

RC 連層壁とダンパーとの接合部の繰返し加力実験

低層部剛性を低下させた超高層 RC 建物の連層壁制振架構の開発 その2

CYCLIC LOADING TEST OF RC MULTI-STORY SHEAR-WALL – DAMPER CONNECTION

Development of vibration controlled high-rise RC building
with low stiffness at lower stories using shear-wall and oil-dampers Part 2谷 翼^{*1}, 欄木龍大^{*2}, 竹脇 出^{*3}

Tsubasa TANI, Ryota MASEKI and Izuru TAKEWAKI

A new structural control system using a couple of shear-walls to amplify the damper deformation is proposed for vibration control of high-rise RC buildings. To demonstrate the effectiveness of the system, it is important to carefully design the damper connections between different materials (steel and concrete). Cyclic loading experiments using T-shape specimens were conducted for evaluating their stiffness and durability. The results clarified that it has sufficient stiffness and durability as a damper connection. Finite element analysis introducing crack lines were also conducted to simulate the experiments. Finally a simplified model of the connection was proposed.

Keywords: High-rise building, Vibration control, Connection, Cyclic loading test

超高層建物, 制振, 接合部, 繰返し加力実験

1. はじめに

超高層 RC 建物に大きな減衰を付与するために、著者らは Fig.1 に示すような、低層部剛性を低下させた上で、連層壁とダンパーを低層部に集約配置する超高層制振架構の提案を行っている¹⁾。前報では連層壁脚部に用いる回転支承として積層ゴムを採用し、その回転変形に対する耐久性について報告した²⁾。本報では、連層壁とダンパーとの接合部の繰返し加力実験の結果とともに、接合部のモデル化方法について報告する。

制振建物の応答性状を高精度に把握するためには、取付け部材や接合部等の周辺部材の変形を考慮して、ダンパーに生じる変形を正しく評価する必要がある。特に、RC 建物においては、ダンパー取付け部が異種材料間の接合となるためにその構造的評価が難しく、実験や解析による性能の確認が不可欠である。

RC 建物へのダンパーの設置に関しては、種々の方法が提案・適用されている。間柱型³⁾、壁型⁴⁾、ブレース型⁵⁾のような鉄骨建物にも多く見られる方法に加え、連層壁間の境界梁や短スパンの梁に低降伏点鋼を用いた梁型⁶⁾の例も多い。コンクリート部材へのダンパーの接合方法としては、端部をコンクリート内に埋め込む根巻型や、アンカーボルトや PC 鋼棒により取り付ける露出柱脚型がある。露出柱脚型では、ガセットプレートに突起を設ける⁷⁾、あるいはコンクリートにコッターを設ける⁵⁾等の工夫を施し、せん断力の伝達

性能を高める提案がなされている。しかし、いずれの接合部においても、設計変位あるいは設計荷重を超える載荷試験がなされているものの、加力回数は多くとも全加力を合わせて数十サイクル程度である。近年発生が懸念されている長周期・長時間地震動を想定した場合には、より多数回の変形が接合部に生じる可能性がある。また、地震後の継続使用や、繰返し生じる地震動に対する安全性を確保するためにも、接合部の繰返し加力に対する性能を確認することが重要である。

RC 部材に対しては、100 回を超えるような多数回の繰返し加力実験がいくつか行われている。柱梁接合部の試験体を用いたものと

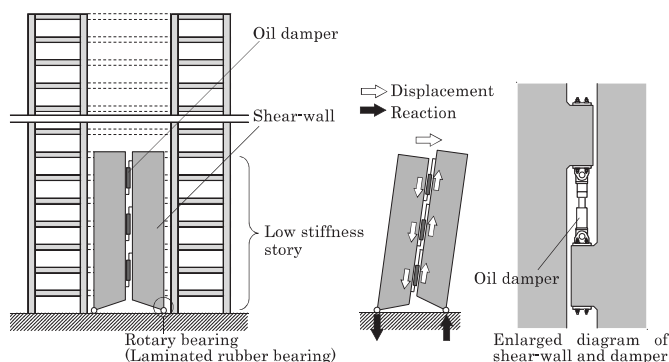


Fig. 1 Proposed vibration-controlled structure

*1 大成建設(株)技術センター 修士(工学)
(京都大学大学院博士後期課程)

*2 大成建設(株)技術センター 博士(工学)

*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.
(Grad. Student, Kyoto University)

Technology Center, Taisei Corp., Dr.Eng.

Prof. Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

しては以下のものがある。齋藤ら⁸⁾は、大変形経過後も小変形域の繰返しにより耐力低下が生じることを示した。鈴木ら⁹⁾は、繰返しによる履歴吸収エネルギーの減少および逆S字型の履歴性状への移行を表現するため、武田モデルにスリップ型の特性を導入したモデルの提案を行っている。また、永井ら¹⁰⁾は、繰返し加力がコンクリートと鉄筋の付着および鉄筋の抜け出し性状に与える影響の確認を行っている。いずれの研究においても、多数回の繰返しがコンクリート部材の剛性・耐力の低下を引き起こすことを示している。

そこで本研究では、提案架構の連層壁とオイルダンパーとの接合部を対象とした多数回の繰返し加力実験を行い、接合部の剛性および耐久性を確認する。また、ひび割れ発生位置をあらかじめ想定した有限要素解析により、載荷力の増加に伴う剛性低下や鉄筋のひずみが追跡可能であることを確認する。最後に解析結果を元に、接合部の変形を考慮できる簡易設計用モデルを構築する。

なお、本論文は日本建築学会大会学術講演¹¹⁾において発表した内容に大幅な加筆を行い新たな知見を加え、作成したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体、配筋図、ひずみおよび変位計測位置図を、それぞれ Fig.2, Fig.3, Fig.4 に、試験体諸元を Table 1 に示す。ダ

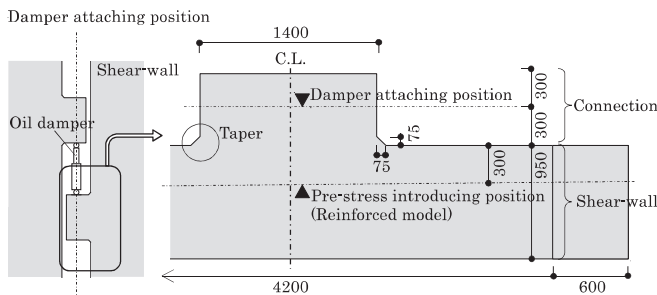


Fig.2 Specimen of shear wall with damper support diaphragm

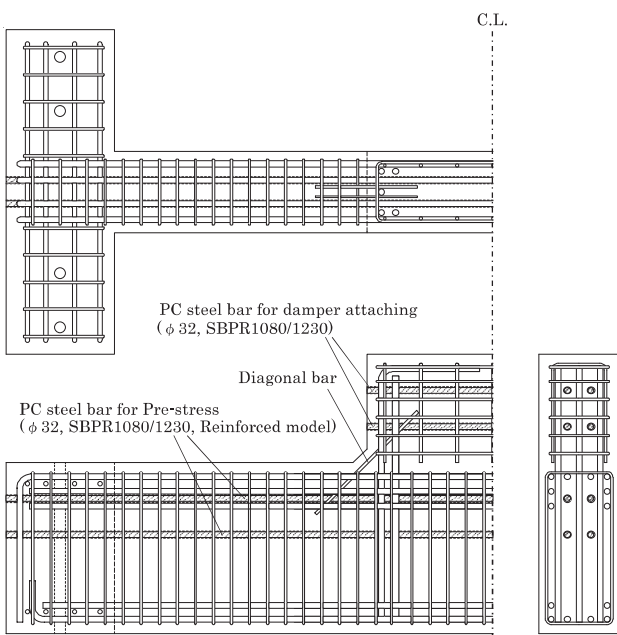


Fig. 3 Bar arrangement diagram

ンパーは連層壁先端に設けた接合部に PC 鋼棒により圧着することで接合する。最大減衰力 1500kN のダンパーが取り付くことを想定した実大スケールで、接合部と周辺の連層壁を取り出した部分試験体とした。試験体では連層壁部分のせいを 950mm としているが、実建物では 4000mm 程度になる。試験体は標準試験体×2、補強試験体×1 の計 3 体を用いた。ダンパー接合部および連層壁の厚さは 450mm で全試験体共通とし、接合部と連層壁との入り隅部分にはテーパを設けている。耐力はストラット-タイモデルを用いて評価し、最大減衰力に対し余裕を持った設計としている¹²⁾。このとき、接合部に生じる引張力は接合部主筋のみで負担するものとし、斜め補強筋は計算外の付加要素とした。地震時に連層壁に生じる曲げひび割れの影響を考慮するため、標準試験体のうち 1 体は、加力前に最大ひび割れ幅 0.2mm 程度の曲げひび割れを生じさせるものとする (Fig.5) (以下、ひび割れ試験体と称す)。連層壁はダンパーの支持部となるだけでなく、低層部の特定層への変形集中を防止する重要な役割を担っているため、最大ひび割れ幅が 0.2mm 程度になるよう十分な配筋を施している。なお、連層壁に生じる応力におけるダンパー反力の影響は小さい。補強試験体はひび割れによる剛性低下を抑えるため、PC 鋼棒により連層壁先端に 2000kN のプレストレスを導入する。プレストレスによる接合部の補強は、一般的な建物よりも要求性能が高い場合に用いることを想定している。

2.2 加力装置

加力装置を Fig.6 に示す。水平に配した左右の加力用ジャッキのうち一方を引張、もう一方を圧縮として、それぞれが載荷力の半分を負担するよう制御することで水平力を与える。水平荷重が 1500kN を超える場合のみ引張側ジャッキの性能が不足するため、圧縮側と引張側の載荷力の比を 5 : 4 としている。ジャッキは実際のダンパーの取付け状態を模擬して PC 鋼棒により接合部に圧着さ

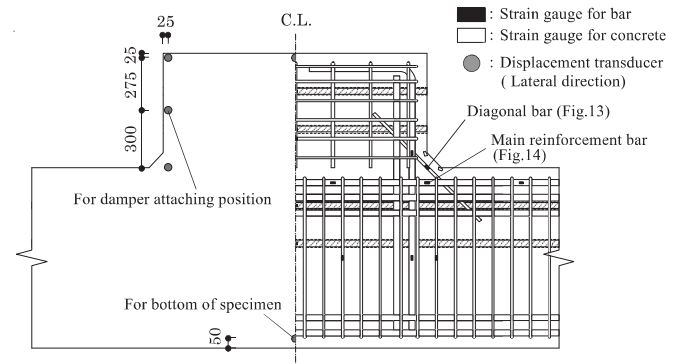


Fig. 4 Strain gauge and displacement transducer arrangement

Table 1 Specification of specimen

No.	Specimen	σ_B (MPa)	E_c (MPa)	Bar arrangement	Remarks
1	Normal	73.4	38700	Connection Main reinforcement: 5-D32 Stirrup: D13-□-@100	Bending crack 0.2mm
2	Cracked	83.0	41000	Shear-wall Main reinforcement: 8-D32 Diagonal bar: 2-D13	
3	Reinforced	75.9	40700	Shear reinforcement: D13-□-@100	Pre-stress 2000kN

σ_B : Compressive strength of concrete, E_c : Young's modulus of concrete
Bar type: D32 (SD390), D13 (SD295A)

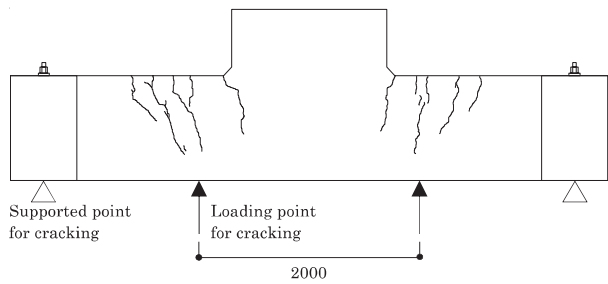


Fig. 5 Cracked specimen

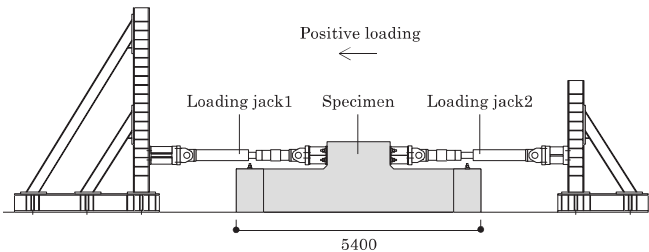


Fig. 6 Set up of specimen

Table2 Loading program

No.	Confirmation content	Loading pattern
1	stiffness	±250, 500, 1000, 1500kN each 3 cycles
2	durability	±1500kN 100 cycles
3	Property after maximum loading	±1800kN 5 cycles*

* Only 2nd loading on normal specimen is up to 2000kN

れており、接合部の左右両側から載荷した場合でも、接合部の挙動は片側から載荷した場合と同等になるものと考えられる。導入緊張力は、想定したダンパーの最大減衰力 1500kN に対して離間が生じないように、加力時点で 1500kN 以上となるよう設定した。

2.3 加力プログラム

接合部の剛性、繰返しに対する耐久性能および最大荷重以降の特性を確認するため、3種類の試験を実施した。Table 2 に加力プログラムを示す。試験体ごとに、剛性確認として水平力±250kN、±500kN、±1000kN、±1500kN と漸増させ各 3 サイクル、次に耐久性能確認として水平力±1500kN を 100 サイクル、最後に最大荷重以降の特性確認（以降、最大荷重試験）として水平力±1800kN を 5 サイクル与える。最大荷重試験において、当初は水平力±2000kN を予定していたが、安定した加力が難しかったため±1800kN に変更している。そのため、標準試験体の 2 サイクル目のみ±2000kN の加力となっている。

3. 実験結果

3.1 水平剛性

各試験における、ダンパー取付け位置での水平力-水平変位関係を Fig.7 から Fig.9 に、最大荷重の違いによる水平剛性の変化を Fig.10 に、繰返し載荷に伴う水平剛性の変化を Fig.11 に示す。Fig.11 には、最大減衰力 1500kN の一般的なオイルダンパーの鋼材部分の剛性、および内部オイルが変形することによる剛性の直列和である装置全体の剛性も併せて示す。水平変位は、左右のダンパー取付け位置の表面および裏面の計 4 か所の平均値と試験体底の変位の差とした (Fig.4)。水平剛性は、剛性確認試験および最大荷重試験の各

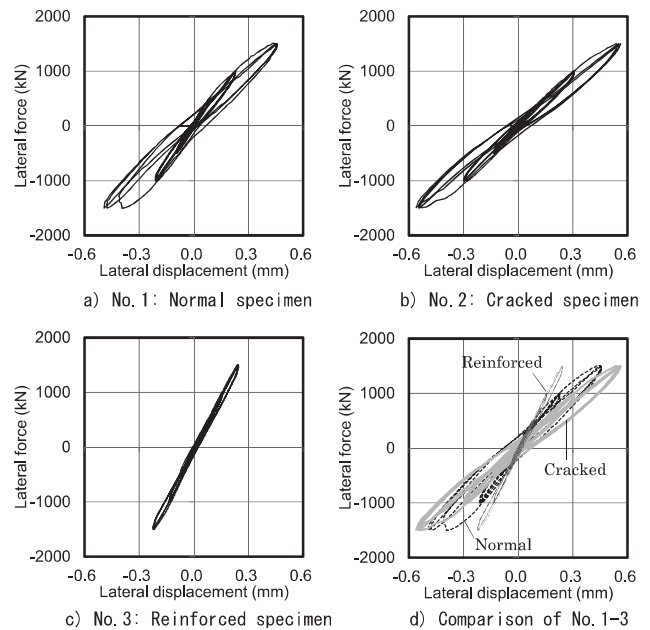


Fig. 7 Force-deformation relation in stiffness test

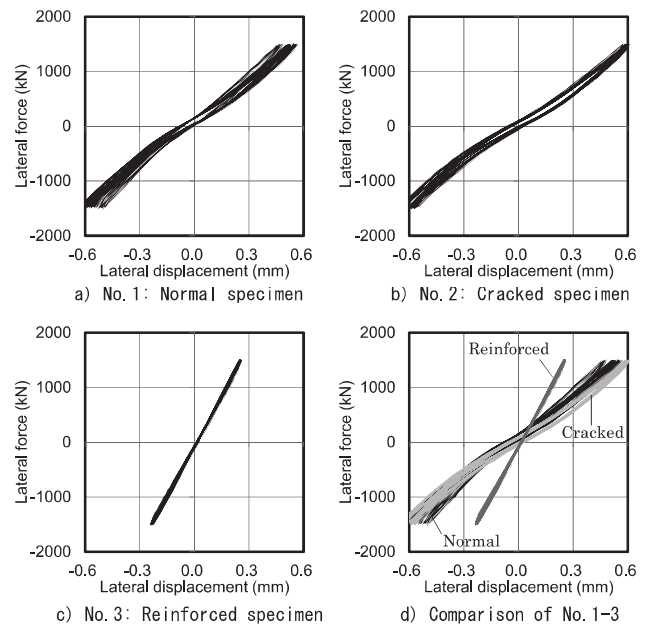


Fig. 8 Force-deformation relation in durability test

荷重レベルでの 3 サイクル目の水平力-水平変位関係に対して、最小二乗法により近似した直線の傾きとした。

標準試験体：最大荷重の増加に伴い、水平剛性は線形に低下する。また、繰返し回数の増加に対して水平剛性は低下するが、繰返し初期ほどその程度が大きく、繰返し終盤では概ね一定値に収束する。
ひび割れ試験体：標準試験体よりも初期剛性が小さい。ただし、最大荷重の増加および繰返し回数の増加に伴う剛性低下の程度は標準試験体より小さく、最終的な剛性は標準試験体と同程度となった。
補強試験体：水平力 1000kN 以下ではほとんど剛性の低下は見られない。それ以降は剛性低下が生じるものの、その程度は小さい。また、繰返しに伴う剛性の低下も非常に小さい。
全試験体共通：耐久性能確認試験における接合部の最大変形は 0.2

～0.6mm 程度であり、大地震時に想定される提案架構のダンパー接合部間の変位差 60mm に比べて小さく、接合部としての機能を保持していると言える。また、試験体の水平変形には連層壁部分の曲げ変形が含まれているため、接合部単体での剛性はより大きくなるものと考えられる。なお、4 章の解析で試験体底部の浮き上がりを拘束した場合、全体変形は 30% 程度低下した。

3.2 ひび割れ

全試験終了後のひび割れ状況を Fig.12 に示す。

標準試験体：ジャッキの取付け時点で入り隅のテーパ部に微細な斜めひび割れが生じており、荷重の増加に伴いひび割れ幅が拡大した。水平力が 1000kN を超えると、連層壁部分に曲げひび割れが生

じ始めた。また、繰返し回数の増加に伴い僅かながらひび割れの進展が見られた。最大ひび割れ幅は 0.60mm、最大残留ひび割れ幅は 0.10mm であった。

ひび割れ試験体：導入した曲げひび割れを起点にひび割れが進行した。水平力が 1000kN 程度からは、導入した曲げひび割れの延長線上以外にもひび割れが生じ始めた。標準試験体同様、繰返し回数の増加に伴い僅かながらひび割れの進展が見られた。最大ひび割れ幅は 0.60mm、最大残留ひび割れ幅は 0.15mm であった。

補強試験体：水平力が 1000kN 程度から入り隅のテーパ部にわずかにひび割れが生じたが、ひび割れ幅・ひび割れ本数ともに小さかった。最大ひび割れ幅は 0.15mm、最大残留ひび割れ幅は 0.04mm 以下であった。

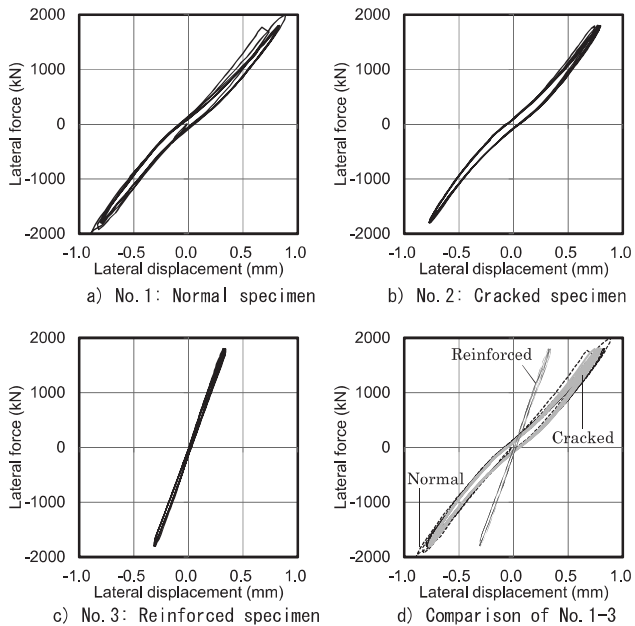


Fig.9 Force-deformation relation after maximum loading test

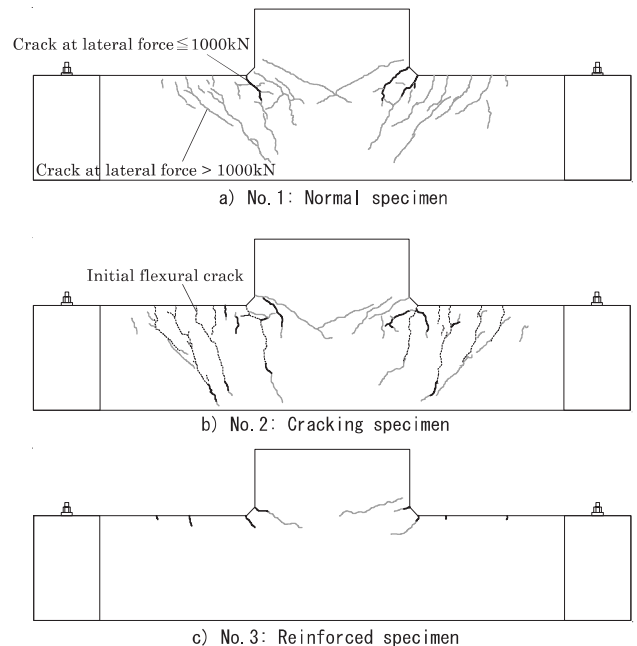


Fig.12 Crack distribution after the test

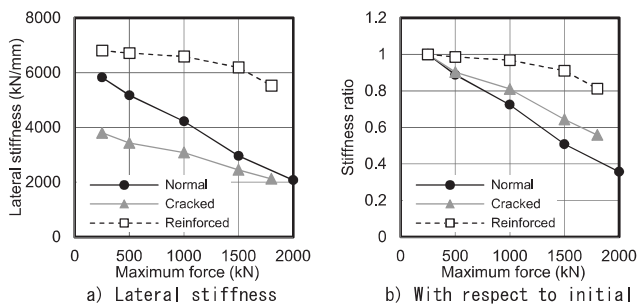


Fig.10 Change of stiffness depending on force

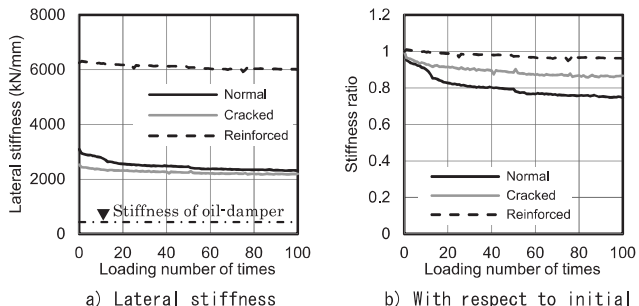


Fig.11 Change of stiffness depending on number of loadings

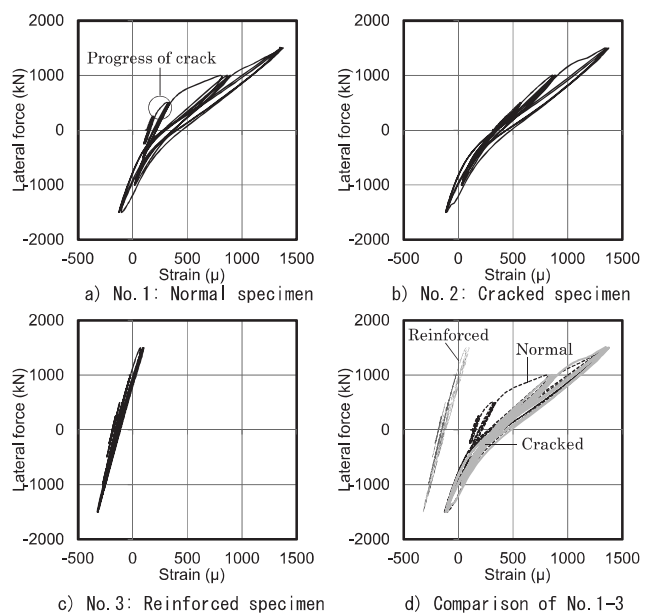


Fig.13 Force-strain relation in diagonal bar

3.3 鉄筋のひずみ

Fig.4 に示す斜め補強筋の水平カーひずみ関係を Fig.13 に、連層壁主筋の水平カーひずみ関係を Fig.14 に示す。引張りひずみを正とし、正加力方向は Fig.6 に依う。

斜め補強筋：標準試験体、ひび割れ試験体ではダンパーの最大荷重である水平力 1500kN で降伏ひずみ（降伏応力度：295MPa、鉄筋のヤング係数：205GPa のとき 1439μ ）程度のひずみが生じているため、より多くの鉄筋を配置することが望ましい。加力用ジャッキの圧着および連層壁へのプレストレス導入（補強試験体）により、水平力が作用しなくともひずみが生じており、標準試験体およびひび割れ試験体では引張りひずみが、補強試験体では圧縮ひずみが生じている。引張力が生じる正方向加力では、コンクリートのひび割れが進展するためひずみは大きく、圧縮力が生じる負方向加力ではひずみは小さい。標準試験体では、ひび割れの進展が顕著となる水平力 250kN を超えたあたりからひずみが急増する (Fig.13a)。水平力が 1000kN を超えると、標準試験体とひび割れ試験体との差はほとんど見られない。

連層壁主筋：斜め補強筋と同様、引張力が生じる正方向加力のひずみが大きくなる。ただし、斜め補強筋と比べひずみのレベルは小さいため、接合部剛性への寄与は相対的に小さいものと考えられる。

4. 有限要素解析

接合部各部の応力・ひずみの確認および斜め補強筋の効果の検証のため、有限要素解析により標準試験体の実験結果を再現する。ただし、繰返し加力の影響は考慮せず、単調載荷とした場合の解析とする。

4.1 モデル化

解析モデルを Fig.15 に示す。各要素を平面要素にモデル化した 2 次元のモデルで、ひび割れによる剛性低下を表現するため、離散ひび割れモデルを導入した¹³⁾。前節の実験結果に基づき、入り隅部のテーパの下側から 45° 方向にひび割れが生じるものと仮定して接合部と連層壁を分離している。 45° の分離面に沿って、コンクリ

ートの圧縮・引張およびせん断と、鉄筋の圧縮および引張による応力伝達を表現する 1 次元ばねを配した。ひび割れ面付近での鉄筋の付着応力分布は、ひび割れ面から内側に鉄筋径 d の 3 倍程度の位置で最大となることから¹⁴⁾、鉄筋の引張を表現するばねはひび割れ面から内側に $3d$ 入った位置で接続していると仮定した。

平面要素は弾性で、コンクリート部分はヤング係数 38.7GPa、ポアソン比 0.2、鉄骨部分はヤング係数 205GPa、ポアソン比 0.3 としている。一次元ばねのうち、コンクリートの圧縮・引張およびせん断剛性と鉄筋の圧縮剛性は、コンクリートのひび割れ応力以下で分離面にずれが生じないように、平面要素に比べて十分に大きな値としている。鉄筋の引張剛性はヤング係数 205GPa として、島モデルを用いてマルチリニア型の骨格曲線を設定した¹⁵⁾。コンクリートの引張を表現するばねにひび割れ応力以上の力が生じる場合、その部分の引張、せん断両方のばねを取り除き、ひび割れ応力以下となるまで収斂計算を行う。

4.2 解析結果

荷重の増加に伴う標準試験体の水平剛性の変化について、実験値との比較を Fig.16 に示す。最大荷重 1000kN まではよい対応を見せているが、それ以降は差が大きくなる。実験では最大荷重 1000kN を超えると連層壁に曲げひび割れが生じているが (Fig.12)、解析では接合部以外のひび割れを考慮していない。そのため、仮定した位置以外にもひび割れが生じるような大きな荷重に対しては剛性を過大に評価してしまう。曲げひび割れが生じるまでの剛性は精度よく評価できていることから、最大荷重 1000kN 以降の剛性の低下は連層壁の曲げひび割れに起因するものと考えられる。

斜め補強筋のひずみ変化の実験値との比較を Fig.17 に示す。ひび

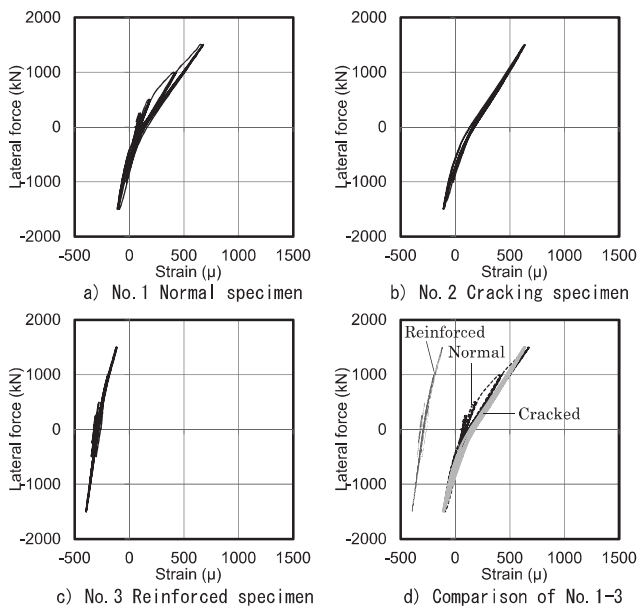


Fig.14 Force-strain relation in main reinforcement bar

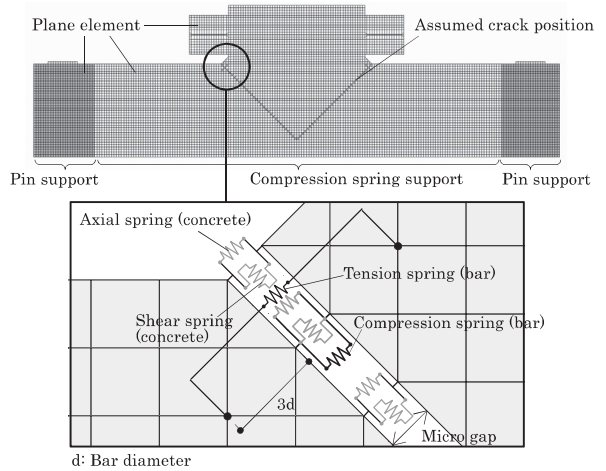


Fig.15 Analysis model

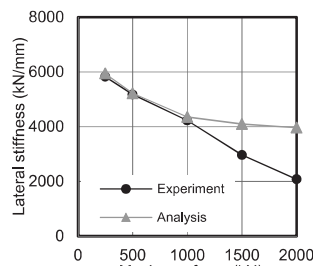


Fig.16 Comparison of lateral stiffness

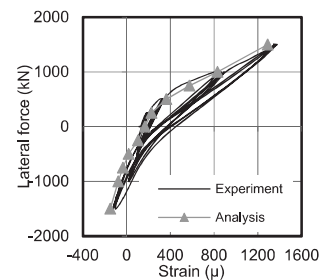


Fig.17 Comparison of strain in reinforcement bar

割れ位置とひずみ計位置にずれがあるため、鉄筋の付着応力の分布に応じた補正を行っている。最大荷重に依らず、精度よく表現できている。

荷重 1000kN での変形図を Fig.18 に示す。ひび割れ仮定位置に変形が集中していることがわかる。また、連層壁部分の曲げ変形も大きく、接合部は剛体回転に近い変形をしていることがわかる。

4.3 斜め補強筋をパラメータとした解析

実験によれば、接合部剛性は、水平荷重の増大による入り隅の斜めひび割れの進展に伴い低下している。そのため、斜めひび割れを制御することで剛性の低下を抑えることが可能である。鉄筋により斜めひび割れを抑制するには、ひずみが大きい斜め補強筋の増量が効果的だと考えられる。また、鉄筋の増量により鉄筋の応力度が低下すれば、鉄筋とコンクリートの付着の劣化が生じにくくなる。これは、繰返しによる剛性の低下にも効果があるものと考えられる。

標準試験体において、斜め補強筋の本数を 2, 4, 8 倍したときの水平剛性の変化および斜め補強筋のひずみの変化を Fig.19 に示す。水平荷重 0kN での値は、ひび割れが生じないとした弾性での剛性を示す。斜め補強筋を増加させることで、初期剛性は変化しないものの、剛性低下を抑えることができる。また、斜め補強筋に生じるひずみも小さくなる。

5. 接合部の設計用モデル

実建物の設計を行う際、各接合部に対して有限要素解析をその都度行うのは現実的ではない。部材断面や配筋のみから自動的に設定できることが望ましい。また、設定したモデルを既存の骨組解析モデルに組み込む必要がある。そこで、接合部を線材に置換した簡易なモデルにより表現する。

5.1 接合部のモデル化

有限要素解析に用いたモデル (Fig.15) のひび割れ仮定位置より上の部分を、コンクリートのばねを除いて取り出す (有限要素モデル, Fig.20a)。これを、接合部の連層壁からの突出部を断面積および断面 2 次モーメントが等しい線材に、連層壁内となる部分を剛として縮約する (縮約モデル 1, Fig.20b)。このとき、鉄筋周辺のコ

ンクリートの変形を考慮するため、1 次元ばねの剛性を鉄筋とコンクリートの直列ばねとして算定した。コンクリートの変形を考慮する範囲は、ばね取り付け位置からモデル中心線または加力位置高さまでとし、有効断面は鉄筋径の 2 倍の幅×接合部厚さとしている。この状態では、線材で構成された通常の構造解析モデルへの適用が難しいため、回転剛性が等価なより簡易なモデルに縮約する (縮約モデル 2, Fig.20c)。剛体部分は自由度が 1 方向しかないため、両モデルの幾何学的関係を用いることで変換可能である。圧縮側鉄筋の剛性を 0 としたときの、前節の解析の諸元を用いた有限要素モデルと縮約モデルの比較を Fig.21 に示す。これから、縮約モデルでも十分な精度で接合部の評価が可能であるといえる。

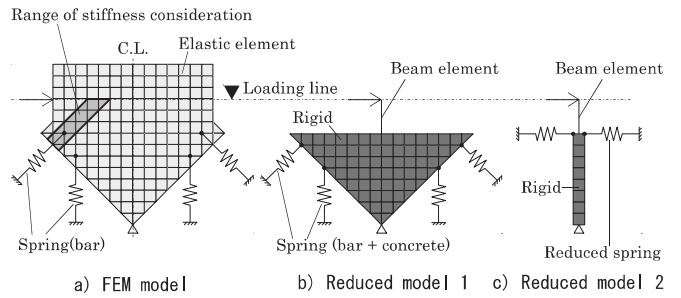


Fig. 20 Various analysis models

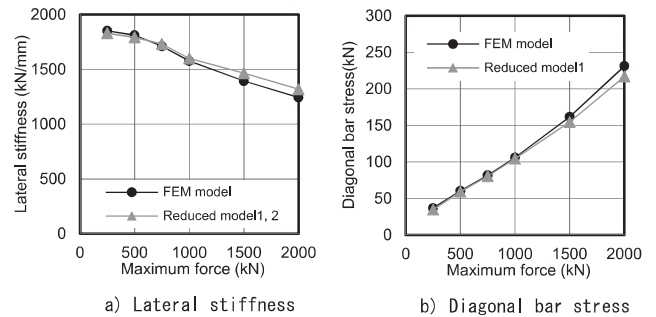


Fig. 21 Comparison of FEM model and Reduced model

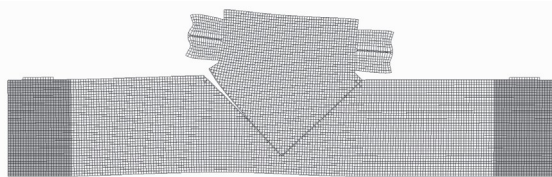


Fig. 18 Deformation diagram (Load:1000kN)

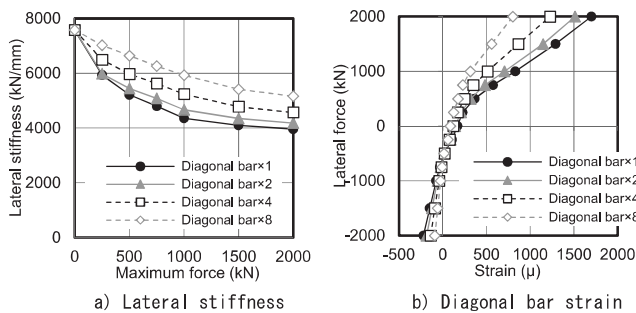


Fig. 19 Property change with respect to diagonal bar

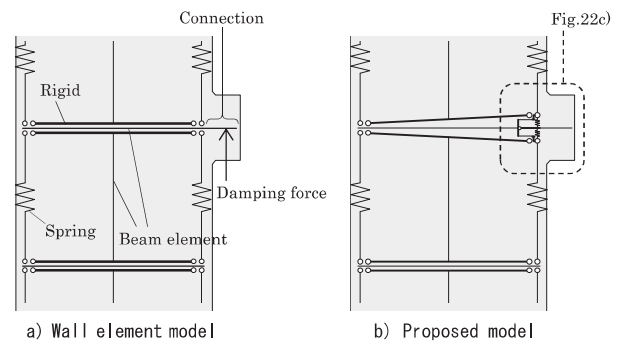


Fig. 22 Modeling of connection

5.2 解析モデルへの導入

構造解析において、連層壁およびダンパー接合部は、通常 Fig.22a のように壁エレメント置換モデルおよび線材を用いてモデル化されることが多い。このモデルに接合部ばねを直列で付加することで、接合部のひび割れによる剛性低下を考慮したモデルを構築する。ただし、接合部の剛性は連層壁の軸力に依存するため、単純に接合部端に非線形ばねを組み込んで適切に評価することができない。そこで Fig.22b に示すようなモデル化を提案する。すなわち、接合部を Fig.20c の縮約モデル 2 に置き換え、ばねを壁エレメント置換モデルの側柱（以下、側柱）に、ピン部分を壁エレメント内の線材（以下、壁内梁）に連結した。このとき、接合部と壁内梁間で曲げモーメントの伝達を行えるように、剛部材と線材を組み合わせた要素（以下、直列要素）を組み込んでいる。また、側柱と直列要素は剛な圧縮ばねで接続している。側柱と接合部のばねを直列に接続することで、軸力の影響を考慮した接合部の剛性が評価できる。連層壁のモデル化の精度は壁エレメント置換モデルに依るが、接合部については有限要素モデルに近い精度での解析が可能となる。なお、繰返し加力による剛性低下を考慮する場合は、想定する繰返し回数に応じて引張鉄筋の剛性を低下させる。

6. 結論

低層部剛性を低下させた上で、連層壁とダンパーを低層部に集約配置する提案超高層制振架構について、RC 連層壁間に設置するダンパーの接合部の性能を明らかにするため、実大試験体を用いた繰返し加力実験および有限要素解析による実験結果の再現を行った。また、接合部の局所的なひび割れを考慮できる設計用モデルの提案を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 標準試験体およびひび割れ試験体において、接合部剛性は最大荷重の増加に伴い低下するが、ダンパーの最大減衰力を超える荷重に対しても一定の剛性を保持できる。また、繰返し回数の増加によっても剛性の低下が見られるが、一定値に収束する。長周期・長時間地震動による多数回の繰返し加力に対して十分な耐久性能を有している。
- 2) 補強試験体において、最大荷重および繰返し回数の増加に伴う剛性の低下は他の試験体に比べ小さい。接合部周辺にプレストレスを導入することで、ひび割れの発生や剛性の低下を抑制可能であり、効果的な補強方法といえる。
- 3) ひび割れ発生位置を予め想定した簡易な有限要素解析により、斜め補強筋のひずみを精度よく再現できる。また、周辺部のひび割れが小さい範囲においては、水平剛性についても精度よく再現できる。接合部の変形は、ひび割れに伴う回転変形と連層壁の曲げ変形による分の寄与が大きい。
- 4) 接合部の変形を考慮した簡易解析モデルの提案を行った。従来の壁エレメント置換モデルに、壁の軸力の影響を考慮できるように回転方向の自由度を有する系を直列に組み込んだモデルである。これにより接合部の局所的なひび割れに起因する回転変形を表現できる。

参考文献

- 1) Tani, T., Maseki, R. and Hibino, H.: Development of High Damping

- Structural System for High-rise RC Building "TASS-Flex FRAME", Taisei technical report, No.49, CD-ROM, 2016.12 (in Japanese)
- 谷翼, 欄木龍大, 日比野浩: RC 高層住宅向け高減衰架構「TASS-Flex FRAME」の開発, 大成建設技術センター報, 第 49 号, CD-ROM, 2016.12
- 2) Tani, T., Maseki, R., Hibino, H. and Takewaki, I.: Durability of Laminated Rubber as Rotary Bearing, (Part1) Development of vibration controlled high-rise RC building with low stiffness at lower stories using shear-wall and oil-dampers, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.733, pp. 395-402, 2017.3 (in Japanese)
- 谷翼, 欄木龍大, 日比野浩, 竹脇出: 回転支承としての積層ゴムの耐久性低層部剛性を低下させた超高層 RC 建物の連層壁制振架構の開発 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 733 号, pp. 395-402, 2017.3
- 3) Matsuura, T., Inai, E. and Fujimoto, T.: Study on Structural Performance of Pillar Type Hysteretic Dampers Using a Simple Connecting Method for RC Buildings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.644, pp. 1821-1829, 2009.10 (in Japanese)
- 松浦恒久, 稲井栄一, 藤本利昭: RC 造建築物に用いる簡易型接合形式による間柱型履歴ダンパーの構造性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 644 号, pp. 1821-1829, 2009.10
- 4) Shimazaki, K., Tozawa, M., Miyazaki, Y. and Hama, T.: Experimental Study on the Wall-Type Viscoelastic Damper Bases Consolidated with RC Stub, The Strength of Joints with Headed Stubs, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.691, pp. 1641-1648, 2013.9 (in Japanese)
- 島崎和司, 戸澤正美, 宮崎裕一, 濱智貴: 粘弾性壁型制振ダンパーの RC 根巻型構造取り付け部の検討 スタッド接合形式の耐力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 691 号, pp. 1641-1648, 2013.9
- 5) Maida, Y., Kishiki, S., 6 other: Experimental Evaluation of Structural Behavior of RC Frame Subassemblies with BRB Connections, (Part1) Applications of buckling restrained braces in reinforced concrete frames, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.681, pp. 1737-1746, 2012.11 (in Japanese)
- 毎田悠承, 吉敷祥一, ほか 6 名: 座屈拘束筋違を取り付けるための接合部を有する RC 部分架構の実験 鉄筋コンクリート骨組への座屈拘束筋違の活用に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 681 号, pp. 1737-1746, 2012.11
- 6) Kumagai, H., Shimazaki, K. and Hayashi, S.: Experimental Study on Coupling Beams with Steel Dampers in Mid-Span, (Part1) Coupling beam dampers with low yield point steel, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.638, pp. 755-763, 2009.4 (in Japanese)
- 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄: 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁に関する実験的研究 低降伏点鋼を用いた境界梁ダンパーに関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 638 号, pp. 755-763, 2009.4
- 7) Maida, Y., Kinoshita, K., 4 other: Shear Strength Evaluation of Post-tensioned Connection between Ductile Cast Iron Plate with Shear-key and Concrete, (Part1) Applications of dampers in concrete composite structures by post-tensioned connection utilizing ductile cast iron plate with shear-key, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.739, pp. 1425-1435, 2017.9 (in Japanese)
- 毎田悠承, 木下澄香, ほか 4 名: 突起付き鋳鉄製プレートとコンクリートの圧着接合面におけるせん断耐力の評価 突起付き鋳鉄製プレート圧着接合法を用いたコンクリート系構造物へのダンパー適用に関する研究 突起付き鋳鉄製プレート圧着接合法を用いたコンクリート系構造物へのダンパー適用に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 739 号, pp. 1425-1435, 2017.9
- 8) Saito, J., Iwata, N., 6 other: Experimental Study on Structural Performance of Beam-Column Joints in High-Rise RC Building under Long-Period Earthquake Ground Motion, Part1 to 3, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, StructureIV, pp. 187-192, 2015.9 (in Japanese)
- 齋藤純毅, 岩田希, ほか 6 名: 長周期地震動を受ける超高層 RC 造建物の柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究 その 1~その 3, 日本建

- 築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 187-192, 2015.9
- 9) Suzuki, Y., Hyodo, Y., 3 other: Behavior of Reinforced Concrete Buildings Subjected to Many Cyclic Loadings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.646, pp. 2317-2325, 2009.12 (in Japanese)
鈴木芳隆, 兵頭陽, ほか3名: 多数回繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート造建物の挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第646号, pp. 2317-2325, 2009.12
- 10) Nagai, S., Maruta, M., Takaine, Y. and Suzuki, N.: Bond and Slip out Behavior of Steel Embedded in Concrete Under a Large Number of Cyclic Loadings, Part1 to 2, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, StructureIV, pp. 63-66, 2011.8 (in Japanese)
永井寛, 丸田誠, 高稲宜和, 鈴木紀雄: 多数回繰返し引張力を受ける鉄筋のコンクリートからの付着・抜け出し性状 その1~その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 63-66, 2011.8
- 11) Tani, T., Nakajima, T. and Maseki, R.: Cyclic Loading Test of RC Multi Story Shear Wall – Damper Connection, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure II, pp. 729-730, 2017.8 (in Japanese)
谷翼, 中島徹, 欄木龍大: 連層壁とダンパーとの接合部の繰返し加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 729-730, 2017.8
- 12) AIJ: Guidelines for Structural Design of Precast Concrete Connection Emulating Cast-in-place Reinforced Concrete, 2002 (in Japanese)
日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説, 2002
- 13) Hillerborg, A.: The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy G_F of Concrete, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp. 25-30, 1985
- 14) Takahashi, M., Shima, H.: Drop of Bond Stress between Reinforcing Bar and Concrete near Crack Surface, Research Report of the Shikoku Branch of the Architectural Institute of Japan, pp. 5-6, 2009.5 (in Japanese)
高橋正典, 島弘: 鉄筋とコンクリートの付着 ひび割れ近傍での低下, 日本建築学会四国支部研究報告集, pp. 5-6, 2009.5
- 15) Shima, H., Iie-Liung Chou and Okamura, H.: Bond-Slip-Strain Relationship of Deformed Bars Embedded in Massive Concrete, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.378, pp. 165-174, 1987.2 (in Japanese)
島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 日本土木学会論文集, 第378号, pp. 165-174, 1987.2

CYCLIC LOADING TEST OF RC MULTI-STORY SHEAR-WALL – DAMPER CONNECTION

Development of vibration controlled high-rise RC building
with low stiffness at lower stories using shear-wall and oil-dampers Part 2

Tsubasa TANI^{*1}, *Ryota MASEKI*^{*2} and *Izuru TAKEWAKI*^{*3}

^{*1} Technology Center, Taisei Corp., M.Eng.
(Grad. Student, Kyoto University)

^{*2} Technology Center, Taisei Corp., Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

The authors have developed a new vibration-controlled system effective for high-rise RC buildings against long period, long duration ground motions which are highly concerned recently. The system has a couple of shear-walls with pins at the bottoms to utilize oil dampers effectively by amplifying its deformation. To demonstrate the effectiveness of the system, it is important to carefully design the damper connections between different materials (steel and concrete). Since the proposed system is complex, experiments are required to evaluate its properties. The objective of this study is to clarify the mechanical property of the connection between a couple of shear-walls and dampers and to construct a simplified analysis model for design.

First, cyclic loading experiments using three types of T-shape specimens (normal, cracked and reinforced) were conducted for evaluating their stiffness and durability. As the magnitude of loaded force or the number of loadings becomes larger, the stiffness of the connection between a couple of shear-walls and dampers becomes lower due to extension of cracks at the internal corner. However, it keeps high stiffness compared with that of dampers and the residual crack width is small. Under the maximum damper force, the strain of reinforcement bar is lower than the yield strain.

Secondly, finite element analysis was conducted to simulate the actual behavior. The analysis model is 2-dimensional and elastic plane elements are used to simplify the analysis. In order to take into account the non-linearity caused by cracks, the model is divided into two parts by the presumed crack line and they are connected by 1-dimensional non-linear springs representing the properties of concrete and reinforcement bars. Stiffness decrease is mainly caused by the crack at the internal corner, and it converges due to balance of loaded force and reinforcement bar stress. Since diagonal bars are highly related to the connection stiffness, the increase of diagonal bars improves it effectively.

Finally, a simplified analysis model of damper connection was proposed to enhance the usability in the usual structural design. To consider the effect of the internal corner crack in more detail, an additional spring is introduced in the form of series type through rigid elements and beam elements. It is easy to adopt because all elements are only composed by beam elements.

It is concluded that the connection between a couple of shear-walls and dampers has sufficient stiffness and durability against long period, long duration ground motions.

(2017年10月5日原稿受理, 2018年2月13日採用決定)