

論文 鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組の補強接合部破壊を考慮した FEM 解析およびマクロ解析モデルの構築

佐藤 亮介*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3・白井 伸明*4

要旨：主筋に丸鋼を用いた垂壁・腰壁付き RC 造連スパン骨組に対する鉄骨ブレース補強効果の検証実験を対象に FEM 解析を実施した。丸鋼を用いた柱主筋の付着すべり挙動および柱－雑壁間の離散ひび割れモデルにより、無補強試験体の履歴形状を概ね良好に模擬した。また、補強試験体に対して、鉄骨枠とモルタルを離散化することにより、鉄骨ブレースに対するせん断伝達機構の劣化が表現可能となった。そこで、適用性が得られた FEM 解析モデルを基に、補強接合部バネの復元力特性を決定した。その結果、補強接合部の破壊を伴う鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組に対するマクロ解析モデルの適用性が得られた。

キーワード：鉄骨ブレース補強, RC 造骨組, FEM 解析, ファイバー解析, 補強接合部破壊

1. はじめに

耐震補強の中でも、比較的軽量で適度な大きさの開口を設けられる鉄骨ブレース補強工法が数多く採用されている。この工法の補強効果は、単層単スパン骨組を対象として実験的に確認される場合が多く、骨組中の部分架構に施される鉄骨ブレース補強が骨組全体の耐震性能に及ぼす影響については未解明な部分が多い。

筆者らは、これらの問題に取り組むに際して、補強建物全体の地震応答解析の実施を視野に入れた、ファイバーモデルをベースとした数値解析モデルの検証を行うとともに、1 層 2 スパン鉄筋コンクリート（以下、RC）造骨組に対して鉄骨ブレース補強した耐震補強効果の検証実験¹⁾を実施した。実験結果と数値解析結果の比較を通じて、無補強試験体に対する解析モデルの有効性が確認された。一方、鉄骨ブレース補強された試験体においては、骨組全体の耐力・変形挙動を予測するために、実験早期に観察された補強接合部の破壊を模擬可能な解析モデルの構築が必要であることが明らかとなった。

本報では、RC 造連スパン骨組に対する鉄骨ブレース補強効果の検証実験を対象として、補強接合部破壊を模擬可能な FEM 解析モデルを構築する。さらに、FEM 解析モデルを基に補強接合部の破壊の進行を模擬可能なマクロ解析モデルの構築を試みる。

2. 鉄骨ブレース補強効果の検証実験に対する FEM 解析

2.1 解析対象実験概要

1960 年代に建てられた既存の学校建築を想定し、1/3 スケールに縮尺した 1 層 2 スパン骨組である。図-1 に試験体概要を示す。また、表-1 に各種材料の力学特性を示す。試験体のパラメータは、ブレース補強の有無お

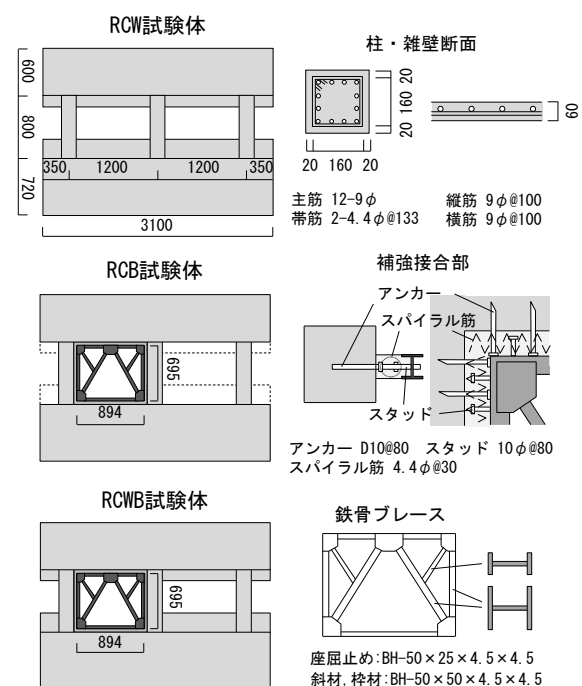


図-1 試験体概要

表-1 各種材料の力学特性

種類（使用箇所）	圧縮強度 降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
F _c 18 (RC躯体)	20.97	23049
F _c 30 (補強接合部)	37.1	—
9φ (柱主筋, 梁補強筋)	333.8	177659
4.4φ (柱補強筋, スパイラル筋)	268.0	183611
D13 (梁主筋)	363.7	182708
PL-4.5 (鉄骨ブレース)	336.7	181668
D10 (アンカー)	353.4	176700
10φ (頭付きスタッド)	342.7	171350

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*4 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

よび雑壁に対するスリットの有無であり、雑壁付き無補強（以下、RCW）試験体、雑壁無し補強（以下、RCB）試験体、および雑壁付き補強（以下、RCWB）試験体の3体である。

载荷は、一定軸力下（540kN）における正負交番繰返し载荷である。なお、1/1000rad を変位制御の基準として、最大耐力までは正負2回、最大耐力以降は正負1回ずつ繰返ししている。

2.2 RCW 試験体に対する FEM 解析

図-2 に試験体の要素分割図を示す。なお、解析には FINAL²⁾を用いた。本検討では、2 次元解析を実施した。コンクリートは1辺 25mm 程度の4 節点平面応力要素でモデル化し、非直交分散ひび割れモデル³⁾を採用した。鉄筋は、柱主筋および帯筋をトラス要素とし、その他の鉄筋を分散型の埋め込み鉄筋としてモデル化した。なお、丸鋼を用いた柱主筋の付着すべり挙動の影響が考えられることから、4 節点接合要素を設けてコンクリート鉄筋間の付着すべりを考慮した。また、実験において早期に観察された柱と雑壁の境界部分の離間を表現するため、柱-雑壁間に離散ひび割れモデルを採用した（図-3）。

図-4 にコンクリートと鉄筋の応力度(σ)ーひずみ度(ϵ)関係および付着応力度(τ)ーすべり量(S)関係を示す。コンクリートは圧縮強度到達後、圧縮破壊エネルギー G_{fc} を考慮した軟化モデルとした。 G_{fc} の算出には、Nakamura⁴⁾らの式を採用した。要素代表長さは、要素面積 A の平方根を仮定した。引張側の上昇域は引張強度 f_t までを線形弾性と仮定し、下降域は長沼ら⁵⁾のテンションステイフニングモデルを採用した。鉄筋には Ciampi ら⁶⁾の提案による修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。なお、降伏後の二次勾配は初期剛性の 1/100 とした。 τ - S 関係は、最大付着強度点および下降域に松岡ら⁷⁾の提案式を採用した。また、離散ひび割れモデルの垂直方向の復元力特性として、引張側にはひび割れ強度に達した後、壁筋の抜け出しを考慮するモデル⁸⁾を用いた。なお、ひび割れ方向のせん断伝達特性は、長沼の提案モデル⁹⁾とした。

図-5 に層せん断力(Q)ー層間変形角(R)関係を示す。なお、横軸には既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準¹⁰⁾に示される靱性指標 F 値を併せて示す。また、図-6 に実験の最終破壊状況と解析における最大耐力時のひび割れパターンの比較を示す。解析結果の除荷および再载荷を含めた履歴形状は実験結果を概ね良好に模擬した。また、解析では 3/1000rad において全ての柱にせん断ひび割れが発生しており、それと同時に顕著な耐力低下に至った。解析において、各柱にせん断ひび割れが生じるタイミングのずれは見られなかったものの、柱の破壊形式に関して実験結果と良好な対応を示した。

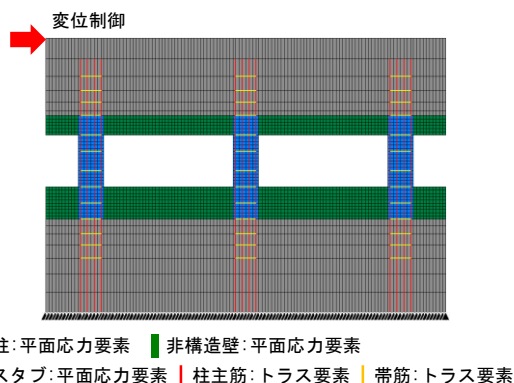


図-2 要素分割図 (RCW 試験体)

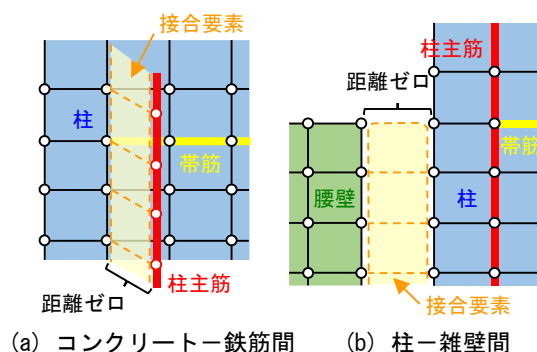


図-3 接合要素導入モデル詳細図

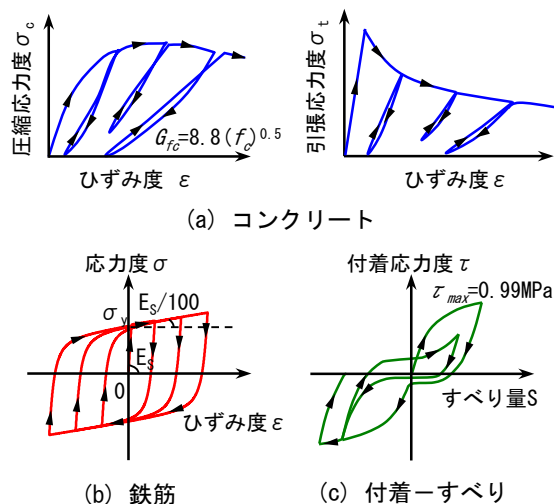


図-4 σ - ϵ 関係および τ - S 関係

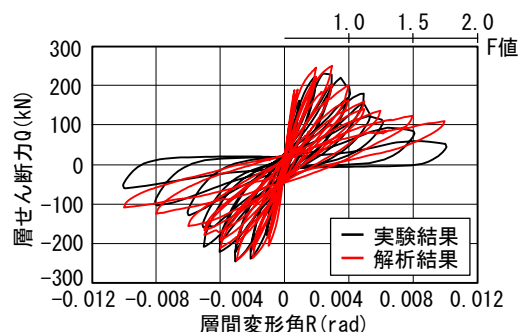


図-5 静的繰返し解析結果

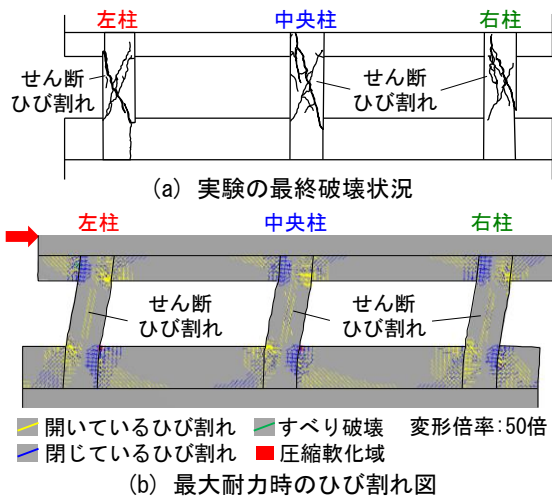


図-6 ひび割れパターンの比較

2.3 RCB 試験体に対する FEM 解析

図-7 に試験体の要素分割図を示す。モデル化方法および材料構成則は、前節 (RCW 試験体) と同様である。補強接合部のモデル化として、モルタルは 4 節点平面応力要素、スタッドおよび施工アンカーは分散型の埋め込み鉄筋としてモデル化した。また、鉄骨枠および鉄骨ブレースは梁要素によってモデル化した。なお、実験で観察された補強接合部の破壊に伴う、鉄骨ブレースに対するせん断伝達機構の劣化を表現すべく、鉄骨枠-モルタル間を離散化した。図-8 に鉄骨枠-モルタル間のモデル化詳細を示す。鉄骨枠とモルタルを離散化し、その間に 4 節点接合要素を設けた。垂直方向の復元力特性として、圧縮側は十分に剛な接合とし、引張側はひび割れ強度に達した後、スタッドの抜け出しを考慮するモデル⁸⁾を採用した。せん断方向の復元力特性は、松浦ら¹¹⁾による鋼材の引抜き試験を参考に tri-linear 型とし、摩擦係数は 0.4 を仮定した。なお、比較・考察のため、接合要素を取り除いた解析を併せて実施した。

図-9 に鉄骨枠-モルタル間を離散化した解析モデルの層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係と正側加力時における鉄骨ブレースの負担せん断力の推移を示す。なお、解析では 12/1000rad 以降に解が不安定となったため、この範囲までの解析結果を示す。解析結果は、実験結果の履歴形状を概ね良好に模擬した。また、鉄骨ブレースの負担せん断力の推移は、実験結果と同様な傾向である。

図-10 に実験の最終破壊状況と解析における最大耐力時のひび割れパターンの比較を示す。解析において、左柱と中央柱にせん断ひび割れ、右柱に曲げひび割れを確認した。また、補強接合部のひび割れが顕著であり、実験の最終破壊状況と良好な対応を示した。ここで、図-11 に鉄骨枠-モルタル間の接合要素を取り除いた解析モデルの層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係と正側加

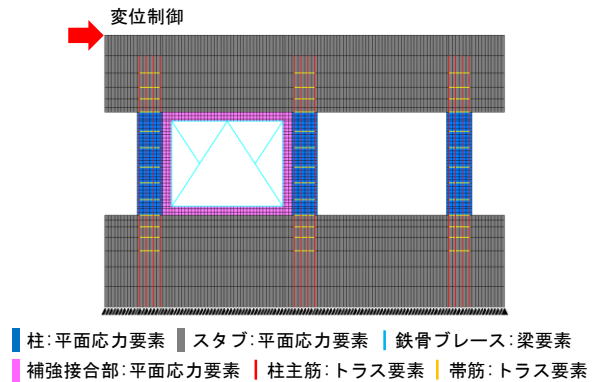


図-7 要素分割図 (RCB 試験体)

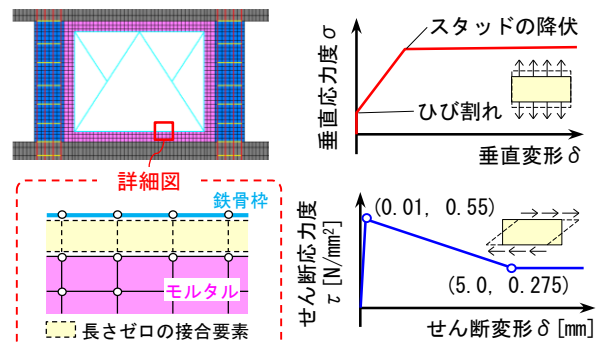
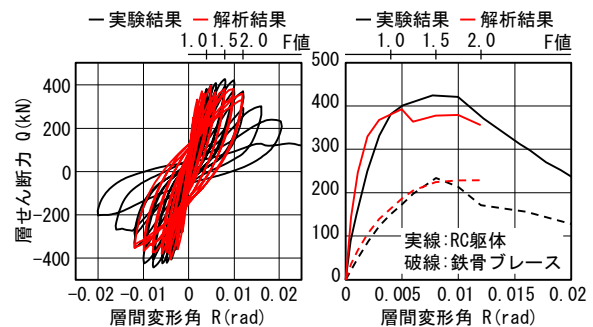


図-8 補強接合部周辺のモデル詳細図



(a) Q-R 関係 (b) 鉄骨ブレースの負担せん断力

図-9 静的繰返し解析結果 (接合要素あり)

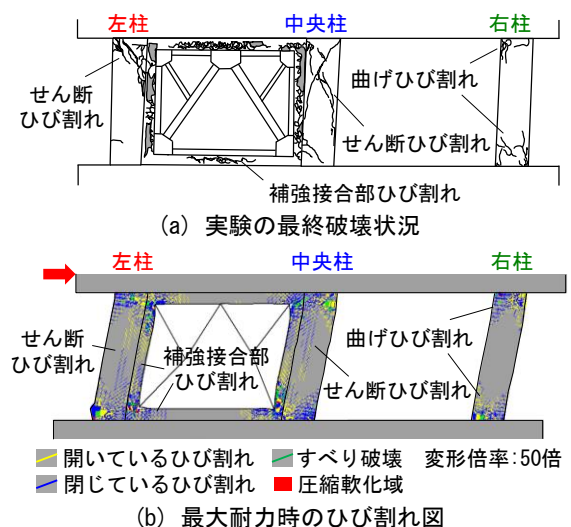


図-10 ひび割れパターンの比較

力時における鉄骨ブレースの負担せん断力の推移を示す。解析結果は、実験結果に対して鉄骨ブレースの負担分が大きく、骨組の剛性と最大耐力を過大評価した。これより、鉄骨枠-モルタル間を離散化することで、補強接合部の破壊に伴う、鉄骨ブレースと RC 躯体の一体化が弱まる現象を概ね再現できたといえる。

2.4 RCWB 試験体に対する FEM 解析

図-12 に試験体の要素分割図を示す。モデル化方法および材料構成則は、前節 (RCW 試験体および RCB 試験体) と同様である。なお、前節では、鉄骨枠-モルタル間を離散化した解析モデルにおいて実験と良好な対応を示したことから、本試験体に対しても鉄骨枠-モルタル間を離散化した解析を実施する。

図-13 に層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係を示す。また、図-14 に実験の最終破壊状況と解析における最大耐力時のひび割れパターンの比較を示す。解析結果は、負側の最大耐力を若干過小評価したものの、実験の骨格曲線ならびに履歴形状を概ね良好に模擬した。また、解析では 1/1000rad において全ての柱にせん断ひび割れが発生した。実験に対して、各柱にせん断ひび割れが生じるタイミングは早いものの、柱の破壊形式についても良好な対応を示した。

3. 補強接合部破壊を考慮したマクロ解析モデルの構築

3.1 解析モデルの概要

前章では、3 体の試験体に対して FEM 解析モデルの適用性を検証した。そこで、本章では FEM 解析モデルを基に、補強接合部の破壊を考慮したファイバーモデルによるマクロ解析モデルの構築を試みる。

図-15 に解析モデルの概要を示す。本検討では RCB 試験体を解析対象とする。なお、解析には OpenSees¹²⁾を用いた。各柱はファイバー要素でモデル化し、主筋の抜け出し挙動とせん断挙動を再現するため、接合部サブ要素とせん断サブ要素¹³⁾を付与した。また、補強接合部が取り付け柱は、柱の断面に補強接合部の圧入モルタル部分を含めてモデル化し、剛域は柱梁接合部の中心から補強接合部までとした。梁および基礎は剛体とした。鉄骨枠および鉄骨ブレースは梁要素でモデル化した。RC 造骨組と枠材の接合は、すべて剛体とした Case1 と、補強接合部の破壊を考慮するため一部を補強接合部バネで接合した Case2 の解析を実施した。

図-16 に材料構成則および復元力特性を示す。コアコンクリートに対しては、Mander¹⁴⁾の拘束効果を適用した。鉄筋は bi-linear 型とし、降伏後の二次勾配は初期剛性の 1/1000 とした。接合部サブ要素に付与する復元力特性は、曲げひび割れ点および降伏点により定義づけられる bi-linear 型のモーメント(M)-回転角(θ)関係でモデル化し、

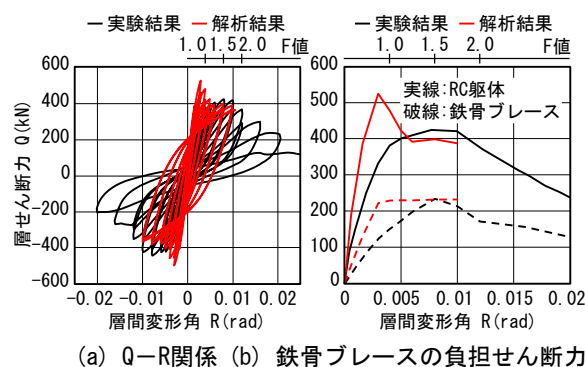


図-11 静的繰返し解析結果 (接合要素なし)

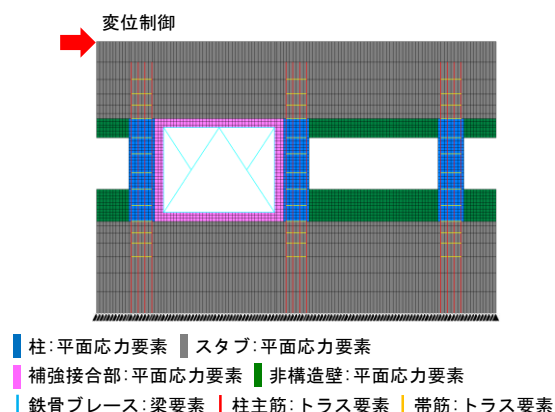


図-12 要素分割図 (RCWB 試験体)

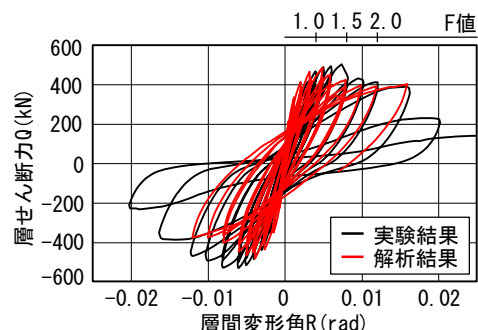


図-13 静的繰返し解析結果

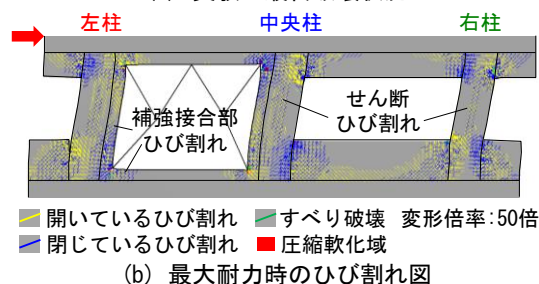
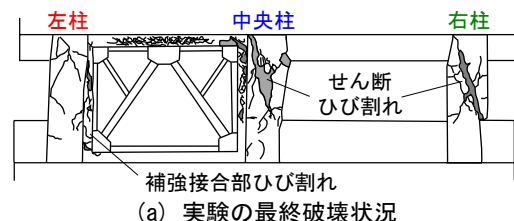


図-14 ひび割れパターンの比較

Fillipou¹⁵⁾の研究に基づいて降伏前剛性 K_{joint} を算出した。 K_{joint} の算出における付着応力度は坂本ら¹⁶⁾の提案式を用いた。せん断サブ要素に付与する復元力特性は、せん断ひび割れ点、せん断破壊点および軸破壊点により決定する。なお、せん断破壊点のせん断力は、荒川 min 式¹⁰⁾より算出した。また、せん断破壊点のせん断変形は、水平変形が $1/250\text{rad}$ に到達した時にせん断破壊すると仮定し、水平変形に対するせん断変形成分の割合は 40%であると仮定して算出した。鉄骨ブレースの応力度(σ)–ひずみ度(ϵ)関係には修正 Menegotto-Pinto モデル⁹⁾を用いた。

補強接合部バネに付与する復元力特性には、前章の FEM 解析モデルで採用した垂直およびせん断方向の復元力特性を適用する。なお、FEM 解析では応力度–変形関係を付与するため、マクロ解析モデルに適用するためにはカー変形関係に変換する必要がある。そこで、本検討では補強接合部バネの支配面積を乗じることにより応力度を力の単位に変換した。なお、履歴モデルについても FEM 解析と同様、せん断方向を弾性剛性で除荷するモデル、垂直方向を原点指向型モデルとした。

3.2 静的繰返し解析

図-17 に静的繰返し解析結果の層せん断力(Q)–層間変形角(R)関係を示す。Case1 では、実験における最大耐力は模擬したが、剛性を過大評価し、最大耐力時変形も過少評価した。また、全体的に鉄骨ブレースの挙動が支配的であり、実験結果と対応していない。これに対し、Case2 では、早期から剛性が低下し Case1 に比べて剛性の過大評価が改善された。また、鉄骨ブレースに対するせん断力の伝達機構が劣化することにより、紡錘型の履歴挙動に関して大幅な改善がみられた。ただし、丸鋼を用いた柱主筋の抜け出し挙動を表現した接合部サブ要素の履歴モデルにおいて、簡略的に原点指向型モデルを仮定した影響により、解析結果の逆 S 字形状は実験結果よりも緩やかである。

図-18 に $+3/1000\text{rad}$ における鉄骨ブレース上部中央の補強接合部バネの応答を示す。垂直方向に対しては圧縮を受けており、剛な応答を示した。一方、せん断方向では軟化域に到達しており、顕著な応答を示している。つまり、補強接合部上部に至っては、鉄骨ブレースと RC 躯体のせん断伝達特性が劣化することにより骨組の剛性低下が生じたといえる。ここで、図-19 に FEM 解析における補強接合部上部の代表的な接合要素の応答を示す。なお、比較のため、応力度に支配面積を乗じて力の単位に変換した。FEM 解析結果は、垂直およびせん断方向ともに、マクロ解析モデルと同様の傾向を示した。ただし、FEM 解析では作用圧縮応力によるせん断強度の増大を考慮しているため、マクロ解析モデルに対してせん断強度が大きい。これより、両者の対応からマクロ解

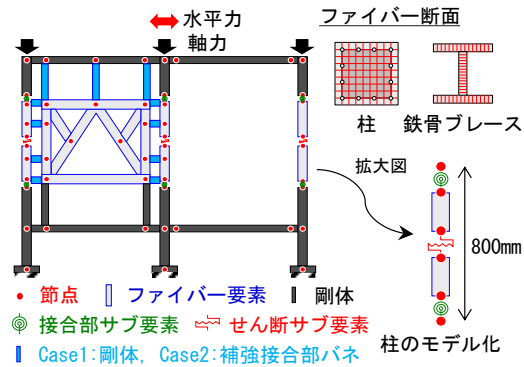


図-15 解析モデル概要

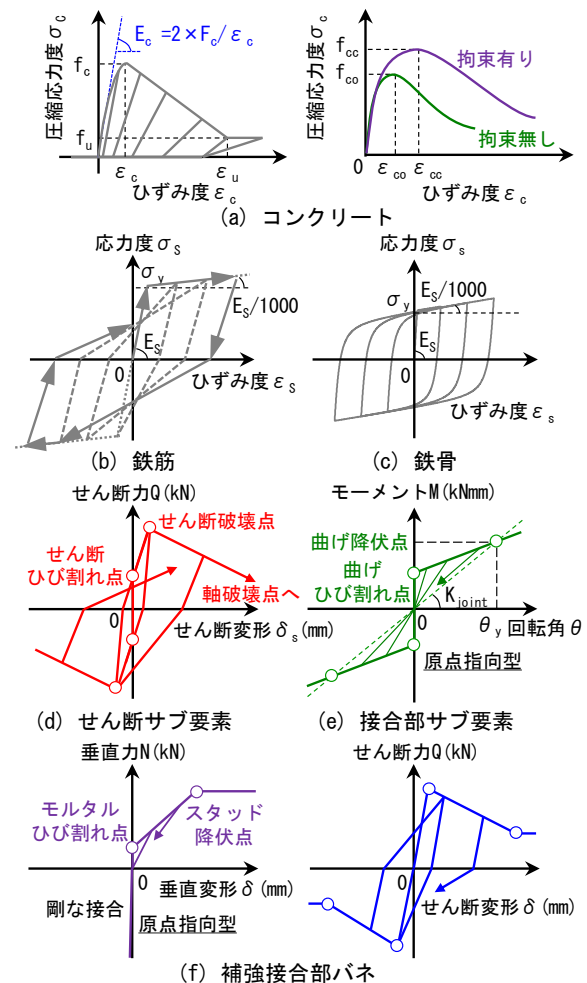


図-16 材料構成則および復元力特性

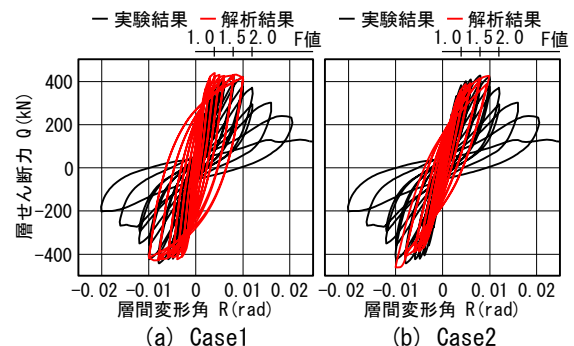


図-17 静的繰返し解析結果

析モデルにおいて補強接合部の破壊の進行を再現できたといえる。

4. まとめ

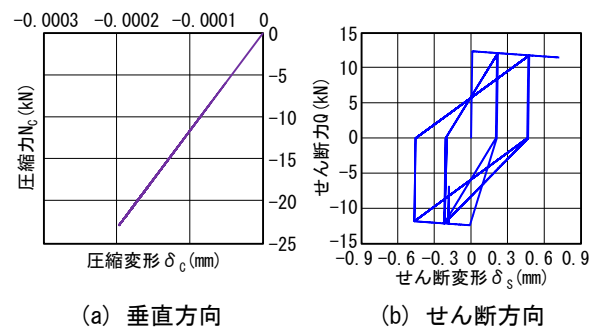
- (1) RCW 試験体に対する FEM 解析では、丸鋼を用いた柱主筋の付着すべり挙動と柱－雑壁間の離散ひび割れモデルにより、実験結果と良好な対応を示した。
- (2) 補強試験体に対する FEM 解析では、鉄骨枠とモルタルを離散化した結果、鉄骨ブレースに対するせん断伝達機構が劣化し、実験結果を良好に模擬した。
- (3) FEM 解析モデルを基に、補強接合部パネに付与する復元力特性を決定した。これを導入したマクロ解析モデルでは早期から剛性低下がみられ、補強接合部の破壊の進行が表現可能となった。

謝辞

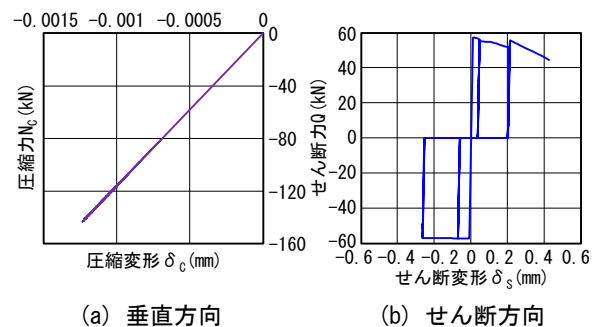
本研究の一部は H27 年度日本大学理工学部学術賞指定研究費の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 内野卓, 佐藤亮介, 田嶋和樹, 白井伸明:「主筋に丸鋼を用いた腰壁・垂壁付き連スパン RC 造骨組に対する鉄骨ブレース補強効果」, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.841-846, 2015
- 2) Naganuma, K., et al.:Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.586, Aug., 2004
- 3) 米澤健次・長沼一洋・江戸宏彰: RC 構造部材の三次元繰返し FEM 解析手法, コンクリート工学年次報告集, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2001
- 4) Nakamura, H., and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, Oct.1999
- 5) 長沼一洋, 山口恒雄: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会梗概集 (中国), pp.649-650, 1990.10
- 6) Ciampi, V., et al.:Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982
- 7) 松岡由高, 中村光, 国枝稔, 河村精一: 有限要素解析による主筋に丸鋼を用いた RC 部材の力学挙動価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.595-600, 2011
- 8) 三島徹也, 山田一字, 前川宏一: 正負交番載荷下に



図－18 補強接合部パネの応答



図－19 接合要素の応答 (FEM 解析)

- における鉄筋コンクリートひび割れ面の局所的挙動, 土木学会, No.442, Vol.16, pp.161-170, 1992.2
- 9) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-45, 1991.3
- 10) 日本建築防災協会: 2001 年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.10
- 11) 松浦睦, 北野敦則, 後藤康明, 城攻: 鋼材とコンクリートの付着性状に関する基礎的検討－鋼材断面形状による影響－, 日本建築学会大会梗概集 (近畿), pp.1037-1038, 2005.9
- 12) Open System for Earthquake Engineering Simulation – Home Page, <http://opensees.berkeley.edu/>
- 13) 田嶋和樹, 河井慎太郎, 今井究, 白井伸明:「脆性部材の破壊が RC 造骨組の耐震性能に及ぼす影響」, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.337-342, 2012
- 14) J.B.Mander: “Teoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.8
- 15) Filippou, F. C.:Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Subassemblages, UBC/EERC-92/8, 1992
- 16) 坂本篤, 八十島章: 丸鋼とコンクリートの付着特性に関する研究(その 1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.125-126,127-128, 2012.9