

日本における鉄筋コンクリート造建築物の耐震補強工法の現状

Seismic Retrofitting of Reinforced Concrete Buildings in Japan

中 埜 良 昭*

Yoshiaki NAKANO

地震国においては地震に強い建物、都市を築くことは、地震防災上重要な課題である。本稿では鉄筋コンクリート造建築物を対象に、世界でも有数の地震国であるとともに地震工学の先進国でもある日本における耐震補強対策について、その現状を紹介する。

1. は じ め に

わが国では1920年代より、多数の鉄筋コンクリート造(以下RC造)建築物が建設されてきた。これらの建物は耐震規定に従って設計、建設されたものであるが、1968年・十勝沖地震あるいは1978年・宮城県沖地震に見られた被害は、既存RC造建築物の中には耐震性能が十分でない建物もある割合で含まれていることを示した。同時に、まだ地震を経験していない地域にもひとたび大地震が発生すると同じような被害が生じる可能性があることが指摘され、耐震性能の低い建物を選定、補強する対策が急務とされた。

1968年・十勝沖地震以後、耐震規定の見直し、新しい耐震規定の模索を主目的とした総合研究プロジェクトが始まるとともに、種々の耐震診断手法が提案され、1977年にはこれらの成果を統一した「耐震診断基準¹⁾」が発表されている。この基準はこれまでに数多くの建物に適用され、特に静岡県では東海地震対策を念頭に、学校、病院、庁舎などの公共建築物が耐震診断され、問題のある建物については補強されてきている。

本稿では、わが国における耐震補強対策の現状について、事例をまじえて解説する。

2. 耐震補強の手順

将来の地震に対して建物の耐震安全性を確保するためには、必要に応じて耐震補強を行うことが必要となるが、補強の可否の判定における一般的な手順は次のように表せる。

- (1) 建物の耐震性能の評価
- (2) 必要とされる耐震性能の決定
- (3) 耐震補強工法の決定
- (4) 補強要素と既存骨組の接合詳細の決定

*東京大学生産技術研究所 第1部

(5) 補強建物の耐震性能の確認

構造物の耐震性能はその剛性、強度、変形能(じん性)、構造物の応答性状、地震動や地盤の特性などに依存することはよく知られているが、これらのうち、強度および変形能が建物の耐震性能を支配する最も重要な要因である。したがって、建物の耐震性能を評価するに当たっては、その強度および変形能を考慮することが重要である。

構造物の耐震安全性の評価においては、予想される地震動に対して必要とされる耐震性能、すなわち補強の可否を判定する基準を設定することも重要な事項となる。判定では、建物の重要度(用途)、地震活動度、建設地において予想される地震動のレベルが重要な要因となる。

建物に補強が必要となった場合、目標となる耐震性能、構造種別、地盤条件、居住者の有無、補強に要する費用などを勘案して補強工法を決定することになる。また既存建物と新たに設置する補強要素の接合部分の性能は構造物全体の耐震性能に大きな影響を与えるため、その接合詳細も重要な検討項目となる。

最終的には補強建物の耐震性能を再評価し、補強目標を満足していることを確認する必要がある。

3. 日本における耐震診断手法

RC造建築物の耐震性能を評価するにあたっては、わが国では、「耐震診断基準¹⁾(以下診断基準)」を適用する事例が多い。そこで本節では、耐震診断手法の概略およびその適用例について簡単に紹介する。

3.1 耐震診断手法の概略

耐震診断基準は、計算の最も簡単な第1次診断から最も詳しい第3次診断までの3つのレベルから構成され、それぞれの特徴は以下のとおりである。

第1次診断：柱、壁の強度をその部材の断面積から略算的

に求める。計算は最も簡単である。

第2次診断：柱、壁の強度には鉄筋の影響も考慮し、部材の強度、形状寸法からその変形能を評価する。ただし、梁、スラブは剛と考へ、計算では考慮しない。

第3次診断：柱、壁に加えて、梁の強度も考慮して耐震性能を計算する。計算は最も詳しい。

診断基準では、構造物の耐震性能を建物の各主要方向それぞれについて各階ごとに、(1)式に示す I_s 指標で表す。

$$I_s = E_o \times S_D \times T \quad (1)$$

E_o 指標は構造物の耐震性能を評価する上で最も基本となる指標であり、構造物の保有する耐力を建物の重量で割ったいわゆるせん断力係数の形で表した指標 (C 値) と、変形能を表す指標 (F 値) の積で表すことを原則としている。これは建物が地震力を受けた際に安全であるためには、壁の多い建物では粘り (変形能) が少ないのでかなりの強度が必要であるが、壁の少ない建物では強度があまり高くないので粘りのある構造でなければならないことを考慮して、壁の多い建物と少ない建物とに共通な耐震性能の評価尺度を与える目的で定められたものである。

S_D 指標、 T 指標はそれぞれ、構造物の平面形状および立面形状の非整形性、構造物に生じているきれつ、変形、老朽化などの経年劣化が、その耐震性能に及ぼす影響を評価するための係数で、これらはともに、構造物の耐震性能に不利な影響を与える要因を考慮するための E_o 指標の修正係数である。

以上の考えに基づき、耐震性能が数値として算定され、その数値が大きいくほど耐震性能に優れていることを表すことになる。

3.2 日本における RC 造建築物の耐震性能の現状

既述のとおり、静岡県では東海地震を想定した地震対策の一環として、1977年より県内の既存 RC 造公共建築物を対象に「耐震診断基準」を適用し、その耐震性能の見直しを行うとともに、耐震性能に問題のある建物については耐震補強、改築などの対策を行ってきている。現在では県内の3000棟を超す建物の耐震診断が完了しており、300棟以上の建物については補強、改築が行われている。

Fig. 1 の棒グラフ (白抜き部分) は、耐震診断が実施された建物の内の1615棟 (いずれも被害地震は未経験) を対象に、第2次診断による1階の I_s 指標の分布を示したものである³⁾。対象建物の大半は、1970年の建築基準法施行令改正前に建設された2~4階建ての学校建築物である。なお同図では、建物の桁行方向、梁間方向の I_s 指標をそれぞれ別々のサンプルとして扱っており、データ数は建物数の約2倍の3153個である。図中の曲線①は頻度分布を対数正規分布曲線で近似したものであるが、この図から既存 RC 造建築物の I_s 指標の分布はほぼ対数正規分布曲線で

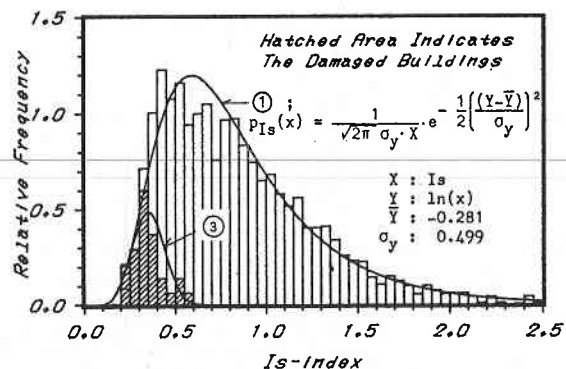


Fig. 1 Histogram of Seismic Capacity of Existing R/C Buildings³⁾

近似でき、またその耐震性能にはかなりの幅があることがわかる。なお、ここでは静岡県の例を示したが、わが国における耐震規定は全国的に統一されており、したがって耐震性能の地域差が比較的小さいと予想されることから、Fig. 1 の分布は、わが国における既存 RC 造建築物の耐震性能の分布を概略表しているものと考えられよう。

4. 耐震補強の要否判定のためのクライテリア

“耐震性能”が評価されると、その耐震安全性を判定し、耐震補強の要否を決定することが次に必要となる。診断基準では、(2)式に示す必要耐震性能 (I_{so}) 以上の耐震性能 (I_s) を有する建物は“安全”と判定される。

$$I_s \geq I_{so} \quad (2)$$

$$I_{so} = E_s \times Z \times G \times U$$

(2)式における E_s 指標は、対象建物に必要とされる基本的耐震性能を表す。 Z 指標、 G 指標、 U 指標はそれぞれ、地震活動度、地盤条件、建物の用途 (重要度) を考慮するための係数である。

必要耐震性能を決定するための一つの有効な手段としては、対象建物の耐震性能を過去に被害地震を経験した建物の耐震性能と比較することが考えられる。Fig. 1 のハッチ部分は、1968年・十勝沖地震および1978年・宮城県沖地震で中破以上の構造被害を受けた建物についての耐震診断結果の頻度分布を、1615棟の診断結果に重ねて示したものである。なおここでは、前記の地震における RC 造建築物の被害率が約 10 %であったことから、被害建物の頻度分布については相対頻度を 0.1 倍に調節して示した。

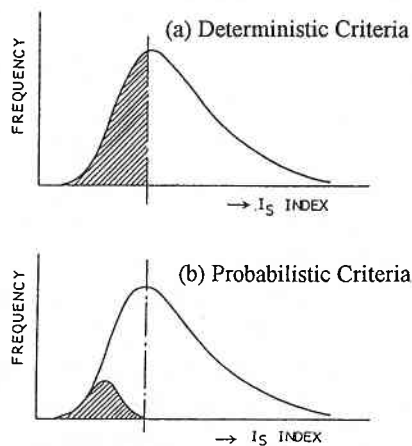
図から、これらの2つの地震に対して I_s 指標が 0.6 程度以上有する建物は被害を受けていないことがわかるが、この結果をもとに、十勝沖地震における八戸市あるいは宮城県沖地震における仙台市程度の地震動レベルに対する E_s 指標は、第2次診断および第3次診断レベルでは 0.6 と設定されている。なおここで注意すべき点は、 I_s 指標が

Table 1 Decision Criteria for Retrofitting School Buildings^[4]

ランク	条 件	判 定
I	$I_s \geq E_T$	補強の対象としない。
II	$E_T > I_s \geq \frac{2}{3} E_T$	原則として補強の対象としない。ただし、想定した強さの地震動に対して被害の生じる可能性があるため、破壊形式を検討し、崩壊の危険性がある場合には補強が必要である。
III	$\frac{2}{3} E_T > I_s \geq \frac{1}{3} E_T$ かつ $I_s \geq 0.3$	原則として補強の対象とする。ただし、より精密な診断により崩壊の危険性がないと予想される場合には補強の対象としない。
IV	$I_s < \frac{1}{3} E_T$ または $I_s < 0.3$	補強または改築の対象とする。

注：表中の E_T 指標は耐震診断基準の I_{so} 指標に対応する。

低くなるに従って地震被害を受ける割合が高くなる、すなわち地震による被害危険度が高くなるが、0.6 よりも低い建物すべてが必ずしも被害を受けるわけではない点である。Fig. 2 には既存建物と被害建物の I_s 指標の分布の模式図を、また Fig. 1 には確率理論に基づき推定した地震被害建物の頻度分布を曲線③でそれぞれ示したが、Fig. 1 の被害建物の分布は Fig. 2 (b) の形状と類似しているのがわかる。もし必要耐震性能が確定論的に決定される、すなわち、ある I_s 指標よりも性能の低い建物すべてが被害を受けると考えるならば、十勝沖地震および宮城県沖地震における被害率は 10 % よりも大きなものになっていたはずである。これらの結果は、地震被害の可能性を議論する場合には地震動、建物の終局強度、変形能、地震応答などにおけるばらつきを考慮すべきであり、必要耐震性能を下回る建物が必ずしも直ちに危険というのではなく、地震に対して安全な建物、危険な建物の選定は確定論的に決定するよりはむしろ確率論的立場から検討すべきことを示唆している。以上の検討結果をもとに、学校建築物の耐震補強の要否の判定基準では、Table 1 に示したような基準^[4]が提案されている。

Fig. 2 Distribution of I_s -Index for Buildings

5. 日本における耐震補強技術

5.1 耐震補強に対する基本的な考え方

すでに述べたとおり、水平耐力とじん性能は構造物の耐震性能を支配する最も主要な要因である。したがって、低い耐震性能を有する建物を耐震補強する際の基本的な考え方としては以下のような手法が考えられる。

- (a) 建物の水平耐力を増加させる
- (b) 建物の変形能（じん性）を向上させる
- (c) 上記(a)および(b)の組み合わせ

Fig. 3 はこれらの概念を模式的に示したものである。手法(a)はもとの建物よりも水平耐力を高めることにより、地震時の応答変形をその変形限界以下に納め、耐震安全性を確保する手法である (Fig. 4 (a))。手法(b)は建物の変形能を応答変形量以上となるように改善することで耐震安全性を確保する手法である (Fig. 4 (b))。手法(c)はこれらの手法を組み合わせたもので、より高い水平耐力と変形能を期待するものである。

5.2 耐震補強手法²⁾

建物により高い水平耐力を付与するための具体的な補強手法としては、

- (a-1) 既存 RC 造フレームへの RC 造耐震壁の増設
 - (a-2) 既存 RC 造フレームへの鉄骨ブレースの増設
 - (a-3) 既存 RC 柱へのそで壁の増設
 - (a-4) 既存 RC 造フレーム（外周）へのバットレスの増設
- などが考えられる (Fig. 5 参照)。

手法 (a-1) は耐震補強工法として最も効果的な工法のひとつであり、従来からもわが国では最も一般的な耐震補強工法として用いられてきた。しかしながら、この工法では開口部分が減少するため、開口を必要とするような建物では、手法 (a-2) のように、鉄骨ブレースによる耐震補強も利用されるようになってきている。この工法では、採光が比較的容易であることに加えて、(1)高い強度と剛性を付与することができる、(2)RC 造耐震壁に比較して軽量であるため、基礎への負担が少なく、基礎補強工事が省略で

きることが多い、(3)補強要素は工場でプレファブ生産が可能であるため、工期短縮により居住者の不便を軽減できる、などの利点もある。

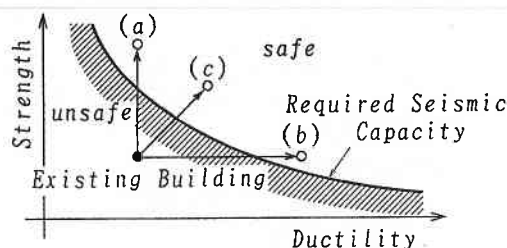


Fig. 3 Basic Concept for Seismic Retrofitting

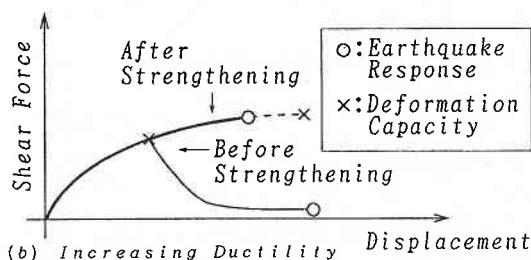
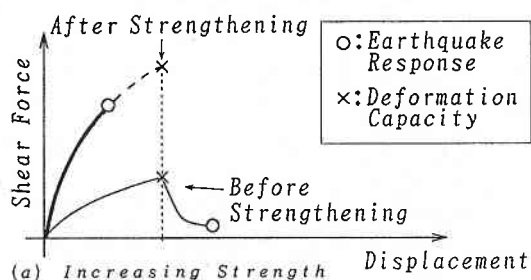


Fig. 4 Relationship of Seismic Capacity Before and After Retrofitting

一方、手法 (a-3) や (a-4) は、柱の水平耐力を上昇させるために有効な方法である。しかしながら、(a-4) の手法では、周辺敷地に空き地が必要であることや、バットレスの基礎部分で十分な反力が必要となるため、他の方法に比べると適用頻度はあまり高くない。

既存骨組、特に柱の変形能を改善する手法としては、

(b-1) 既存柱に鋼板を巻き両者の空隙部にモルタルを充填

(b-2) 既存柱の4隅にセットしたアングルに鋼帯を溶接

(b-3) 既存柱に溶接金網を巻きコンクリートを増し打つなどが考えられる (Fig. 6 参照)。

上記の工法はせん断耐力や圧縮軸力に対する拘束効果を高めることにより、水平耐力よりもむしろ変形能を改善することが主目的である。そのため、曲げ終局耐力の上昇を抑える一方で、せん断終局耐力を増加させ、より高い [せん断耐力/曲げ耐力] 比を実現することで部材の変形能を改善するために、これらの工法ではいずれも部材両端に隙間を設けている点に注目されたい。なおこれらの工法の場合、多少の部材を補強しても、未補強部材の変形能が乏しい場合は、建物全体の耐震性能の改善にはあまり効果がない点に注意する必要がある。

水平耐力およびじん性能ともに改善するための手法としては、Fig. 7 に示すようなじん性抵抗型の枠付き鉄骨ブレース⁵⁾が考えられる。この補強要素は、その塑性変形により地震時の入力エネルギーを吸収するシアパネル、大変形領域においても弾性範囲にとどまるように設計したブレース材、およびそれらを囲む鉄骨枠から構成される耐震補強要素である。この要素を既存骨組に設置することにより、骨組の耐震性能を、強度、剛性、変形能および履歴エネルギー吸収量の面で改善することが可能である。

補強要素と既存フレームとの接合、特に手法(a)および手

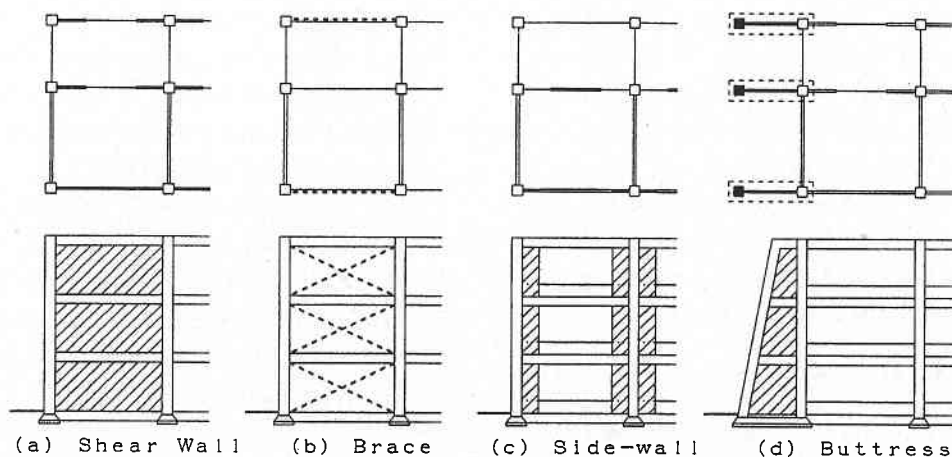


Fig. 5 Retrofitting with Walls or Braces to Increase Lateral Strength

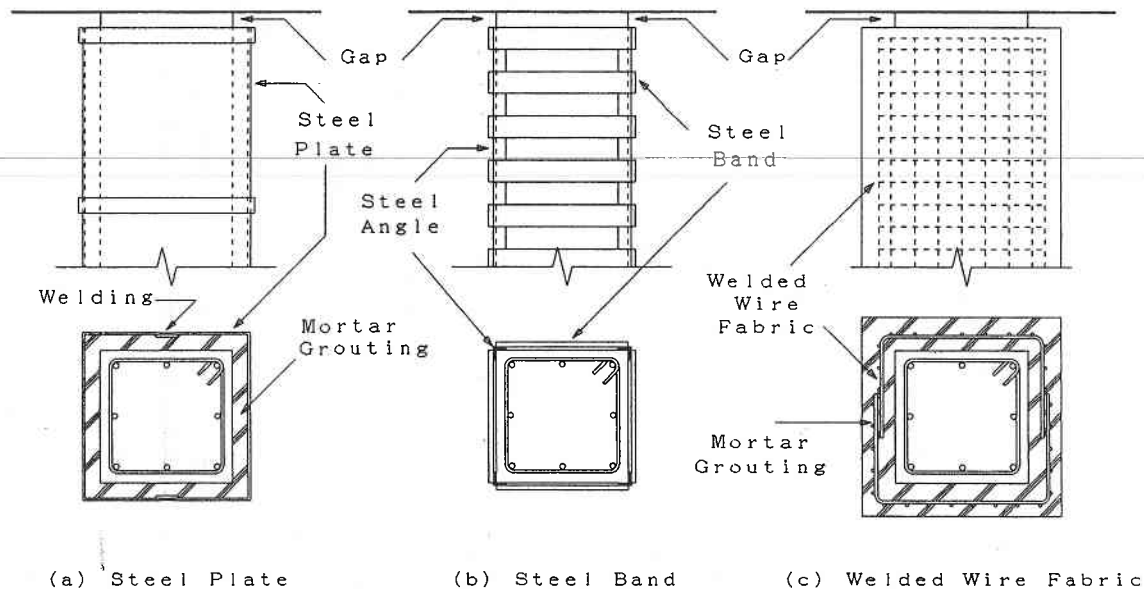


Fig. 6 Retrofitting of Columns to Improve Ductility

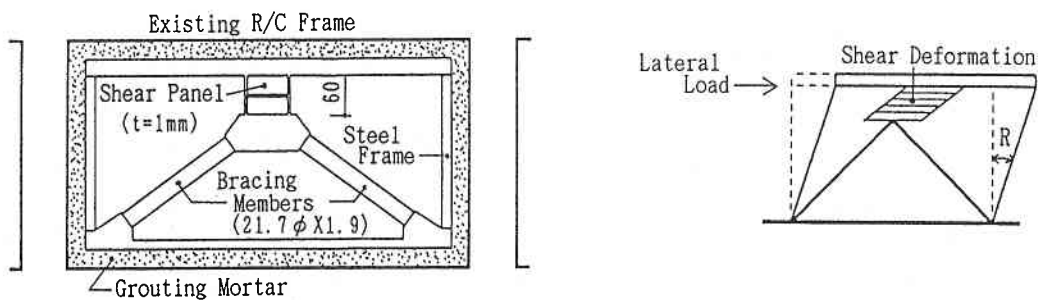


Fig. 7 Retrofitting with Ductile Steel Framed Brace

法(c)においては“あと施工アンカー”が一般的に用いられる。Fig. 8 に接合部分の詳細図を示す。地震時において構造物が受ける繰返し荷重に対して、補強建物が十分な性能を発揮するためには、作用応力を既存の構造要素および補強要素間で十分に伝達できるように設計することが肝要である。耐震補強要素は、既存要素と一体として挙動することにより最も効果的にその性能を発揮できると考えられることから、接合部分におけるアンカー自身の設計は変形能よりも強度に着目して設計されることが通常である。また接合部分における割裂破壊を防止するために、スパイラル筋を配することも多い。なお耐震改修指針²⁾における適用可能なアンカーは、従来、金属拡張型アンカーのみであったが、近年の研究成果をふまえて、同指針の改訂(1990年)に際し、接着系アンカーも追加させている。

6. む す び

地震に強い都市を築くためには、地震前、中、後それぞれに対して、ハード、ソフトの両面から幅広く対策を講じることが必要であるが、事前対策として日本では、本稿で

述べたように耐震補強手法が確立されてきた。

一方海外の状況を見ると、1988年・スピタク地震(アルメニア共和国)、1990年・ルソン島地震(フィリピン)、1992年・エルジンジャン地震(トルコ)など、近年においてもRC造建築物の崩壊により、時には数万人のオーダーで犠牲者が発生している。しかしながら、これらの被害を軽減するために有効な、事前対策としての耐震補強については、どのような概念に基づき、どのような手法を適用すべきかについて、必ずしもすべての地震国が明確な答を持ち合わせていないのが現状である。

1990年には「国際防災の10年(IDNDR)」が世界的規模でスタートしており、わが国も耐震工学の先進国として国際的な貢献が期待されている。本稿で示した手順、手法は、各国の建築事情により細部の修正は必要とはなるだろうが、基本的には他国にも同様に適用可能であると考えられる。今後は、これらの技術を積極的に“輸出”することが重要となろう。

(1993年12月22日受理)

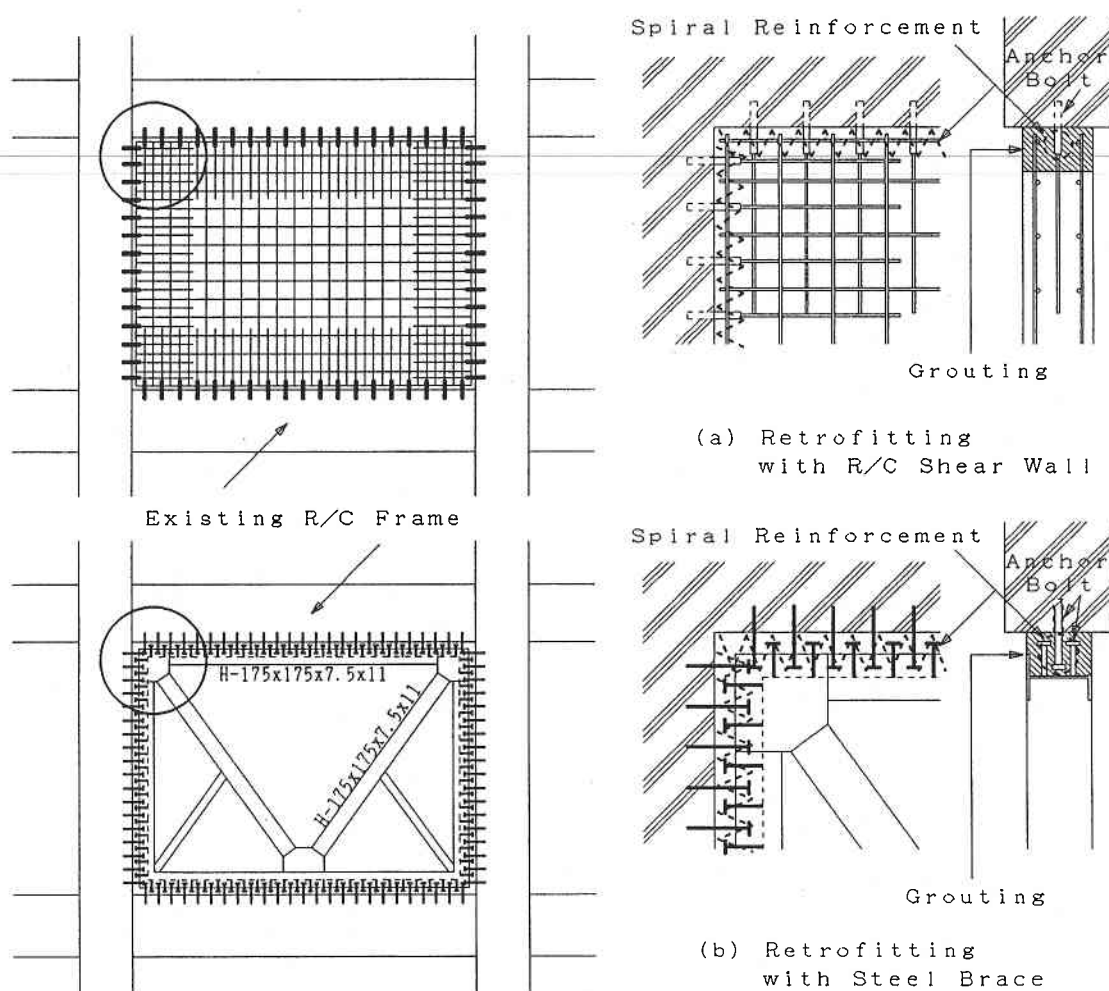


Fig. 8 Details at Connection

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，1977年（1990年改訂）
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修指針・同解説，1977年（1990年改訂）
- 3) Tsunéo Okada and Yoshiaki Nakano: Reliability Analysis on Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, August, 1988, Japan, vol.VII, pp. 333-338
- 4) 村上雅也，岡田恒男：鉄筋コンクリート造建物の耐震診断－例題と判定方法－，日本建築防災協会
- 5) Yoshiaki Nakano et al.: Experimental Study of Reinforced Concrete Frames Retrofitted with Ductile Steel Framed Y-shaped Bracing System, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No. 25, March 1992, IIS Univ. of Tokyo
- 6) Masamichi Ohkubo: Current Japanese System on Seismic Capacity and Retrofit Techniques for Existing Reinforced Concrete Buildings and Post-earthquake Damage Inspection and Restoration Techniques, Report No. SSRP-91/02, UC San Diego, May 1991
- 7) Yoshiaki Nakano and Tsunéo Okada: Seismic Evaluation and Retrofitting Techniques of Existing R/C Buildings in Japan, Proc. of the International Conference on Continental Collision Zone Earthquakes and Earthquake Hazard Reduction, Armenia, October 1-6, 1993 (印刷中)