

論文 制震ブレースを取付けた RC バルコニーの補修補強を考慮した性能評価解析

惟 義英*1・横内 基*2・北嶋 圭二*3・白井 伸明*4

要旨：制震ブレースを利用した既存 RC 造建物の耐震補強法の有効性が実験的に検討されている。本論文では、集合住宅のバルコニースラブ先端に制震ブレースを設置する工法を想定して実施されたモデル試験体に関する実験の FEM 解析を行い、制震ブレース取付部の性能を評価する手段としての FEM 解析の適用性について検討した。なお、初回実験後に補修・補強を施した試験体の性能を確認するため、段階解析を実施した。その結果、取付部の性能は、補強に伴う施工箇所の付着性状を考慮することにより評価が可能であること、また、あと施工に伴う試験体の性能や補修の影響などを確認し得ることを示している。

キーワード：耐震補強，制震補強，外付けフレーム，集合住宅，補修・補強，FEM 段階解析

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では、1981 年に施行された新耐震設計法以前の旧建築基準で設計された建物が、数多くの被害を受けた。このことから、旧基準建物に対して耐震診断・改修を早急に実施することが望まれている。また、旧基準建物の耐震安全性を確保するため、耐震改修促進法が施行され、これを機に公共建築物では、耐震診断・改修が積極的に行われるようになった。しかし、集合住宅などの民間建物では、期待通りに進んでいないのが現状である。その主な理由として、耐震補強工事に際し、建物使用者の転居が困難な点が挙げられる。この問題を解消するため、集合住宅などのバルコニーラブ先端部に鉄骨外付けフレーム(以下、フレーム)を設け、そこに摩擦ダンパー付き鋼管ブレース(以下、制震ブレース)を設置する「居ながら補強」が可能な制震補強工法が開発されている¹⁾。

筆者らは、フレームが既存架構に取付く部分(以下、取付部)の繰返し荷重に対する性能を検討するため、確認実験を実施してきた²⁾。また、実験結果と解析結果の整合性を把握した上で、様々な取付け方法に対して、解析を用いて取付部の性能を合理的に評価することを目標に、2 次

元 FEM 解析による予備的な検討を行ってきた³⁾。しかし、スラブに小梁を増設する際の打継ぎ部付着性状の問題など、実験と同等の評価を 2 次元解析で行うのは不十分であることがわかった。よって本論文では、スラブの厚さ方向を考慮した 3 次元の FEM 解析を行い、取付部の性能を評価し得るかを確認する。また、初回実験後に補修した試験体の損傷が、取付部性能に及ぼす影響を確認するため、FEM 段階解析を行う。

2. 実験概要

制震ブレースの性能を有効に発揮させるためには、既存架構とフレームが一体となって変形する必要がある。そのために、取付部やその周辺部は、地震力のような多数回の繰返し荷重に対しても、過度の変形進展が起らず十分な剛性の確保が要求される。本論文では、ダンパー摩擦荷重(196kN)の 1.5 倍に相当する水平成分(196kN×cos45°×2本=416kN)を設計用作用力とし、取付部にはこの荷重内での繰返し荷重を受けても、変形が進展しない性能を要求する。

2.1 試験体概要

解析対象試験体は、TYPE2A と TYPE2B である²⁾。試験体は既存建物の梁付きバルコニー

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 青木あすなろ建設(株) 技術本部技術研究所建築研究室 工修 (正会員)

*3 青木あすなろ建設(株) 技術本部技術研究所建築研究室室長 工博 (正会員)

*4 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

スラブ 1 スパンを想定して、スラブ先端にフレームを取付けたものである。図-1 に両試験体の平面図と断面図を示す。TYPE2A は、スラブ先端のスパン端部でフレームと一体化を図った簡易的な取付方法であり、この試験体は実験前に乾燥収縮による初期ひび割れが観察されていた。TYPE2B は TYPE2A 実験終了後、エポキシ樹脂でひび割れ補修をし、スパン両端部に小梁を増設して、スラブ先端の全域にグラウトを注入した試験体である。

2.2 加力スケジュール

加力スケジュールを図-2 に示す。加力は制震ブレースがスパン端部と中央部に取付く場合を想定して行った。ブレース軸力の水平成分の合力である面内せん断力を水平荷重とし、正負交番で載荷した。TYPE2A は、スラブ先端のスパン両端部で載荷が行われている。TYPE2B の載荷は 2 段階から成り、1 段階目はスパン両端部で繰返し載荷が行われ、2 段階目は加力点をスパン中央に変更して載荷が行われた。ここでは、1 段階目を TYPE2B-1、2 段階目は TYPE2B-2 と表記することにする。

3. FEM 解析概要

図-3 に FEM 要素分割図、表-1 に各要素種類を示す。また、解析に用いた材料特性を表-2(a)、(b)に示す。グラウトの材料物性算定式が確立されていないので、引張強度はコンクリートに準じて、圧縮強度より算出した⁴⁾。

解析には、汎用解析コード DIANA-8.1⁵⁾を使用した。なお、加力は荷重制御とし、設計用作用力内では実験と同回数の繰返し載荷を行い、取付部の要求性能を評価し得るかを確認した。また、それ以降の荷重レベルでの繰返し回数は 1 回とし、補修した試験体における取付部の変形性能を評価し得るかを確認した。

コンクリートおよびグラウトの圧縮応力下の非線形挙動は *von-Mises* の降伏基準に従う弾塑性構成則により表現した。ひび割れ判定には、最大主引張応力が引張強度に達した時点で、ひ

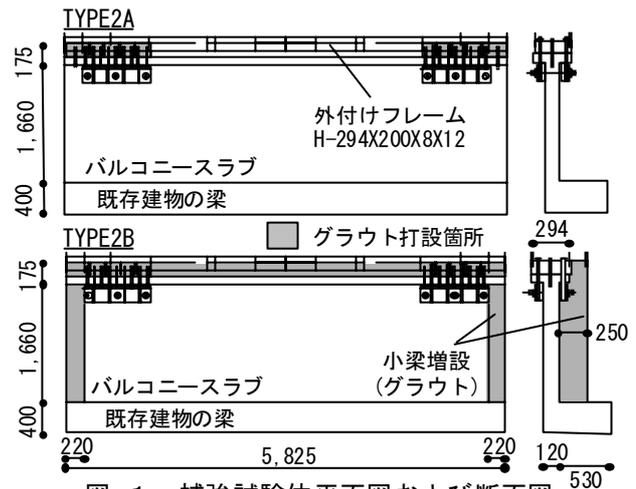


図-1 補強試験体平面図および断面図

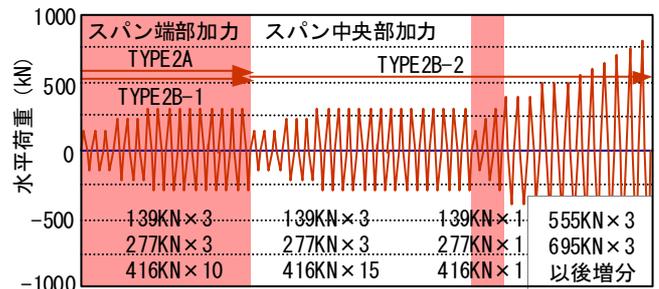


図-2 加力スケジュール

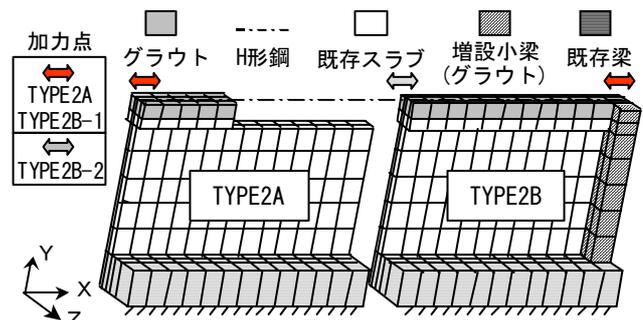


図-3 境界条件および要素分割図

表-1 各要素のモデル化

グラウト		8 節点ソリッド要素	弾塑性
コンクリート (既存スラブ)			
コンクリート (既存梁)			弾性
H形鋼	梁要素		
あと施工アンカー、頭付きスタッド スラブ筋、梁主筋梁、せん断補強筋	埋め込み鉄筋要素		弾塑性

表-2 材料特性
(a) コンクリートおよびグラウト

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
コンクリート	19.0	1.37*	18.9
グラウト	40.4	1.99*	29.6*

*文献 [4] より算出

(b) 鋼材

	ヤング係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)
あと施工アンカー	175	393
異形スタッド	183	400
STP, スラブ筋 (φ9)	201	353
スラブ筋 (φ13)	210	343
梁主筋	175	393
H形鋼	210	-

ひび割れが発生する強度破壊基準を適用した。

図-4 にひび割れコンクリートの圧縮強度低減を考慮した 1 軸圧縮応力(σ_c)—ひずみ(ε)関係を示す。下降域は圧縮破壊エネルギー G_{FC} を考慮した直線軟化でモデル化し、 $G_{FC}(N/mm)$ は次式により評価した⁶⁾：

$$G_{FC} = 8.8\sqrt{f_c} \quad (1)$$

ここで、 $f_c(MPa)$ はコンクリート圧縮強度である。ピーク後の $\sigma_c - \varepsilon$ 関係は、 $\sigma_c -$ 塑性変形(δ_p)関係から、 $\varepsilon = \delta_p / L_c$ として求めている。 L_c は破壊領域の長さを表し、要素代表長さと呼ぶ。 L_c は要素体積 V と等価な体積を持つ球の直径($L_c = 2\sqrt[3]{3V/4\pi}$)とした。なお、除荷・再負荷時の剛性は初期弾性剛性に従うものとした。

1 軸引張応力—ひずみ関係を図-5 に示す。下降域は次式に示す岡村らの Tension Stiffening モデル⁷⁾ を 4 直線で近似した。

$$\sigma_t = f_t (\varepsilon_{tu} / \varepsilon_t)^c \quad (2)$$

ここで、 f_t は引張強度、 ε_t は引張強度時ひずみ、 C は Tension Stiffening 効果を表す係数である。なお、除荷、再負荷時の剛性は原点指向の割線剛性とする。

あと施工アンカー、スタッドおよび鉄筋の応力—ひずみ関係は bi-linear 型モデルとし、降伏後の 2 次剛性はヤング係数の 1/100 とした。

4. 解析パラメータ

TYPE2A では実験以前に初期ひび割れが観察されたことから、ひび割れコンクリートの圧縮強度低減について検討した。また、Tension Stiffening 効果の付着係数 C についての予備解析も併せて行った。さらに、鋼材—グラウト間およびスラブにグラウトを打継いだ界面など、

補修・補強に伴う施工箇所の付着性状が取付部の性能に及ぼす影響を確認した。また、ひび割れをエポキシ補修した試験体の性能を評価するため、段階解析を用いて検討を行った。

4.1 圧縮強度低減係数 λ および付着係数 C

圧縮強度低減係数 λ と付着係数 C をパラメータとした予備検討を行う。 λ は長沼の研究を参照して 0.7 とした⁸⁾。ただし、圧縮強度時ひずみは強度低減前と同値とし、図-4 のように仮定した。また、異形鉄筋に対する C としては $C=0.4$ が提案されている⁷⁾。しかし、本実験のスラブ筋のような丸鋼に対する推奨値は示されていない。丸鋼は異形鉄筋より付着性能が劣るため、適当な C 値も変化することが考えられる。そこで、丸鋼に対し $C=0.6$ として解析を行った。

図-6 に TYPE2A 試験体に対して、予備解析と実験で得られたスラブ先端の作用水平荷重と H 形鋼の中央部水平変位の関係を示す。解析結果より、 λ が剛性に及ぼす影響は大きく、初期ひび割れの影響は強度低減を考慮することで再現できそうである。次に、付着係数 C に注目すると、Tension Stiffening 効果を低減した影響が表れ、 $C=0.6$ の解析結果は実験結果により近づいており、丸鋼に対して仮定した $C=0.6$ は妥当と思われる。以上より、以後の解析では、 $\lambda = 0.7$ および $C=0.6$ を用いるものとする。

4.2 鋼材とグラウト間の付着特性

取付部では、鋼材とグラウトという異種の材料が接合されているため、その界面において、すべりなどの挙動が予想される。そこで、界面における付着特性に関して、界面要素を用い、付着応力—すべり関係を仮定して検討を行う。ここでは、大下らが、スタッド付き H 形鋼とコンクリート界

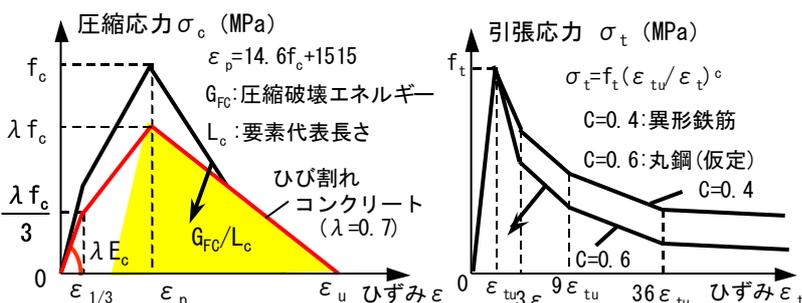


図-4 圧縮側構成則

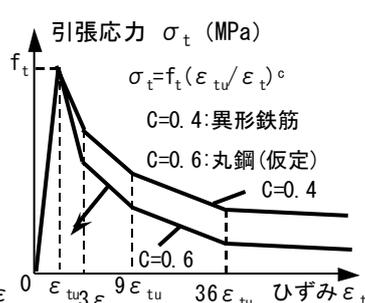


図-5 引張側構成則

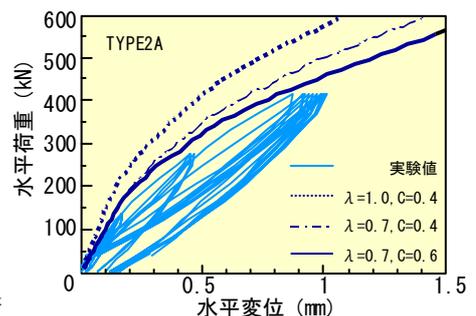


図-6 予備解析結果

面の付着性状を評価することを目的として行った、鋼材の押し抜き実験⁹⁾について解析する。検討に使用するモデルは、大下らの実験式を近似するモデル⁹⁾ (大下モデル) と CEB(丸鋼)モデル¹⁰⁾ である。図-7に実験概要と解析モデルを示す。なお、実験ではスタッド本数を1本としている。図-8に仮定した付着応力-すべり関係を示す。図-9の解析結果より、両モデルとも初期の挙動と実験値は概ね一致している。CEBモデルは実験のすべり開始点と良い対応を示すが、それ以降のせん断応力をやや過小評価している。これはスタッドをトラス要素とし、曲げ抵抗を考慮していないことによると考えられる。一方、大下モデルはすべり開始以降のせん断応力を過大評価している。以後の解析では、単純さを考慮して鋼材-グラウト間の付着特性に CEBモデルを仮定する。

4.3 小梁打継ぎ部の付着特性

コンクリート構造物の打継ぎ部には、曲げや引張のような開口型変形だけでなく、せん断や圧縮変形も存在する。このような複合応力下における破壊過程を明らかにすることが重要である。本解析では、打継ぎ部の界面に沿う破壊や摩擦すべり、圧壊をシミュレートするのに適している「複合界面モデル」¹¹⁾を用いて、小梁打継ぎ部の界面挙動に注目した解析を行った。まず、石原らが行ったコンクリート打継ぎ面の処理方法などをパラメータとしたせん断加力実験¹²⁾を取り上げる。実験を図-10に示すようにモデル化し、せん断破壊エネルギー(G_{FII})をパラメータとした解析を行った。図-11に実験結果と解析結果の比較を示す。この結果より G_{FII} を 0.4N/mm とした。また、Rots らの研究¹¹⁾より、粘着力 c は $1.4f_t$ 、摩擦角 ϕ は 37° と仮定した。ここで、 f_t はグラウトの引張強度である。

4.4 段階解析

段階解析(Phased Analysis)とは、例えばある荷重履歴の下で解析を行い、終了時の損傷などの情報を保存し、さらに補修・補強の影響を考慮するため、要素の追加や除去、境界条件の変更などを行ったモデルについて、新たな荷重履

歴の下で解析を行う方法である。

TYPE2A の解析終了時におけるコンクリート等のひずみ(損傷)や応力を保存し、かつ小梁やグラウト増設部を有限要素として追加した初期状態から TYPE2B-1 の解析を継続する。同様に、TYPE2B-2 は TYPE2B-1 の解析終了後の応力やひずみを初期値とし、かつ加力点を変更して解析が継続される。なお、ここではエポキシによる補修効果は無視している。

5. 解析結果および考察

表-3に検討した解析モデルの一覧を示す。

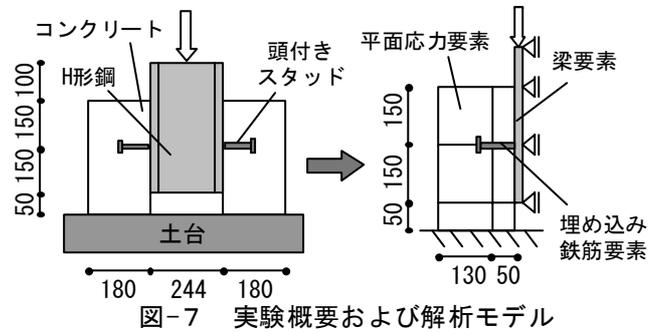


図-7 実験概要および解析モデル

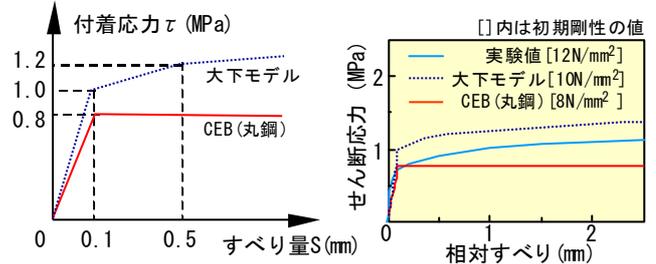


図-8 付着応力-すべり関係 図-9 解析結果

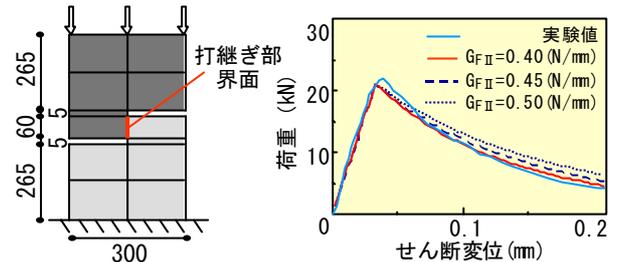


図-10 検証解析モデル 図-11 検証解析結果

表-3 解析パラメータ

試験体	鋼材-グラウト 付着	打ち継ぎ部 付着	載荷法	段階解析	
解析-1	TYPE2A	大下モデル	単調	なし	
解析-2					
解析-3					
解析-4	CEB(丸鋼)	なし	繰返し	なし	
解析-5	TYPE2B-1	CEB(丸鋼)	複合界面 モデル	繰返し	
解析-6					
解析-7	TYPE2B-2	CEB(丸鋼)	複合界面 モデル	繰返し	あり
解析-8					
解析-9					あり

5.1 鋼材とグラウト間の付着性状

図-12(a)は TYPE2A に対して、鋼材とグラウト間の付着特性を検討した結果である。解析-1, 2, 3 より、付着の有無が結果に及ぼす影響は大きく、鋼材とグラウト間の付着を考慮すると、実験結果を良好に再現できる。このことから、取付部の性能を評価する上で、付着すべりは重要な因子であることが確認できた。また、解析-2,3 で、付着モデルの違いにより剛性に差異が生じる荷重レベルは、実験での繰返し加力において変形が進展する荷重レベルと概ね対応している。それ以降の耐力は、CEB モデルでは頭打ちになっているが、大下モデルでは上昇している。この傾向は検証解析と整合している。次に、図-12(b)は鋼材とグラウト間の付着特性を CEB モデルとした時の繰返し解析結果と実験結果の比較である。単調解析と同様に、実験結果を比較的良好に再現し、解析から実験時にみられた変形の進展を確認できる。以上より、試験体の鋼材とグラウト間の付着特性は、CEB モデル程度であったと考えられる。また、設計用作用力(416kN)内において、FEM 解析により実験と同等の評価ができそうである。

5.2 小梁打継ぎ部の付着性状

図-12(c)は TYPE2B-1 に対して、小梁打継ぎ部の付着と、段階解析により加力前の損傷を考慮した結果である。打継ぎ部を完全付着とした解析-5 では、実験に比べ剛性が高いのに対し、付着を考慮した解析-6 では剛性低下がみられ、実験結果に近づく傾向がある。これより、スラブ面内に生じる力に対して、増設小梁が負担できる応力は、打継ぎ部の状態に依存することが考えられ、取付部性能を評価する上で、打継ぎ部の付着性状を慎重に考慮する必要があることがわかる。なお、いずれの解析結果も設計用作用力内における繰返し载荷において、変形が進展しない性状は、実験と一致していた。しかし、剛性については、まだ若干の差異がみられる。

5.3 加力前に受けた損傷の影響

図-12(c)に示す解析-7 は、段階解析により加力前に受けた損傷を考慮した結果である。実験

の剛性と概ね対応しており、加力前の損傷が取付部の剛性に及ぼす影響が大きかったことがわかる。さらに図-12(d)は、スパン中央部を加力した時の比較である。加力前の損傷を無視した解析-8 に比べ、損傷を考慮した解析-9 では、剛性や耐力を低く評価しており、これらの結果からも、損傷考慮の有無が解析結果に及ぼす影響が大きいことがわかる。ただし、解析-9 は実験結果と比べて、耐力を過小に評価している。図-13 はピーク加力時において、コンクリートおよびグラウトのクラックひずみ(ひび割れ発生後の引張ひずみ)の分布と実験の最終破壊状況を比較して示す。解析-8 では実験で生じたスラブ中央のせん断ひび割れが確認できるが、解析-9 ではそれが確認できず、スラブ端部の損傷が目立つ傾向が見られる。この解析-9 の耐力の過小評価や実験結果との破壊状況の相違は、TYPE2A 実験終了後のエポキシによる補修効果を無視していることが原因と考えられ、TYPE2B 取付部の性能を解析的に評価するには、損傷を考慮し、かつエポキシによる補修効果を考慮した解析を行う必要がある。

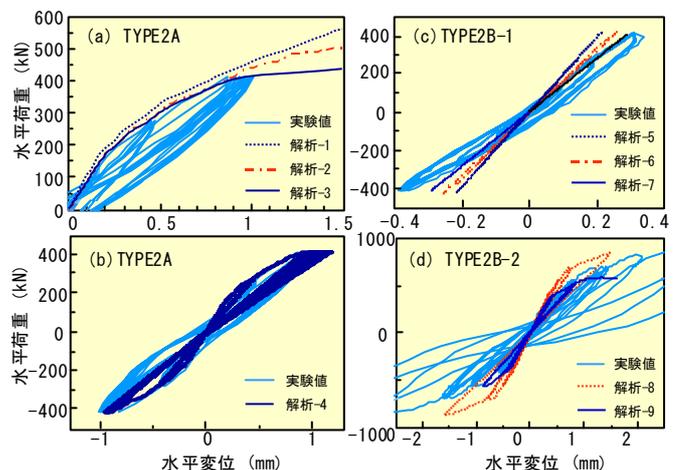
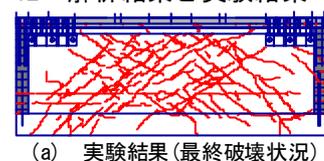
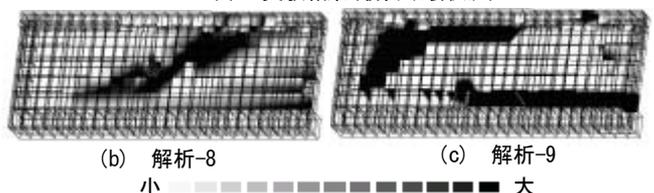


図-12 解析結果と実験結果の比較



(a) 実験結果(最終破壊状況)



(b) 解析-8

(c) 解析-9

小 大

図-13 TYPE2B-2クラックひずみ分布と破壊状況の比較

5.4 エポキシ補修を考慮した解析

図-14 に解析-4(TYPE2A 繰返し解析)終了後のクラックひずみ分布を示す。ここで、クラックひずみが生じたコンクリートおよびグラウト要素は、引張強度に達してひび割れが発生している。この要素を段階解析によって新しい無損傷の要素に置き換えて、試験体を補修したと仮定する。

図-15 に補修考慮の有無と実験結果を比較して示す。補修を考慮した解析は、解析-9 に比べ若干耐力が上昇していることが確認できる。また、図-16 に示すクラックひずみ分布より梁とスラブの取り合い部分における損傷や、スラブ中央のせん断ひび割れが概ね再現できていることが確認できた。これらより、段階解析により要素を取り替えることによって、補修の影響を概ね再現できそうである。さらに、TYPE2B 試験体においても設計用作用力内で、FEM 解析により実験と同様の取付部性能の評価ができそうである。しかし、設計用作用力を超えたピーク荷重近傍まで実験値を再現できていないので、この点については今後の課題となるだろう。

6. まとめ

本研究により次の知見が得られた：

- (1) 補強に伴う施工箇所の付着性状を考慮することによって、FEM 解析を用いて、取付部の変形性能を概ね把握することができた。
- (2) 段階解析を用いてひび割れた要素を新しい要素に取り替えることにより、補修効果を概ね再現できることがわかった。
- (3) 設計用作用力での地震動を想定した多数回の繰返し荷重に対する制震ブレース取付部の性能を確認する手段として、非線形 FEM

解析が有効であることがわかった。

- (4) 今後の課題として、補修を考慮する際に、エポキシ樹脂を含んだコンクリートの構成則について検討する必要があると思われる。

謝辞

本研究は、平成 16 年度文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学理工学部:継続)「環境・防災都市に関する研究」(研究代表者:石丸 辰治)の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 北嶋圭二ほか：集合住宅への制震補強工法の適用事例, コンクリート工学, Vol.42, No.2, pp.54-60,2004.2
- 2) 上田英明ほか：バルコニーを有する集合住宅への外付け制震ブレースの取付方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol26, No.2, pp1754-1758,2004
- 3) 惟義英, 白井伸明ほか：FEM 段階解析による制震ブレースバルコニー先端取付部の性能確認, 日本建築学会学術講演概要集 C-2, pp.77~78, 2004.8
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 5) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research, 2002
- 6) 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, 1999.10
- 7) 岡村甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, pp.36-37, 1991
- 8) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート版の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp39-48, 1991.3
- 9) 笠井祐次, 河村哲男, 大下英吉: スタッド付き鋼・コンクリート界面における引張応力依存型の付着性状に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 13 巻第 2 号, pp1-13, 2002 年 5 月
- 10) CEB: CEB-FIP MODEL CODE1990 DESIGN CODE, Thomas Telford Service Ltd., 1993
- 11) Lourenco, P.B., and Rots, J.G.A.: Multi-Surface Interface Model for The Analysis of Masonry J.Struct.Eng. Structures. ASCE123, 7(1997), 660-668
- 12) 石原誠一郎ほか: コンクリート打継ぎ部のせん断破壊過程に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.574, pp181-187, 2003 年 12 月

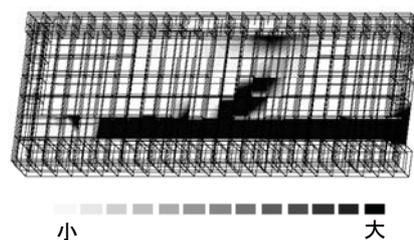
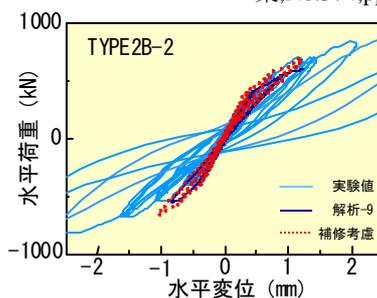
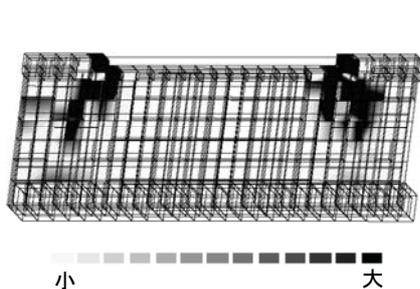


図-14 解析-4終了時クラックひずみ分布

図-15 解析結果(補修考慮)

図-16 クラックひずみ分布(補修考慮)