

(60) 鋼製柱による既存RC造の耐震補強法における接合部の挙動に関する一考察

北村 研士¹・藤永 隆²・宮川 和明³・喜多村 亘⁴・孫 玉平⁵

¹正会員 神戸大学大学院生 工学研究科建築学専攻 (〒657-85001 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:120t021t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学准教授 都市安全研究センター (〒657-85001 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:ftaka@kobe-u.ac.jp

³正会員 JFEシビル (株) システム建築事業部開発グループ長 (〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4)
E-mail:miyagawa@jfe-civil.com

⁴正会員 JFEシビル (株) システム建築事業部開発グループ (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)
E-mail:w-kitamura@jfe-civil.com

⁵正会員 神戸大学教授 工学研究科建築学専攻 (〒657-85001 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:sunlili@people.kobe-u.ac.jp

本論は、ブレースを用いない鋼製柱による外付け耐震補強工法における接合部の挙動を追跡することを目的とする。鋼とコンクリート間の間接接合部の挙動を検討するため、わが国でこれまで行われた鋼とコンクリート間の間接接合部に関するせん断実験のデータベースを作成し、各種因子がせん断挙動に及ぼす影響について考察した。データベースの検討結果より、アンカー筋1本あたりの間接接合部の荷重-ずれ変位関係の置換バネモデルを作成し、剛体とバネによる簡易なモデルを用いた解析で、間接接合部の挙動追跡を行った。あと施工アンカーのせん断耐力として、日本建築防災協会の「外側耐震改修マニュアル」および山本等の低強度コンクリートに対するあと施工アンカー単体のせん断耐力で検討を行った。剛体と置換バネのモデルで接合部実験の挙動を概ね評価できており、外側マニュアルのあと施工アンカーのせん断耐力を用いて実験結果を安全側に評価することを示している。

Key Words : *Seismic retrofitting, Indirect connection, Post-installed anchor*

1. はじめに

著者らは、既存不適格RC造の耐震補強にブレースを用いない、鋼製柱によるRC造の外付け耐震補強工法を提案している(図1参照)¹⁾。同工法は、補強鋼製柱の曲げに対して梁部の間接接合が回転抵抗する抵抗機構であり、設計法が一般化されていない。同接合部における応力伝達機構を明らかにするために、これまで梁部接合部の部分実験を行い、剛部材とバネの簡易なモデルでの挙動追跡の解析を行っている²⁾。しかし、鋼とコンクリート間の間接接合部の挙動を適切に評価できるような置換バネの一般的なモデルはなく、これまで間接接合部の剛性を適切に評価可能な提案式も示されていない。そこで、本論では間接接合部を対象とした既往の実験に関するデータベースを作成し、各種因子が頭付きスタッドとあと施工アンカーによる間接接合部のせん断挙動における初

期剛性や耐力に及ぼす影響について調べた。また、初期剛性、各変位時における耐力を検討して置換バネの荷重-ずれ変位関係のモデルを作成し、本工法の間接接合部の挙動追跡を行った。

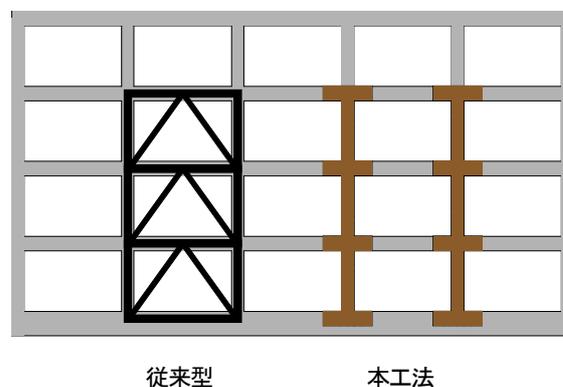


図1 補強工法の概要

2. 間接接合部の実験データベース

(1) 実験条件の範囲

せん断力を受ける、鋼とコンクリート間の間接接合部を想定した試験体のせん断加力実験、および押し抜き実験に関するデータベースを作成した。対象とした間接接合部は、鋼側に頭付きスタッド、RC側にあと施工アンカーを配し、無収縮モルタルあるいは無収縮コンクリートで間詰めされたもので、鋼側が鋼製リブのもの、コンクリート表面を目荒らしたものは除外した。実験のデータは、2000年～2013年の日本建築学会大会学術講演梗概集、日本コンクリート協会年次論文集、日本鋼構造協会年次論文集より収集しており、収集した試験体数は、せん断実験が42体、押し抜き試験が4体である。比較検討した実験条件の範囲を表1に示す。

(2) 初期剛性

アンカー筋1本当たりの間接接合部の初期剛性に関し

て、各因子との比較を行った。ここでは初期剛性は、ずれ変位が0.2mmとなった時の割線剛性としている。図2に初期剛性とアンカー筋径の関係、図3に初期剛性と躯体コンクリートの圧縮強度の関係を示す。図中実線は最小二乗近似直線である。アンカー筋径と躯体コンクリート強度ともに初期剛性との相関が見られ、ばらつきは大きいものの、アンカー筋径や躯体コンクリート強度の増加に伴い、初期剛性も増加していることがわかる。著者が行った接合部の実験²⁾でのあと施工アンカーのアン

表1 実験条件の範囲

アンカー径 (mm)	13 ~ 25
アンカー本数 (本)	2 ~ 7
アンカー筋間隔 (mm)	100 ~ 600
へりあき寸法 (mm)	100 ~ 375
有効埋め込み長さ径比	7 ~ 15
アンカー筋降伏応力 (N/mm ²)	328 ~ 401
アンカー筋引張強さ (N/mm ²)	464 ~ 624
躯体コンクリート強度 (N/mm ²)	4.5 ~ 31.3

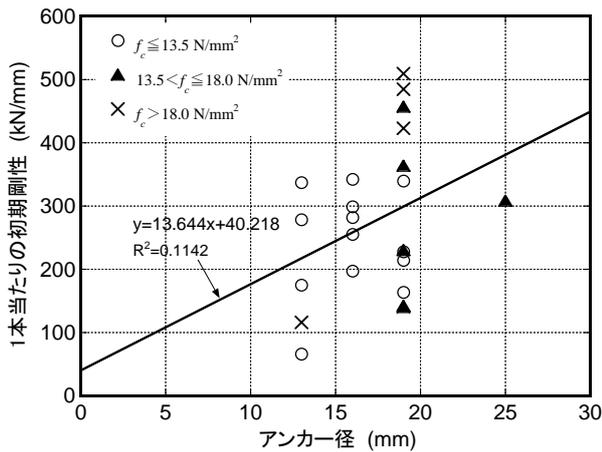


図2 初期剛性—アンカー筋径関係

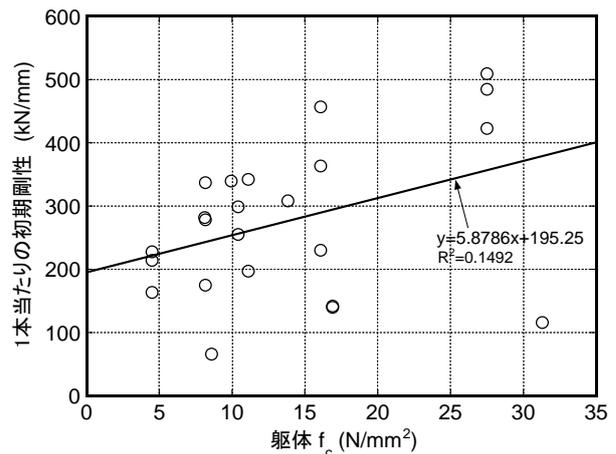
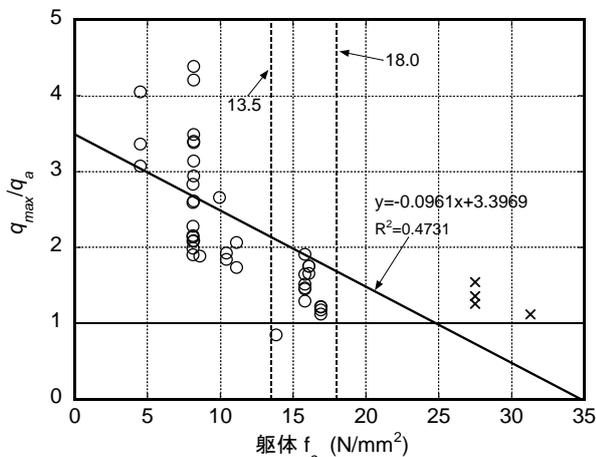
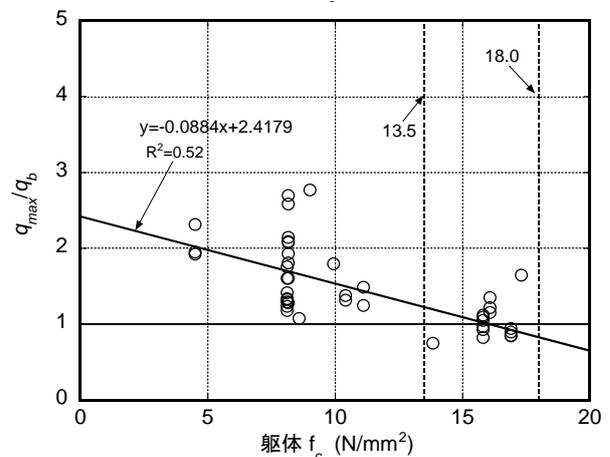


図3 初期剛性—躯体コンクリート圧縮強度関係



(a) 外付けマニュアル



(b) 山本等(単体)

図4 無次元化耐力—躯体コンクリート強度関係

カー筋径が $d_a=16\text{mm}$ 、躯体コンクリートの圧縮強度が $F_c=13\text{N/mm}^2$ 程度であり、図より文献2)におけるあと施工アンカー1本当たりの間接接合部の初期剛性は $200\sim 350\text{kN/mm}$ 程度になると推察される。

(3) 無次元化耐力

各試験体のアンカー筋1本当たりの間接接合部の最大耐力の無次元化耐力と、各因子との比較を行った。本論では、無次元化にあつて施工アンカーのせん断耐力を用い、日本建築防災協会の「外側耐震改修マニュアル」のせん断耐力³⁾(以下、外付けマニュアル) q_a と、山本等の低強度コンクリートに対するあと施工アンカー単体のせん断耐力⁴⁾(以下、山本等(単体)) q_b で検討を行った。図4に無次元化耐力と躯体コンクリート圧縮強度の関係を示す。なお、図中の直線は最小二乗近似直線を、×印は外付けマニュアルによる耐力計算において、アンカー筋のせん断で耐力が決定される試験体を示している。また、山本等の式は低強度コンクリートに設置されたあと施工アンカーに対して提案されたせん断耐力式であり、図4(b)において $F_c=18\text{N/mm}^2$ 以上のものは除外している。図より、外付けマニュアルのせん断耐力では1体を除き無次元化耐力が1.0を上回っていることがわかる。また、コンクリート強度が増加するにつれ、無次元化耐力が1.0に近づく傾向が見られる。山本等(単体)のせん断耐力は低強度コンクリート($F_c=13.5\text{N/mm}^2$ 以下)の範囲では精度よく、全て安全側となっており、コンクリート強度が低い範囲では外付けマニュアルのせん断耐力より精度がよい。

(4) 各試験体のせん断挙動

アンカー筋1本当たりに換算した間接接合部の挙動を検討するために、 0.2mm 、 0.5mm 、 1mm 、 2mm 、 4mm 時の耐力を調べ、アンカー筋1本当たりに換算した間接接合部のせん断挙動を分類した(図5参照)。アンカー筋径が 19mm 以上の時にはバイリニアの挙動となるものが多く(Aタイプ)、有効埋め込み長さ径比が10以上の時は最大耐力に達する前に二次剛性を示す場合が多かった(Bタ

イプ)。また、躯体コンクリート強度が $F_c=13.5\text{N/mm}^2$ 以下の低強度コンクリートの場合では、最大耐力以降に耐力が緩やかに減少し続けるB2のタイプや、最大耐力以降の耐力低下後に一定の耐力を保持するB3のタイプがほとんどであった。

3. 簡易モデルによる挙動追跡

(1) 解析方法

あと施工アンカー1本当たりの間接接合部の荷重-ずれ変位挙動をバネに置換し、剛体の柱梁部材と軸方向バネによる簡易なモデルにより、実験挙動の追跡を行った(図6参照)。文献2)の接合部の実験では、RC躯体のコンクリートに低強度コンクリートを使用しており、間接接合部の耐力はあと施工アンカーのせん断で決定されるため、置換バネの荷重-ずれ変位関係の最大耐力はあと施工アンカーのせん断耐力を使用した。

(2) 置換バネの荷重-ずれ変位関係モデル

間接接合部の置換バネの荷重-ずれ変位関係のモデルを作成する。2章の検討結果より、アンカー筋1本当たりの間接接合部の荷重-ずれ変位関係を図7のように仮定した。文献2)のコンクリート強度は $F_c=13\text{N/mm}^2$ 程度であり、せん断挙動のタイプはB2あるいはB3となる可能性が高い。初期剛性は 300kN/mm とし、B2タイプのモデルは最大せん断耐力の80%の耐力まで上昇し、 0.5mm で最大耐力を発揮する。その後、耐力は初期剛性の $1/250$ の傾きで耐力が低下していくものとする。一方、B3タイプのモデルは最大せん断耐力の80%の耐力まで上昇し、 0.5mm で最大耐力を発揮する。その後、耐力は 2mm までに最大耐力の80%に減少し、その後一定の耐力を保持するものとする。

(3) 実験結果との比較

図8に解析と実験の初期剛性の比較を、図9に解析と実

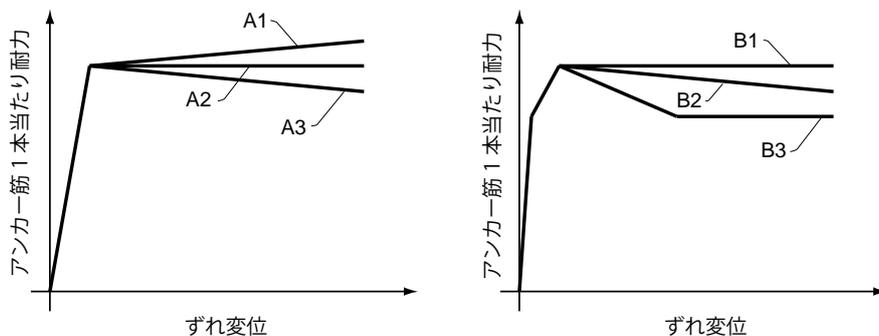


図5 アンカー筋の挙動モデルのタイプ

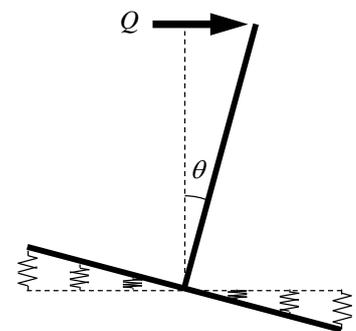


図6 解析モデル

験の比較を示す。図中、実線は実験結果で、水平荷重 Q —鋼梁部の回転角 θ 関係を、点線は外付けマニュアルのせん断耐力式を使用した解析結果、一点鎖線は山本等のせん断耐力式(単体)での解析結果である。図より、初期剛性はいずれにおいても実験結果が解析結果を上回っていることがわかる。これは、実験においてコンクリートとモルタル間に付着があり、それが初期剛性に影響を及ぼすことから実験結果が解析結果を上回っているものと推察される。また、ここではアンカー筋1本当たりの初期剛性を 300kN/mm として計算しているが、2章で検討した初期剛性の想定される最大値である 350kN/mm で算定した計算初期剛性においても実験結果が解析値を上回っており、初期剛性は想定される値を上回る結果となった。

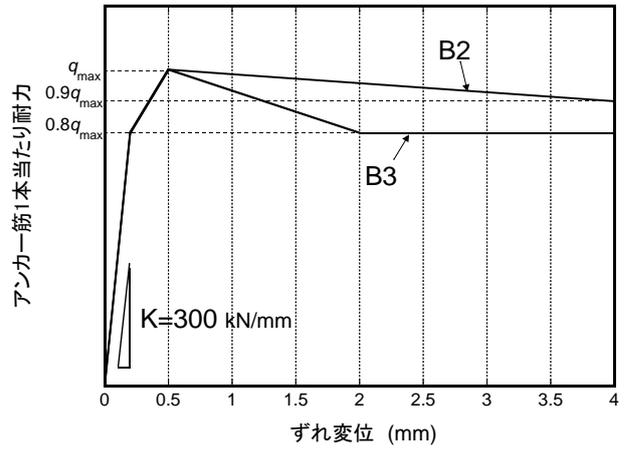


図7 置換バネの荷重—ずれ関係モデル

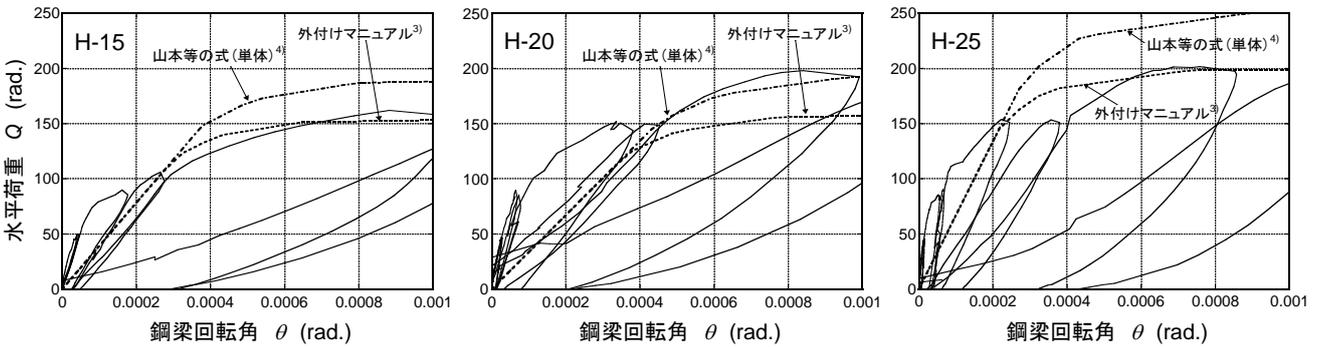
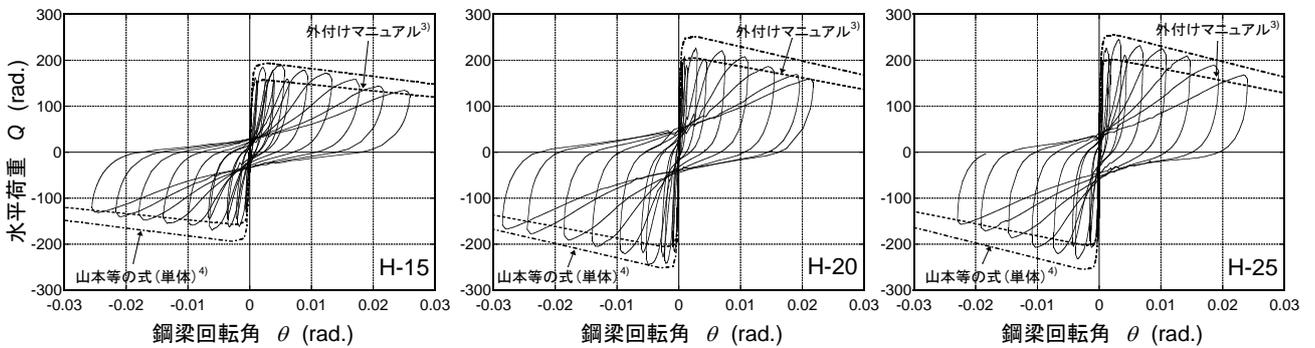
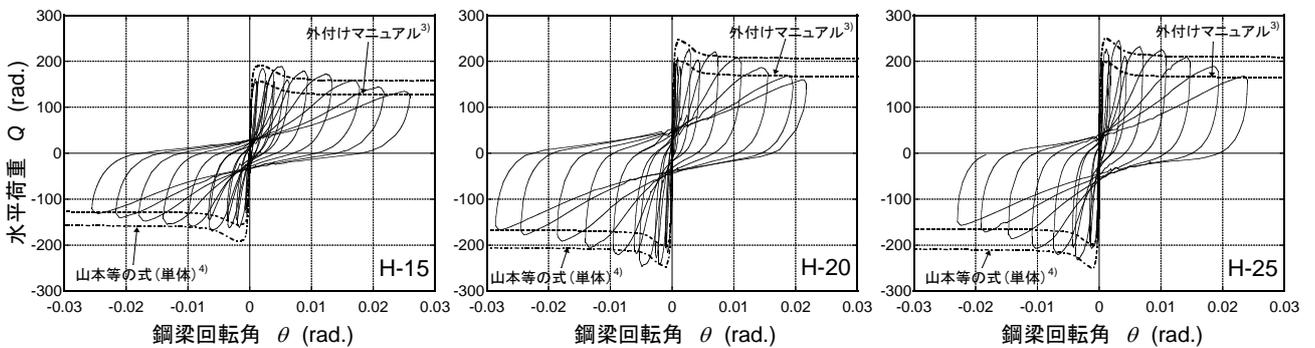


図8 解析と実験の初期剛性の比較



(a) B2タイプ



(b) B3タイプ

図9 解析と実験の比較

全体の挙動に関しては、図より、B2、B3タイプともに外付けマニュアルのせん断耐力式の結果が実験結果を概ね安全側に評価していることがわかる。特にB2タイプでは耐力低下後の挙動をよく追跡しており、最終サイクルまで外付けマニュアルによる計算結果を超えることはなかった。また、ここではあと施工アンカーのせん断耐力の低減係数を $\phi_s=1.0$ として算定しているが、実際の設計においては $\phi_s=0.7$ とすることとなっているためにさらに安全側の評価となる。山本等のせん断耐力式(単体)を用いたものは、最大耐力の実験値を危険側に評価するが、その後の挙動は実験値をよく追跡している。しかし、約0.01rad程度からは耐力の低下をよく追跡できてはおらず、B2タイプのモデルを使用した場合は常に危険側の評価となった。

4. まとめ

せん断力を受ける、間接接合部を想定した試験体のせん断加力実験、および押し抜き試験に関するデータベースを作成し、各種因子があと施工アンカーのせん断挙動における初期剛性や耐力にどのように関係するかを調べた。また、間接接合部の置換バネの荷重-ずれ変位関係のモデルを作成し、本工法の間接接合部の挙動追跡を行った。そこで得られた知見をまとめて本論のまとめとする。

- 1) 間接接合部のアンカー筋1本当たりの初期剛性はアンカー筋径および躯体コンクリート圧縮強度との間に相関が見られた。
- 2) 外付けマニュアルおよび山本等の式(単体)のせん断耐力式を用いてアンカー筋1本当たりの間接接合部の最大耐力の無次元化を行い、間接接合部の耐力と躯体コンクリート圧縮強度との比較を行った。外付けマニュアルのせん断耐力による無次元化耐力は1体を除き1.0を上回り、山本等(単体)のせん断耐力による無次元化耐力では低強度コンクリートの範囲では全て安全側となっており、コンクリート強度が低い範囲では外付けマニュアルより精度がよかった。
- 3) 間接接合部の置換バネの荷重-ずれ変位関係のモデルを作成し、簡易なモデルで挙動追跡を行った。初期剛性はいずれの試験体においても実験結果が解析結果を上回っていた。全体の挙動については外付けマニュアルでの結果が実験結果を概ね安全側に評価しており、B2タイプのモデルを用いた解析で耐力低下後もよく追跡できていた。

謝辞：本研究を行うにあたり、多くの研究者の貴重な実験データを参照させて頂きました。ここに記して深く感謝致します。

付録 あと施工アンカーのせん断耐力式

- (1) 外付けマニュアルあと施工アンカーせん断耐力式

$$\begin{aligned} Q_A &= \phi_s \cdot \min(Q_{a1}, Q_{a2}) \\ Q_{a1} &= 0.7 \cdot a_e \cdot a \cdot \sigma_y \\ Q_{a2} &= 0.4 \sqrt{E_c \cdot c \cdot \sigma_B} \cdot a_e \end{aligned} \quad (\text{付 1})$$

ここで、 $a \sigma_y$ ：アンカー筋の降伏応力度、 a_e ：接合面のアンカー筋断面積、 $c \sigma_B$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 E_c ： $c \sigma_B$ に基づいて算定したヤング係数(N/mm²)、 ϕ_s はせん断変形を許容値(2mm)以下に制限するための低減係数で0.7とすることとなっているが、本論では1.0とする。

- (2) 山本らの単体あと施工アンカーせん断耐力式

$$\begin{aligned} Q_B &= \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi_3 \cdot \tau_{mg} \cdot a_e \\ \tau_{mg} &= (0.205 + 0.036 c \sigma_B) a \sigma_y \\ \phi_1 &= 0.84 - 0.05(d_a - 22) \\ \phi_2 &= 0.85(c/100)^{0.15} \leq 1.0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 c ：へりあき(mm)、埋め込み長さの影響係数 $\phi_3=1.0$ である。

参考文献

- 1) 喜多村亘, 北村研士, 宮川和明, 藤永隆, 孫玉平：鋼製柱による RC 造建築物の外付け耐震補強工法に関する実験的研究(その1 工法および実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.871-872, 2012.8
- 2) 北村研士, 宮川和明, 喜多村亘, 藤永隆, 孫玉平：鋼製柱による RC 造建築物の外付け耐震補強工法に関する実験的研究(その3 接合部実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.261-262, 2013.8
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル」- 枠付き鉄骨ブレースによる補強, 2002.9
- 4) 山本泰稔, 秋山友昭, 市橋重勝, 片桐太一, 藤山知繁, 加藤三晴, トンプソン ジム, 有木克良, 上田洋一：低強度コンクリートに装着した接着系あと施工アンカー筋の挙動に関する実験的研究(その1~6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.397-408, 2000.9

STUDY ON CYCLIC BEHAVIOR OF INDIRECT CONNECTION BETWEEN EXISTING R/C BEAM AND RETROFITTING STEEL FRAME

Kenshi KITAMURA, Takashi FUJINAGA, Kazuaki MIYAGAWA,
Wataru KITAMURA and Yuping SUN

The objective of this paper is to predict the behavior of indirect connection in a recently proposed seismic retrofitting frame made only of steel columns. In order to evaluate the behavior of indirect connection between retrofitting steel and existing concrete, a database of shear experiments on indirect connection in Japan was made. The influence of the parameters such as concrete strength and diameter of anchor bolt on the cyclic shear behavior was discussed. The behavior of indirect connection was predicted by using a simple rigid body and spring model. The spring model, characterized as relationship between the load and relative displacement of indirect connection for each anchor, was developed on the basis of study of the database. The shear strength of 'Outer frame retrofitting manual (OFRM)' published by the Japan Building Disaster Prevention Association, and the shear strength for low strength concrete proposed by Yamamoto et al. were used to define the ultimate shear strength of the spring model. Comparisons between the measured and theoretical cyclic behaviors has indicated that the proposed model could predict the experimental behavior reasonably well if the shear strength equation of OFRM was used.