

Super HRCシステム-超々高層RC住宅の開発 高性能RC造超高層住宅の構造



和泉 信之*1

大井 貴之*1
千葉 脩*2

概 要

「Super HRCシステム」は、21世紀の住まいとして、フレキシブルな住まい、安心できる住まい、長寿命の住まいをテーマに、高品質・経済性・短工期を実現する「高性能RC造高層住宅システム」である。

住空間の自由度を高めるため、骨組形式は3タイプの異なる性格を持たせたフレームから構成している。剛なセンター・フレームのまわりに、無柱・無梁の住戸ゾーンを支持する開放的なアウター・フレームを束ねるように配置している。床下配管スペースやバリアフリー化のため、床スラブは段差付き大型合成スラブとしている。

耐震安全性を向上させるため、柱や梁には高強度材料を用いるとともに、1階の柱は、帯筋と鋼管で二重拘束した鋼管RC柱としている。さらに、センター・フレームには、エネルギー吸収能力が高い制振デバイスをRC柱の中間に取り付けた制震柱を配置している。また、耐久性を向上させるため、高強度コンクリートを用い、主要な構造部材には、プレキャスト部材を用いて品質を安定化させて向上させている。

埋立地盤の場合には、基礎は、外周部の壁杭と壁杭の間を鋼製継手で接合することにより、通常の杭に比べて、水平剛性と強度が極めて高いボックス型連壁杭としている。

居住性や安全性に優れた住まいを経済的に実現するため、高強度RC造工法を採用している。さらに、短工期で建設するため、プレキャスト部材と現場打ちRC部材を使い分けるプレキャスト複合化工法を採用している。

DEVELOPMENT OF “*Super HRC SYSTEM*”

SUPER HIGH PERFORMANCE RC HIGH-RISE HOUSING SYSTEM

Nobuyuki IZUMI*1

Takayuki OHI*1

Osamu CHIBA*2

“*Super HRC System*” is a highly performed high-rise reinforced concrete housing system that achieves high quality, cost-effectiveness and a shorter construction period. As a residence for the 21st century, the theme for this new housing system emphasizes flexible planning, safe housing and longer lifetime housing.

The structure of this housing system is composed of three different frames to improve the flexibility of the housing space. The outer frames that support the housing unit zones without any columns and girders are bundled around the rigid central frames. Floor slabs are consisted of large-scale composite slabs with differed levels so that piping spaces below floors and barrier-free system can be secured.

In order to improve the earthquake-proof safety, high strength materials are used for columns and girders, and the steel tube RC columns that are doubly constrained by hoops and steel tubes are placed on the first floor. In addition, damping control columns with the high ability for energy-absorption are installed between columns on central frames. In order to improve the durability of the structure, high-strength concrete is used, and main structural members are consisted of precast members so that the quality of the structure can be stabilized.

As the foundations for reclaimed ground, the box-type wall foundations with extremely high horizontal rigidity and strength are laid while each wall foundation is connected with steel splices between the walls.

To achieve economic housing which demonstrates good habitability and safety, the method of using high strength reinforced concrete is adopted. In addition, to construct this housing system with a short term of works, the complex method of properly using precast concrete members and cast-in-place concrete members is adopted.

*1 構造設計部 *2 技術研究所

*1 Structural Engineering Dept. *2 Technical Research Institute

Super HRCシステム-超々高層RC住宅の開発

高性能RC造超高層住宅の構造

和泉 信之*1
大井 貴之*1
千葉 脩*2

1. はじめに

最近、超高層住宅の建設件数が増加しているが、その半数以上がRC造である。RC造による超高層建築物は、鉄骨造に比べて風揺れが小さいなど居住性や経済性に優れており、住宅には適した構造である。しかし、従来のRC造の材料を用いたラーメン構造では、柱間のスパンが小さくなるので、居室配置によっては柱や梁が出っ張ってくるのがあった。そのため、住戸計画が制約されることや柱梁断面が大きすぎるなどが指摘されてきた。また、現場打ちRC造は鉄骨系工法に比べて現場作業量が多いため、躯体工期が長くなり、30階以上の超高層住宅では、工期が課題とされてきた。

居住性や経済性などRC造の長所を生かしながら、住戸計画の自由度を増し、さらに工期短縮を実現する超高層住宅の新しい構造システムが「Super HRCシステム（スーパーエイチアールシーシステム）」である。本報では、システムの主な特長について説明する。なお、本システムには、制振と免震という2つのシステムがあるが、ここでは、住宅としては最高高さとなる60階クラスの制振システムについて述べることにし、免震システムについては別途紹介したい。

2. Super HRCシステムの概要

「Super HRCシステム」は、21世紀の住まいとして、フレキシブルな住まい、安心できる住まい、長寿命の住まいをテーマに、高品質・経済性・短工期を実現する「高性能RC造超高層住宅システム」である。中ボイド形式の高層住宅の例として、基準階の平面図を図-1に、住戸ゾーンの略断面図を図-2に示す。ウォーターフロントに計画された50～60階建クラスの骨組の概観イメージを図-3に示す。

(1) フレキシブルな住まい

住空間の自由度を高めるため、骨組形式は3タイプの異なる性格を持たせたフレームから構成している。中央の吹き抜け部を取り囲む骨組は、部材断面を増大するとともに、間柱を設置して、構造体全体の核となるセンター・フレームを形成している。センター・フレームのまわりには、無柱・無梁の住戸ゾーンを支持するアウター・フレームを配置している。アウター・フレームでは、居室の眺望を良くするため、外周には梁せいの小さなワイドビームを用いている。また、平面の四隅には、形態が自由なサブ・フレームを設けて、一段と眺望性が優れた居

室を可能としている。剛なセンター・フレームのまわりに、開放的なアウター・フレームやサブ・フレームを束ねるように配置しており、この骨組形式をバンドル・フレームと呼んでいる。

設備の更新性や可変性に配慮した床下配管スペースや居室内のバリアフリー化のため、床スラブには段差を設けている。さらに、居室には梁型が出ないように戸境方向の梁を無くして、床スラブはひび割れを制御するため、プレストレスを導入した段差付き大型スラブとしている。

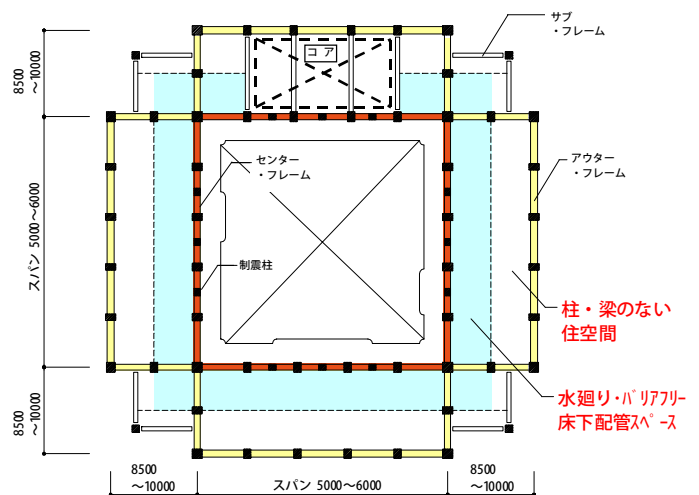


図-1 中ボイド形式の基準階平面図

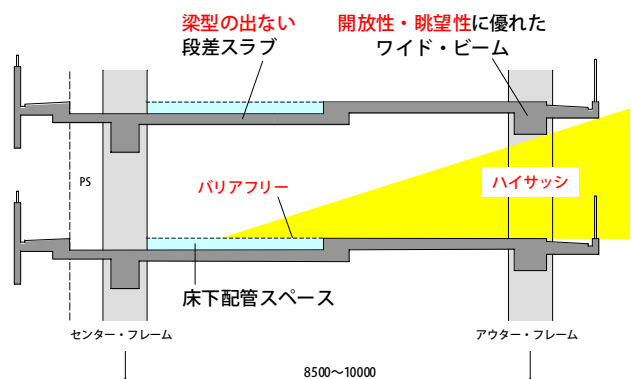


図-2 住宅ゾーンの躯体断面図

*1 構造設計部 *2 技術研究所

(2) 安心できる住まい

耐震安全性を向上させるため、柱や梁には高強度材料を用いるとともに、1階の柱は、帯筋と鋼管で拘束したRC柱（以下、鋼管RC柱と呼ぶ）としている。さらに、センター・フレームに配置した間柱には、地震時にエネルギー吸収能力が高い制震デバイスをRC柱の中間に取り付けた複合部材（以下、制震柱と呼ぶ）を採用している。

地震時に軟弱な砂地盤が液状化することは知られてきたが、ウォーターフロントなどの埋立地盤では、超高層建築物を支える基礎の耐震安全性の確保は最も重要なことである。軟弱な埋立地盤に最適な基礎は、地下連続壁杭（以下、連壁杭と呼ぶ）である。外周部の壁杭と壁杭の間を鋼製継手で接合することにより、通常の杭に比べて、水平剛性と強度が極めて高いボックス型連壁杭としている。

(3) 長寿命の住まい

住宅に長く住むことができるように、構造体のコンクリートには高強度コンクリートを用いて、耐久性を向上させている。また、鉄筋のかぶり厚を増すとともに、鉄筋の組立て精度を確保するため、主要な構造部材には、プレキャストコンクリート部材（以下、PCa部材と呼ぶ）を採用している。

(4) 住まいの経済性・建設工期

居住性や安全性に優れた住まいを経済的に実現するため、高強度RC造工法を採用している。RC造が経済性に優れていることは、最近数年間に高層住宅の半数以上がRC造で建設されていることから示唆される。本システムでは、構造コストは鉄骨系工法に比べて、20～30%程度低減が可能である。

RC造の構造体を短工期で建設するため、構造体の構築には、PCa部材と現場打ちRC部材を使い分けるプレキャスト複合工法を採用している。現場作業量や揚重工程に配慮した工区分けにより、基準サイクル工程は、1フロアあたり4日間が可能であり、鉄骨系工法とほぼ同等の工期が実現できる。

3. 高強度RC造工法

(1) 高強度RC造

構造体は季節風や台風による風揺れに強く、日常の居住性に優れた剛性の高いRC造としている。柱や梁は、図-4に示すように、高強度コンクリートと高強度鉄筋を使用した高強度RC造である。コンクリートには、設計基準強度で最大100N/mm²の高強度コンクリートを使用する。鉄筋では、主筋には降伏点で最大685N/mm²までの太径異形鉄筋を、横補強筋には溶接閉鎖形式あるいはスパイラル形式の高強度鉄筋を用いる。高強度主筋の継手には、信頼性の高い機械式継手を、定着には、機械式プレート定着を用いている。

高強度RC造による骨組の構造性能は、構造実験および施工実験により検証している。十字型柱梁部分骨組による構造実験では、梁降伏型降伏機構が形成され、層間変形角1/25程度まで耐力低下のない変形性能が確認さ

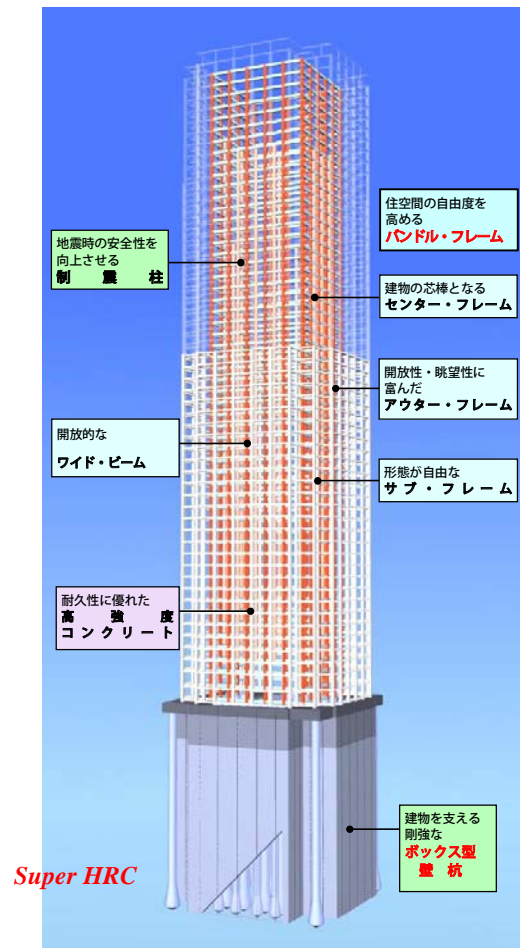


図-3 「Super HRCシステム」概観

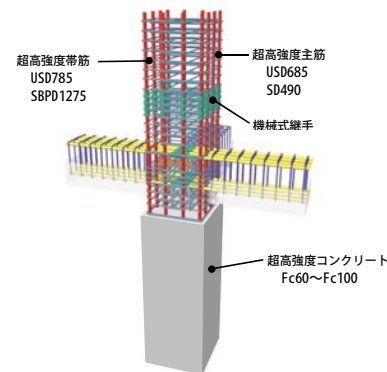


図-4 高強度RC造柱

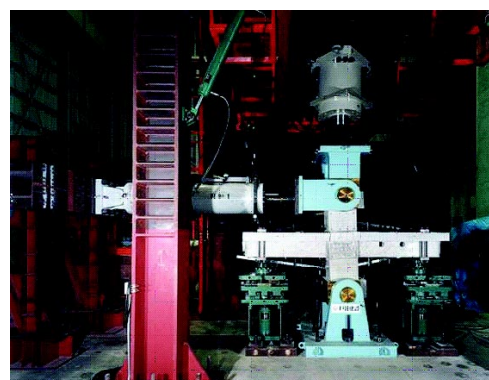


図-5 高強度RC造骨組の構造実験

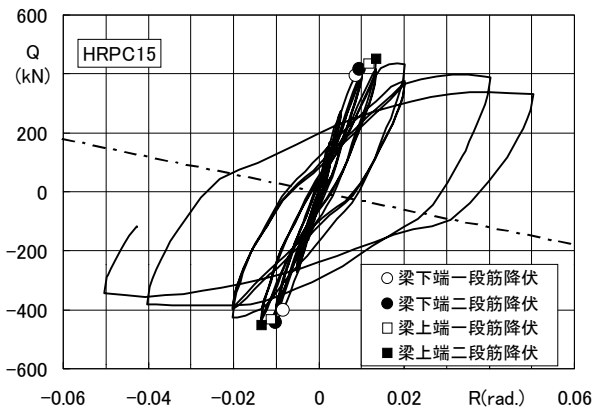


図 6 高強度 RC 造骨組の荷重 変形関係の例

れている(図 5、6)。地震後に大規模な補修を行うことなく、使用し続けるには、地震動のレベルに応じた残留ひび割れなど損傷レベルを評価することが必要になる。構造実験では、大変形時の保有性能とともに、地震時の想定変形における部材のひび割れなど損傷状況を確認している。また、Fc100クラスのコンクリートには、混和材としてシリカフェームを用いている。実機製造した高強度コンクリートを使用して模擬柱を施工し、コア強度を求めて調合設計や強度管理に必要なS値(標準養生28日圧縮強度とコア91日圧縮強度の差)を評価している(図7)。

(2) 鋼管 RC 柱

1階の柱には、Fc100クラスのコンクリートと685N/mm²クラスの太径異形鉄筋を使用している。この柱は、帯筋とともに鋼管によりコンクリートを二重拘束した高強度鋼管 RC 柱として、高軸力下における強度および変形性能を向上させている。鋼管の有無による高強度 RC 造柱の荷重 変形関係の比較(図8)を見ると、鋼管の拘束効果により曲げ圧縮域の劣化が抑制され、部材角1/20まで荷重低下のない優れた変形性能が確認できる²⁾。さらに、高軸力下の柱の軸方向変形を見ると、鋼管が無い場合に比べて、鋼管 RC 柱は圧壊による軸ひずみの累積が抑制できている。

4. 制震柱工法

センターフレームに配置した制震柱は、図9に示すように、柱の中間に制振デバイスを組み込んだ複合部材である。制振デバイスには、低降伏点鋼を用いたタイプと、粘弾性体を用いたタイプがあり、対象とする外乱に応じて選択することができる(図10)。3タイプとも地震を対象としているが、タイプは暴風も対象としている。

高強度 RC 造では、初期剛性が高いので、台風や小地震に対しては揺れが小さい。大地震に対しては、梁端部の曲げひび割れの発生により梁の曲げ剛性が低下し、等価周期がのびることにより、地震入力が低減される。また、高強度主筋の使用により、部材の降伏変形角が大きくなるので、普通強度の主筋を用いた部材に比べて、大



図 7 高強度コンクリートの施工実験

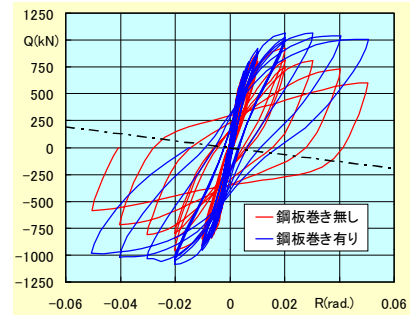


図 8 鋼管 RC 柱の荷重 変形関係の例

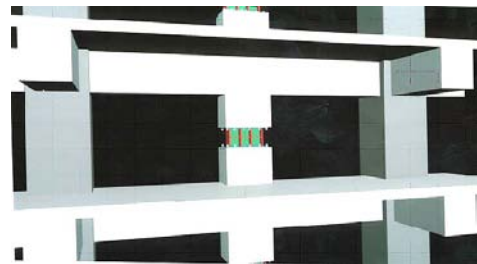


図 9 制震柱



(a)タイプ 対地震 RC + 低降伏点鋼
(b)タイプ 対地震 (ボルト接合)
(c)タイプ 対風・地震 (ボルト接合)
取替方法(溶接接合)(ボルト接合)(ボルト接合)

図 10 制震柱のタイプ

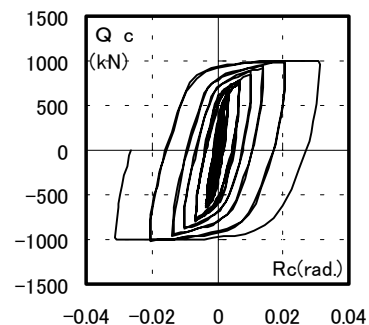


図 11 制震柱の荷重 変形関係の例

地震時の許容層間変形角における部材の損傷を軽減することができる。その反面、部材の塑性変形量が少ないため、履歴減衰は減少する。そこで、制振デバイスの付加減衰を与えることにより、大地震時の最大応答変形を低減し、部材の損傷を制御することが可能となる。

制震柱は実大試験体による水平加力実験により、大地震時の繰り返し変形に対して優れたエネルギー吸収能力を検証している³⁾ (図-11)。実験では、大地震の想定変形を数回与えて制振効果を確認しており、地震後の制振デバイスの取り替えは不要と考えている。不測の事態によるデバイス交換も考慮して、接合方法は溶接接合、または高力ボルト接合としている。制震柱による地震時の層間変形角の低減効果は、設置本数や地震動により異なるが、概ね20～30%程度である。

5. プレキャスト複合化工法

R C造部材の品質確保および工期短縮のため、躯体構築工法としてプレキャスト複合化工法を採用している⁴⁾。プレキャスト複合化工法は、柱、梁、床スラブなどPCa部材を組み立て、接合部の鉄筋を接合して、現場打ちコンクリートを打ち込み、骨組を一体化する工法である。本工法の施工手順を図-12に示す。本工法は、かつてのオールプレキャスト工法のように、全部材へPCa部材を使用することを前提とはしていない。建築物の条件に応じて適材適所にPCa部材を採用し、現場打ち部材と混用させ、施工性と製造コストのバランスを考慮して、お互いの長所を引き出そうとする点に特長がある。

柱や梁の接合部では、鉄筋は信頼性の高い継手などにより連続しており、適切な接合部の応力伝達機構を確保することにより、現場打ち同等の構造性能が実現できている⁵⁾。

柱は、床上から梁下までの柱部分をPCa部材とし、主筋継手にはスリーブ継手を使用している。梁は、床スラブを除いた部分をPCa部材とし、主筋継手には機械式継手あるいは溶接継手を使用している。梁無しの居室の床は、段差の付いたプレストレスト合成スラブとしている。大型のT型、あるいは逆T型のリブ付きPCa床スラブを用いて、緊張力をプレテンション形式により導入している。

段差付き床スラブには、常時の荷重を支持するとともに、住宅としての上下階の遮音性能が必要である。そのため、実大規模の床スラブ試験体を施工して、様々な条件下における重量衝撃音測定試験を行い、その遮音性能を検証している (図-13)。



図-13 実大大型スラブの遮音・施工実験

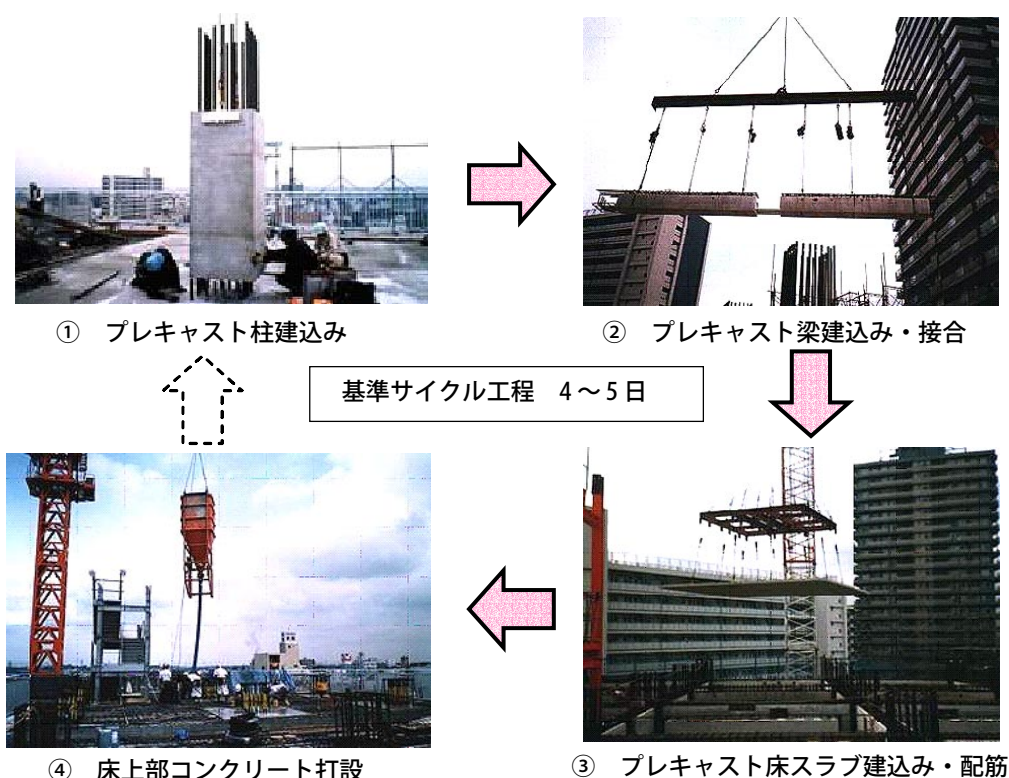


図-12 プレキャスト複合化工法の施工例



① 掘削



② 鉄筋カゴ組立・壁間継手



④ コンクリート打設



③ 鉄筋カゴ建込み

図 - 14 連壁杭の施工状況例

6. 地下連続壁杭工法

軟弱地盤に建設する場合には、連壁杭と杭を併用した複合基礎を用いている。連壁杭は、高層部直下の外周部に、杭は内部の柱下に配置する。基礎に作用する地震力の大部分は、杭に比べて剛性の高い連壁杭に負担させている。連壁杭は、壁エレメントごとに施工されるが、各壁エレメントは鋼製継手により接合することができる。接合された連壁杭は、全体が一個のボックス型の基礎として挙動するので、地震時に上部構造の重量を支え、軟弱地盤の大きな揺れに抵抗できる信頼性の高い構造形式である（図 - 14）。

7. 今後に向けて

21世紀の住まいとして、フリープラン超高層住宅への期待は高まってきている。このニーズに応えることのできる構造システムとして、「Super HRCシステム」を開発した。本システムは、東京都臨海地域に建設される地上54階建および45階建のツインタワー形式の超高層住宅に採用され、現在施工中である。

今後は、より自由度の大きい高品質の超高層住宅を提供できるように、制振・免震構造システムの充実を目指してゆきたい。

[謝辞]

本システムの開発、設計についてご指導いただいた白井建築部長はじめ本社建築設計統轄部、建築技術統轄部、建築工事統轄部並びに東京支店建築部のプロジェクト・チームの皆様には深甚なる謝意を表します。

[参考文献]

- [1]和泉信之ほか：プレキャスト鉄筋コンクリート造の柱梁部分架構に関する実験研究（その8、9）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000年
- [2]和泉信之ほか：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート構造の柱部材に関する実験研究（その3、4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2000年
- [3]和泉信之ほか：低降伏点鋼パネルを組み込んだRC柱の耐震性能に関する実験的研究、日本コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.3、2000年
- [4]和泉信之：プレキャスト複合化工法による高層RC造住宅の設計と施工、日本建築学会関東支部シンポジウム資料、1997年
- [5]和泉信之：接合部要求性能と設計用外力、プレキャストコンクリート構造の構造設計の問題点、日本建築学会大会RC構造PD資料、2000年