

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560698

研究課題名(和文) 耐震補強された鉄筋コンクリート造建物の高精度安全性評価システムの構築

研究課題名(英文) Development of the sophisticated safety evaluation methodology for the retrofitted RC buildings

研究代表者

白井 伸明 (SHIRAI, Nobuaki)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：90060144

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：耐震補強されたRC造建物の耐震性能を高精度に評価可能な数値解析ベースの安全性評価システムを構築することを目的として、1. 鉄骨ブレース補強工法の抵抗機構を考慮した解析モデルの構築、2. 鉄骨ブレース補強したRC造骨組モデルの性能確認実験および解析モデルの検証、3. 鉄骨ブレース補強したRC造建物の安全性評価シミュレーションという3つの課題に取り組んだ。その結果、全ての課題において、概ね研究目的を達成した。また、研究課題2,3において、構造スリットが補強効果に及ぼす影響について考察し、補強接合部の新たな破壊形式を再現可能な解析モデルについて検討した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a safety evaluation methodology for the retrofitted RC buildings using the numerical method which can evaluate their seismic performance accurately, the following three efforts were made; 1. Development of the analytical model being able to incorporate the resistant mechanism of the RC frame retrofitted with steel braces, 2. Experimental validation on the seismic performance of RC frames retrofitted with steel braces and their numerical verification of the analytical models developed, 3. Simulations of the safety evaluation for the RC buildings with steel braces.

All efforts were almost accomplished. As for the items of 2 and 3, the strengthening effect of the structural slits on the RC frames and buildings retrofitted with steel braces were discussed, and the validity of the analytical models, which can simulate a newly identified fracture mode along the interface joints between RC frame and steel brace frame was investigated.

研究分野：工学

 キーワード：鉄筋コンクリート構造 耐震補強 耐震性能評価 鉄骨ブレース補強 構造スリット 破壊実験 FEM解析  
 解析 ファイバー解析

### 1. 研究開始当初の背景

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、旧基準で設計された鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の耐震補強に対する関心が高まり、耐震改修促進法の施行に伴って学校校舎、病院および市庁舎など公共性の高い建物に対する耐震診断・補強が急速に進められた。しかし、当時の社会状況では、診断から補強に至るまでの効率が重要視された。そのため、耐震補強に関する本質的な理解、言い換えれば耐震補強後の建物の耐震性能の評価は必ずしも十分ではなかったと可能性が高い。

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、耐震補強された建物に顕著な被害が発生した。被害の原因の1つとして、耐震補強の際に打ち替えた耐震壁が機能しなかった可能性が高いと報告された。この点は、現行手法において、種々の耐震補強の有効性が十分に把握できない可能性を示唆している。

また、筆者らは、前回は科学研究費補助を受けた研究において蓄積した建物の損傷評価に関する知見を検証するために、東北地方太平洋沖地震における建物被害調査を実施している。その際、複数の自治体の特定地域内に存在する学校校舎の全数調査を実施したが、耐震診断によって耐震性能が不足していると判定されたものの、地震発生段階で補強未実施であった校舎が多く存在していることがわかった。さらに、それらの建物の被害が概ね軽微であったことも確認している。このことは、従来の耐震診断手法における地震動特性の影響に関する評価の不十分さを指摘していると考えられる。なお、この点に関しては、H20年度から国土交通省が主導して「耐震診断の高度化に向けた検討」に関する取り組みを実施しており、脆性部材を含む建築物の地震時における挙動を再現可能な解析手法の開発などが進められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、耐震補強されたRC造建物の耐震性能を高精度に評価可能な数値解析ベースの耐震安全性評価システムを構築することである。これまでに構築してきたRC造建物の損傷評価システムを発展させ、耐震補強されたRC造建物に対する補強効果の検証手法の開発に取り組みとともに、耐震補強されたRC造建物の想定地震動に対する安全性評価手法の開発に取り組み、大地震後のRC造建物の早期復旧を可能にし、都市機能の早期回復に貢献したいと考えている。

これらの目的を達成するために、本研究では主に以下の3つの研究課題を設定した。

- 課題 1：各種耐震補強工法の抵抗機構を考慮した解析モデルの構築
- 課題 2：補強したRC造骨組モデルの性能確認実験および解析モデルの検証
- 課題 3：想定地震動に対する実建物の安全性評価シミュレーション

### 3. 研究の方法

本研究では、代表的な耐震補強工法の1つである鉄骨ブレース補強工法に焦点をあてる。前章で示した3つの研究課題を達成するため、具体的には以下の(1)~(6)に示す研究計画を立案した。

- (1) 耐震補強工法の抵抗機構の解明
- (2) 耐震補強工法の抵抗機構に基づくファイバー解析モデルの構築
- (3) 耐震補強したRC造骨組試験体による補強効果の検証実験の実施
- (4) 実験結果に基づく解析モデルの検証
- (5) 動的荷重下における補強RC造建物の耐震性能評価手法の検討
- (6) 耐震補強されたRC造建物の安全性評価シミュレーション

### 4. 研究成果

前述した3つの研究課題に対し、本研究を通じて得られた研究成果のうち、特に顕著な成果を抜粋して以下に報告する。

#### (1) 課題1に関する研究成果

##### ①パンチングシア破壊が生じる場合の抵抗機構の解明と解析モデルの構築

パンチングシア破壊が生じた試験体を対象として、FEM解析を実施した。図-1に要素分割を示す。モデル化の特徴は、極めて小さいシアスパンのパンチングシア破壊を模擬するため、実験においてパンチングシア破壊が確認された引張側柱柱頭の破壊面におけるコンクリートと鉄筋を離散化し、節点および線分界面要素を配置した点である。この破壊面では、接合筋のダボ作用とコンクリート間の摩擦および骨材の噛み合い作用の重ね合わせによりせん断耐力が決定されると考えられる。そこで、節点界面要素のせん断方向は接合筋のダボ作用、線分界面要素の接線方向はコンクリートのせん断抵抗としてモデル化し、界面垂直方向はそれぞれ剛とした。なお、ダボ作用は、大淵らの実験式を多直線近似したものを採用した。一方、コンクリートのせん断抵抗はコンクリート間の摩擦抵抗を考慮してモデル化した。

解析結果として、図-2にQ-R関係を示す。また、図-3に引張主ひずみ分布を示す。

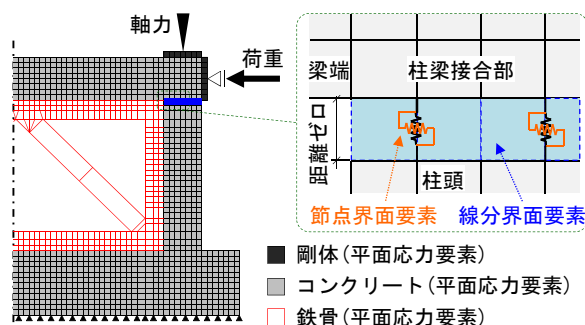


図-1 要素分割図

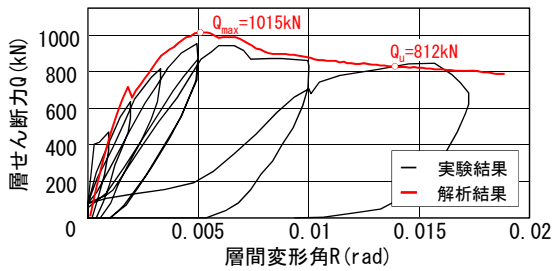


図-2 層せん断力-層間変形角関係

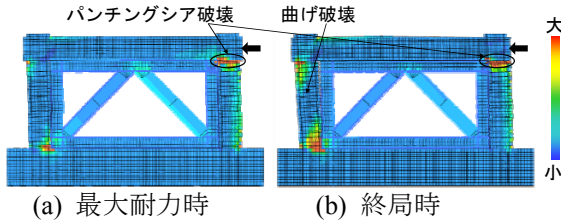


図-3 引張主ひずみ分布図

解析結果は、実験の最大耐力およびポストピーク挙動を良好に表現した。また、引張側柱柱頭のパンチングシア破壊および圧縮側柱の曲げ破壊を再現した。

② ブレース座屈が生じる場合の抵抗機構の解明と解析モデルの構築

既往の実験において、鉄骨ブレースが座屈した場合、その後補強接合部に引張破壊が生じ、せん断耐力が急激に低下することが報告されている。そこで、本研究では鉄骨ブレースの座屈挙動ならびに補強接合部の引張破壊のモデル化について検討した。

図-4 に要素分割を示す。特徴は、補強接合部の引張破壊を考慮するために、圧入モルタルおよびアンカー筋、スタッド筋をそれぞれ個別にモデル化している点である。具体的には、躯体の梁と鉄骨柱との間の補強接合部を離散化し、圧入モルタルの挙動を線分界面要素で、スタッドの挙動を節点界面要素でモデル化する。一方、座屈ブレースには、鋼構造の分野で提案されている加藤らの履歴モデルの圧縮側の骨格曲線を多直線近似して採用した(図-5)。

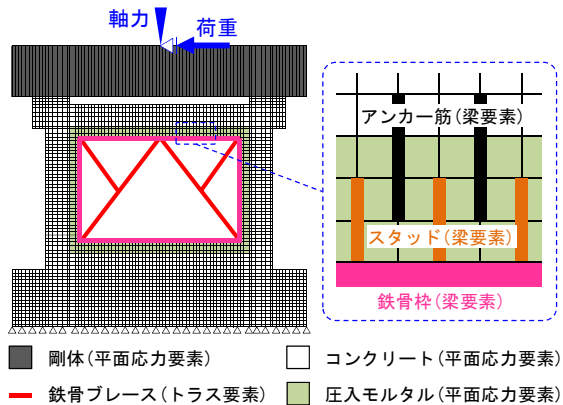


図-4 要素分割図

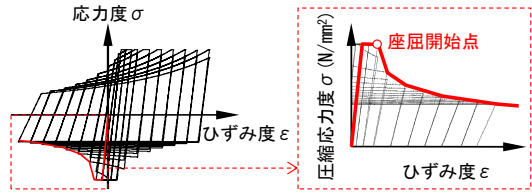


図-5 座屈ブレースの構成則

図-6 に解析より得られた鉄骨ブレース(引張側)の応力度-ひずみ度関係を示すが、座屈に伴う除荷を再現した。また、図-7 に層間変形角 0.02rad 時の引張主ひずみ分布を示すように、鉄骨柱-補強接合部間の剥離が確認できた。

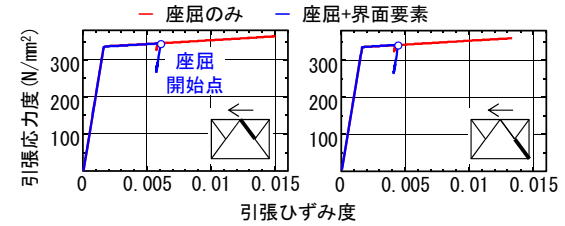


図-6 ブレースの応力度-ひずみ度関係

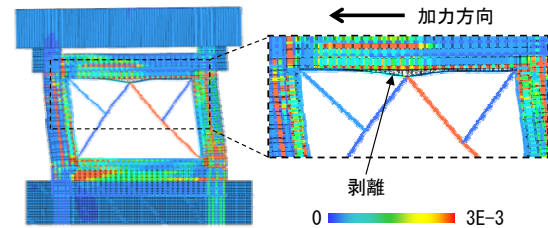


図-7 引張主ひずみ分布

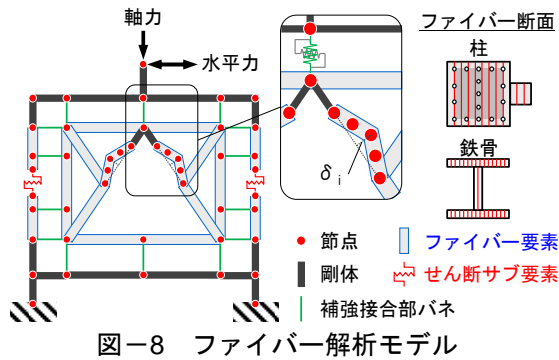
③ 座屈を伴う鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組のファイバー解析モデルの構築

ブレース座屈を伴う場合、ブレースの座屈挙動ならびに補強接合部の引張破壊が主たる抵抗機構である。ファイバー解析モデルの構築では、これらのモデル化が重要となる。

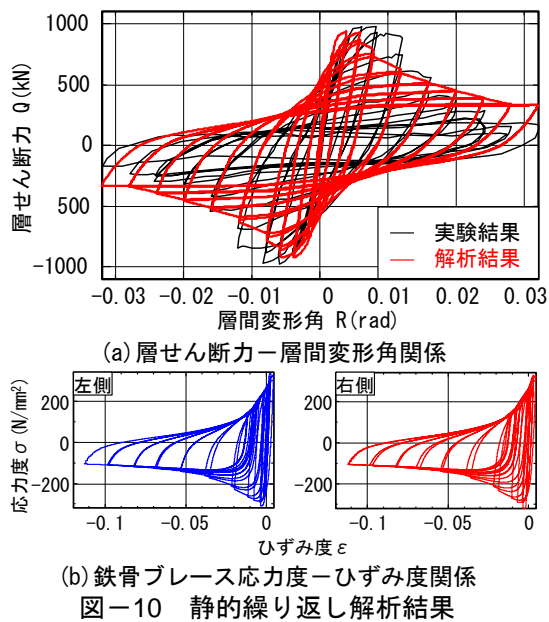
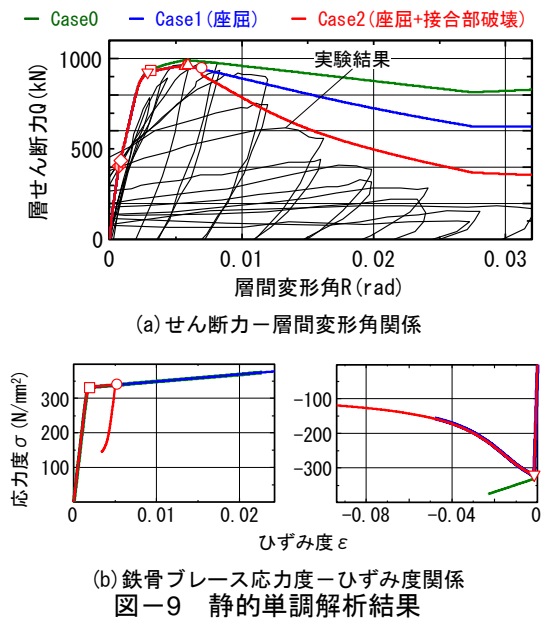
図-8 にファイバー解析モデルを示す。鉄骨ブレースの座屈挙動のモデル化に際しては、共回転理論を用いて座屈挙動を模擬する Uriz らの提案手法を採用した。鉄骨ブレースを複数のファイバー要素でモデル化し、Menegotto-Pinto の応力度(σ)-ひずみ度(ε)関係を付与するとともに、ブレース中央の鉛直方向に初期不整(δ<sub>i</sub>)を与えた。一方、補強接合部の引張破壊のモデル化に際しては、FEM 解析より得られた補強接合部の垂直力-垂直変形関係を多直線近似し、ブレース交差部上部に設置するバネの垂直方向に付与した。

図-9 に静的単調解析より得られた骨組の層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係および鉄骨ブレースの σ-ε 関係を示す。鉄骨ブレースの座屈挙動と補強接合部の引張破壊の両者をモデル化した場合、実験結果と良好に対応しており、特にポストピークにおける急激な耐力低下を再現することができた。

図-10 に静的繰り返し解析結果より得ら



- ◇ せん断ひび割れ(左)    △ せん断破壊(左)    □ プレース降伏
- ◇ せん断ひび割れ(右)    △ せん断破壊(右)    ▽ プレース座屈
- 補強接合部破壊



れた骨組の Q-R 関係および鉄骨ブレースの  $\sigma$ - $\epsilon$  関係を示す。補強後 RC 造骨組中では鉄骨ブレースが負担するせん断力の占める割合が大きいため、骨組全体の履歴挙動にお

る鉄骨ブレースの影響は大きい。本解析では、共回転理論を用いてモデル化した座屈ブレースが座屈挙動を精度良く模擬しており、その結果として補強後 RC 造骨組の履歴形状も実験と良好な対応を示した。

(2) 課題 2 に関する研究成果

① 1 層 2 スパン RC 造骨組試験体に対する鉄骨ブレース補強効果の検証実験

1970 年以前に建設された既存 RC 造校舎の 1 階架構に着目し、鉄骨ブレース補強の有無と垂壁・腰壁に対する構造スリットの有無をパラメータとした 1 層 2 スパン骨組試験体を 3 体製作し、正負交番繰り返し載荷実験を実施した。図-11 に試験体概要を示す。

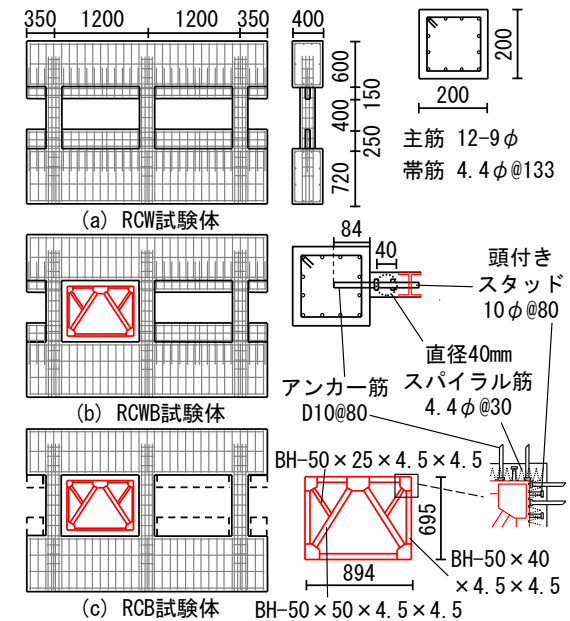


図-12 に層せん断力 ( $Q_{story}$ ) - 層間変形角 ( $R$ ) 関係の一例を示す。今回の実験では、鉄骨ブレース補強による耐力・変形性能の向上が見られたが、構造スリットを設けた RCB 試験体においては期待した変形性能が発揮されなかった。これは、図-13 に示すように、柱-鉄骨ブレース間の補強接合部に破壊が生じたためである。このことは、図-14 に示す鉄骨ブレースの負担せん断力の推移からも確認することができ、RCB 試験体では早期に鉄骨ブレースの負担せん断力が減少に転じている。このような補強接合部破壊の要因の 1 つとして、構造スリットの存在により柱の剛性が低下し、鉄骨ブレースとの顕著な剛性差が生じて両者に変位差が発生したことが考えられる。このような破壊形式は従来の耐震補強設計において想定されていないため、今後詳細な検討が必要である。

② 実験結果に基づくファイバー解析モデルの改良

これまでに構築してきたファイバー解析

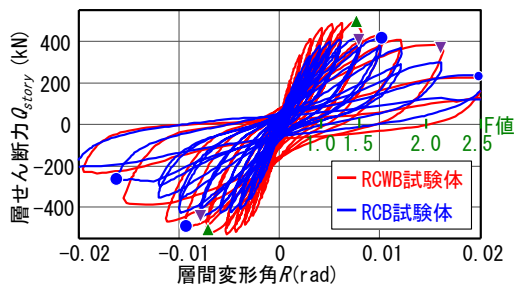
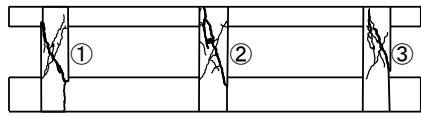
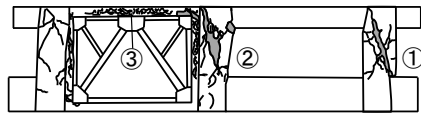


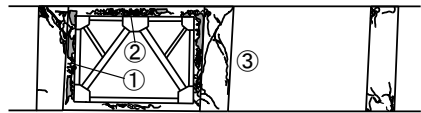
図-12 層せん断力-層間変形角関係の例



3本柱ともせん断破壊 (主筋の座屈確認)  
(a) RCW試験体



中央柱, 右柱のせん断破壊 補強接合部は上部が破壊  
(b) RCWB試験体



中央柱のせん断破壊  
補強接合部は側部の破壊後に上部が破壊  
(c) RCB試験体 ※○数字は破壊の順番

図-13 最終破壊状況

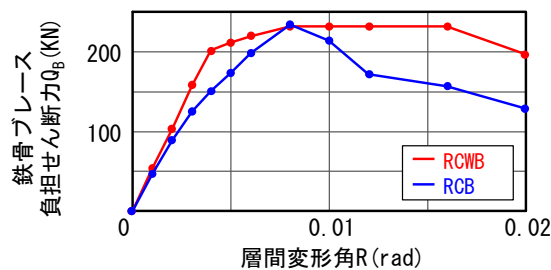


図-14 鉄骨ブレース負担せん断力の推移

モデルを RCWB 試験体および RCB 試験体に適用し、解析モデルの改良を試みた。特に、実験早期に観察された補強接合部破壊のモデル化に着目した検討を行った。

図-15 に RCWB 試験体の解析モデルを示す。ここでは、躯体と枠材を接合する要素をすべて剛体とした Case1 と一部を補強接合部バネで接合した Case2 を設定した。図-16 に解析結果を示す。Case2 の方が実験結果を良好に模擬しており、補強接合部バネの効果を確認できる。特に、ポストピーク挙動においては、Case1 では全柱が同時にせん断破壊したのに対し、Case2 では実験同様に各柱のせん断破壊のタイミングにずれが生じた。

図-17 に RCB 試験体の解析モデルを示す。RCWB 試験体の解析結果に基づき、補強接合部バネを設けた。図-18 に解析結果を示す。図中には RCWB 試験体の Case2 の解析結果も

示す。RCB 試験体の解析結果は実験結果を良好に模擬した。さらに、RCWB 試験体の解析結果との比較より、実験同様に構造スリットの影響が再現された。

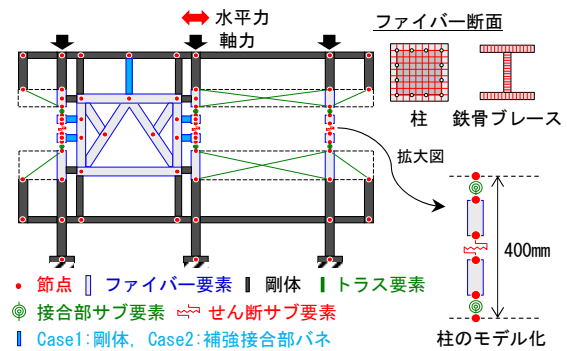


図-15 解析モデル (RCWB 試験体)

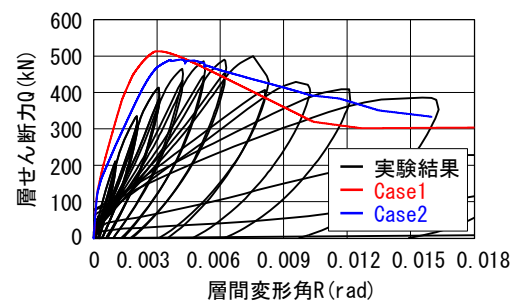


図-16 解析結果 (RCWB 試験体)

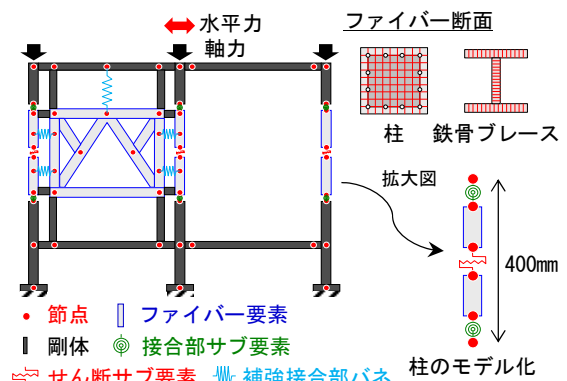


図-17 解析モデル (RCB 試験体)

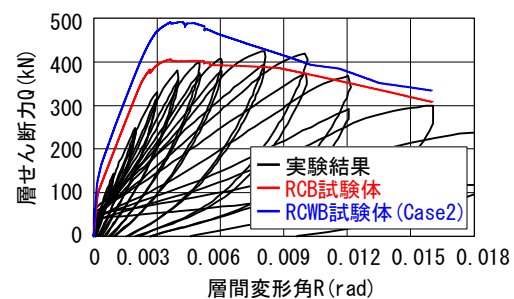


図-18 解析結果 (RCB 試験体)

### (3) 課題 3 に関する研究成果

これまで構築した解析モデルを補強後 RC 建造物に適用し、地震応答解析に基づく耐震性能評価を試みる。ここでは、1970 年代当時の一般的な構造設計手法により設計され

た旧基準の無補強試験体に外付け鉄骨ブレース補強し、全ての腰壁際に一面せん断型の構造スリットを設けた実大規模の補強試験体を解析対象とする。図-19に解析モデルを示す。実験結果との比較を通じて、本解析モデルの妥当性が確認されたため、補強方法および地震動をパラメータとした解析を実施する。ここでは、実大試験体をベースとして、無補強建物の1層における構造耐震指標  $I_S$  を0.5とし、補強建物の  $I_S$  が0.8となる鉄骨ブレースを設定した。なお、補強建物は構造スリットの有無により2ケースの建物モデルについて検討を行うが、いずれも1層の  $I_S$  は同一である。

図-20に耐震診断結果および解析結果(EL CENTRO, 75(cm/sec))を示す。いずれも鉄骨ブレース補強による耐力の上昇が確認できるが、鉄骨ブレースの座屈の発生により変形が進んだ。さらにスリットを設けた補強試験体は、既存試験体の内法スパンの増加によって剛性および耐力が低下したため、両補強建物の最大応答変形は無補強建物と同等となった。これより、現行手法による  $I_S$  値を基準とした補強設計では、大地震に対する性能評価が困難であり、数値解析モデルを用いた地震応答解析によって補強建物の耐震性能を適切に把握するとともに、補強に対する要求性能を満足する補強設計ならびに既補強建物の耐震性能の再検証が必要であると考えられる。

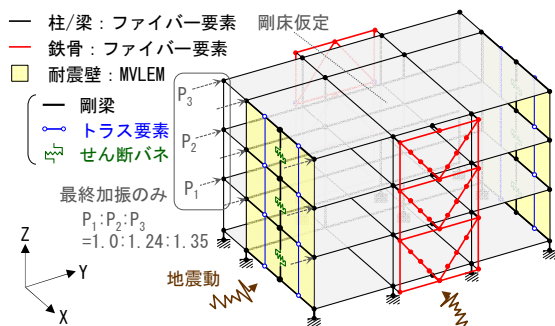


図-19 ファイバー解析モデル

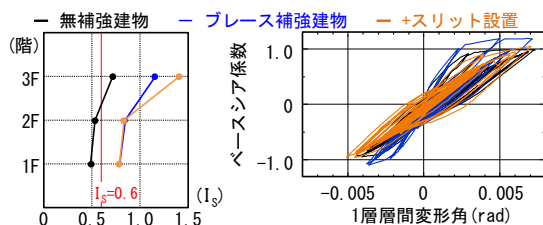


図-20 耐震診断結果および解析結果

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- 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

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, 査読有, Vol.37, 2015.07 (掲載決定)

- ②佐藤亮介, 内野卓, 田嶋和樹, 白井伸明: 主筋に丸鋼を用いた垂壁・腰壁付き RC 造連スパン骨組の鉄骨ブレース補強効果に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, 2015.07 (掲載決定)
- ③山根康孝, 田嶋和樹, 白井伸明: 座屈を伴う枠付き鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組のファイバー解析, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.2, pp.907-912, 2014.07
- ④山根康孝, 田嶋和樹, 白井伸明: 座屈またはパンチングシア破壊が生じる枠付き鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組の抵抗機構に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, No.2, pp.1075-1080, 2013.07
- ⑤K. Tajima, N. Shirai, A.Nishio, K.Imai: Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings by Damage Spectrum Method (損傷スペクトルによる RC 造建物の耐震性能評価), Conference Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering, 査読有, Paper No. 2579, 2012.09

[学会発表] (計29件)

- ①内野卓, 藤田有希子, 山根康孝, 田嶋和樹, 白井伸明: 地震動を受ける鉄骨ブレース補強後 RC 造建物の耐震性能評価 (その1, 2,3), 日本建築学会大会学術講演会, 神戸大学 (兵庫県神戸市), 2014.09.12
- ②山根康孝, 内野卓, 藤田有希子, 田嶋和樹, 白井伸明: 鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組の抵抗機構に基づく骨組解析モデルの構築 (その1,2,3), 日本建築学会大会学術講演会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2013.08.30
- ③伊東大地, 山根康孝, 田嶋和樹, 白井伸明: 破壊モードの異なる鉄骨ブレース補強後 RC 造骨組の復元力特性のモデル化 (その1,2), 日本建築学会大会学術講演会, 名古屋大学 (愛知県名古屋), 2012.09.12

[その他]

ホームページ <http://rc.arch.cst.nihon-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

白井 伸明 (SHIRAI, Nobuaki)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 9 0 0 6 0 1 4 4

### (2)研究分担者

田嶋 和樹 (TAJIMA, Kazuki)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 6 0 3 8 6 0 0 0