

鉄筋コンクリート構造物の離散化極限解析(その2)

——ディープビームの解析——

Discrete Limit Analysis of Reinforced Concrete Structures (II)

——Analysis of Deep Beam——

川井忠彦*・樋口晴紀**・竹内則雄*
渡辺正明*・上田真稔***・毛井崇博***

Tadahiko KAWAI, Harunori HIGUCHI, Norio TAKEUCHI
Masaaki WATANABE, Masatoshi UEDA and Takahiro KEI

1. はじめに

鉄筋を等価な直交異方性板に置換した鉄筋コンクリート要素の2次元剛体パネモデルの定式化をその(1)で示した。そこで本論文では、その妥当性を確認するために、せん断破壊が明確に現れるせん断スパン比1.0のディープビームおよびPush-Off型せん断実験のシミュレーション解析を行った。

2. せん断スパン比1.0のディープビーム

解析モデルとしてPaiva¹⁾²⁾らが行った実験のうち、せん断スパン比1.0の矩形ばりを取り上げた。この実験の破壊形態は典型的なディープビームにおけるせん断破壊の様相を示しており、斜めひび割れ発生後ウェブコンクリートが圧壊し破壊に至っている。

試験体の形状寸法を図-1に、材料特性値を表-1に示す。表中の P_b は鉄筋比を、 F_y は鉄筋の降伏応力度を表す。また F_c ・ F_b はそれぞれコンクリートの圧縮強度、曲げ強度を表す。そして実験による破壊形態を図-2に示す。図中の黒い箇所は破壊した部分であり、アーチリブに相当するコンクリートが圧壊している。

2.1 骨材のかみ合い作用

本手法ではダウエル効果を除いたひび割れ界面でのせん断特性をCedolin and Dei Poli³⁾の関係式を用いてせん断パネとして取り扱っている。このせん断パネは骨材のかみ合い作用・ひび割れ後の鉄筋とコンクリートの付着をマクロ的に表現している。そこで、このせん断パネの存在範囲をI-鉄筋領域のみとした場合とII-無筋領域にも一様に分布するとした場合の崩壊荷重・破壊形態にどのような差異が生ずるか比較を行った。その結果が表-2および図-3である。

図-3よりIの破壊形態はせん断破壊と引張破壊の混合

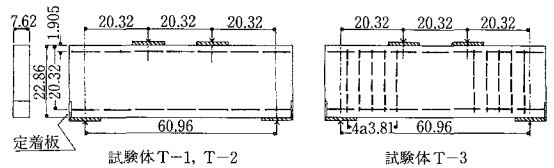


図-1 試験体寸法

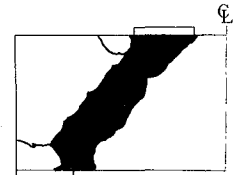


図-2 試験体T-1の破壊形態

表-1 材料特性値 kg/cm²

	ウェブ鉄筋		引張鉄筋		圧縮鉄筋		F_c	F_b
	P_b	F_y	P_b	F_y	P_b	F_y		
T-1	0	0	2.58	3178	0.83	3536	203	33
T-2	1.09	2250	1.67	3325	0.92	3620	236	36
T-3	0	0	1.67	3325	0.92	3620	203	33

表-2 T-1の崩壊荷重

ϕ 度	C kg/cm ²	実験値 t	種別	計算値 t
37	50.5	21.8	I	21.24
			II	21.70
46.3	40.7	21.8	I	18.84
			II	21.24

したものであり、IIのそれは圧縮破壊である。実験との比較から崩壊荷重・破壊形態ともIIが良好である。

次に圧縮を受けるコンクリート面での摩擦はモール・クーロンの降伏条件における粘着力 C または内部摩擦角 ϕ で表現することができる。表-3は内部摩擦角を一定にし粘着力を変化させたときの本解析による崩壊荷重を実験値と比較したものである。Iの⑥は末永の式⁴⁾(1)より、IIの⑥は圧縮強度円応力と割裂引張強度円の包絡線より求める式(2)より、またその他の値は適当な値を仮定したものである。ここで F_b 、 σ 、 τ はそれぞれコンクリートの引張強度・軸方向応力度・せん断方向応力度を表す。

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** ㈱安部工業所

*** ㈱竹中工務店 技術研究所

研究速報

表-3 崩壊荷重

		C kg/cm ²	φ 度	実験値 t	計算値 t	P/P _{exp}
I	Ⓐ	35.0	37.0	21.8	20.36	0.93
	Ⓑ	50.5			21.70	0.99
	Ⓒ	60.0			21.70	0.99
	Ⓓ	100.0			21.52	0.98
II	Ⓐ	35.0	46.3	21.8	18.46	0.84
	Ⓑ	40.7			21.24	0.97
	Ⓒ	60.0			21.44	0.98
	Ⓓ	100.0			21.48	0.98

P : 計算値
P_{exp} : 実験値

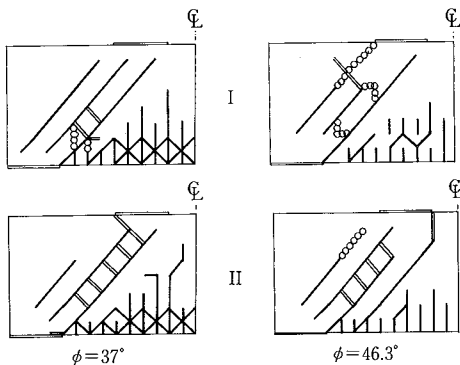


図-3 破壊形態

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi + 0.249 F_c \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin\phi &= (F_c - 4 F_t) / (F_c - 2 F_t) \\ C &= F_t (2 - \sin\phi) / \cos\phi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

この結果より、通常用いられている内部摩擦角 37° を用いたとき C の変化に対して崩壊荷重に大きな差異はなく、II の場合も C の値が Ⓐ より大きければ差異は認められない。しかも図-4 の破壊形態も I と II の間に大きな違いはない。この原因として、すべりが低応力で発生し、しかも鉄筋領域に集中し破壊にあまり影響を与えていないと考えられる。図-5 に荷重-変位曲線を示す。

2.2 ダウエル効果

ダウエル効果は鉄筋とコンクリートの相互作用でありダウエル効果の係数 β は鉄筋径や鉄筋の変形・応力状態によって変化するパラメータと考えられる。しかし、ここでは複雑さを避け β は一定とし β = 0.0, 0.02, 0.1 について φ = 37°, C = 50.5 kg/cm² として解析を行った。その結果を表-4 に、破壊形態を図-7 に示す。

この結果から、ダウエル効果の係数によって崩壊荷重・破壊形態は大きく変化し、β = 0.0 のときは圧壊とせん断破壊でメカニズムを形成し β = 0.1 の場合は載荷点付近で

表-4 β の変化による崩壊荷重

	C kg/cm ²	φ 度	β	計算値	P/P _{exp}
Ⓐ	50.5	37.0	0.0	18.9	0.87
Ⓑ	"	"	0.02	21.7	0.99
Ⓒ	"	"	0.1	23.0	1.06

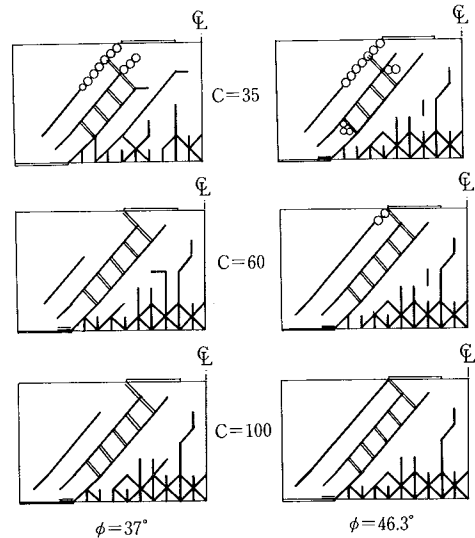


図-4 粘着力の変化による破壊形態

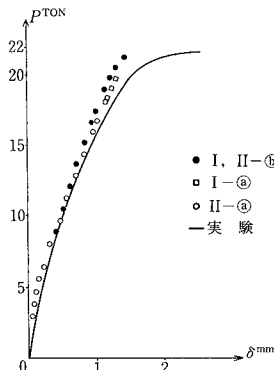


図-5 荷重-変位曲線

破壊し斜めひび割れ間のコンクリートは圧壊していない。β = 0.02 の場合が実験の破壊形態と一致している。図-6 はそれぞれの場合の荷重-変位曲線が示しているが β の変化を明瞭に表している。この結果よりダウエル効果の係数 β は一定値として取り扱っても良いと思われる。

2.3 試験体 T-2・T-3¹⁾ のシミュレーション

φ = 37°, C = 50.5 kg/cm², β = 0.02 として、あばら筋の有る梁と無い梁について解析を行った。材料特性は表-1、試験体寸法は図-1 である。解析結果を表-5 に、実験と

研究速報

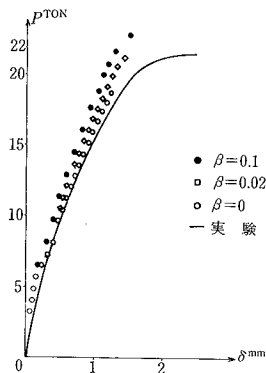


図-6 荷重—変位曲線

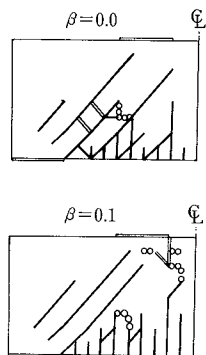


図-7 ダウエル効果係数の違いによる破壊形態の差

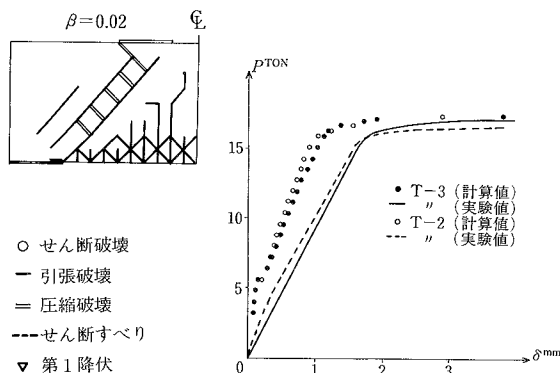


図-8 荷重—変位曲線

表-5 崩壊荷重

	T-2		T-3	
	実験 <i>t</i>	解析 <i>t</i>	実験 <i>t</i>	解析 <i>t</i>
ひび割れ荷重	5.9	6.3	6.0	6.3
崩壊荷重	17.2	17.0	17.4	17.2
破壊形態	せん断破壊		せん断破壊	

解析の破壊形態の比較を図-9に示す。図中の黒い個所は破壊している部分である。図-8に荷重—変位曲線を示す。変位は実験と比較してやや堅めとなつてはいるものの破壊形態・崩壊荷重は良好に一致している。

3. Push—Or型せん断実験

電力中央研究所で行われた Push—Or型せん断実験⁹⁾のシミュレーション解析を行い、Jensen⁹⁾による内部エネルギー—逸散速度に基づいたせん断耐力式と比較を行った。

図-10は試験体の形状寸法と加力方法であり、図-11は要素分割図である。加力部にはローラーおよび球座が用いてあり試験体のせん断ずれ変位・回転変位を拘束しないようになっている。表-6は材料特性値であり $E_c \cdot E_s$ はそれぞれコンクリート・鉄筋のヤング係数である。

図-12は鉄筋比 P_r が 1.89% の場合の解析による破壊進展状況であり実験による破壊形態である。解析による最大平均せん断応力 $\bar{\tau}_{max} = 109 \text{ kg/cm}^2$ 、実験結果では 101.4 kg/cm^2 と一致し最終の破壊状態も良好な対応を示している。

また、図-13は種々の鉄筋比に対する終局耐力の関係を無次元化し実験・解析および Jensen の式を示したものである。この図より本解析法がそれぞれの鉄筋比に対する崩壊荷重を良好に推定していることが伺える。領域 I で

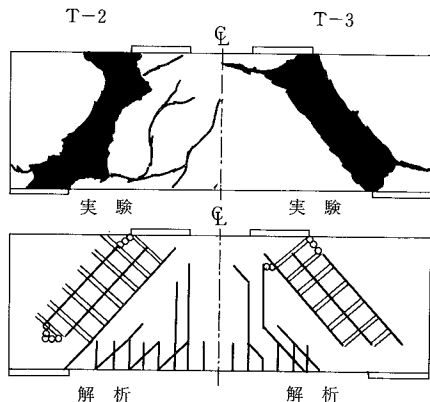


図-9 試験体 T-2, T-3 の解析と実験の破壊形態

は鉄筋量が少なくダウエル効果が多く期待できないためすべり破壊となり、領域IIでは鉄筋量の増加に伴いすべりが 20° 方向に分散されている。また、領域IIIでは斜めせん断すべりおよび、ひび割れの後圧縮破壊で耐力が決定している。

次に、この結果と Jensen が与えている上界荷重の関係を検討する。Jensen によれば相対速度ベクトルとすべり線のなす角 α と内部摩擦角の関係で耐力は次に示す4つの式で表される。

(i) $\alpha > \phi, \mu_t < \nu/2 \cdot \{(1 - \sin\phi) - 2(1 + \sin\phi)\xi\}$ のとき

$$\tau/F_c = (\mu_t + \nu\xi)$$

$$\sqrt{\nu(1 - \sin\phi - 2\xi\sin\phi) / \{(\mu_t + \nu\xi)(1 - \sin\phi)\}} - 1 \quad (3)$$

(ii) $\alpha = \phi, \nu/2 \cdot \{(1 - \sin\phi) - 2(1 + \sin\phi)\xi\}$

$\leq \mu_t \leq \nu/2(1 - \sin\phi)$ のとき

$$\tau/F_c = \nu(1 - \sin\phi)/2 \cos\phi + \mu_t \tan\phi \quad (4)$$

(iii) $0 < \alpha < \phi, \nu/2(1 - \sin\phi) \leq \mu_t \leq \nu/2$ のとき

$$\tau/F_c = \sqrt{\mu_t(\nu - \mu_t)} \quad (5)$$

表-6 材料特性値

コンクリート				鉄筋	
F_c	F_t	E_c	ϕ 度	F_y	E_s
308	26.5	2606×10^5	37	4500	2.1×10^6

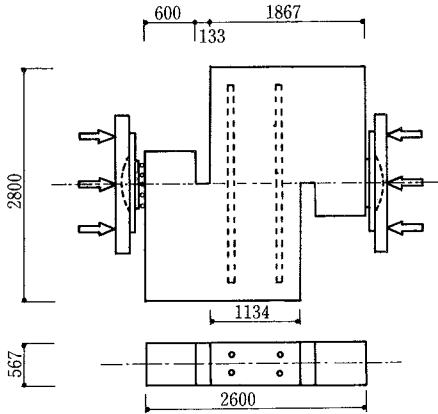


図-10 試験体形状寸法

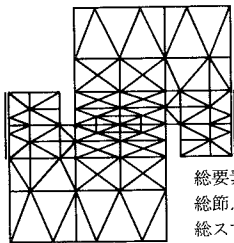


図-11 要素分割図

(iv) $\alpha = 0, \mu_t > \nu/2$ のとき

$$\tau/F_c = \nu/2 \quad (6)$$

ここで $\xi = F_t/F_c$

ν : コンクリートの有効係数

μ_t : 鉄筋係数 $P_o \cdot F_y/F_c$

今、 $\nu = 2/3, \xi = 0.1, \phi = 37^\circ$ と仮定すれば(3)式の領域は $P_o \leq 0.178\%$, (4)式では $0.178 \leq P_o \leq 0.91\%$, (5)式では $0.91 \leq P_o \leq 2.28\%$ で(5)式の領域は $P_o \geq 2.28\%$ となる。解析との比較では(3), (4)式が領域Iに相当し, (5)式, (6)式がそれぞれ領域II・領域IIIに相当する。そして(6)式は鉄筋比に依存せずコンクリートの圧縮強度のみでせん断耐力が決まり, 解析による領域IIIの破壊形態がこのことを良く示している。

4. ま と め

本手法を用いてせん断が卓越する2つの試験体を解析

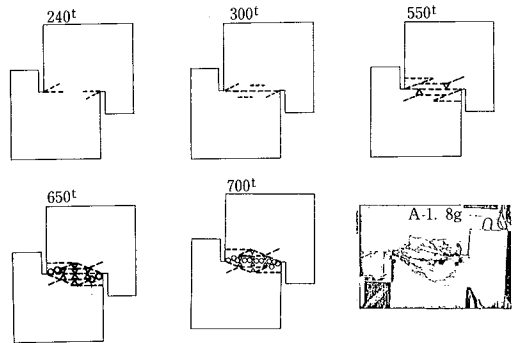


図-12 Push-Off型せん断実験の解析結果および実験結果

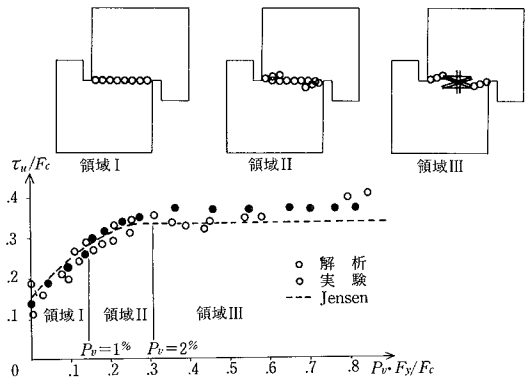


図-13 解析と実験の比較

した結果, 崩壊荷重・荷重-変位曲線・破壊形態を良好に表現することができた。(1986年1月22日受理)

参 考 文 献

- 1) de Paiva, H.A.R. et al., [Strength and Behavior of Deep Beam in Shear], Proc. of A.S.C.E.,
- 2) RC 構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, JCI, データ集, 1983. pp. 1~3
- 3) 末永・石丸: 組合せ応力を受けるコンクリート材の動力的解析, 日本建築学会論文報告集, No. 220, pp. 1~7
- 4) Cedolin, L., and Dei Poli, S., "Finite Element Non-Linear Plane Stress Analysis of Reinforced Concrete", Studi e Rendiconti, Costruzioni in Cement Armato, Vol. 13, Politecnico di Milano, pp. 3-33, 1976
- 5) Aoyagi, Y., Sakamoto, S., Takada, K., and Yamasaki, A., "Full Scale Model Push-Off Test of Reinforced Concrete Block with 51 mm Dia. Deformed Steel Bars", 6-th SMIRT, J 417, 1981
- 6) Jensen, B.C., "Lines of Discontinuity for Displacements in The Theory of Plasticity of Plain and Reinforced Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 27, No. 92, Sept., 1975., pp. 143~150