

論文 軟鋼製せん断パネルを取り付けた高強度鉄筋コンクリート造骨組の耐震性能に関する実験的研究

孫 玉平^{*1}・福原武史^{*2}

要旨：本研究は、地震による損傷を制御可能な鉄筋コンクリート造骨組の開発研究の一環として、地震エネルギーを吸収する装置として通常の軟鋼製せん断パネルを組み入れた、高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造骨組の繰り返し履歴性状について実験的検討を行った。その結果、鋼製せん断パネルを組み入れることは、高強度材料を用いた骨組の原点指向型履歴性状を崩すことなく、骨組のエネルギー吸収能力の向上に貢献できることと、骨組のエネルギー吸収能の上昇分は組み入れたパネルのそれとほぼ同じであることなどを明らかにした。

キーワード：高強度材料，鉄筋コンクリート造骨組，軟鋼製せん断パネル，エネルギー吸収能

1. はじめに

近年、都市再開発が活発に行われているなか、高強度コンクリートと高強度鉄筋を用いた高層鉄筋コンクリート造建物の建設例が増えつつある。高強度材料の使用は、構造部材の断面の寸法縮小を図れることによる建物重量の減少や構造体の耐久性の向上などのような利点を有する。また、高強度材料の弾性域が長いことと高強度鉄筋が相対的にすべり易いことから、高強度材料を活用した骨組構造は構成部材、特に柱に適切な拘束工法を施せば、極めて安定した履歴挙動を示すと同時に、普通強度材料を用いた骨組構造と比べて、同じ変位振幅から除荷した場合の残留変位が小さく抑えられることが著者らの既往の研究¹⁾によって明らかになっている。

高強度材料を用いたコンクリート骨組構造の履歴性状に見られる、靱性に富んだ履歴スケルトンと小さな残留変形というような特徴は非常に重要な意味を持つ。写真—1には、著者らがこれまでに行われた高強度 RC 骨組構造の実験後の破壊状況例を示す。写真—1に示す2体の試験体はいずれも層間変位角が 0.04rad まで荷重されており、柱・梁に用いた主筋の降伏点応力のみが異なり、他の試験条件がすべて同じものである。しかしながら、写真—1に示す破壊状況からは、高強度鉄筋を用いることによって、骨組構造の残留変形が極めて小さく、梁に生じるダメージが大きく低減できることが分かる。

一方、高強度鉄筋と高強度コンクリートを用いた骨組構造は、履歴性状には鉄筋のすべり易さに起因するピンチング現象がよく見られる。即ち、地震力によるダメージが小さいが、材料の強さに見合うだけのエネルギー吸収能が期待できない一面を有する。そのため、一定規模の地震動によるエネルギーを吸収するには、高強度材料を用いた骨組構造はより大きく変形させられてしまう恐



高強度鉄筋使用



普通強度鉄筋使用

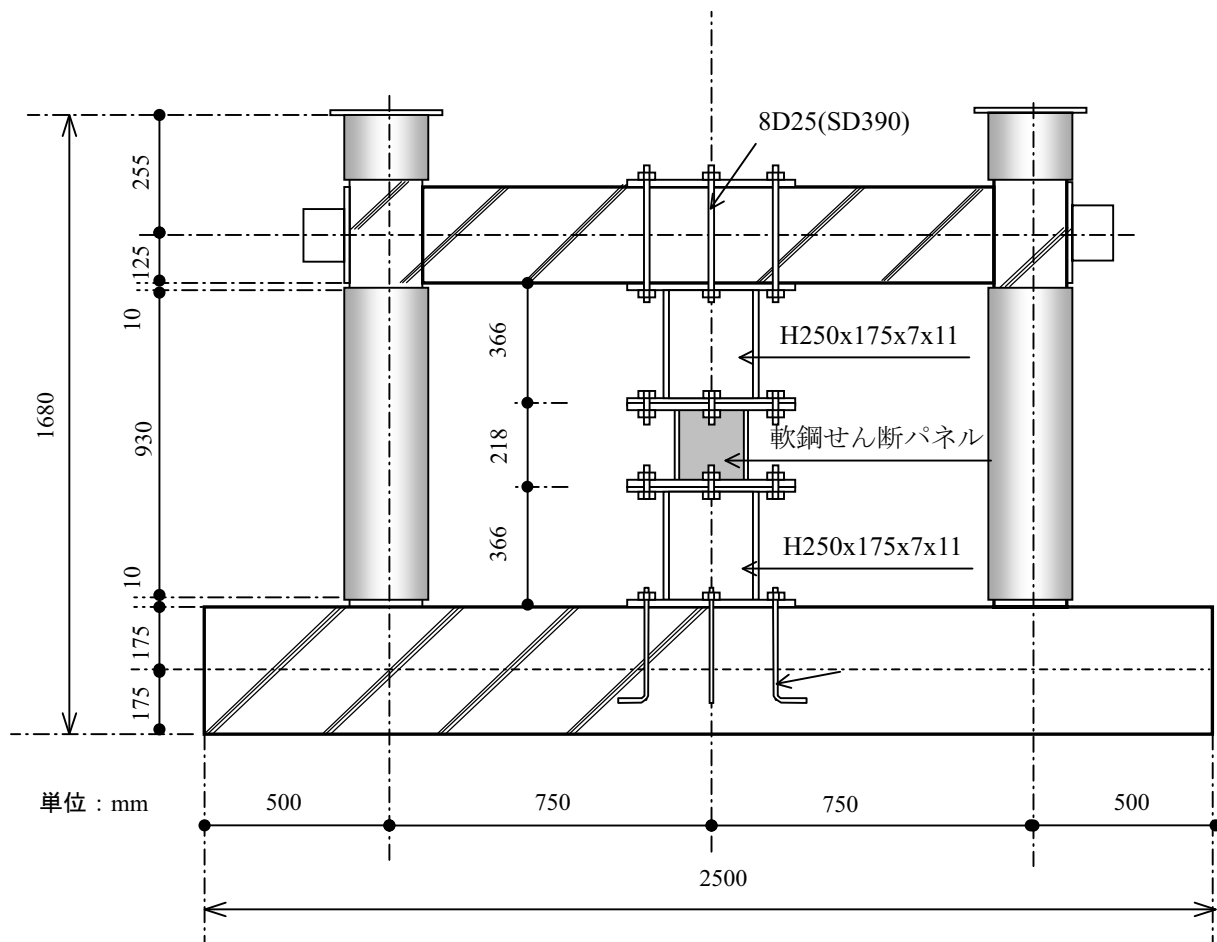
写真—1 高強度 RC 造骨組の破壊状況例¹⁾

れがある。このような状況を改善するために、高強度材料を用いた RC 造骨組にエネルギーを吸収するための補助的装置を取り付ける必要がある。

RC 造骨組のエネルギー吸収能力を向上させるために、これまでに低降伏点鋼で製作したせん断パネルを取り付ける方法が提案されている²⁾。従来の低降伏点鋼せん断パネルを取り付ける方法は地震時周辺主要構造躯体を弾性域に保持させたまま、低降伏点鋼せん断パネルの

*1 神戸大学 大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

*2 竹中工務店 技術研究所 研究員 博士 (工学) (正会員)



図—1 骨組試験体の寸法詳細（せん断パネルつき）

繰り返しせん断履歴により地震エネルギーを吸収させようというコンセプトの下で提案されている。しかしながら、主要躯体に弾性挙動しか許容しないことは、躯体の持つ潜在能力を無駄にする恐れがあると同時に、大量のエネルギー吸収装置を必要とすることで建物の機能に支障をきたしかねないことが考えられ、必ずしも合理的とはいえない。

そこで、本研究は高強度材料を用いた主要躯体の“原点指向型”履歴特性を有することに着目して、高強度材料を用いた RC 骨組に、高価な低降伏点鋼材の変わりに普通強度を有する軟鋼板で作成したせん断パネルを取り付けることによって、主要躯体の能力を生かしつつ、低残留変形・高エネルギー吸収能を併せ持つ高性能 RC 造骨組の実現が可能かどうかを実験的に調べた。

本研究で目指す高性能 RC 造骨組は、既往の低降伏点鋼せん断パネルを活用した骨組とは以下の諸点において異なる。

- 1) 軟鋼板せん断パネルはあくまでも補助的なエネルギー吸収装置で、周辺躯体の“原点指向型”履歴特性を十分に生かせるためのエネルギー吸収体にすぎない。
- 2) 骨組の残留変形を小さく抑えるために、補助的なエネルギー吸収装置によるエネルギー吸収量を周辺躯体のその一定割合以下に制限する。その

割合は鋼製せん断パネルの耐力と周辺躯体の耐力の比によって制御させるので、骨組の耐震性能設計は現行設計法を準用することが可能となる。

- 3) 鋼製エネルギー吸収装置は補助的なものなので、その取り付け方法もより簡単でかつ地震後に取り外し・取替えが容易に行われる。

2. 実験計画

2.1 骨組試験体概要

骨組試験体は、高層建築の最下階を想定した約 1/3 スケールに相当する 1 層 1 スパンの「全体崩壊型」骨組構造である。計 4 体の試験体のうち、2 体はプロトタイプ of オープンフレームで、他の 2 体は図—1 に示すように、オープンフレームのスパン中央に軟鋼を用いて実験室で製作したせん断パネルを取り付けたものである。

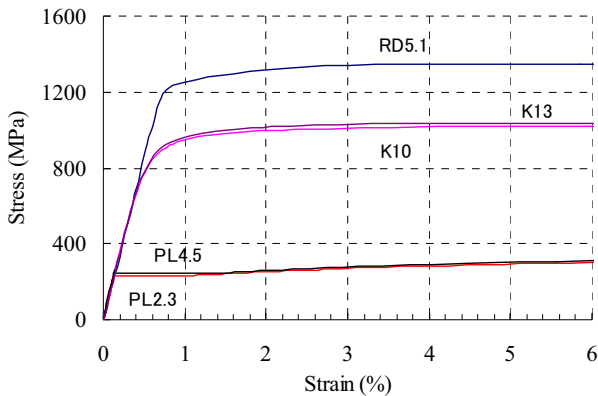
試験体の共通実験定数は以下に述べる。骨組の柱は内幅 200mm の角形鋼管により拘束されたもので、内のり高さが 950mm となっている。柱には 12 本の高強度異形鉄筋 K10 (KW785) を断面周辺に均等配置し、主筋比が 2.13% である。梁は高強度せん断補強筋 RB5.1 (KW785) により拘束されており、内のりスパンが 1300mm となっている。梁に配置された RD5.1 せん断補強筋は間隔が 50mm で帯筋比が 0.45% となっている。梁の引張鉄筋として 3 本の高強度異形鉄筋 K13 (KW785) を配置してお

表—1 試験体一覧および主な実験結果

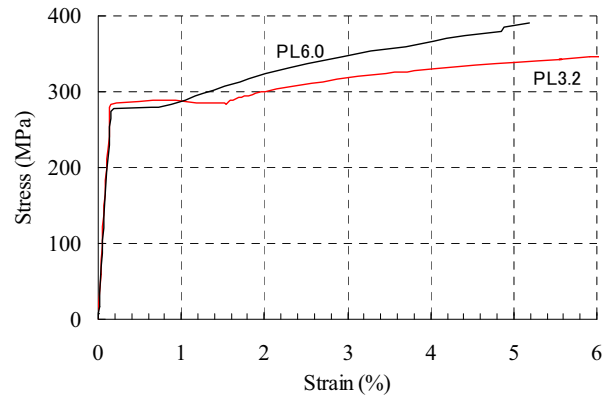
試験体名	FC (N/mm ²)	Fsy (N/mm ²)	Fhy (N/mm ²)	Fty (N/mm ²)	鋼管板厚 (mm)	軸力比	Damper	Vexp (kN)	Rexp (0.01rad)
FT23N33	88.8	997	1170	279	2.3	0.33	なし	414	2.25
FT45N33	89.3			286	4.5			463	2.00
FDT23N33	88.8			279	2.3		あり	550	1.50
FDT45N33	89.3			286	4.5			589	1.90

注：FC：コンクリートシリンダー強度，Fsy (Fhy, Fty)：主筋 (帯筋、鋼板) の降伏点応力

Vexp：骨組水平耐力の実験結果 (正負側の平均)，Rexp：Vexp 時の層間変位角



図—2 鋼材の応力—ひずみ関係曲線 (骨組用)



図—3 鋼材の応力—ひずみ関係曲線 (パネル)

り、引張鉄筋比は約 0.79% である。また、すべての試験体は設計強度が 80N/mm² の高強度コンクリートを用いて製作した。実験時のコンクリートのシリンダー強度は試験体一覧と併せて表—1 に示す。

本実験における実験変数は骨組の柱に用いる横拘束鋼管の板厚と鋼製せん断パネルの有無の二つを取った。柱の拘束材として鋼管を用いたのは、大変形域におけるかぶりコンクリートの剥離に起因する骨組の耐力低下、柱の主筋の座屈、コアコンクリートの破壊などを防ぎ、骨組に十分な変形能力を持たせるためである。使用した鋼管は、所要板厚を有するものは市販されていないことから、SS400 級の目標板厚を有する平板をチャンネル型に折り曲げてから溶接してビルトアップした。ビルトアップした鋼管の板厚が 2.3mm と 4.5mm の二種類である。また、角形鋼管の拘束効率を向上させるために、柱両端から 1.25D (D は柱の断面せいで 200mm) の範囲に渡って、鋼管内部に十字型スチフナーを取り付けていた。なお、鋼管は柱のコンクリートの横膨らみを拘束する働きのみを果たすことを確保するために、鋼管の端部と柱の上下端の間に 10mm 程度のクリアランスを設けた (図—1 を参照)。

鋼製せん断パネルの詳細と力学性能については次節で詳しく述べる。図—1 より分かるように、せん断パネルユニットは骨組の柱に予め設けた穴を通した 8 本のボルトによって周辺骨組造に取り付けられる。

試験に用いた鋼材の力学的性質と代表的な引張応力—ひずみ曲線を図—2 に示す。図より明らかのように、骨組の柱と梁の主筋および帯筋に用いた鉄筋はいずれも明瞭な降伏棚を示さないものである。

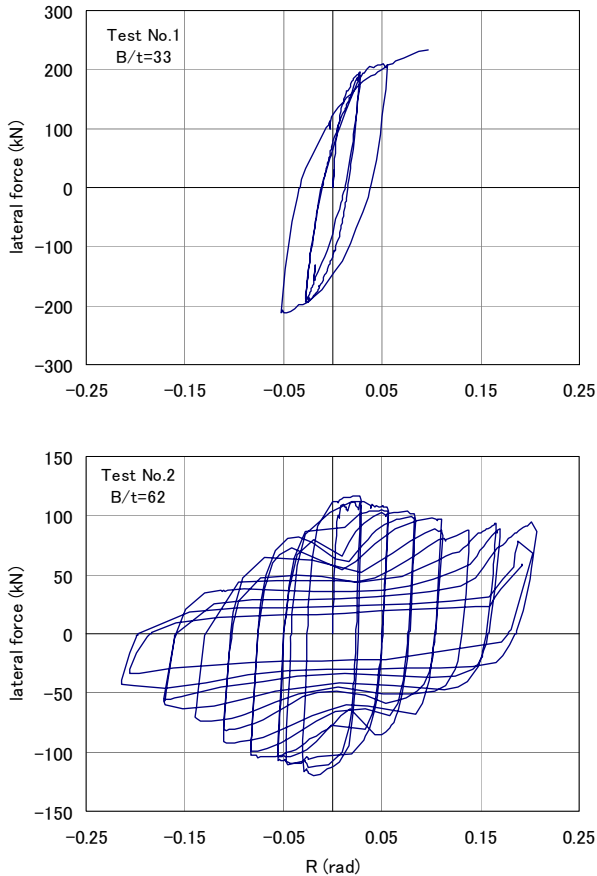
2.2 加力と測定方法

骨組に対する一定軸力下における繰り返し載荷実験は文献 1 で述べた加力装置を用いて行う。一定軸力は万能試験機により加えてから、繰り返し水平力は油圧ジャッキによって加える。骨組の層間変位角や柱の鉛直方向縮むなどの測定も文献 1 で述べた方法で行う。また、骨組柱の拘束材としての鋼管表面、主筋、および梁の帯筋などには数十枚のひずみゲージを貼付して、それぞれのひずみ状況を計測する。鋼製せん断パネルを取り付けた骨組の場合は、上述した諸測定以外に、せん断パネルの相対水平変位角を計測するために、さらに 2 個の変位計を用いた。

3. 軟鋼せん断パネルの力学性状

3.1 試験体と実験概要

本研究が目指す高性能骨組の開発には、後付けせん断パネルの力学性状を明らかにすることが必要不可欠である。軟鋼せん断パネルのエネルギー吸収性能や耐力など重要な構造指標に最も影響を及ぼす因子として、せん断パネル自身の幅厚比が挙げられる。パネルの板厚はどの



図—4 セン断パネルの履歴性状

程度にすれば、軟鋼の粘りを発揮させ、パネルがせん断降伏しながら十分な履歴エネルギーを吸収できることかを明確にすれば、パネルの設計が容易になる。

本節では、パネルの幅厚比とパネルの履歴性状との関係をパイロット試験体について繰り返し載荷実験を行うことによって調べた。

実際の骨組の使用を想定して、せん断パネルを一辺の長さが 200mm に固定し、厚さ 3.2mm と 6.0mm の SS400 級の軟鋼板を用いてパネル 2 体を製作した。せん断パネルのフランジには厚さ 6.0mm 幅 60mm の鉄板を用いた。また、厚さ 3.2mm と 6.0mm パネルの上下端にはそれぞれ 12mm と 9mm 厚のエンドプレートが溶接されており、それらのエンドプレートを通じて H 型鋼に連結させた。なお、大変形時パネルがせん断破壊する前に、フランジから過大な引張力によるエンドプレートの面外曲げを防ぐために、厚さが 3.2mm のせん断パネル試験体の上下の応力を伝達するための H 型鋼のフランジの外側に、スチフナーとして $\mathbf{E}267 \times 74 \times 9$ 板で補強を施した。

図—3 には、せん断パネルの作成に用いた鉄板の引張試験結果を示す。なお、図中に記していない 9mm と 12mm のエンドプレートはいずれも SS400 級の板を用いた。

せん断パネルの履歴実験は建研型加力装置を用いて、

軸力を加えない状態で繰り返し水平力を加えて行った。

3.2 実験結果と考察

図—4 には、せん断パネルの履歴性状に関する実験結果を示す。図—4 より分かるように、 $B/t=33$ のせん断パネルはせん断部材角が約 0.10rad (骨組の層間変位角が約 0.025rad) へ進む途中で、パネル上下の H 型鋼固定部分のエンドプレートは H 型鋼のフランジから過大な引張力を受けて、プレートの面外へ湾曲してしまった。一方、パネル自身には、せん断変形座屈の波形が認められず、載荷もこの時点で終了した。図—4 に示す実験結果からは、 $B/t=33$ の厚みの軟鋼でビルトアップしたせん断パネルは、骨組の層間変位角が 0.02rad となるまで履歴ループを描ききれず、本研究で目指すエネルギー吸収装置としては適していないと判断した。

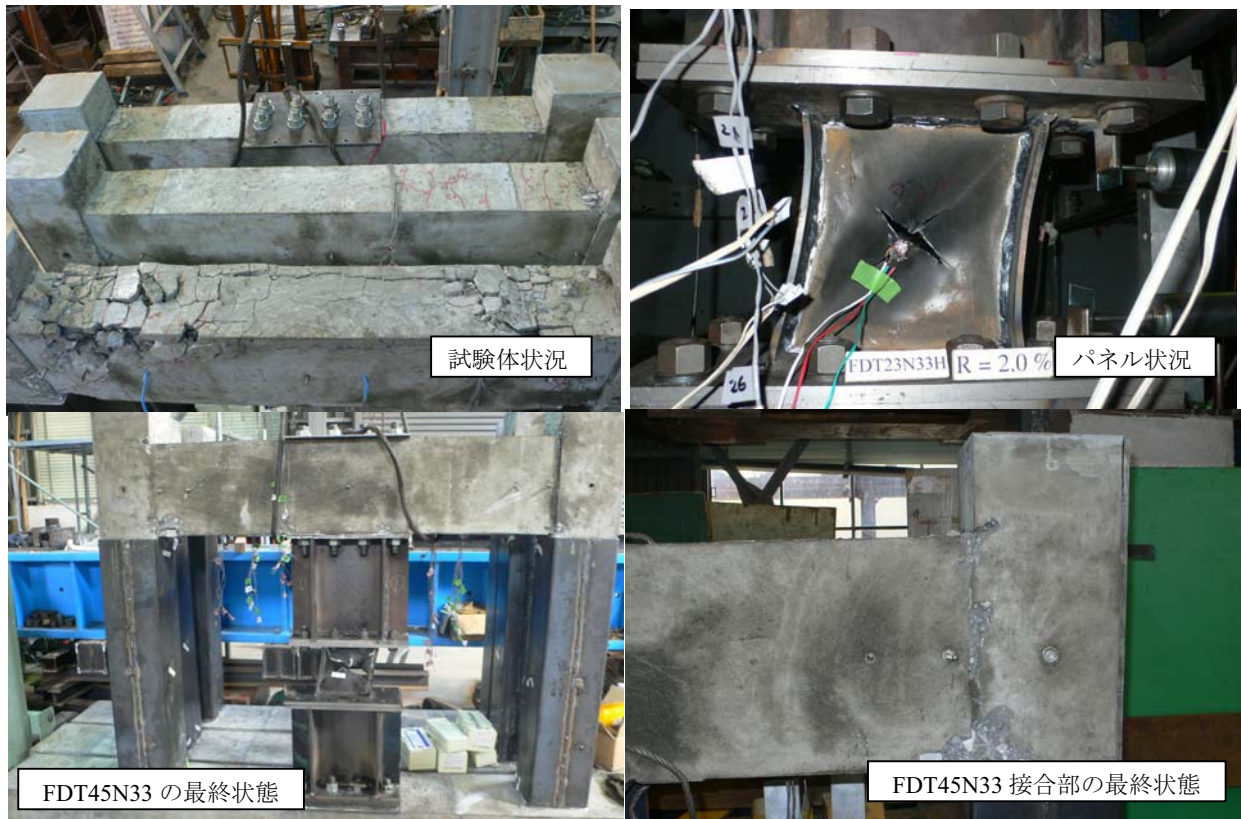
それに対して、 $B/t=62$ のせん断パネルはせん断部材角が約 0.05rad (骨組の層間変位角が約 0.0125rad) となる時点でパネルにせん断座屈モードが生じたことから、履歴ループにおいては耐力低下が観察され始めた。しかしながら、せん断部材角が約 0.15rad (骨組の層間変位角が約 0.0375rad) となるまで、耐力低下が徐々に進行していたにもかかわらず、安定した紡錘形状の履歴ループを示し、エネルギー吸収能力を保持していた。履歴ループのせん断変形角ゼロ近傍に見られた曲線の急変 (耐力の急な低下) 現象は、パネルのせん断座屈モードの変化に起因したものです。また、履歴曲線はせん断部材角が約 0.10rad となる時点から、第 1 象限と第 3 象限にある部分が点対称でなくなり始めた。それはせん断パネルの座屈モードが押し引き方向にて異なり、座屈後の保有耐力に違いをもたらしたためと思われる。

以上のことから、本構造の吸震装置としての普通強度軟鋼せん断パネルは幅厚比 60 程度のものにすれば、周辺骨組に大きな負担を加えずかつ相応なエネルギーを吸収する役割を果たせると思われる。この考察に基づき、パイロット試験体として的高性能 RC 骨組に取り付けるせん断パネルの幅厚比 B/t を 60 程度のものにする事とした次第である。

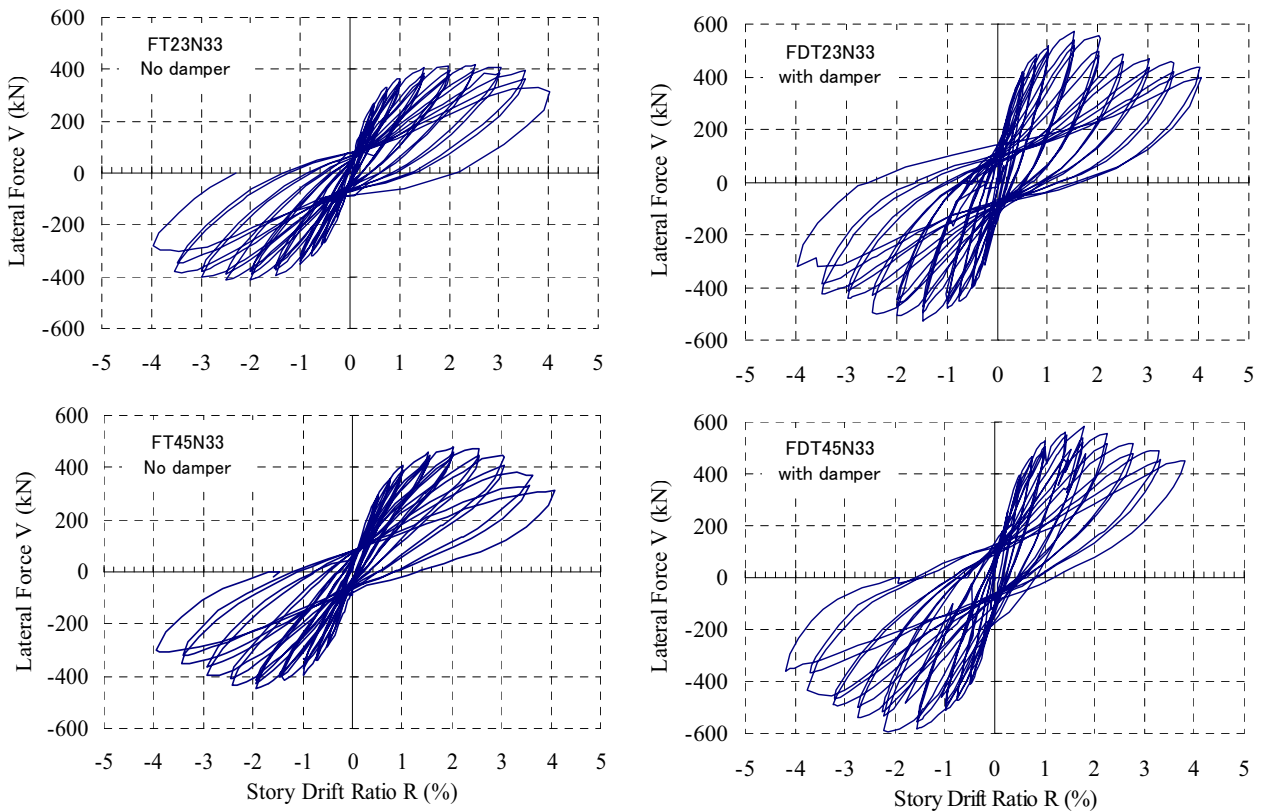
4. 骨組の実験結果と考察

写真—2 と図—5 にはそれぞれ実験終了後の骨組試験体の破壊状況例と繰り返し水平力 V と層間変位角 R 関係の実験結果を示す。

せん断パネルを取り付けていない二つのオープンフレーム試験体 FT23N33 と FT45N33 は、骨組の層間変位角が 0.03rad となるまでいずれも安定した履歴性状を示した。試験体 FT23N33 は層間変位角が 0.04rad の大変位域に入ってから耐力低下が見られたが、それは実験後に



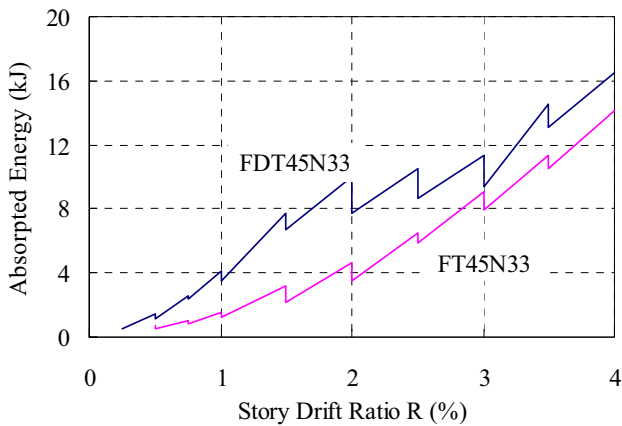
写真—2 骨組試験体の破壊状況例



図—5 骨組試験体の繰り返し水平力と層間変位角関係の実験結果

観察されたように、梁端部の上端引張鉄筋の溶接定着部が引張鉄筋の過大な引張力により破断し、鉄筋がすべり出したためである。一方、試験体 FT45N33 では、層間変

位角が 0.03rad の時点から緩やかな耐力低下が生じ始めた。それは、当該試験体において、その変形レベルに達したときから梁上部のコンクリートの上端鉄筋に沿った



図—6 荷重サイクルごとのエネルギー吸収能の比較

部分に、明らかにコンクリートのブリジング現象に起因する割裂ひび割れが顕著に生じ始め（写真—2を参照）、変位角の増大とともに割裂ひび割れが広がっていたためである。しかしながら、二つの骨組試験体はいずれも高強度材料を用いたことの利点を十分に発揮しており、層間変位角が骨組の安全限界変位に相当する 0.02rad までからの除荷後の残留変位角は 0.005rad 以下に収まった。なお、試験体 FT45N33 の梁に見られたコンクリートのブリジング現象は高流動のコンクリートの打設時にバイブレータをかけすぎたためである。

補助的エネルギー吸収装置であるせん断パネルを取り付けていた二つの試験体 FDT23N33 と FDT45N33 は、いずれもせん断パネルの吸震効果を十分に反映でき、層間変位角 R が 0.04rad となるまで極めて安定な履歴性状を示した。せん断パネルを取り付けることに伴う残留変位角の増大も小さく、残留変位角はせん断パネルなしの試験体とほぼ同レベルに収まった。また、せん断パネルを取り付けることによって、初期剛性とエネルギー吸収能ともに大きく上昇した。試験体 FT45N33 と FDT45N33 を比較することにより、両者の初期剛性の比が約 2.0 倍、変位角 0.02rad まで各サイクルの吸収エネルギー（図—6を参照）比も 2.0 倍前後となっていることが分かった。更に、図—5に見られた、層間変位角が 0.02rad となる時点からせん断パネル付きの試験体の水平抵抗能力が低下し始める現象は、写真—2 右上の写真に示すようにその変位レベルからはせん断パネルのせん断座屈の進行に伴い、パネルは斜め方向に破断し始めたためである。

以上の考察は、せん断パネルの耐力を適切に設計すれば、せん断パネルのエネルギー吸収効果を生かしつつ残留変形の小さい高性能 R C 造骨組の実現が可能であることを示唆している。

5. 結論および今後の課題

高い初期剛性、高い変形能力、安定した履歴ループ、

および小さい残留変形を併せ持つ高性能鉄筋コンクリート造骨組を開発するために、普通強度軟鋼板で製作したせん断パネルを補助的エネルギー吸収装置として用いた場合、高強度材料を用いた R C 造骨組の履歴性状に及ぼす影響について実験的に調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) $B/t=60$ 程度の軟鋼板で製作したせん断パネルは、大変位に入るとせん断座屈に起因する耐力低下が生じるものの、せん断変形角 0.15rad まで安定したエネルギーを吸収することができる。
- 2) 幅厚比 60 程度のせん断パネルを取り付ければ、高強度鉄筋コンクリート骨組の耐震挙動に顕著な向上が期待できる。終局耐力、初期剛性およびエネルギー吸収能力などのすべての面においてせん断パネルによる性能向上効果が確認された。
- 3) 適切にせん断パネルの耐力を設計すれば、高強度材料を用いた骨組の残留変形にパネルの導入によるサイドエフェクトを最小限に留めることができる。本パイロット研究の範囲内では、パネルの水平耐力を周辺フレームのその約 1/4~1/3 程度に設定すればよいと思われる。

今後の研究課題としては、1)せん断パネルの水平耐力および累積エネルギー吸収能とパネルの幅厚比の相関関係を定式化すること、2)せん断パネルと周辺骨組の耐力比が残留層間変位角に及ぼす影響を定量的に評価すること、および3)せん断パネルの累積エネルギー能力を考慮に入れられる高性能 R C 造骨組の耐震設計法を確立することなどが挙げられる。

謝辞

本研究は、九州大学 21 世紀 COE プログラム「循環型住空間システムの構築」平成 17 年度萌芽研究助成を受けて行われました。また、本試験に使われている高強度鉄筋と鉄筋の加工はすべて J F E テクノワイヤ（株）からご提供をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Yuping Sun and Takeshi Fukuhara, Development of High Seismic Performance Concrete Frames, *the ACI Special Publication*, No. 228, June 2005, Vol. 1, pp. 615-632, American Concrete Institute
- 2) 例えば、和泉信之、他：低降伏点鋼パネルを組み込んだ R C 柱の耐震性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 22, No. 3, June 2000, pp. 1099-1104