

鉄筋コンクリート造超高層建物の耐震・制震構造

黒瀬行信

(清水建設(株) 構造生産設計2部)

1. はじめに

近年、大都市圏での大規模再開発が増加し、超高層集合住宅の需要が増大してきている。超高層集合住宅は、都市部の利便性と住宅地の快適性を兼ね備えた住宅として購買層に好評であり、低迷が続くマンション市場にあって好調な売れ行きを堅持している分野である。特に、住戸数の多い大規模案件ほどコストメリットが大きくなるので、超高層集合住宅は今後ますます高層化・大型化を指向するものと思われる。

超高層集合住宅の構造種別は、過去には鉄骨造(以下、S造と略)や鉄骨鉄筋コンクリート造(以下、SRC造と略)が採用されていたが、最近はそのほとんどが鉄筋コンクリート造(以下、RC造と略)である。これは、RC造がS造に比べて重量が大きく剛性が高いために風揺れ等に対する居住性が良好であり遮音性にも優れていること、S造やSRC造に比べて経済的に建設できること、SRC造に比べて短工期で施工できること、などの理由によるが、その背景には、高強度コンクリートや高強度鉄筋が実用化されてRC造の適用範囲が拡大したこと、コンピューターや解析技術の発達により詳細な構造解析が可能になったこと、などが挙げられる。

日本におけるRC造超高層建築は、昭和49年に建設された鹿島建設の椎名町アパート¹⁾に端を発しており、昭和59年に(財)日本建築センターに設置された「高層鉄筋コンクリート造技術検討委員会」による技術検討を通じて広く普及していった²⁾。同委員会による技術検討の第1号は、清水建設の清水高層RCシステムであった³⁾。当時のRC造超高層建物は、設計基準強度が $F_c=42\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリートとSD390までの主筋を組合せた30階前後の純ラーメン構造が一般的であった。昭和63年から5年間に亘り実施された建設省の総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(略称: New RC)では、特にゾーンIと呼ばれる領域(コンクリートは $F_c=60\text{N/mm}^2$ 以下、鉄筋はUSD685以下)を中心に、RC構造の適用範囲を拡大するための材料、構造、施工の各技術が確立され、40階を超えるRC造超高層住宅などが建設された⁴⁾。New RCプロジェクトの成果は、1997年のJASS5の改定⁵⁾や、同年の靱性保証型指針⁶⁾の発行、1999年のRC規準の改定⁷⁾などに盛り込まれて一般化されている。

RC造超高層建物は、自重が大きいために地震力が大きく、耐震性能の確保が設計上最も重要な課題となる。通常のRC造超高層建物は、靱性に富む耐震構造を採用して構造計画を行い、大地震時には梁曲げ降伏型の全体崩壊機構を形成するように耐震設計を行うのが一般的である。しかるに、建築計画上の理由などにより耐震要素の部材数や断面寸法に制約を受ける場合や、建物の幅に対する高さの比(塔状比)が大きいなどの建物形状に起因して地震時の揺れが大きいと予想される場合、或いは、住宅性能表示制度における耐震等級を上げる場合などでは、建物の耐震性能を補うために制震デバイスを併用した耐震構造(以下、制震構造と称す)を採用することがある。

本報告では、以下にRC造超高層建物の関連技術や耐震設計の概要を述べ、耐震構造・制震構造の事例を紹介する。なお、本報告で扱うRC造超高層建物ならびにその関連技術は、筆者が所属する建設会社における事例が中心であり、日本のRC造超高層建物全般について論じている訳ではないことを予め了解されたい。

2. RC 造超高層建物の関連技術

(1) 材料に関する技術

RC 造超高層建物では、構造材料として高強度コンクリートや高強度鉄筋が使用される。高強度コンクリートは、単位水量を少なく単位セメント量を多くして低水セメント比で調合されるが（図-1）、最近、高ビーライト系ポルトランドセメント⁸⁾とポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤⁹⁾を使用して、スランプフローが 50~60cm 程度の高強度・高流動コンクリートとして製造されるのが一般的である（図-2）。設計基準強度が $F_c=60\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリートは、火災時に表層部分が爆裂により失われる可能性が高く、爆裂防止材としてポリプロピレンなどの合成繊維を混入した耐爆裂性の AFR コンクリート（Advanced Fire Resistant Concrete）が実用化されている¹⁰⁾。最近、結合材としてセメントにシリカフュームなどの超微粒子を添加した超高強度コンクリートが実用化され¹¹⁾、一連の部材実験によって構造性能が確認されている¹²⁾。

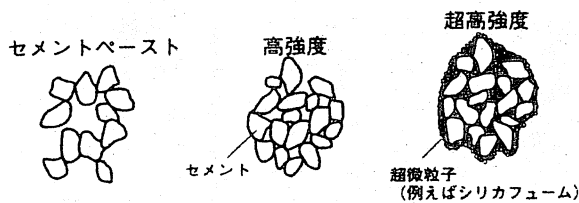


図-1 コンクリートの高強度化

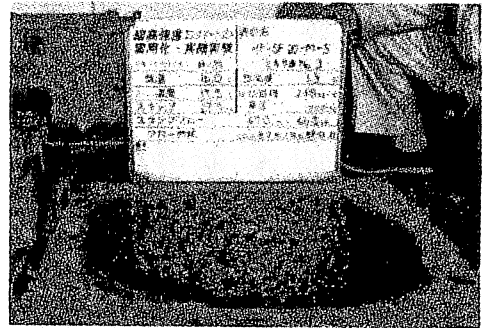


図-2 高強度・高流動コンクリート

高強度鉄筋は、梁や柱の主筋に SD390~490、主として柱の主筋に USD685 が使用され、梁や柱のせん断補強筋に降伏点が $685\sim785\text{N/mm}^2$ の異形鉄筋や 1275N/mm^2 の異形 PC 鋼棒が使用されている¹³⁾（図-3）。高強度主筋の接合は、ねじ鉄筋をカプラーやスリーブに噛合せてグラウトを注入する機械式継手（図-4）や、エンクローズ溶接・フラッシュバット溶接などの溶接継手が一般に用いられている¹⁴⁾。主筋の機械式定着工法として、主筋末端に定着ナットを嵌合する方法や鉄筋末端を高周波加熱して定着部を成型する方法¹⁵⁾などが実用化されている（図-5）。高強度せん断補強筋は、スパイラル型、突合せ抵抗溶接による溶接閉鎖型、一筆書き加工による閉鎖型¹⁶⁾などの形状のものが用いられている。

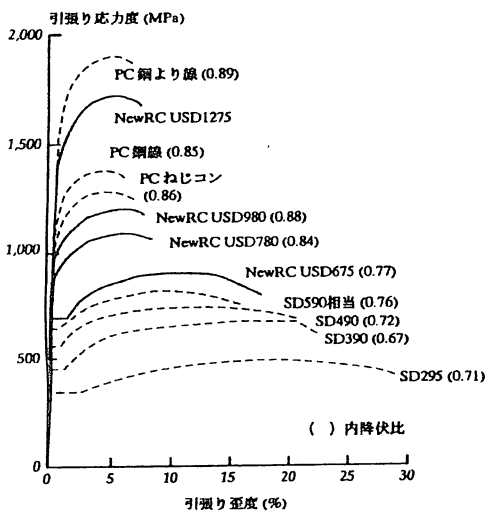


図-3 鉄筋の応力度-歪度関係¹³⁾

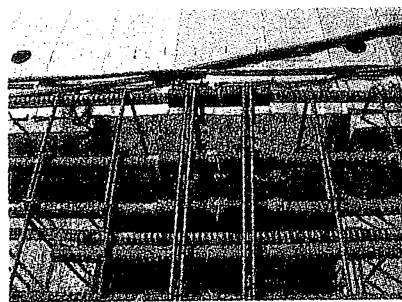


図-4 梁主筋の機械式継手

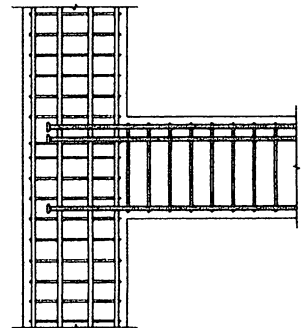


図-5 梁主筋の機械式定着

(2) 構造に関する技術

RC 造超高層建物では、高強度材料を用いた構造部材が使用され、ラーメン架構やチューブ架構、コアウォール併用架構などが構築される¹⁷⁾。ラーメン架構などに用いられる柱や梁部材は、構造実験によって耐力ならびに変形性能が確認され、設計式や復元力モデルが確立されている¹⁸⁾。チューブ架構などに用いられる短スパン梁は、せん断破壊防止に X 型配筋が有効であり、その性能が構造実験によって確認されている¹⁹⁾ (図-6)。柱梁接合部はラーメン架構やチューブ架構の一体性を保持する重要な構造要素であり、接合部自身のせん断強度や接合部内の梁主筋の付着・定着性状などが構造実験により確認されている^{20) 21)}。連層立体耐震壁であるコアウォールは、地震時に建物の心棒として作用し揺れを抑制することが期待できる耐震要素であり、構造実験によって性能が明らかにされて²²⁾、超高層建築の事務所²³⁾や集合住宅などに使用されている (図-7)。

制震デバイスは、梁、柱、コアウォールなどの構造部材による耐震性能を補う装置として建物に設置される。制震デバイスに期待する効果は、大地震時の応答変位の低減による建物の損傷の軽減と応答加速度の低減による家具・什器の保全の二点があるが、RC 造超高層住宅の場合は前者に重点を置いて履歴型の制震デバイスを採用する場合が多い。極低降伏点鋼を用いた履歴型制震デバイスの例として、ラーメン架構内に設置する間柱や方立壁に鋼材ダンパーを組み込んだものや²⁴⁾ (図-8)、コアウォール間の境界梁に鋼材ダンパーを組み込んだもの²⁵⁾ (図-9) などが実用化されている。

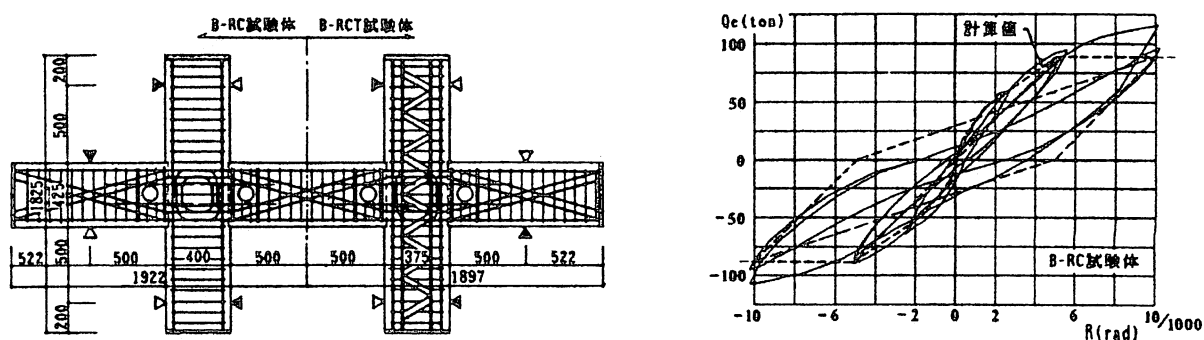
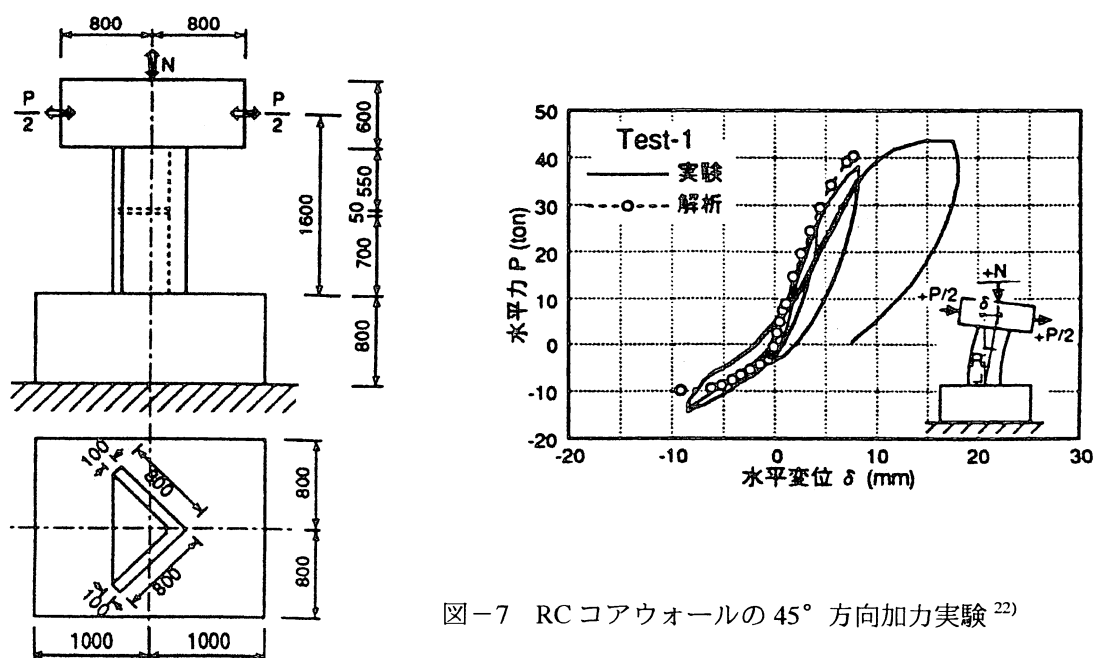
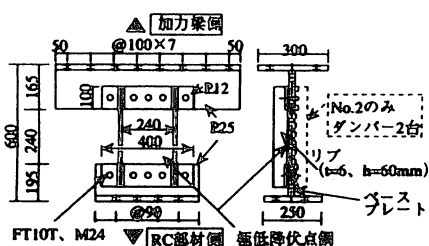
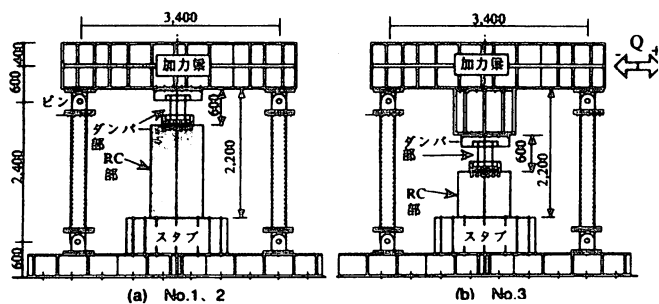
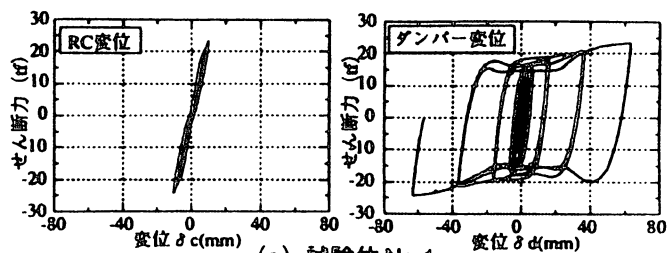


図-6 X型配筋を施したRC短スパン梁の架構実験¹⁹⁾

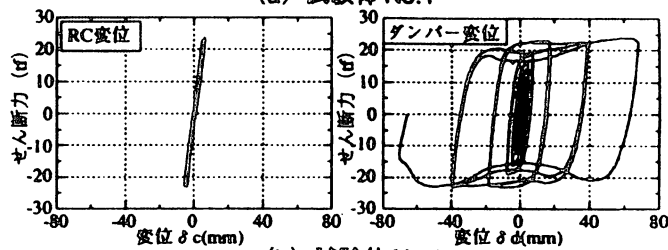
図-7 RC コアウォールの 45° 方向加力実験²²⁾



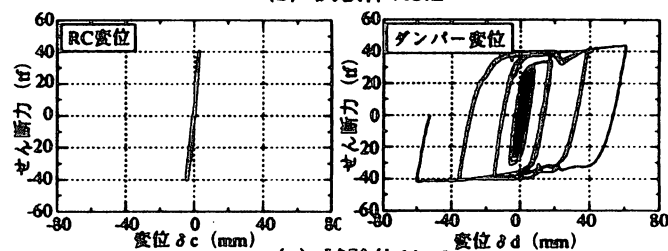
ダンパー形状



(a) 試験体 No.1

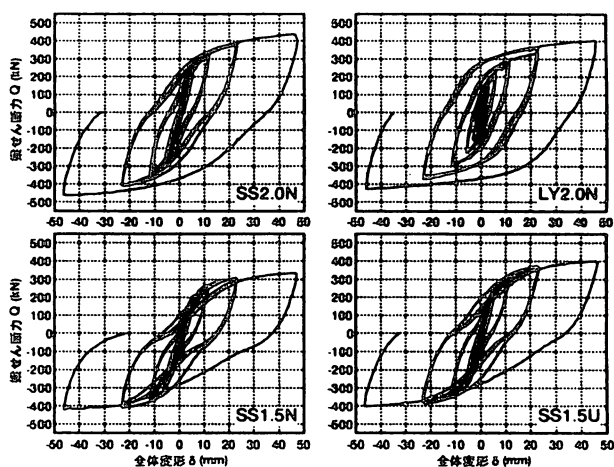
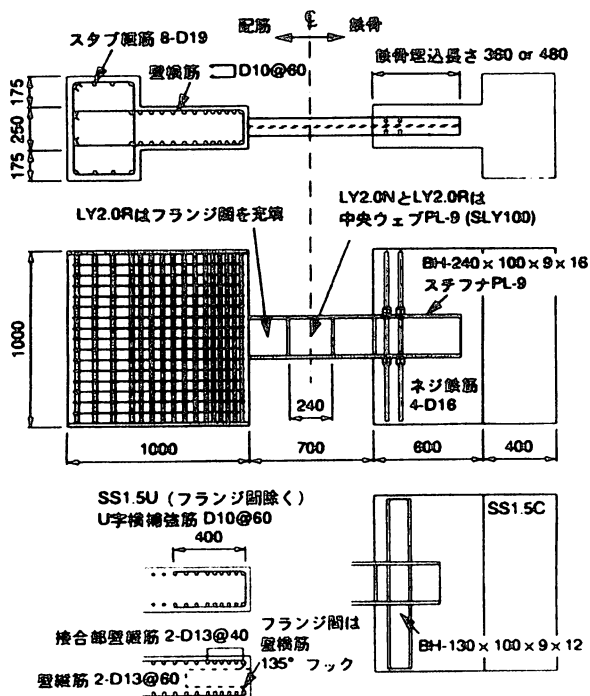


(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3

図-8 極低降伏点鋼を用いた間柱型制震ダンパーの加力実験²⁴⁾



梁せん断力～全体変形関係

図-9 極低降伏点鋼を用いた境界梁型制震ダンパーの加力実験²⁵⁾

(3) 施工に関する技術

RC 造超高層建物の施工では、工期とコストを考慮して、現場打ち工法と PC (プレキャストコンクリート) 工法を最適に組合せた複合化工法が採用される場合が多い。現場打ち工法では、柱や梁には先組み鉄筋やシステム型枠などが採用され、コンクリートの打設は、柱や壁などの鉛直部材 (V) と梁や床スラブなどの水平部材 (H) を分ける VH 分離打設が行なわれるのが一般的である²⁶⁾。最近では、鉛直部材に $F_c=60\text{N/mm}^2$ 以上の高強度コンクリートを使用し、水平部材のコンクリート強度をそれよりも下げて、異強度の VH 分離打設が行われている²⁷⁾。

PC 工法は、適用部位として柱、梁、壁 (主として外壁)、床スラブ、バルコニーなどがあり、PC 化の程度に応じてフル PC 工法、ハーフ PC 工法、PCF (PC 型枠) 工法などがある。特徴的な PC 工法として、現場で製作する大型のハーフ PC 板を用いて 1 枚の床スラブを PC 板の継ぎ目なしに構築する PICOS 合成床板工法²⁸⁾ (図-10) や、工場で遠心成型され内面に凹凸を有する薄肉 PC 外殻を柱鉄筋の外側に建て込んだ後、その内部にコンクリートを充填して柱の構造体を構築するユニコラム S 工法²⁹⁾ (図-11) などがある。

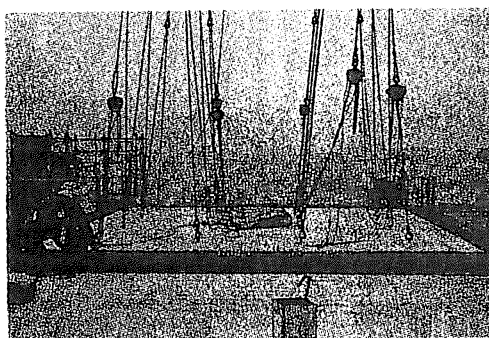


図-10 PICOS 合成床板工法

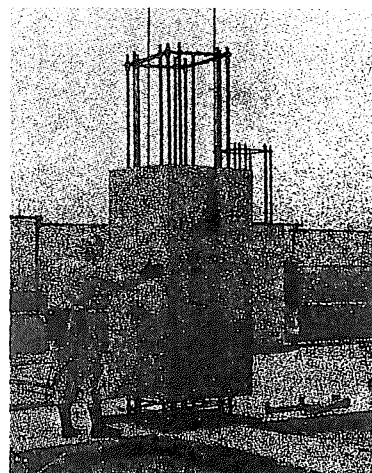


図-11 ユニコラム S 工法

3. RC 造超高層建物の耐震設計

(1) 目標とする耐震性能

RC 造超高層建物の目標とする耐震性能は、当該建物が集合住宅の場合には耐震等級³⁰⁾によって異なるが、最も基本的な等級 1 については以下の通りである。

- 建物の使用性の確保: 建物の供用期間中に 1 度は生じる可能性のある地震動 (レベル 1 地震動) に対して、構造部材は降伏せず、二次部材も被害を生じないこと。
- 建物の安全性の確保: 建設地に生じる可能性のある最大級の地震動 (レベル 2 地震動) に対して、構造部材の降伏は許容するが、架構は耐力低下を生じず、建物は倒壊しないこと。

RC 造超高層建物の設計では、上記の目標性能を達成するために、建物の使用性確保のための 1 次設計と安全性確保のための 2 次設計の 2 段階の静的耐震設計を行った上で、レベル 1 地震動とレベル 2 地震動に対する動的応答解析を行い、設計の妥当性を検証している。

(2) 静的耐震設計

静的耐震設計では、構造部材の断面寸法、配筋及び使用材料などを予め予備解析によって定めた上で、増分地震荷重に対する静的弾塑性解析を行い、その結果の 2 段階の地震時応力に長期荷重時応力を組合せて断面検定を行う。

1 次設計用地震力は、通常は、設計用ベースシャー係数を $C_B=Z \cdot R_t \cdot C_o$ (ここに、 Z : 地震地域係数、 R_t : 振動特性係数、 C_o : 標準せん断力係数で 0.2 以上) とし、層せん断力の分布形を A_i 分布として³¹⁾、必要に応じて予備応答解析結果に基づき補正を行う。2 次設計用地震力 (確認水平耐力) は、通常は、1 次設計用地震力の 1.5 倍以上の数値とし、レベル 2 地震動の最大応答に対して余裕のある設定を行う。

1 次設計では、増分地震荷重が 1 次設計用地震力に達した時の応力に対して、短期許容応力度に基づく断面検定を行う。2 次設計では、増分地震荷重が 2 次設計用地震力に達した時の応力か、或いは梁ヒンジメカニズム時の応力に対して、終局強度に基づく断面検定を行う。この時に、静的弾塑性解析結果の降伏ヒンジの発生状況が許容位置（梁端部、最上階柱頭、最下階柱脚、引張軸力を受ける外柱の端部、連層耐震壁の最下階脚部）であることを確認し、そうでなければ当該断面を見直す。また、2 次設計では、ヒンジ部材における降伏ヒンジの強度上昇や非ヒンジ部材における動的な応力変動、二方向地震力の影響などを考慮して、設計用応力に対する部材耐力の余裕度を適切に確保する。

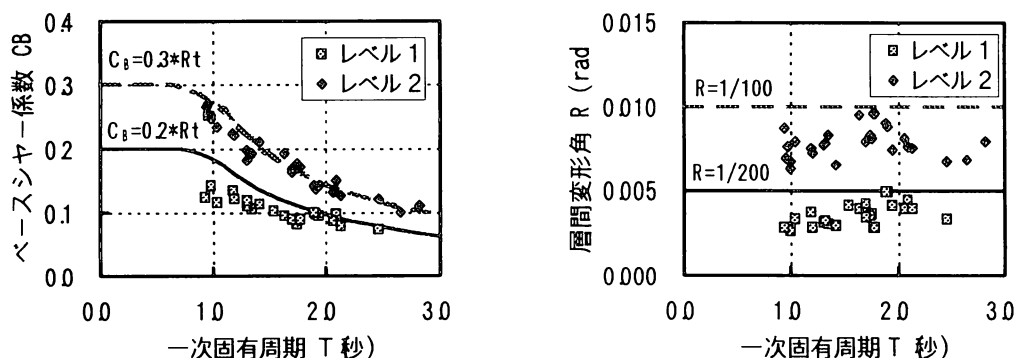
静的弾塑性解析では、建物を立体骨組モデルに置換して、梁は曲げ変形・せん断変形、柱は曲げ変形・せん断変形・軸方向変形を考慮し、柱梁接合部は剛域として取り扱う。各部材は、材端に弾塑性バネを有する線材とし、曲げ剛性は部材のひび割れと降伏を考慮したトリリニア型復元力モデル⁷⁾とし、せん断剛性は弾性とする。なお、柱の復元力モデルには、曲げモーメントと軸方向力の相関関係を考慮する。各階の床は、剛床と仮定するか、或いは床スラブの面内せん断変形を考慮する。

(3) 動的応答解析

入力地震動は、過去の地震記録波形（例えば 1968 年十勝沖地震の八戸港湾記録など）、建設地の地域性を考慮した模擬地震動³²⁾、解放工学的基盤面における加速度応答スペクトル³¹⁾に基づく模擬地震動などが用いられる。入力地震動の強さは、従来のレベル 1、レベル 2（例えば、東京では最大地動速度がレベル 1 で 25cm/s 以上、レベル 2 で 50cm/s 以上）³³⁾ のほかに、解放工学的基盤面における加速度応答スペクトルの大きさ³¹⁾などで定義される。

解析モデルは、通常は、建物の質量が各階の床位置に集中した曲げせん断型質点系が採用され、瞬間剛性比例型で 1 次振動に対して 3% の粘性減衰が仮定される。各層の復元力特性は静的弾塑性解析結果から求められ、せん断バネは武田モデル³⁴⁾などの Degrading Trilinear 型の復元力モデル、曲げバネは弾性と仮定されるのが一般的である。建設地の地盤が良好な場合は基礎固定と仮定されるが、地盤－基礎－上部構造の動的相互作用を考慮する場合は、基礎にスウェイバネとロッキングバネを考慮するか、地盤と基礎を多質点系で表す Penzien モデルなどを採用する³⁵⁾。建物が揺れる場合や制震構造とする場合には、上部構造を立体骨組でモデル化し、部材系の弾塑性応答解析³⁶⁾を行うことがある。

最大応答クライテリアは、レベル 1 地震動に対して層間変形角が 1/200 以下、層せん断力が 1 次設計用層せん断力以下または弾性限層せん断力以下、レベル 2 地震動に対して層間変形角が 1/100 以下、層せん断力が確認水平耐力以下、層塑性率が 2 以下、部材塑性率が 4 以下というのが一般的である。RC 造超高層建物の最大応答の例を図-12 に示す。



(a) 最大応答ベースシャー係数

(b) 最大応答層間変形角

図-12 曲げせん断型質点系モデルによる RC 造超高層建物の最大応答

4. RC 造超高層建物の事例紹介

RC 造超高層建物の事例として、下表に示す 5 件を紹介する。これらの建物はいずれも主要用途が集合住宅である。

表-1 超高層 RC 構造の事例

事例	建設地	階数 (地下・地上・塔屋)	構造種別	構造形式	使用材料の最大強度	
					Fc(N/mm ²)	主筋
1	埼玉県	B2-38-P2	RC	純ラーメン	80	USD685
2	東京都	B2-25-P1	RC	耐震壁併用ラーメン	42	SD390
3	滋賀県	B1-25-P2	RC、一部 SRC	ダブルチューブ	36	SD390
4	千葉県	B1-32-P3	RC	コア型トリプルチューブ	60	USD685
5	東京都	B2-29-P1	RC	制震構造	60	SD490

(1) 事例 1 (図-13)

本建物は純ラーメン構造であり、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートと USD685 の高強度鉄筋を使用している。本建物の施工では、柱にユニコラム S 工法、梁にハーフ PC 工法、床スラブに PICOS 合成床板、バルコニーにフル PC 板を使用し、基準階を現場打ち工法とした場合に比べて型枠面積を 95%削減している。

(2) 事例 2 (図-14)

本建物は一方向に耐震壁を併用したラーメン構造であり、超高層 RC 構造で連層耐震壁を採用した最初の案件である。連層耐震壁は厚さが 20~50cm であり、立体骨組モデルによる弾塑性応答解析を行って耐震安全性を検証している。

(3) 事例 3 (図-15)

本建物はダブルチューブ構造であり、短スパン梁には X 型配筋を採用している。外チューブと内チューブの間は、プレストレス入りハーフ PC 板を用いた合成床板で連結している。外チューブの柱の一部が 1、2 階で抜けるために、下層部を SRC 造としている。

(4) 事例 4 (図-16)

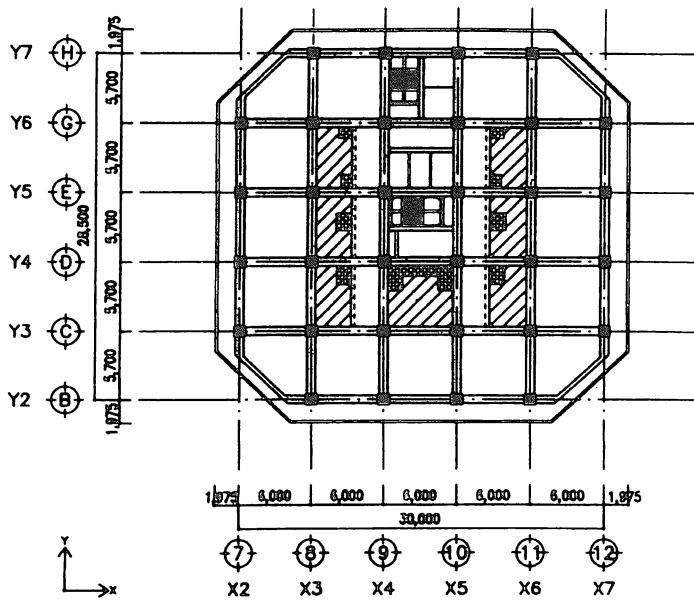
本建物はコア型トリプルチューブ構造であり、建物中央部にコアウォール、建物内部の居室ゾーンと水廻りゾーンの境界部に中チューブ、建物外周部に外チューブを配置している。中チューブの梁は床スラブの段差を利用した扁平梁とし、中チューブと外チューブを大型スラブで連結することにより、居室内に梁型が出ないように計画している。

(5) 事例 5 (図-17)

本建物は板状型の集合住宅であり、外周部に逆梁、建物内部にせいの小さな扁平梁を採用している。本建物はラーメン構造に制震デバイスを併用した制震構造であり、制震デバイスは建物北側の共用コア廻りに配置している。制震デバイスは、極低降伏点鋼 SLY120 を用いた間柱型鋼材ダンパーを使用しており、設計では立体骨組モデルによる弾塑性応答解析を行って、その制震効果を確認している。

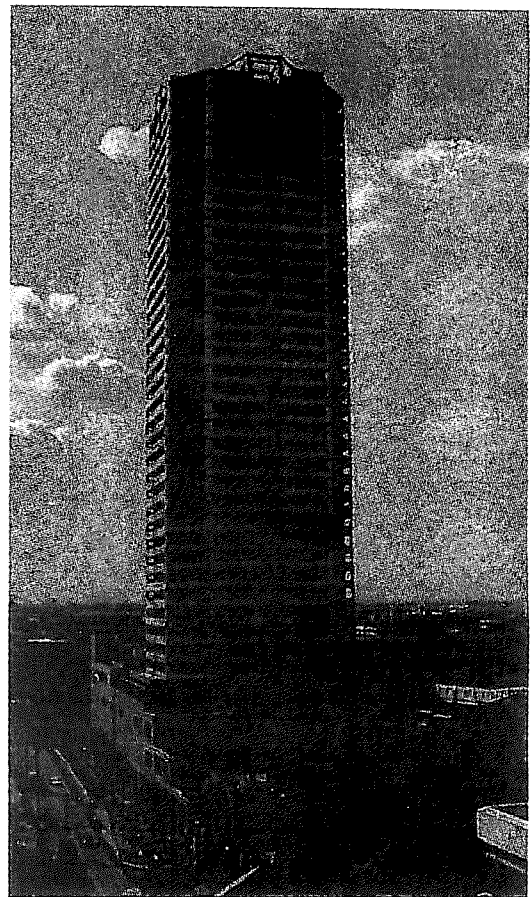
5. まとめ

RC 造超高層建物に関して、筆者が所属する建設会社での例を中心に概要を記述した。RC 造超高層建物は主たる用途が集合住宅であり、施主が有利に住宅を分譲するために高い商品性が求められている。そのために建設会社や材料メーカーは様々な技術開発に取り組んでおり、この分野の技術の歩みは日進月歩の感がある。

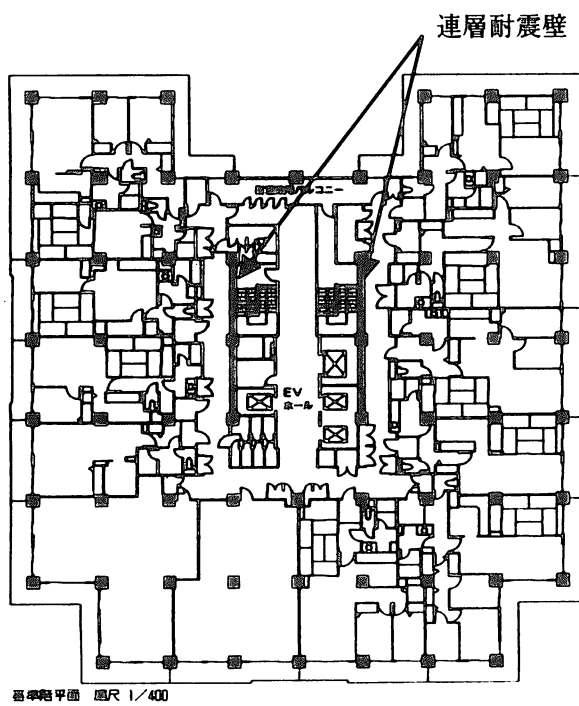


基準階構造伏図

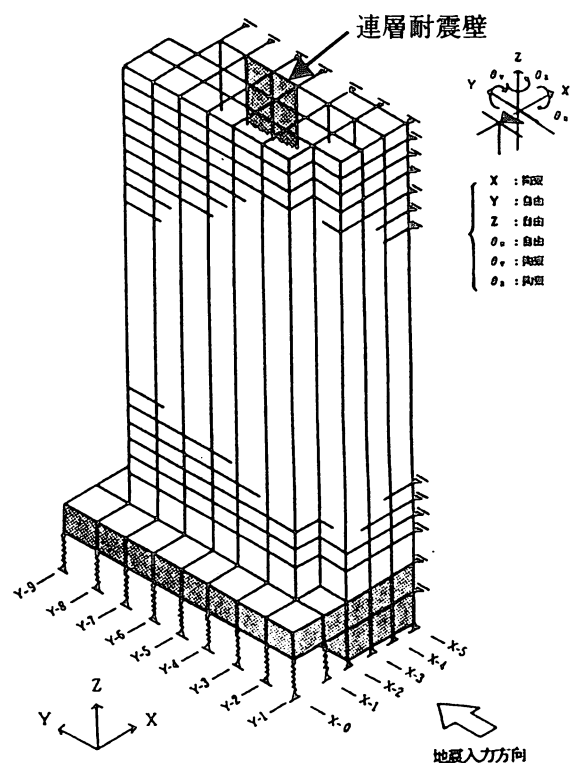
図-13 事例1 (純ラーメン構造)



建物外観写真



基準階平面図



立体骨組モデル

図-14 事例2 (耐震壁併用ラーメン構造)

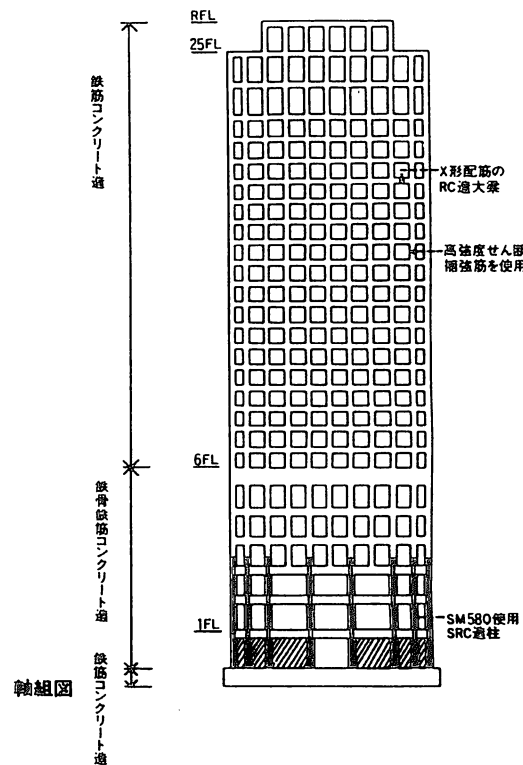
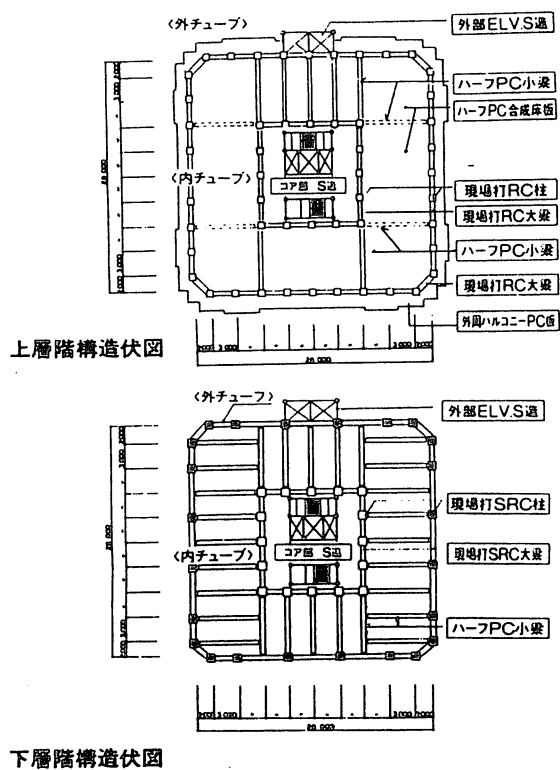
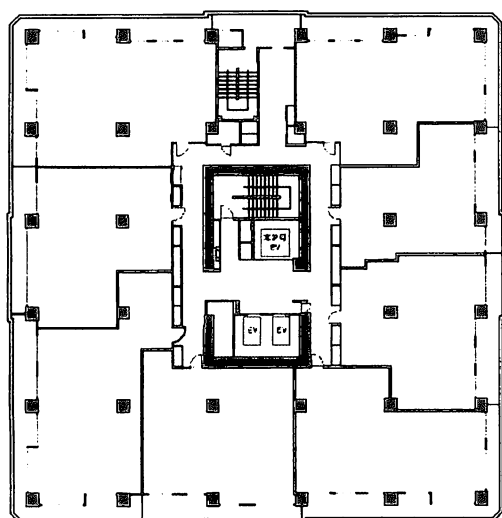
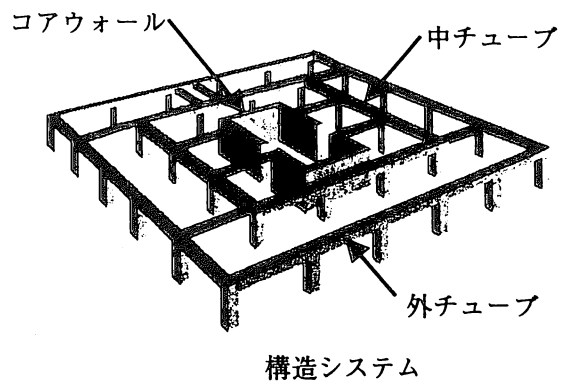


図-15 事例3 (ダブルチューブ構造)



基準階平面図



住戸断面

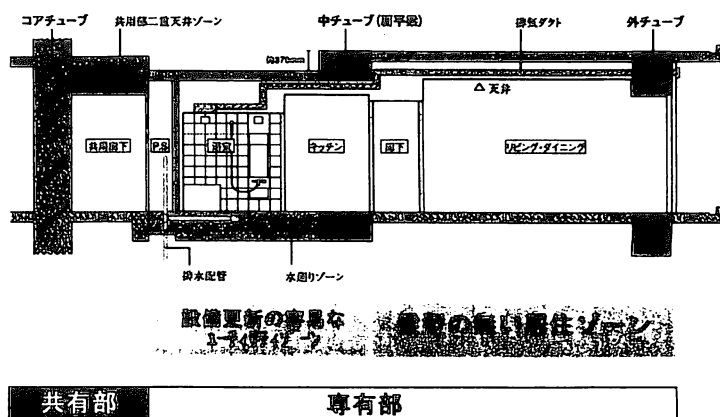
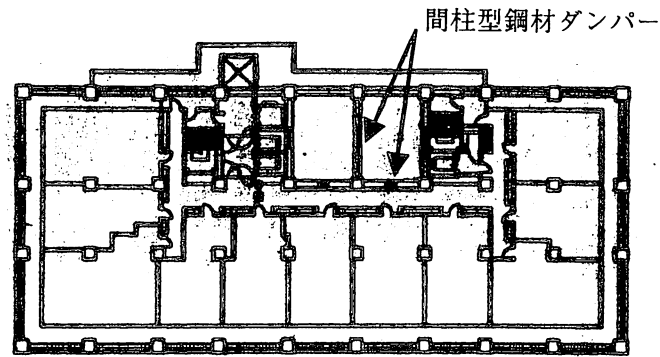
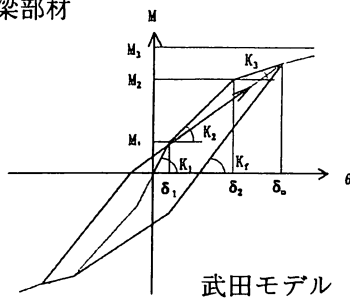


図-16 事例4 (コア型トリプルチューブ構造)



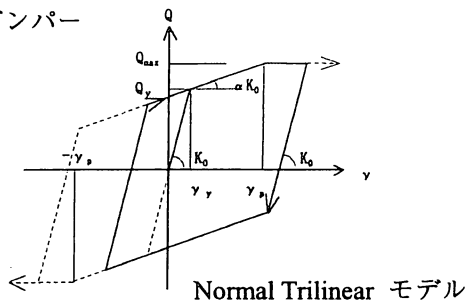
基準階平面

柱、梁部材



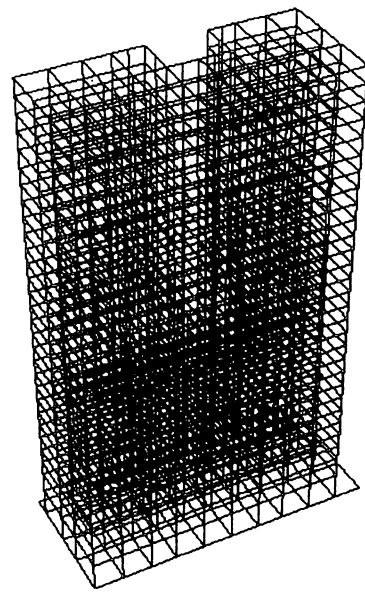
武田モデル

鋼材ダンパー



Normal Trilinear モデル

立体骨組モデルによる弾塑性応答解析



立体骨組モデル

レベル 2 地震動に対する最大応答変位

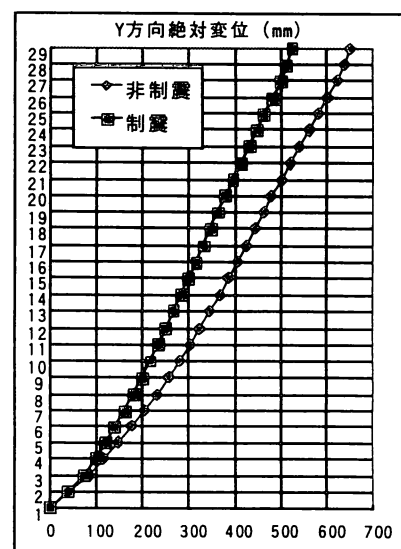


図-17 事例 5 (制震構造)

参考文献

- 1) 岡本公夫：鹿島建設椎名町アパート、コンクリート工学、Vol.40、No.1、2002年1月
- 2) 青山博之：高層鉄筋コンクリート建物の現状と今後の問題点、コンクリート工学、Vol.24、No.5、1986年5月
- 3) 日本建築学会：超高層RC造技術の変遷—より高く、より自由に、らびど第2号、1999年7月
- 4) 青山博之ほか：鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発、建築研究報告、No.139、国土交通省建築研究所、2001年2月
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 1997、1997年3月
- 6) 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、1997年7月
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法、1999年11月
- 8) 名和豊春：高ビークリット系セメントの現状、コンクリート工学、Vol.34、No.12、1996年12月
- 9) 大田 晃：超高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の現状、コンクリート工学、Vol.34、No.5、1996年5月
- 10) 森田武ほか：耐火性に優れた超高強度コンクリートの仕様と施工、コンクリート工学、Vol.39、No.11、2001年11月
- 11) 早川光敬：21世紀のコンクリート—超高強度コンクリートの実用化、2001年度日本建築学会大会材料施工部門パネルディスカッション資料、2001年9月
- 12) 黒瀬行信ほか：超高強度鉄筋コンクリート構造 ($F_c=120\text{N/mm}^2$) の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集（その1～3）2000年9月、（その4～7）2001年9月
- 13) 国土開発技術研究センター：平成4年度高強度鉄筋分科会報告書、建設省総合技術開発プロジェクト—鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発、平成5年3月
- 14) 別所佐登志、角陸純一：鉄筋継手の種類と力学性状、コンクリート工学、Vol.29、No.12、1991年12月
- 15) 塩屋俊幸ほか：Tヘッド工法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.3、2000年
- 16) 渡辺郁夫ほか：高強度マルファーズを用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991年9月
- 17) Iyengar H., “High-Rise System Developments in Concrete”, Analysis and Design of High-Rise Concrete Buildings, SP-97, American Concrete Institute, 1985
- 18) 黒瀬行信ほか：超高強度鉄筋コンクリート造架構の構造特性（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994年9月
- 19) 小川雄一郎ほか：短スパン梁を有する超高層鉄筋コンクリート造の耐震設計に関する研究（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年10月
- 20) 河内武ほか：高強度鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部の挙動に関する実験的研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月
- 21) 神野靖夫ほか：高強度鉄筋コンクリート内部柱・梁接合部の挙動に関する実験的研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1991年10月
- 22) 中島秀雄ほか：RCコアウォールシステムの実用化に関する研究（その1～4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992年8月
- 23) 熊谷仁志ほか：RCコアウォールを用いた高層事務所ビル— $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートの施工、コンクリート工学、Vol.32、No.6、1994年6月
- 24) 寺田岳彦ほか：鉄筋コンクリート造建物用の履歴型制震架構の開発（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1998年9月
- 25) 熊谷仁志ほか：鉄骨梁および鋼材ダンパーで連結された連層耐震壁架構に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、1999年
- 26) 岩井武夫ほか：柱芯鉄筋を用いた高層RC建物の施工、コンクリート工学、Vol.35、No.2、1997年2月
- 27) 中澤春生ほか：梁端埋設型仕切材を用いた高強度・高流動コンクリート打ち継ぎ工法の開発、清水建設研究報告、Vol.70、

1999 年 10 月

- 28) 高田博尾、松崎育弘：薄型シャコッターによる合成接合面の設計に関する研究－大型ハーフ PC 合成床板工法に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第 403 号、1989 年 9 月
- 29) 香田伸次ほか：外殻プレキャスト RC 造柱・梁部材の構造性能（その 1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1995 年 8 月
- 30) 国土交通省住宅局住宅生産課：日本住宅性能表示基準・評価方法基準の改正について、ビルディング・インター、2001 年 8 月
- 31) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001 年版建築物の構造関係技術基準解説書、平成 13 年 3 月
- 32) 石井透、佐藤俊明：建設地において考慮する地震像に基づく設計用地震動策定法、日本建築学会構造系論文集、第 462 号、1994 年 8 月
- 33) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について、ビルディング・インター、1986 年 6 月
- 34) Takeda, T. et al., “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes”, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.96, No.ST12, December 1970
- 35) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、1996 年 4 月
- 36) 小谷俊介：RC 造建築物の地震応答解析の現状と問題点、コンクリート工学、Vol.31、No.8、1993 年 8 月