉄筋腐食深さに対する照査で算定されるかぶりの比較

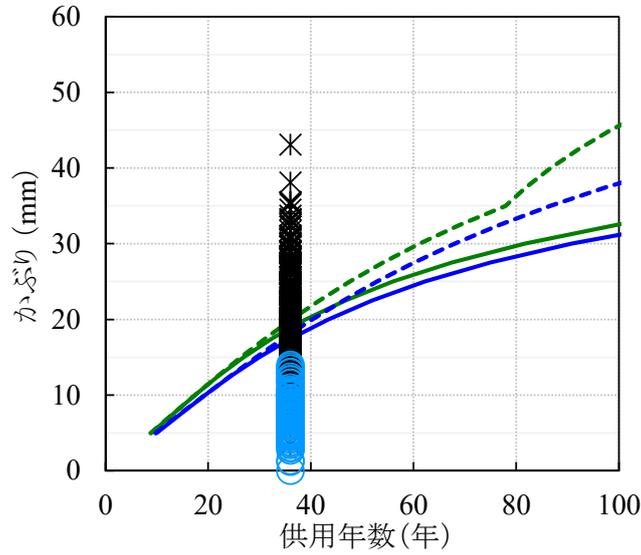
図 4.7.1, 図 4.7.2 に, 排水不良により流水跡が見られた部位を除く, 各部位におけるはく離はく落箇所のかぶりを示す. なお, 調査時に確認できたはく離はく落が発生した時の供用年数は, 不明であるため, 調査時の経年としたが, これより前に, はく離はく落が発生していることに留意が必要である. また, 図中に, 併せて, 図 4.6.1 に示す推定した鉄筋腐食速度と式(1.1.10)の比の最大値を用いて補正した式(1.1.9)および式(3.3.1)の比($* \times$ 式(1.1.9)/式(3.3.1))が 1.0 となるかぶりを示す. $*$ は, 推定した鉄筋腐食速度と式(1.1.10)の比の最大値であり, 表 4.5.2 で示す値を用いた. 式(3.3.1)の体積膨張倍率 α は $2(k_{\alpha}=1)$ とした. 併せて, コンクリート標準示方書[設計編]に示される照査値(式(1.1.9)/式(1.1.8))が 1.0 となるかぶりを示す. なお, 式(1.1.9)中の s_{dy} の算定で用いる W/B は, 式(4.6.1)で推定した表 4.5.2 に示す値の最小値と最大値を参考とした. その他, 図中に示すように, 式(1.1.9)/式(1.1.8)に用いる γ_w は 1.15 とし, $* \times$ 式(1.1.9)/式(3.3.1)に用いる γ_w は各部位で推定した鉄筋腐食速度の最大値を用いるため 1.0 とした. かぶりの施工誤差 Δc_e には一般値を用いた⁹⁾.

高欄外面のはく離はく落は, 算定したかぶりよりも小さなかぶりで発生している. 一方で, 柱外面のはく離はく落は, それよりも大きなかぶりで発生している. この要因は, 推定した鉄筋腐食速度が

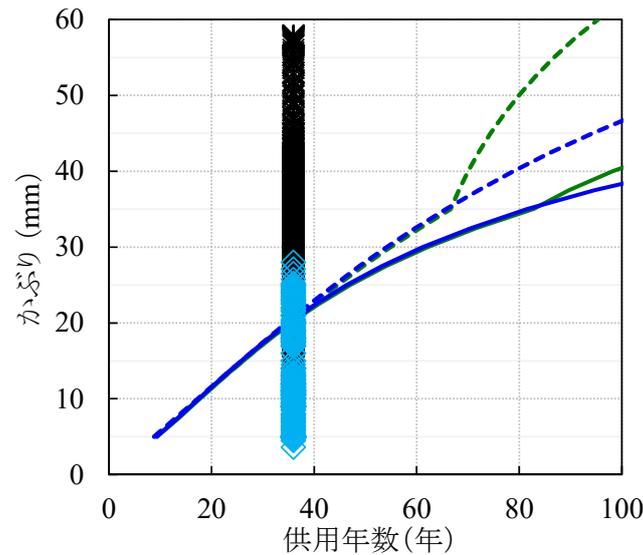
設定した範囲における平均的な値であることおよび推定した鉄筋腐食速度と式(1.1.10)の鉄筋腐食速度の比を算出した時のかぶりがその範囲内の平均値であることなどが考えられ、鉄筋腐食速度を推定する範囲の中でかぶりのばらつきが大きいと鉄筋腐食速度が一部で大きくなるためであると考えられる。

主梁下面および中間スラブ下面のはく離はく落は、算定したかぶりよりも小さなかぶりが発生している。式(1.1.10)は雨掛かりが有る部位を想定して定式化されているため、主梁下面や中間スラブ下面のように雨掛かりが無い部位の鉄筋腐食速度は、式(1.1.10)の考え方に基つくと雨掛かりが有る部位よりも遅くなると考えられる。よって、雨掛かりが無い部位のかぶりは、雨掛かりを想定して算定した図4.7.1(a)(b)に示す値よりも小さくてよいこととなる。しかし、4.6で示すように雨掛かりの有る部位と無い部位で鉄筋腐食速度は同程度であったことから、算定したかぶりと雨掛かり有る部位(高欄外面や柱外面)のはく離はく落箇所のかぶりの差と比べて、それと雨掛かり無い部位(主梁下面や中間スラブ下面)のはく離はく落箇所のかぶりの差は概ね同等であった。算定したかぶりよりも大きなかぶりではく離はく落が生じていたことは今後検討が必要であるが、算定したかぶりよりも小さいかぶりではく離はく落が生じていた。

推定した鉄筋腐食速度の最大値および式(3.3.1)の比($\ast \times$ 式(1.1.9)/式(3.3.1))とコンクリート標準示方書[設計編]に示される照査式(式(1.1.9)/式(1.1.8))で得られたかぶりを比較すると、鉄筋腐食速度の最大値が6~8倍異なっている一方で、両者が同等であることがわかる。これは、コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さの限界値 s_{lim} (式(1.1.8))が照査の不確実性として0.3掛けの安全余裕度を持たせているため、また鉄筋腐食深さの設計値 s_d (式(1.1.9))に、設計値のばらつきを考慮した係数 γ_w として1.15を考えているためである。この限界値に掛かる0.3の安全余裕度を限界値ではなく、設計値に考慮すると、設計値に1/0.3を掛けたことになり、 $\gamma_w=1.15$ も含めると、鉄筋腐食速度に約4倍の安全余裕度を見込んでいるとも考えることができる。また、鉄筋腐食速度の推定に用いたはく落発生時の鉄筋腐食深さ(式(3.3.1))は、 $2.58 \times 10^{-3} \cdot c$ であり、式(1.1.9)から0.3掛けの安全余裕度を除いた $1.27 \times 10^{-3} \cdot c$ の約2倍である。この約2倍と約4倍の安全余裕度を鉄筋腐食速度に見込めば、推定した鉄筋腐食速度は、式(1.1.10)の約8倍でも適切であると考えられる。

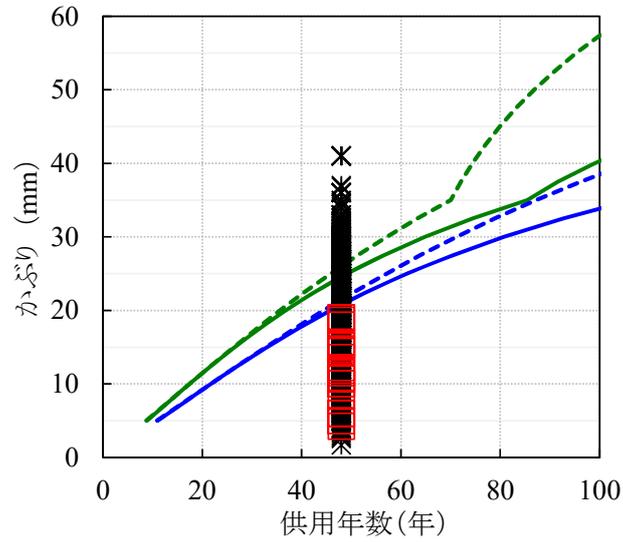
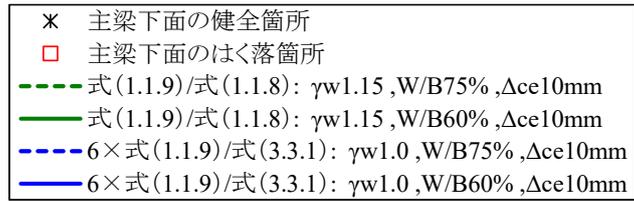


(a) 高欄外面 (雨掛かり有)

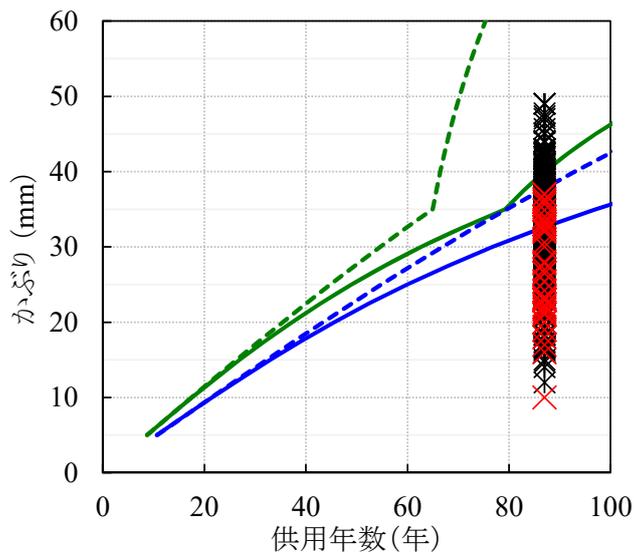
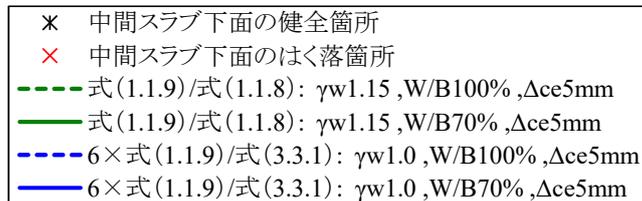


(b) 柱外面 (雨掛かり有)

図 4.7.1 はく離はく落箇所のかぶり (雨掛かり有)



(a) 主梁下面 (雨掛かり無)



(b) 中間スラブ下面 (雨掛かり無)

図 4.7.2 はく離はく落箇所のかぶり (雨掛かり無)

4.8 まとめ

かぶりが30mm以下、中性化残りが10mm以下でははく離はく落が発生した供用中の鉄道RC構造物を対象に調査を行い、中性化の進行および目視による水掛かりの状態から、雨掛かり有、雨掛かり無、排水不良等による流水跡の3つに調査対象とした部位を区分し、部位毎にかぶりコンクリートのはく離はく落の発生に及ぼす水と中性化の影響を検討した。また、提案した鉄筋腐食速度を推定する方法を用いて、鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化の影響を検討した。さらに、調査結果に基づき、コンクリート標準示方書[設計編]に示される照査式の検証を行った。

- (1) はく離はく落は、雨掛かりの有る部位では中性化残り1～10mm以下で発生していたのに対して、雨掛かりが無い部位ではそれよりも小さく中性化残り5mm, 3mmで発生していた。雨掛かりの有る部位では、中性化残り10mm程度となった時には既にはく離はく落するほど腐食が進行し、中性化していなくても水が供給されれば腐食が進行する可能性があることを明らかにした。
- (2) 目視により雨掛かりや流水跡が有ると判断される部位と比べて、水掛かりが無いと判断される部位では、中性化残りが10mm以下であっても、はく離はく落が発生する可能性は低い。
- (3) 発生しているはく離はく落の状況を手掛かりに、鉄筋腐食速度を推定する方法を提案した。推定した腐食速度は、供用期間終了後に切り出した鉄筋の腐食量から推定した既往の腐食速度と同等であった。このことから、本方法により腐食速度を概ね推定できると考えられる。また3章で定式化したはく落発生時の鉄筋腐食深さも結果的に妥当であると考えられる。
- (4) 雨掛かりが有る部位の腐食速度は $0.4\sim 1.4\times 10^{-3}\text{mm/年}$ であった一方で、雨掛かりの無い部位の腐食速度はそれよりも遅く $0.3\sim 1.1\times 10^{-3}\text{mm/年}$ であった。また、流水跡が見られた部位の腐食速度は比較的速く $0.8\sim 1.8\times 10^{-3}\text{mm/年}$ であった。(1)(2)も踏まえると、水が供給されれば中性化が進行していなくても腐食が進行し、水が供給されなければ中性化が進行していても腐食が進行しにくいと考えられる。本調査の範囲では、中性化残りと腐食速度の関係も明確ではなかったため、鉄筋腐食の主要因は水であると考えられる。一方で、雨掛かりが有る部位と雨掛かりが無い部位の腐食速度にそれほど差がなかった。これは、本章で対象とする部位がはく離はく落が発生したものであるため、かつ腐食速度を推定した箇所のかぶりが30mm以下と薄いため、目視からは雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、結露や吸湿、他部位からの水の浸透などにより一般的な雨掛かりが無い部位よりも水が供給されていることが要因であると考えられる。そのため、中性化の進行からも雨掛かりが有る部位と比べて水の供給が比較的少ないものの、中性化が進行しやすく、中性化により腐食速度が増加し、結果的に雨掛かりが有る部位と同程度の鉄筋腐食速度となった可能性がある。これを踏まえると、設計

では、雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、このように何らかの要因により水が供給される場合があることを考慮し、雨掛かりが有る部位と雨掛かりが無い部位で同等の腐食速度を用いるのが安全側である。一方で、水の浸透、つまりかぶりの大小が鉄筋腐食の主要因であることを踏まえると、十分にかぶりを確保することにより鉄筋に水が到達しなければ中性化と関係なく腐食は進行しないことは明らかである。そのため、維持管理では、本論で得られた腐食速度を参考に、かぶりや水の供給状態など実態に応じた腐食速度を用いる必要がある。

- (5) 推定した腐食速度は、コンクリート標準示方書[設計編]に示される腐食速度の2～8倍であったが、調査結果(推定した腐食速度により算定した鉄筋腐食深さと推定に用いたはく落発生時の鉄筋腐食深さ)に基づき算定したかぶりは、コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さに対する照査値が1.0となるかぶりと同程度であった。算定したかぶりよりも小さいかぶりで概ねはく落が発生していたため、コンクリート標準示方書[設計編]の照査を用いても、実態を捉えた設計かぶりが得られると考えられる。

第5章 結論

5.1 本論で得られた成果

「第2章」では、かぶりコンクリートのひび割れやはく落の発生機構の解明や FEM に基づく変状発生時期の予測に資する基礎的データとして、実績の乏しい、ひび割れ形態、はく落形状、鉄筋の腐食状態について、鉄道 RC 構造物を対象に調査を行い、これらのデータの取得および検証を行った。

ひび割れ形態について、既往の研究からかぶり c と鉄筋径 ϕ の比 c/ϕ が 1.0 以下ではく離するようなひび割れ形態となるとされるが、本調査では、 c/ϕ が 3.0 以下の場合に、はく離はく落の発生率が大きくなる傾向であったが、今後、鉄筋の腐食が進行すればよりかぶりが大きな箇所ではく離、はく落が発生する可能性があることを明らかとした。はく落形状について、はく落幅は概ね 180mm 以下であり、はく落角度は概ね 55～85 度であった。レーザー変位センサを用いてはく落形状を計測した結果、鉄筋を中心として左右対称のはく落面を形成している場合には、コンクリート表面の薄いモルタル層を除く領域ではく落角度は、70 度程度であった。鉄筋腐食状態について、健全箇所およびひび割れ箇所、はく離箇所の全てにおいて、鉄筋腐食は、かぶり側に集中して発生していた。レーザー変位センサを用いて腐食した鉄筋の形状を計測した結果、腐食は断面内で均一に発生せず、かぶり側から進行することを定量的に把握した。

「第3章」では、コンクリート片のはく落が多数発生していた 30mm 以下のかぶりを対象とし、FEM に基づき、鉄筋を複数配置したモデルを用いてひび割れ形態や変状発生時の鉄筋腐食深さに及ぼすかぶりと鉄筋間隔の影響を検討した。また、FEM の結果とコンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さの限界値との比較検証を行った。

ひび割れ形態について、かぶりが鉄筋のあきの 1/2 の 0.6 倍よりも小さい場合には、鉄筋から斜め方向にひび割れが進展し、表層にひび割れが達するはく離ひび割れ形態となり、それ以外の場合には、隣接する鉄筋からそれぞれ進展する水平方向のひび割れが繋がり、水平方向にひび割れが貫通する水平ひび割れ形態となることを明らかとした。変状発生時の鉄筋腐食深さについて、変状発生時の鉄筋腐食深さは、はく離ひび割れ形態の場合には、かぶりに依存するが、水平ひび割れ形態の場合には、鉄筋のあきの影響が大きくなり、鉄筋のあきの 1/2 がかぶりよりも小さい場合には、鉄筋のあきに依存することを明らかとした。また、かぶりのみを変数として定式化されたコンクリート標準示方書[設計編]の鉄筋腐食深さの限界値は、鉄筋のあきの 1/2 がかぶりの 1/0.9 よりも大きい条件下において、本解析で得られた変状発生時の鉄筋腐食深さを安全側に評価できた。

「第4章」では、かぶりが30mm以下、中性化残りが10mm以下ではく離はく落が発生した供用中の鉄道RC構造物を対象に調査を行い、中性化の進行および目視による水掛かりの状態から、雨掛かり有、雨掛かり無、排水不良等による流水跡の3つに調査対象とした部位を区分し、部位毎にかぶりコンクリートのはく離はく落の発生に及ぼす水と中性化の影響を検討した。また、提案した鉄筋腐食速度を推定する方法を用いて、鉄筋腐食速度に及ぼす水と中性化の影響を検討した。さらに、調査結果に基づき、コンクリート標準示方書[設計編]に示される照査式の検証を行った。

はく離はく落の発生に及ぼす水とコンクリートの中性化の影響について、はく離はく落は、雨掛かりの有る部位では中性化残り1～10mm以下で発生していたのに対して、雨掛かりが無い部位ではそれよりも小さく中性化残り5mm、3mmで発生していた。雨掛かりの有る部位では、中性化残り10mm程度となった時には既にはく離はく落するほど腐食が進行し、中性化していなくても水が供給されれば腐食が進行する可能性があることを明らかとした。また、目視により雨掛かりや流水跡が有ると判断される部位と比べて水掛かりが無いと判断される部位では、中性化残りが10mm以下であっても、はく離はく落が発生する可能性は低い。

鉄筋腐食速度について、発生しているはく離はく落の状況を手掛かりに、鉄筋腐食速度を推定する方法を提案した。推定した鉄筋腐食速度は、供用期間終了後に切り出した鉄筋の腐食量から推定した既往の鉄筋腐食速度と同等であった。このことから、本方法により腐食速度を概ね推定できると考えられる。また第3章で定式化したはく落発生時の鉄筋腐食深さも結果的に妥当であると考えられる。雨掛かりの異なる部位毎の鉄筋腐食速度について、雨掛かりが有る部位の腐食速度は $0.4\sim 1.4\times 10^{-3}$ mm/年であった一方で、雨掛かりの無い部位の腐食速度はそれよりも遅く $0.3\sim 1.1\times 10^{-3}$ mm/年であった。また、流水跡が見られた部位の腐食速度は比較的速く $0.8\sim 1.8\times 10^{-3}$ mm/年であった。水が供給されれば中性化が進行していなくても腐食が進行し、水が供給されなければ中性化が進行していても腐食が進行しにくいと考えられる。本調査の範囲では、中性化残り腐食速度の関係も明確ではなかったため、鉄筋腐食の主要因は水であると考えられる。一方で、雨掛かりが有る部位と雨掛かりが無い部位の腐食速度にそれほど差がなかった。これは、本章で対象とした部位がはく離はく落が発生したものであるため、かつ腐食速度を推定した箇所のかぶりが30mm以下と薄いため、目視からは雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、結露や吸湿、他部位からの水の浸透などにより一般的な雨掛かりが無い部位よりも水が供給されていることが要因であると考えられる。そのため、中性化の進行からも雨掛かりが有る部位と比べて水の供給が比較的少ないものの、中性化が進行しやすく、中性化により腐食速度が増加し、結果的に雨掛かりが有る部位と同程度の鉄筋腐食速度となった可能性がある。これを踏まえると、設計では、雨掛かりが無いと考えられる部位であっても、このように何らかの要因により水が供給される場合があることを考慮し、雨掛かりが有る部位と雨掛かりが無い部位で同等の腐食速度を用いるのが安全側である。一方で、水の浸透、つまりかぶりの大小が鉄筋腐食の主要因であることを踏まえると、十分にかぶりを確保することにより鉄筋に水が到達しなければ中性化と関係なく腐食は進行しないことは明らかである。そのため、維持管理では、本論で得られた腐食速度を参考に、かぶりや水の供給状態など実態に応じた腐食速度を用いる必要がある。

推定した鉄筋腐食速度は、コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食速度の2～8倍であったが、推定した鉄筋腐食速度により算定した鉄筋腐食深さと推定に用いたはく落発生時の鉄筋腐食深さから算定したかぶりは、コンクリート標準示方書[設計編]に示される鉄筋腐食深さに対する照査値が1.0となるかぶりと同程度であった。算定したかぶりよりも小さいかぶりでは概ねはく落が発生していたため、コンクリート標準示方書[設計編]の照査を用いても、実態を捉えた設計かぶりが得られると考えられる。

本論の結論を踏まえて、鉄筋腐食に対する設計、維持管理における今後の課題と展望を5.2節に示す。

5.2 今後の課題と展望

(1) 鉄筋腐食に影響を及ぼす因子を包括した鉄筋腐食深さに対する照査式の確立

本論では、一般環境に置かれる鉄道 RC 高架橋で発生した鉄筋腐食を対象に、コンクリート標準示方書〔設計編〕に示される鉄筋腐食深さに対する照査に拠りつつ、水と中性化による鉄筋腐食速度についての実態を明らかとした。コンクリート中の鉄筋腐食に影響する因子には、かぶりコンクリートの状態や品質(厚さ, 含水量, 水セメント比や緻密度, pH, 溶存酸素濃度, 溶存二酸化炭素濃度, 塩化物イオン濃度, 初期欠陥の有無), 環境条件(雨, 風, 日射, 湿度, 温度, 二酸化炭素濃度, 酸素濃度)が挙げられるが, 水と pH の他, 主要な要因として塩化物イオンが挙げられる。現状の設計では, 水と中性化による鉄筋腐食と, この塩化物イオンによる鉄筋腐食に分けて照査されるが, これらを包括的に捉えた鉄筋腐食速度や変状発生時の鉄筋腐食深さが評価できれば, 定量的に主要な要因が明らかとなり, より適切に設計・維持管理が可能になると考えられる。

以上より, 今後, 鉄筋腐食に関わる因子を包括した鉄筋腐食深さに対する照査式を確立すると共に, 鉄筋腐食さらには構造物の性能低下に対する主要因の選択とリソースの集中が課題となると考えられる。

(2) 供用中の構造物を対象としたデータ取得に関する省力化技術の開発

第 4 章において, 既に生じているコンクリート片のはく落という目視で得られる情報から, 逆解析により, 鉄筋腐食速度を推定する方法を示した。これは, 材料や施工, 環境, 変状要因の調査などの詳細な調査を必要とせず, 可能な限り少ない調査項目で簡易でかつある程度の精度で材料や施工, 環境の影響を含む鉄筋腐食速度を推定するものであり, 実務の負担を軽減しつつ鉄筋腐食速度を取得する方法である。さらに, 本方法は, 今後の ICT の発展も考慮して開発したものであり, 近年, 現場管理でも導入されてきている携帯型タブレット端末等で撮影された写真から, はく落を抽出して, 鉄筋腐食速度を推定することができることを特徴としている⁶⁴⁾。将来的には, 現場の管理写真から自動的に画像解析により変状を抽出し, それを基に鉄筋腐食速度を推定し, さらに鉄筋腐食速度の推定時にメッシュ分割を行っているため, そのまま FEM により構造物の性能を予測することができると考えている。

一方で, そこで得られた鉄筋腐食速度の要因分析には, 材料や施工, 環境の情報が必要となる。例えば, 材料であればかぶりコンクリートの品質, 環境であれば鉄筋位置の含水率, 施工であればかぶりなどが挙げられる。かぶりは, 腐食因子の浸入程度を左右し, 腐食因子から鉄筋を守り, また腐食膨張圧に対して抵抗する断面としての働きをする。そのため, かぶりは, 鉄筋腐食に対して非常に重要なファクターである。ただし, 実構造物中のかぶりは, 必ずしも配筋図通りではなく, 同じ鉄筋の軸方向であっても, 部材間の鉄筋の取り合いおよびスペーサーやセパレータなどの配置, 側圧など鉄筋に生じる作用に関わるコンクリートの打込み方法(打ち上がり速度, 打込み高さ, 打ち

継ぎ目位置を含む打込み手順など)や締固め方法, 打込み時の温度, コンクリートの実配合, 部材寸法および鉄筋配置や量, 部材の傾斜などの要因から施工誤差を有し, 同一のかぶりでないことは明らかである. そのため, 鉄筋腐食による劣化を考えるには, 可能な限り詳細にかぶりを計測する必要がある. しかし, 外観からの目視では, かぶりが確認できないことが維持管理上のネックであり, 比較的簡易な電磁誘導法などを用いた非破壊計測があるが, 膨大な構造物中の全ての点でかぶりを計測することは容易ではない. そのため, 広範囲のかぶりを自動で取得する技術の向上の他, 限定された計測点で得たかぶりから, 可能な限り精度良く構造物または部材全体のかぶりを推定する技術が必要である⁵⁸⁾.

以上より, ICT を融合したデータ取得技術の省力化を行うこと, また鉄筋腐食等に対する主要因に対するデータ取得技術の省力化を行うことが課題となると考えられる.

(3) 設計と維持管理のシームレス化⁶⁵⁾

本論では, 鉄筋腐食深さに対する照査に着目して研究を行ったが, これは, 維持管理実務の実態を設計へフィードバックし, より設計と維持管理の連携を図り, 良い構造物を建設・保守していくことが主眼となっている. 今後も既設構造物から得た知見を設計に反映していくことが重要であると考えられる. 以下には, 著者が専門とする鉄道の既設構造物に対する性能評価から得た今後の展望を示す.

鉄筋腐食した既設構造物を維持管理では, 定期的な調査でひび割れなどの変状を早期に発見すると共に, かぶりやかぶりコンクリートの品質, 構造物の置かれる環境など, 実態に応じた鉄筋腐食の量や進行, 変状原因に基づき, 構造物の要求される性能を明確にした上で, 残存性能を評価・予測するなどして, 適切な時期と方法で措置を講じることが耐久性を確保する上で重要である. 第三者への公衆災害の恐れがない構造物では, ひび割れやはく落が発生してから公衆安全性以外の性能が要求性能を満足しない状態に至るまでには時間的余裕があることその他, 本来, 鉄道コンクリート構造物は, 不静定次数が高いラーメン高架橋を主に, 局所的な変状が生じた場合, 応力の再分配やクリープによる応力緩和など構造物全体で頑強性や冗長性を発揮するというメリットを持つ(図 5.2.1). また, 例えば, ラーメン高架橋の上層梁はスラブと一体化され T 形断面となるが, 照査ではスラブ断面を考慮せずに矩形断面でせん断耐力を算定することや, その他構造要素と一体となる RC 高欄や路盤鉄筋コンクリートと呼ばれる付帯物は, 設計の簡略化や将来の取替え等の可能性も含めて, 構造要素の照査では一般的にその断面を含めないことなど, いわゆる「余裕代」を持つ. そのため, 元々の照査値の余裕分の他, 既設構造物の性能を厳密に評価するには, 鉄筋の腐食程度や鉄筋腐食した部材の性能評価のみではなく, その「余裕代」を定量的に評価することで, より合理的な維持管理が可能となる. そのため, 鉄筋腐食の量や進行性の他, 維持管理では, 設計で安全側に割り切っている余裕代をも考慮して場合によっては補修・補強を判断する必要があり, 各年代の設計思想や設計上の割切り, 構造細目や照査の前提の重要性を認識し, また諸元が不明確な構造物に対しても現地調査や実験, 3 次元 FEM などの解析等の実施も含めて,

最適な管理をすると合理的である。さらには、これにより、鉄道コンクリート構造物のメリットである頑強性や冗長性を明確にした合理的かつ維持管理との連携がとれたシームレスな設計が可能となると考えられる。

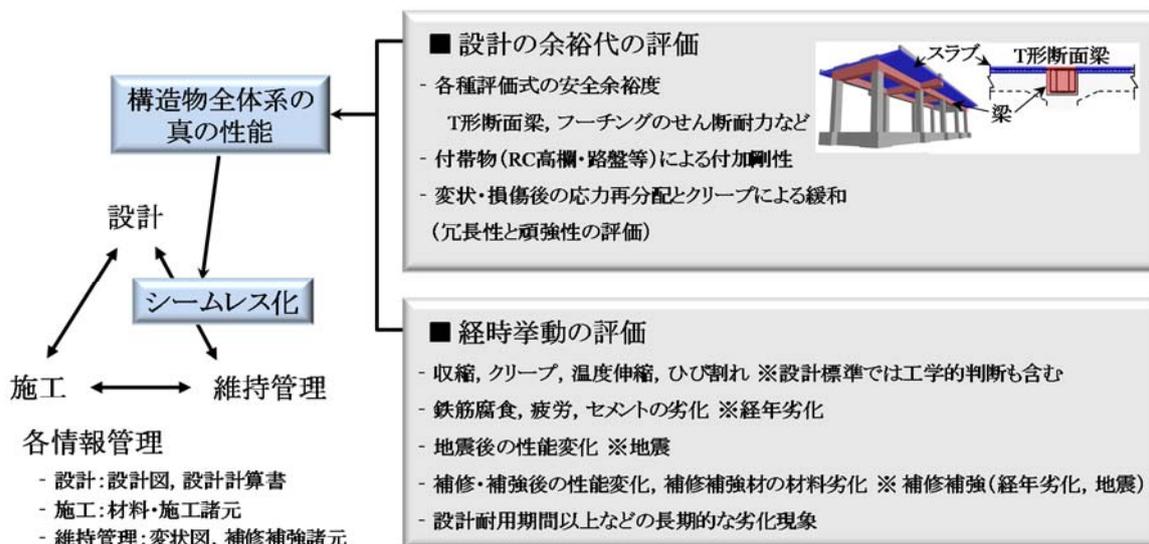


図 5.2.1 設計と維持管理のシームレス化

また、鉄筋腐食の進行や変状の状態のばらつきは大きいですが、実態に応じて、鉄筋腐食速度を評価し、劣化予測を行い、計画的に維持管理のシナリオを定めていくことが合理的である。図 5.2.2 に、かぶりやかぶりのコンクリートの品質に影響を与える環境作用、施工、材料、構造物の条件を示す。かぶりの大きさやかぶりのコンクリートの品質等の影響を受けるかぶりや鉄筋腐食の速度、中性化深さ等は、環境による影響や材料、施工、構造物の諸元の影響を相互に受け、同一の部材・部位でも異なる値を示す。例えば、断面寸法が小さく配筋量が多い部位で、夏にコンクリートを打ち込む場合には、材料配合と施工時の締固めや養生方法などが他部位とは異なり、建設当初のコンクリートの品質自体も相違する可能性がある。さらに、コンクリートは、構造物の形式・寸法により異なる環境の影響や列車荷重の繰り返しを受け、疲労・劣化していく。そのため、劣化が大きくばらつくことになるが、鉄筋腐食の発生およびそれによる変状の発生・進行に及ぼす材料や施工、環境、構造物の諸元の影響を明らかにし、適切に対処していくことが重要である。一方で、経年劣化した構造物の増加や熟練技術者の減少、経済成長の停滞を考えると、より簡易にこれらの影響を評価し、精度の良い劣化予測を行うことが非常に重要である。さらに、維持管理のみならず、維持管理で得られた定量的な知見を設計に活かすことでより良い設計、維持管理に繋がると考えられる。設計と維持管理のシームレス化を今後の展望として挙げたが、計画から設計、施工、

維持管理が一つになって成し遂げられることであり、近年発展が目覚ましい情報技術や、材料から構造物レベルまで経時挙動を追跡可能な数値解析技術への期待は大きい。一方で、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物⁵⁶⁾や鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物⁶⁶⁾では、鉄道固有の構造物に対して、軌道や車両、電気も含め、その特徴を活かしたより強靱な設計・施工・維持管理システムを構築していきたい。

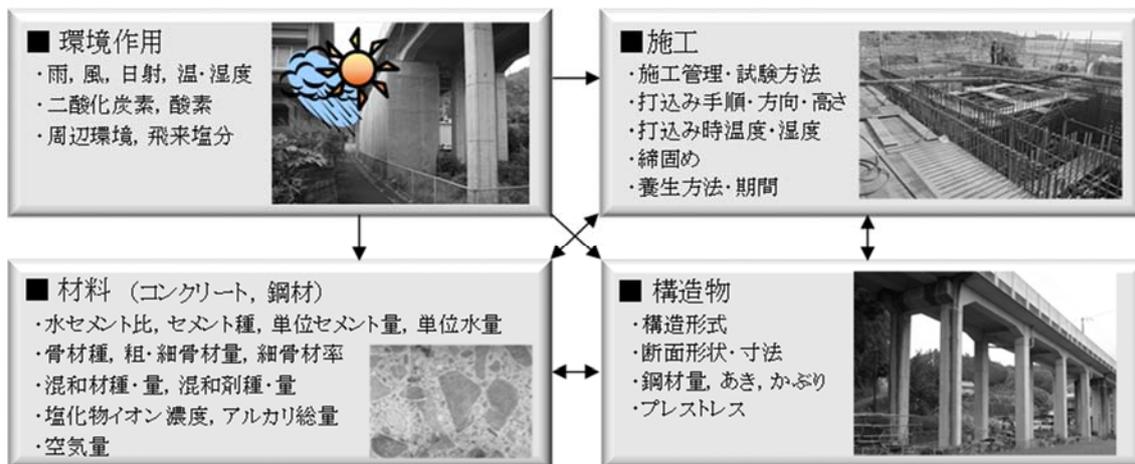


図 5.2.2 かぶりに影響する環境作用, 施工, 材料, 構造物の条件

参考文献

- 1) 土木学会:平成 11 年版 コンクリート標準示方書【施工編】—耐久性照査型—, 2000.1
- 2) 和泉意登志, 喜多達夫, 前田昭信:コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 岸谷孝一・西澤紀昭他編, 技報堂出版, 1986
- 3) 谷村幸裕, 長谷川雅志, 曾我部正道, 佐藤勉:鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集 No.760/V-63, pp.147-157, 2004.5
- 4) 松田芳範:コンクリートの耐久性を定める「水」の制御①コンクリートの劣化・損傷に及ぼす水の影響について, コンクリート工学, Vo.51, No.10, pp.814-818, 2013
- 5) 古賀一八:建築物の維持管理と水, セメント・コンクリート, No.812, pp.36-42, 2014.10
- 6) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人:高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集, No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 7) 横山勇気, 岸利治:雨水等の影響を受ける箇所におけるコンクリート片の剥落に対するかぶりどと中性化深さの関係性の検証:第 71 回セメント技術大会講演要旨, pp.206-207, 2017
- 8) 土木学会:2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2018.3
- 9) 土木学会:2017 年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料 設計編・施工編, 2018.3
- 10) 土木学会:2018 年制定 コンクリート標準示方書 【維持管理編】, 2018.10
- 11) 土木学会:2012 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2013.3
- 12) 土木学会:フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告), コンクリートライブラリー第 64 号, 1988.3
- 13) 岸谷孝一他編:コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版, 1986
- 14) 鈴木浩明, 飯島亨, 上田洋:水分浸透とコンクリート中の鋼材腐食速度との関係, 第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-15, 2017
- 15) R.D.Browne:Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP-65, pp.169-204, 1980.8
- 16) 森川雅行, 関博, 奥村隆:鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.97-105, 1987.2
- 17) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典:鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510.1988
- 18) 高岡祐二, 丸山久一, 清水敬二, 中田泰広:鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.591-596, 1989
- 19) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人:鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.727-732, 1993
- 20) 松島学, 堤知明, 村上祐治:鉄筋腐食膨張による表面コンクリートのひび割れモデル,

- コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.799-804, 1994
- 21) 大津政康, 堤知明, 村上祐治, 工藤雄一: 鉄筋腐食によるひびわれ進展に関する基礎実験および BEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.955-960, 1995
 - 22) 亀谷英樹, 佐藤靖彦, 上田多門, 角田與史雄: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりひび割れ性状の解析的検討, コンクリート年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996
 - 23) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.2
 - 24) 元路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.2
 - 25) 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測, 土木学会論文集, No.802/V69, pp.209-222, 2005.11
 - 26) 荒木弘祐, 高谷哲, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食膨張圧の三次元効果に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 17 巻, 第 3 号, 2006.9
 - 27) 高谷哲, 元濱浩人, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: 鉄筋腐食により生じる腐食膨張圧推定に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 7 巻, pp.235-240, 2007.11
 - 28) 齋藤祐樹, 下村匠: コンクリート中の鉄筋腐食の空間的不均一性が腐食ひび割れ発生限界に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1089-1094, 2008
 - 29) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
 - 30) 鈴木三馨, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋剛: 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1081-1086, 2009
 - 31) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村光, 国枝稔: 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1007-1012, 2010
 - 32) 齋藤亮介, 高谷哲, 平野裕一, 山本貴士, 宮川豊章: 鉄筋断面の週方向腐食分布がひび割れ発生限界腐食深さに与える影響に関する実験的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-201, pp.401-402, 2013
 - 33) Esayas Gebreyouhannes, Koichi Maekawa: Nonlinear Gel Migration in Cracked Concrete and Broken Symmetry of Corrosion Profiles, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 14(2016), pp.271-286
 - 34) 角本周, 梶川康男, 川村満紀: コンクリート中の鉄筋腐食による膨張挙動の弾塑性解析とその適用性, 土木学会論文集, 第 402 号/V-10, 1989.2, pp.151-159, 1989.2
 - 35) 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひび割れ発生限界腐食深さに関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992
 - 36) 山田義智, 大城武: 破壊力学に基づく FEM による縦ひびわれ発生腐食量の解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.733-738, 1993

- 37) K.Yokozeki, K.Motohashi, K.Okada and T.Tsuzumi : A Rational Model to Predict the Service Life of RC Structures in Marine Environment, Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.777-782, 1997
- 38) 松島学, 横田優, 関博:鉄筋腐食膨張によるひび割れ時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004
- 39) 中川裕之, 田中大博, 横田優, 松島学:塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2
- 40) Khao K. TRAN, Hikaru NAKAMURA, Keisuke KAWAMURA and Minoru KUNIEDA : Quantitatively evaluation of crack propagation due to rebar corrosion, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1043-1048, 2010
- 41) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛:ひび割れ発生限界腐食深さと腐食生成物の膨張率の定量化に基づく耐久・構造連成解析システムの高精度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.773-778, 2010
- 42) 松元淳一, 堀口賢一, 丸屋剛:塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時の腐食量の評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 43) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章:コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013
- 44) 元濱浩人, 高谷哲, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章:隣接鉄筋腐食によるかぶりコンクリート剥離の予測に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第7巻, pp.241-246, 2007.11
- 45) 高谷哲, 元濱浩人, 山本貴士, 宮川豊章:隣接鉄筋が腐食ひび割れの発生・進展メカニズムに与える影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第9巻, pp.281-286, 2009.10
- 46) 森永繁:鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学博士論文, 1986
- 47) 佐伯竜彦, 大即信明, 長滝重義:中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.55-66, 1996.2
- 48) 鳥取誠一, 宮川豊章:中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.35-46, 2004.8
- 49) 掛川勝, 榊田佳寛, 松林祐二, 鹿毛忠継:コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.672, pp.143-151, 2012.2
- 50) 掛川勝, 榊田佳寛, 松林祐二, 鹿毛忠継:コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する腐食促進実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.681, pp.1613-1622, 2012.11

- 51) 米澤敏男, 押田文雄, 本間大輔, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純:コンクリートの中性化後における鉄筋の腐食速度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.704, pp.1405-1414, 2014.10
- 52) 前原聡, 伊代田岳史:雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.2, pp.80-87, 2018
- 53) 小林孝一, 宮川豊章:分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.173-186, 2001.2
- 54) 金田尚志, 松岡和巳:BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1715-1720, 2011
- 55) 元濱浩人, 渡辺健, 大野又稔, 轟俊太郎:供用 RC 構造物における鉄筋の腐食性状の評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1291-1296, 2014
- 56) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, 2004.4
- 57) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'18 [基礎編], pp.128-129, 2018.2
- 58) 松下将士, 轟俊太郎, 田所敏弥, 石田哲也:実 RC 構造物の鉛直部材を対象としたかぶりの推定手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1303-1308, 2018
- 59) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016.7
- 60) 嵩英雄, 和泉意登志, 友沢史紀, 福士勲:経年 RC 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, コンクリート工学年次講演会論文集, 第 6 回, pp.181-184, 1984
- 61) 鳥取誠一, 土田伸治, 宮川豊章:ひび割れと鉄筋腐食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.3, pp.1-15, 1999.9
- 62) 上田洋, 玉井譲:コンクリート構造物の表層付近における水分分布の検討, 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会(216 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集, 土木学会, コンクリート技術シリーズ, No.87, pp.113-120, 2009.11
- 63) 飯島亨, 佐々木孝彦, 横田優, 松島学:塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 4 巻, pp.11-16, 2004.10
- 64) 角野拓真, 轟俊太郎, 松下将士, 田所敏弥:目視情報に基づく実 RC 構造物のはく落予測ツールの開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 22 号, pp.131-138, 2018.
- 65) 轟俊太郎:鉄道コンクリート構造物を通して, コンクリート工学, Vol.55, No.1, pp.34-29, 2017.1
- 66) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物, 丸善, 2007.1

謝辞

学位論文を結ぶにあたり、ご指導、ご協力を頂いた多くの方々に、深く感謝の意を表します。

主査の東京大学大学院工学系研究科教授 石田哲也博士には、本論を取り纏めるにあたり、構成から内容に至るまでご指導、ご助言を頂きました。特に、コンクリート構造物の鉄筋腐食に対する耐久設計の在り方を踏まえて、実直にご指導を頂きましたことに深く感謝を申し上げます。同じく、副査の東京大学生産技術研究所教授 岸利治博士、講師 酒井雄也博士、東京大学大学院工学系研究科講師 高橋佑弥博士、東京理科大学教授 兼松学博士におかれましても、貴重な時間を割いて、適切かつ有益なご指導、ご助言を頂きました。ここに厚く感謝を申し上げます。

鉄道総研 谷村幸裕博士、曾我部正道博士には、採用面接時からご指導を頂き、また入所当時からの上司として、未熟な筆者に何よりも幅広い経験をさせて頂いたこと、様々な方の協力を得て仕事をする上で何者かである前に「人」としての心構えを教えて頂いたことに、厚く感謝を申し上げます。また、鉄道総研 上田洋博士には、鉄筋腐食に対する水の重要性や土木学会のコンクリート標準示方書[設計編]に腐食の主要因を水の浸透と考える照査が導入された経緯など本論の根幹にあたる内容に対し、懇切丁寧にご指導を頂きました。ここに厚く感謝を申し上げます。そして、鉄道総研 神田政幸博士には、筆者の所属する部長として、本論の執筆にあたり、励ましと温かいお言葉を頂きましたことに厚く感謝を申し上げます。

鉄道総研 岡本大博士、田所敏弥博士、仁平達也博士、渡辺健博士、および北武コンサルタント 渡邊忠朋博士には、鉄筋コンクリートの破壊現象やその力学的機構による解釈、経時変化を呈する特性、またそれらに基づく技術開発の進め方、設計の考え方など、原理原則からそれを踏まえた研究論、設計論に至るまで、鉄筋コンクリートに対する研究の面白さを踏まえて、ご指導頂きましたことに厚く感謝を申し上げます。また、鉄道総研 渡辺勉博士、後藤恵一博士、中田裕喜博士、徳永宗正博士には、様々な面からご助言、ご協力を頂きました。ここに厚く感謝を申し上げます。

鉄道・運輸機構 玉井真一博士、元 REC 金森真氏、千代雄二氏には、筆者が鉄道・運輸機構へ出向した際、コンクリート構造物の設計、施工に携わる機会を頂くと共に、経験や知見から得た技術や線状構造物としての合理性の捉え方などを教えて頂きました。この経験が、鉄筋腐食を考える上で重要な因子であるかぶりに対する施工誤差やかぶり部分の構造物全体に対する経済インパクト、鉄筋腐食が構造物の性能に与える影響などを真摯に考えるきっかけとなり、本論の執筆に繋がったものと思います。貴重な経験とご指導を頂きましたことに厚く感謝を申し上げます。

本論は、主に鉄道構造物を対象とした実態調査をベースとしたものです。調査では、パシフィックコンサルタンツ 松橋宏治氏、JR 四国 宇野匡和氏、JR 九州コンサルタンツ 原田和洋氏、近畿日本鉄道 元濱浩人氏、JR 四国 角野拓真氏などを中心とする鉄道総研 コンクリート構造への元出向者の方々、鉄道事業者の方々など数多くの方々にご協力、ご助言を頂きました。ここに厚く感謝を申し上げます。

以上のように、本論は、皆様方が着々と積み上げてきた知見の集約の一端を筆者が取り纏めたものであります。今後も、皆様のご指導、ご協力のもと、これまで以上に、コンクリート構造物が自然と人に調和し、均衡のとれた豊かな社会を支えるものとなるように尽力していく所存です。

最後に、両親と日々筆者を支えてくれる妻・未央子に心より感謝します。