

# (S2) 建築におけるハイブリッド構造システムの開発

崎野健治<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 九州大学大学院教授 人間環境学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
E-mail:sakino@arch.kyushu-u.ac.jp

本論文はフレームと耐震壁からなるハイブリッド構造について解説したものである。特に、外周架構をフレーム構造とし、内部コア構造を耐震壁構造としたダブルチューブ構造に重点をおいて解説した。ダブルチューブ構造においては、外周架構や内部コア耐震壁を従来型の RC 構造ではなく鋼材とコンクリートよりなる合成構造とすることにより、合理的な構造システムとすることが可能となる。そこで、履歴ダンパーを内臓した合成構造制振壁、セルフセンタリング機能を有する外周架構構造に関する実験的研究およびそれらよりなる建物の動的応答性状に関する解析的研究について述べた。

**Key Words:** *Hybrid Structure, Core System, Peripheral Frame System, Hysteretic Damper, Self Centering System, Dynamic Response Analysis*

## 1. 序論

代表的な建築構造材料としては、鋼材、コンクリート、木材がある。これらの材料に共通していることは、自然界に大量に存在し、基本的にはリサイクルが可能であることなどが上げられる。これらに代る新素材の研究は古くから行なわれており、グラス・ファイバー、カーボン・ファイバーなどの活用が期待されるが、現在の所はあくまでも補助的な材料である。

コンクリートは、引張に弱い、圧縮に対する変形能力が乏しい、重量/強度比が大きい、収縮する、クリープ歪が大きいなど、構造的な観点からは欠点も多い材料である。そのため、いずれは新素材に取って代わられるというような議論が戦後まもなくの頃から言われていたと聞いている。しかし、現状を見る限りコンクリートは代表的な土木・建築構造材料であることは間違いない。これも、コンクリート工学という学問分野の進歩に負うところが大きいと思われる。鋼、木材を用いる構造の場合、純鉄骨構造、木構造と呼ばれる、いわゆるサラブレッド構造が成立しうる。しかしながら、コンクリートを用いる構造は、コンクリートの引張強度不足、圧縮に対する変形能力不足を補うため各種材料で補強する必要がある。したがって、特殊な構造を除きサラブレッド構造は成立しない。コンクリートを用いる構造は、“Reinforced Concrete Structure”と呼ばれるように、従来は、主筋、横補強筋と呼ばれる鉄筋で補強されることが多かったため、「鉄筋コンクリート構造」と訳されている。日本の場合は鉄筋以外にも組立鉄骨材や型钢などの鋼材により補強された部材よりなる構造があり、このような構造は鉄骨

鉄筋コンクリートと呼ばれてきた。日本独自の構造であるため、“Steel Reinforced Concrete Structure” (SRC 構造) という和製英語が国際的に通用するようになっている。これらは、前述したサラブレッド構造に対比するとハイブリッド構造と呼ぶことも可能であるが、通常はコンポジット (合成) 構造と呼ばれる。ハイブリッド構造は、異なる架構システム、例えば鉄骨構造架構と鉄筋コンクリート構造連層耐震壁と組み合わせた構造に対して用いられることが多い。ニュージーランドでは、鉄筋コンクリート連層耐震壁と鉄筋コンクリートフレーム構造からなる構造 (日本では有壁架構構造と呼ばれる) をハイブリッド構造と呼んでいるようである。

昭和 60 年頃までの日本における鉄筋コンクリート構造は、地上 6 ~ 7 階建までの低層建築に限られていた。これは別に法律による規制ではなく、我国の建築業界の習慣と行政指導によるものであった。そのため、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準」は、別に適用範囲を何階建以下というように限定したものではないが、前述の習慣を反映して、あまり高層の建物の設計に適用することは考えないで作られている。この規準においては許容応力度設計法が採用されている。7 階建てを越すコンクリート系の中層建物は SRC 構造とするのが習慣であった。

昭和 60 年代になると主として大都市を中心に、長年の習慣が打破されて、大手の建設会社や設計事務所において 20 ~ 30 階建の高層鉄筋コンクリート造 (高層 RC 構造) 建物が設計され、現実に建設されるようになった。このような高層鉄筋コンクリート建物の耐震設計法は動的耐震設計法によっており、法律的には建設大臣の特別

認定によるものであった。現在では、「7階建てを越すコンクリート系の中層建物はSRC構造とする」といった強い行政指導は行われなくなったため、従来型のSRC構造は減少し、鉄筋コンクリート構造や各種合成構造が用いられるようになってきている。

合成構造の日本における進展とその展望については、第7回複合構造の活用に関するシンポジウムで報告された南による総説<sup>1)</sup>において述べられている。高層RC構造の発展と今後の検討課題については、和泉らの論文<sup>2)</sup>において述べられている。本論においては、ハイブリッド構造に関して、主として著者の研究を引用しながら、その特性と展望について述べることにする。

## 2. 日米共同研究

日本の建築研究所と北米のNSFをオーガナイザーとする日米共同研究が開始されたのは1979年のことである。この日米共同研究は、各種の建築構造形式について両国の耐震設計法に関する技術交流と研究促進を目的としたものである。研究は後述するプロジェクトごとによって異なるが、建築研究所の実験施設と実大試験体を用いた静的実験、北米の振動台と小型試験体を用いた動的实验、部材あるいはサブアセンブリ試験体を用いた実験、それらに関連して行なわれる解析的研究からなっている。プロジェクトごとに異なる日米両国の研究者が参加し研究成果を挙げている。日米共同研究は第1フェーズから第5フェーズからなり、各フェーズは4年間から5年間の期間に亘り順次実施されている。各フェーズで取り上げられた構造形式は以下のものである。各フェーズの順番は、両国の研究者の合意のもとに決められたもので、それぞれが研究対象とする構造形式の重要度、あるいは緊急度を反映しているものといえる。

第1フェーズ：鉄筋コンクリート構造 (Reinforced Concrete Structure)

第2フェーズ：鉄骨構造(Steel Structure)

第3フェーズ：壁式構造(Masonry Structure)

第4フェーズ：プレキャスト・プレストレスト構造 (Precast/Prestressed Concrete Structure)

第5フェーズ：ハイブリッド構造(Composite and Hybrid Structure)

当時の日本の常識からすると、第3フェーズは「鉄骨鉄筋コンクリート構造」となりそうであるが、上記のような名前と順番になったところに北米の状況が反映されているといえる。

第5フェーズ(研究期間：1993年～1997年)においては、研究対象が広範囲であるということもあり、「CFT分科会」「RCS分科会」「HWS分科会」「RFI分科会」の

4つの分科会が設置され、研究が推進された。各分科会の研究対象とキーワードを列記すると以下ようになる。

**CFT 分科会**：コンクリート充填鋼管構造を研究対象とする。キーワードは、柱、柱・梁接合部、鋼管とコンクリートの付着性状、高強度材料、薄肉鋼管である。

**RCS 分科会**：鉄筋コンクリート柱-鉄骨梁構造を研究対象とする。キーワードは、柱-梁接合部、プレキャストコンクリート、梁貫通型柱梁接合部、柱貫通型内柱梁接合部、外柱-梁接合部、立体柱梁接合部、3次元有限要素解析である。

**HWS 分科会**：Hybrid Wall System 構造を研究対象とする。キーワードは、RC造コア壁、Coupled Shear Wall、繫梁、X型配筋、鉄骨造外周架構である。

**RFI 分科会**：何を研究対象とするかを検討することを研究対象とする (Research for Innovation)。キーワードは、結果的に、連続繊維補強材、補修・補強技術、超軽量コンクリート、高靱性型セメント材料である。

従来型のSRC構造は研究対象となっていないが、この原因は、日本において研究がかなり進んでいたこと、北米では殆ど採用されていない構造形式であること、などが原因であると思われる。大まかに言えば、CFT構造は日米両国で普及しており、RCS構造は日本で、HWS構造は北米で普及している構造であるといえる。

第5フェーズにおける研究成果は、その後に日本建築学会より出版された「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針(2008年改訂版)」「鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造の設計と施工(2001年)」に反映されている。HWS構造については、その後に実施した著者の研究成果をもとに次節以降に詳述する。

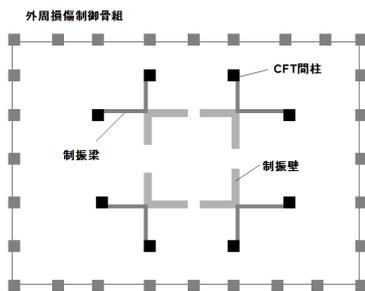
## 3. ハイブリッド構造

1節で述べたように、昭和60年代になると高層RC構造建物が設計・施工されるようになった。これらの建物の用途は「集合住宅」が大部分である。「集合住宅」の場合、居住性の点でコンクリート系の構造が適している。また、「集合住宅」の場合、大空間は必要とされないため柱の支配面積が小さく、鉄筋コンクリートフレーム構造でも設計可能となる。この二つが、高層RC構造普及の原因と思われる。一方、事務所建築の場合は大空間が望ましいため、連層耐震壁の利用や、合成構造部材の合理的な利用が必要となってくる。従来型のSRC構造の利用が、施工性、経済性の観点から減少している今日、次世代型の合成構造の開発が必要である。開発に当たっては、「性能設計の観点からの損傷制御」「環境対応型」「持続性」を考慮に入れておく必要があることは言うまでもない。

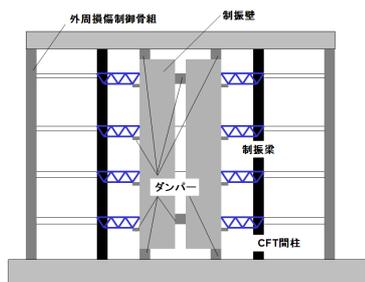
本論で解説する(事務所建築を想定した)構造の平面

および立面の例を図1に示す。本構造はハイブリッド構造（あるいはDual System構造）の一種である。ダブルチューブ構造とも呼ばれ、内部コアと外周架構を連結する構造部材は内部コア壁や周辺架構に支障を生じないような接合法が望ましく、両端ピン接合とされることが多い。図1に示す構造の構成要素としては、内部コア連層耐震壁、外周架構、（必要に応じて建物内部に設けられる）間柱（ポスト）、スラブシステムである。耐震設計上の観点から見た各構成要素の役割は以下の通りである。

**内部コア連層耐震壁：**耐震壁の役割は、低層建物においては大きな水平力（せん断力）を負担する事であるとされてきた。しかしながら、建物が高層化し、大地震に対しては耐力のみでなく、エネルギー吸収能力に依存する耐震設計法の概念が普及した現在では、耐震壁の役割は大きな転倒モーメントを負担することと、層崩壊を防ぐことであると考えた方がよい。いわゆる Strong Column-Weak Girder Philosophy においては、耐震壁は Strong Column の象徴（大黒柱）的な存在となる。全体降伏機構を形成する（転倒モーメントにより耐力が支配される）建物の層せん断力に対する設計は、建物を一本の片持ち柱と見た場合、（片持ち柱の曲げ降伏機構に相当する）全体降伏機構を保证するためのせん断設計である。せん断設計においては、耐震壁の主な役割は大きなせん断力を負担することではなく、適切にせん断力を負担することと考えた方がよい。従来の耐震壁はそのせん断剛性の異常な大きさにゆえに入力せん断力を下層において必要以上に負担することがあり、有壁架構の合理的なせん断設計を困難なものとする。また、層保有耐力、層せん断力の概念が浸透しているため、ややもすると転倒モーメント耐力の概念の明確化が遅れている



(a) 平面図



(b) 立面図

図1 ハイブリッド構造の例

らがある。例えば、耐震壁には、上層部において逆せん断力が生じることが多いが、この部分は無駄なので、耐震壁をカットオフするという考えは、層保有耐力の概念から派生するものである。この現象は、外周架構部の上層部における転倒モーメント耐力の早期（小変形時からの）活用という連層耐震壁の持つ重要な役割ということになる。

低層建物の場合は、降伏機構によりエネルギーを吸収しなくても、大きな水平耐力で地震に抵抗できるように設計することも可能であるので、耐震壁の役割を大きなせん断力を負担することと捉えても問題はないが、中層建物あるいは高層建物の設計をエネルギー吸収能力に依存する考え方で設計する場合は、耐震壁の役割を上述のように認識する必要がある。日米共同研究においては、内部コアとして Coupled Shear Wall を採用することを念頭におき大型試験体を用いた実験的研究が実施されている。本論においては、著者により提案された新しいタイプの連層壁の性状について後述する。

**外周架構：**建物の外観を決める要素であると同時に室内熱・光環境を支配する要素であるが、構造的には水平力、振れに対する抵抗要素である。日米共同研究においては、平面鉄骨骨組を採用するものとし、基本的には水平力全体の 10%程度の水平力を負担するような架構が考えられている。本論においては、著者により提案された原点指向型の復元力特性を有する柱降伏機構型合成構造骨組の性状について後述する。

**間柱：**基本的には長期軸力支持が間柱の主たる役割である。ただし、図1においては、水平力に対して、（トラス梁により連結することにより）内部コア連層壁との共同抵抗機構を有する間柱の例が示されている。建物の内部空間の自由度を持たせるためには、間柱の数は出来るだけ少ない方がよいことから、必然的に軸力が大きくなる。したがって、間柱としては高強度コンクリートを充填した CFT 柱の採用が合理的であるといえる。図1に示すトラス梁にダンパーを組み込んだ場合の性状を実験的に検討した研究を行っているが、本論においては割愛する。

#### 4. ハイブリッド構造の構造要素の性状

##### 4.1 制振壁

前節で述べたように、ハイブリッド構造における内部コア連層耐震壁の役割は、転倒モーメントを負担すること、地震時にエネルギーをできるだけ早期（層間変形の小さいうち）に吸収すること、層崩壊を防止すること、である。特に重要なのは層崩壊を防ぐことであるが、そのためには耐震壁のせん断破壊を防止する必要がある。

せん断破壊の防止は、連層耐震壁に生じる設計用せん断力とせん断耐力を正確に評価して初めて可能となるが、このことは必ずしも容易ではない。そのことが、各種規準に見られる「耐震壁が存在するゆえのペナルティー」（耐震壁を有する建物の設計用水平力あるいは必要保有耐力の割り増し）という形で現れている。耐震壁がせん断破壊を生じる場合の層間変形角は小さく  $0.005\text{rad}$  程度であることが多くの実験結果により明らかにされている。1層でせん断破壊する「せん断破壊型耐震壁」と「曲げ降伏型耐震壁」の性能比較を片持壁構造に関する多くのケーススタディにより検討した解析的研究<sup>3)</sup>によると、せん断破壊型耐震壁構造の応答層間変形角を  $0.005\text{rad}$  以下にするためには、許容層間変形角を  $0.01\text{rad}$  とした曲げ降伏型耐震壁構造に比較して、必要ベースシア耐力は4倍程度になることが報告されている。

著者が提案する耐震壁は、図2に示すような降伏機構を生じる耐震壁である。通常の Coupled Shear Wall と一見類似しているが、支持条件が異なるので、降伏機構時には繫梁および耐震壁周辺柱の最下層柱脚部と最上層柱頭部に塑性ヒンジが形成され、耐震壁自体が顕著に塑性化する事は無い。すなわち、従来の Coupled Shear Wall の降伏機構とは全く異なる降伏機構(転倒降伏機構と呼ぶ)を有する耐震壁で、新たに提案する耐震壁である。履歴ダンパーとしての機能を有するH型鋼製繫梁を内蔵していることから制振壁と称することにした。

制振壁の有する主な特性(利点)は次の通りである。

- 1) RC 構造壁板自体が顕著に塑性化することが無いので、簡単に信頼の置ける線材置換モデルで有壁架構の挙動が説明できる。
- 2) 制振壁の圧縮側柱および引張側柱軸力の大きさが、繫梁の設計耐力により制御できる。
- 3) 制振壁には(最上層と最下層の)周辺柱と繫梁にしか塑性変形は生じず、壁板自体には(メカニズム形成時にも)高い弾性剛性が期待でき、その結果、建物に一樣層間変形を生じる全体降伏機構が形成される。
- 4) 曲げ耐力の一部はエネルギーを吸収しない(軸力効果により上昇した)見かけ上の耐力である従来型の耐震壁に比較して、繫梁が早期にせん断降伏し、安定した復元力(エネルギー吸収能力)を有する耐震壁となる。
- 5) RC 造壁板は塑性化させないので、建築基準法でいう構造特性係数は小さく出来る。すなわち各種規準に見られる、耐震壁が存在するゆえのペナルティーを論理的には受けなくて済む。
- 6) 性能設計においては、①損傷部の補修の容易さ、②主な損傷部を特殊な部材に集中させ、その他の所は塑性変形を制限して余り目立たないようにする、の2項目が必要となる。そのためにはコンクリートの構

造的な損傷は出来るだけ小さくするか、目立たなくする必要があるが、この事を可能にする。

以上を要約すると、制振壁は、「鋼材にはエネルギー吸収の役割を、コンクリートには剛性確保の役割を持たせる」という、合成構造の設計理念を具体化した耐震壁ということが出来る。

以下、3層1スパン制振壁の力学的性状に関する実験的研究<sup>4)</sup>の概要を紹介する。3層の試験体を用いて実験を行った理由は、図2に示す制振壁で塑性化する部分を全て含むことが出来る事と、第2層目は一般層を代表する層と見なすことが出来るからである。

実験の主な目的は以下の通りである。

- 1) 塑性化する部分の変形能力、エネルギー吸収能力、累積塑性変形能力などを検証する。
- 2) 想定した降伏機構以外の降伏(破壊)機構が形成されることが無いかを検証する。
- 3) 実験により得られた復元力特性を、解析的にどの程度の精度で予測できるかを検討する。

試験体の形状を図3に示す。試験体は後述するプロトタイプ建物を参考にして設計されている。プロトタイプ建物と比較した場合、スパンは縮尺  $1/5$  であるが、階高は約  $1/4$  となっている。RC 造壁板の壁厚は柱幅と同じとしている。したがって、一般の耐震壁に比較すると非常に厚い壁板となっているが、これは斜めひび割れの発生を防ぐことと、H型鋼製の繫梁の壁板への定着性状を良くするためである。壁板部分の設計は、長方形RC造柱と考えて設計されている。せん断補強筋としては横筋のみで、主筋を包含する帯筋状に配筋している。トラス理論で計算したRC造壁板部分のせん断耐力は実験により得られた最大水平力に対して1.5倍以上の余裕度がある。基礎梁(あるいは最上層梁)と壁板端面の間に設ける(制振壁特有の)クリアランスの幅は  $40\text{mm}$  である。実験はプ

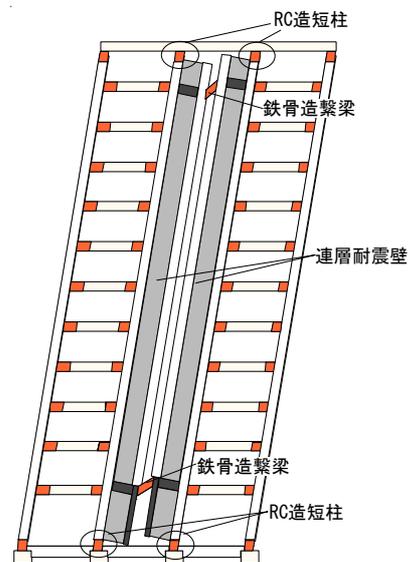


図2 制振壁の降伏機構

ロタイプ建物の建物で計算した 18 階建てのやや高層の建物の鉛直荷重に相当する一定軸力を載荷し、正負交番漸増振幅繰返し水平加力載荷を行った。層間変形角  $R=0.25/100\text{rad}$  から  $R=2.0/100\text{rad}$  まで変位振幅増分を  $R=0.25/100\text{rad}$  とし、各変位振幅で 3 回、合計 24 回の繰返し載荷が行われている。

図 4 と写真 1, 2 に各試験体の荷重—変形関係上に示した塑性化進行状況と実験終了後の試験体の様子、および繫梁の損傷状況を示す。図 5 に示す荷重—変形関係には図 6, 7 に示された解析モデルと材料の構成則を用いて得られた解析結果が点線で示されている。解析に用いたプログラムは 2 次元 FEM プログラムで、柱梁はファイバーモデルの柱梁要素モデルとし、繫梁のみせん断変形を考慮した柱梁要素を用いている。実験結果より以下のことが分かる。

- 1) 試験体の降伏機構は想定した降伏機構となっている。RC 造壁板には損傷が殆ど見られない。
- 2) 層間変形角が  $1.5/100\text{rad}$  を超す大変形での繰返しでは、繫梁ウェブに局部座屈発生によるキレツが観察され、これが復元力特性の劣化の原因となっている。これは累積塑性変形による疲労破壊と見ることが出来る。建物設計時のクライテリアとして最大層間変形角を  $1.0/100\text{rad}$  として設計したプロトタイプ建物の地震応答解析結果(最大地震速度 PGV を  $50\text{kine}$  に基準化した各種地震波に対する応答結果である)とあわせ検討した結果、このような破壊は大地震を数回経験した時のみに生じるような破壊であると考えられる。
- 3) 制振壁の履歴性状は通常の解析で十分予測可能である。

以上より、実験の目的はほぼ達成され、提案する制振壁は履歴ダンパー内臓型の構造壁として十分利用可能であ

ることが分かった。

#### 4.2 セルフセンタリング機能を有する外周架構

ハイブリッド構造における外周架構の役割は水平力および振れに抵抗することである。通常は鉄骨造平面フレーム構造が採用されることが多いが、ここではセルフセンタリング機能を持つ柱降伏先行型 RC 造骨組の試験体を用いた実験例<sup>5)</sup>を紹介する。内部コア構造により層崩壊を防止することが出来れば、外周架構は柱崩壊型であっても支障は無い。軸力を受ける柱の変形能力が確保できれば、梁崩壊型よりむしろ柱崩壊型の方が望ましいとさえ言える<sup>5)</sup>。セルフセンタリング機能とは、復元力特性で言えば原点指向型の特性で、地震後の残留変形を小さくする機能のことである。北米における高速道路橋の地震被害の経験を踏まえて重要視されるようになった機

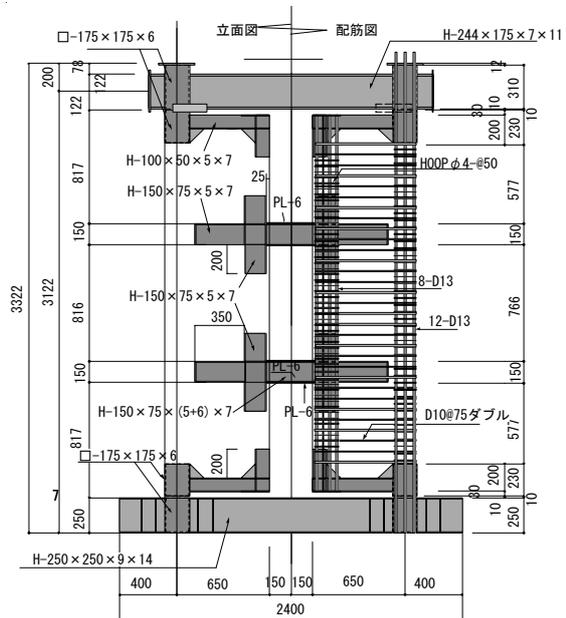


図 3 制振壁試験体

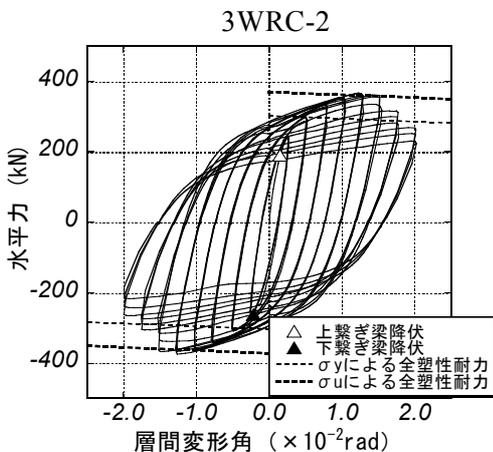


図 4 荷重—層間変形角関係



写真 1 実験後試験体



(a) 上繫梁



(b) 下繫梁

写真 2 実験後の繫梁の損傷

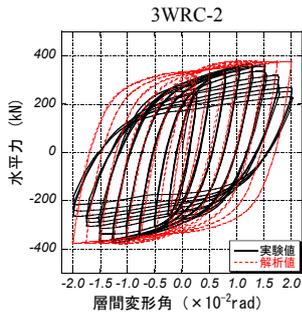


図5 荷重—層間変形角関係  
(実験値と解析値の比較)

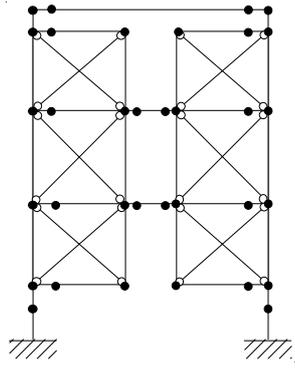


図6 骨組モデル

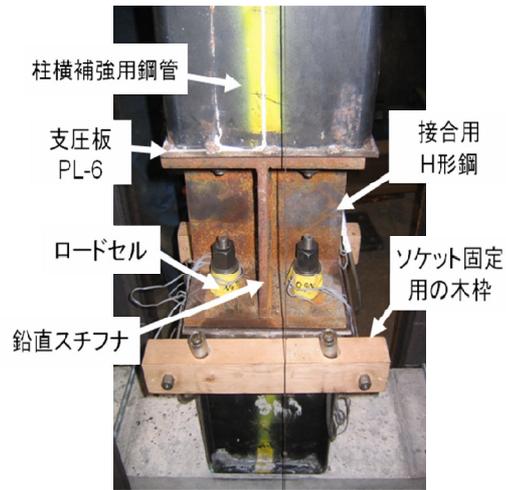
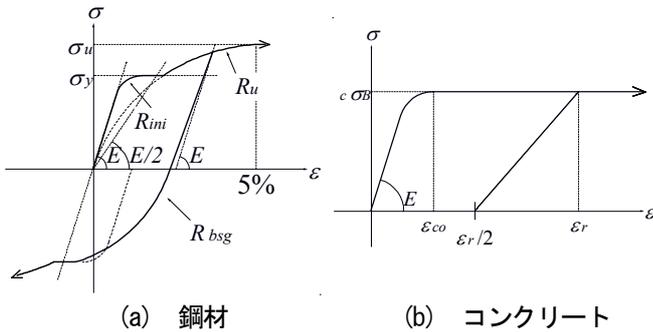


写真3 柱接合用ユニット

H型鋼を介して PC 鋼棒で緊結することにより柱を乾式接合する。接合用のH型鋼ユニットには、面外補剛の鉛直スティフナーが設けられている(写真3 参照)。図8 (b)に地震応答時に予想される変形状況を示す。提案する骨組では、柱降伏が先行する機構を計画している。柱は、無筋としているので材端部の曲げひび割れが大きく開くことになるが、図に示すようにアンボンド配置した PC 鋼棒に引張力が作用することで、ひび割れが閉じ、残留層間変形を小さくする効果が期待できる。試験体は、実験室の床に PC 鋼棒により締め付けて固定し、試験体の最下層の柱脚が固定支持の条件となるようにした。実験時には、建物下層部の鉛直荷重に相当する一定軸力を試験機により載荷し、その後2層目頂部に正負交番漸増振幅繰返し水平加力載荷を行った。層間変形角  $R=0.5/100\text{rad}$  から  $R=2.0/100\text{rad}$  まで変位振幅増分を  $R=0.5/100\text{rad}$  とし、各変位振幅で3回、合計24回の繰返し載荷が行われている。

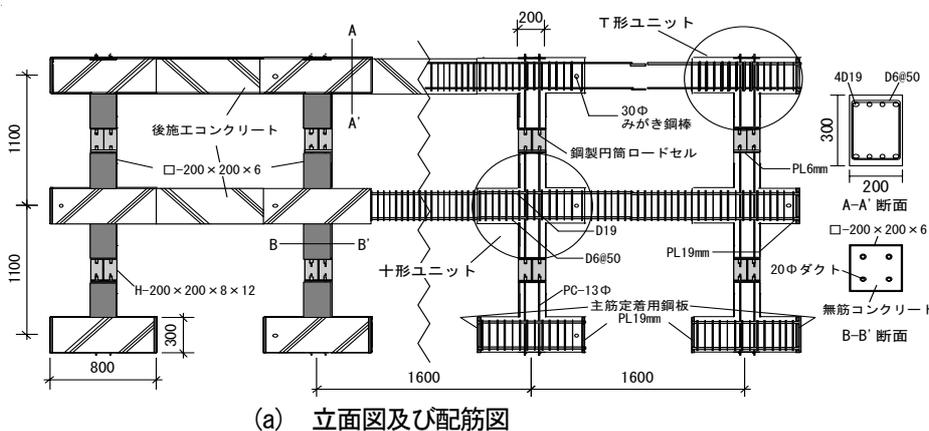
図9に実験より得られた復元力特性を示す。想定した通りの原点指向型の復元力特性が得られていることが分かる。 $2.0/100\text{rad}$  という最大層間変形角を経験したにもかかわらず残留変形は小さく、試験体の損傷も軽微であった。また、試験体を計画したとおりに製作することが出



(a) 鋼材 (b) コンクリート  
図7 材料の応力—ひずみ関係

能である。原点指向型の復元力特性はエネルギー吸収の観点からは望ましくない復元力特性であると考えられてきたが、前節で述べた制振壁を用いたハイブリッド構造の場合は残留変形が大きくなる可能性があるため、外周架構の復元力特性としては望ましい特性であるといえる。

図8(a)に2層3スパンの骨組試験体の立面図と配筋図を示す。試験体は、柱梁接合部を含むT形、十形の2種類のユニットをプレキャスト工法により製作し、これらを組み立てて完成させる。各ユニットはRC造梁に、鋼管で横補強した無筋コンクリート柱を取り付けることで作成している。鋼管とRC造梁の間は10mmのクリアランスを設けており、鋼管は軸力を負担せず、柱の横補強にのみ有効となるようにしている。上記のユニットを、



(a) 立面図及び配筋図

(b) 地震時の変形予想図

図8 2層3スパン骨組試験体

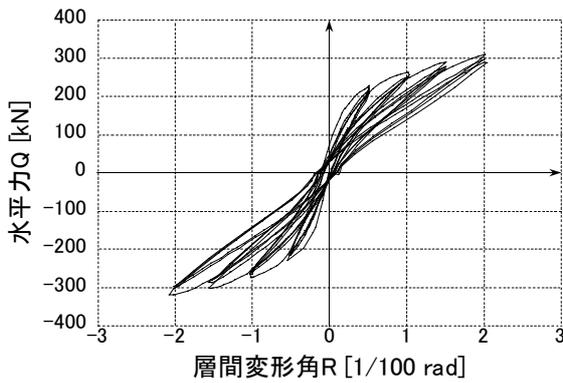


図9 荷重—層間変形角関係

来たのもこの実験的研究で得られた成果の一つである。

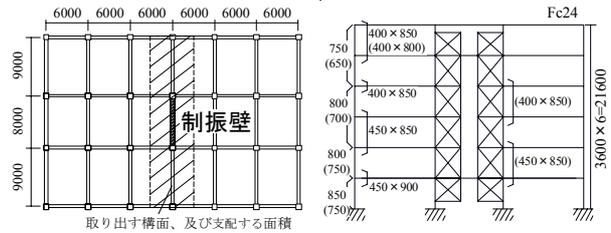
### 5. 制振壁を有する建物の地震応答性状

前節で述べたハイブリッド構造の構成要素のうち、建物の耐震性能を支配する要素は制振壁であることから、制振壁を有する建物の地震応答性状についての解析的研究成果<sup>3)</sup>を紹介する。RC造耐震壁を内部コア構造に採用した場合、地震応答解析に必要な耐震壁の復元力特性としては、壁谷澤モデルとして知られる経験則的な復元力特性が用いられることが多いが、ここで述べる研究は4.1節の制振壁の復元力特性を解析的に求めるために使用された解析プログラムが用いられている。したがって、経験則的な復元力特性モデルは材料の構成則のみであり、その精度は実験により検証されている(図5参照)。

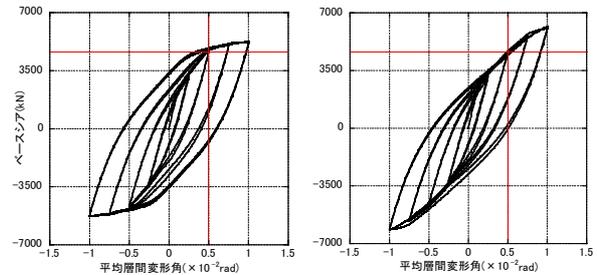
検討した建物は3,6,12,18層の制振壁フレーム構造建物で、フレームに普通強度鉄筋を用いた(type1)モデルと、高強度鉄筋を用いた(type2)モデルで解析が行なわれている。建物平面は文献6)の設計例と同様のもので、図10に示す張間方向1構面を対象としている。図10の立面は6層モデルのみが示されている。全モデル全層にわたり1.3ton/m<sup>2</sup>の質量分布、3.6mの高さを仮定している。

解析は4.1節で述べた2次元骨組解析プログラムを用いて行なわれている。静的解析では、高さ方向の分布がAi分布に従う水平力を各層柱梁節点に漸増载荷した。動的解析では3%のレーリー減衰が仮定されている。地震波としては、通常良く用いられる観測地震波5波と模擬地震波5波が、PGVが50kineとなるように基準化されて用いられている。ベースシア耐力を変数とする場合は、負担する水平質量を増減することにより調整している。

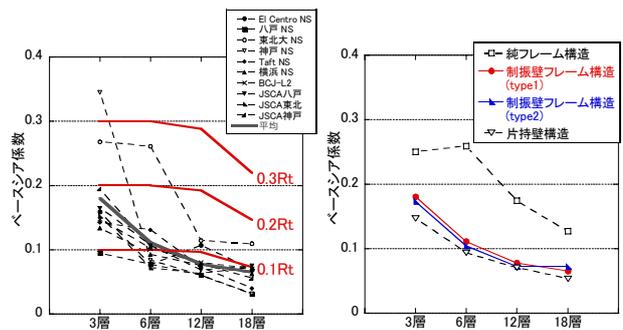
図11に、静的解析で得られた6層モデルの荷重—変形関係を示す。縦軸はベースシア、横軸は平均層間変形角である。type1ではR=0.005rad.時に周辺フレームが降伏し始めるのに対し、type2ではR=0.01rad.でも殆どの柱梁が弾性を保ちながら耐力が増加している。なお、建物



(a) 平面図 (b) 解析モデル(6層の例)  
図10 制振壁フレーム構造と解析モデル



(a) type1 ( $\sigma_y=350\text{N/mm}^2$ ) (b) type2 ( $\sigma_y=500\text{N/mm}^2$ )  
図11 荷重—平均層間変形角関係(6層モデル)



(a) type1 (地震波別) (b) 各構造における比較(10波の平均)  
図12 必要ベースシア係数

のベースシア耐力としては、R=0.005rad.時の耐力で定義している。また、早期に繫梁が降伏する制振壁の特性が図11に示される建物の復元力特性に現れている。図12(a)に動的解析により得られた必要ベースシア係数を示す。必要ベースシア係数とは、前述したPGVが50kineである10波の地震波のそれぞれに対する最大応答層間変形角が1/100rad.以下に収まるために必要な最小のベースシア耐力のことである。10波に対する応答の平均値で見ると全てのモデルで0.2Rtを下回っており、終局強度指針<sup>6)</sup>が定める有壁架構造物の設計用ベースシア係数0.3Rtに対して余裕がある(Rtは建築基準法に従って求める振動特性係数である)。また、図12(b)にtype1,2の必要ベースシア係数平均、及び片持制振壁構造、純フレーム構造の必要ベースシア係数平均値が示されている。制振壁フレーム構造は片持制振壁構造と比較すると同等かやや大きな値を必要としているが、純フレーム構造と比較すると小さな値でよいことが分かる。片持制振壁構

造を壁負担率 100%, 純フレーム構造を壁負担率 0%として考えると制振壁フレーム構造は中間に位置する性能を持っており, 壁の負担率増加に伴い必要ベースシア係数が抑えられる傾向にあることが分かる. また, 高強度鉄筋を用いた type2 と type1 が殆ど変わらないことは,  $R=0.5/100rad$ 以降に発揮される耐力上昇は耐震性能にあまり寄与しないことを意味している. これらの知見はハイブリッド構造の外周架構の構造計画の際重要であると思われる.

## 6. 今後の検討課題

前節までにおいては, ハイブリッド構造についての解説を行ってきた. 中低層の事務所建築をコンクリート系の構造物として設計する場合, ハイブリッド構造は合理的な構造であり, 今後の発展が期待できる. そのために研究する必要のある課題を以下に挙げる.

- 1) 外周架構の構造形式としては, 従来は平面鉄骨造骨組構造を採用することが考えられてきた. 本論においては, セルフセンタリング機能を有する RC 造フレームを紹介した. 外周架構としては, それ以外に RC 造スパンドレルウォールと鋼管横補強 RC 造短柱からなる架構が有効であると思われる. その理由は, 従来の RC 構造あるいは SRC 構造の中低層建物に良く見られる形式であり, 室内環境設計, 意匠設計, 経済性の観点からも優れた性能を有するからである. 構造的にも, 柱降伏機構型にすることによる利点以外に, 剛性が高く比較的小さな層間変形で耐力を発揮できることが利点になると考えられる.
- 2) 制振壁の有効性については, 実験的および解析的に検証したが, 制振壁脚部におけるせん断耐力についてはなお検討が必要である. 塑性ヒンジが形成される部分を CFT 柱とすれば, せん断耐力については研究もなされており, せん断破壊を生じることは殆ど無いといえる. ただし, CFT 柱を採用すると, 最下層を鋼板耐震壁とするなどの工夫が必要となる. 鋼管横補強 RC 造柱とした場合については, せん断破壊を生じた実験例は今の所ない. したがって, 合理

的な設計を行うためには鋼管横補強 RC 造柱のパンチングシア耐力に関する実験的研究が必要である.

- 3) 建物が高層になるほど転倒モーメントに対する設計が支配的となるが, 内部コアに転倒モーメントの大部分を負担させることは, 内部コアの搭状比が建物全体のそれより大きいことから合理的ではない. 外周架構の構造計画及び (大きな変動軸力を受ける) 隅柱の設計法について研究を行う必要がある.

**謝辞:** 本論で述べたハイブリッド構造に関する研究は, 科学研究費補助金 (基盤研究 (A), 課題番号: 18206060, 研究代表者: 九州大学大学院教授 崎野健治) の助成により行なわれたものである. 研究分担者である九州大学大学院 河野昭彦教授, 中原浩之准教授, 福岡大学 江崎文也教授, および研究に参加された九州大学, 福岡大学の技官, 大学院学生, 学部学生の方々に感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 南 宏一: 次世代の合成構造の可能性, 第 7 回複合構造の活用に関するシポジウム, 2007.11
- 2) 和泉信之, 木村秀樹, 石川祐次: 日本における超高層鉄筋コンクリート造建築物の構造特性の傾向, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp351-360, 2009.3
- 3) 崎野健治, 増田真吾, 中原浩之: 片持壁構造の耐震性能評価に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp391-400, 2009.3
- 4) 崎野健治, 中原浩之: RC 造短柱を有する 3 層転倒モーメント降伏型制振壁の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集第 634 号, pp2159-2166, 2008. 12
- 5) 中原浩之, 崎野健治, 江崎文也: 柱降伏を先行させる自己修復型 RC 骨組の開発に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集第 628 号, pp957-664, 2008. 6
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.

## DEVELOPMENT OF HYBRID STRUCTURAL SYSTEM FOR BUILDINGS

Kenji SAKINO

This paper is a state-of-art review on hybrid structural system. The emphasis of this report will be placed on a double-tube-system in which plane frames are used as an outer tube and structural walls as an inner core tube. It is believed that the double-tube-system can be a reasonable structural system for office buildings by replacing ordinary steel members and/or reinforced concrete members with composite members for members used in the peripheral and core tubes.