

# 超高層住宅の構造設計の分析－耐震・制震・免震の比較－

野 路 利 幸\*・山 中 久 幸\*\*・山 岸 邦 彰\*\*

## Analysis of Structural Design for High-rise Apartment Buildings – Comparison of Earthquake Resistant System, Structural Control System and Base-isolated System –

Toshiyuki NOJI, Hisayuki YAMANAKA and Kuniaki YAMAGISHI

High-rise apartment buildings began to be built from the 1970's, and many have been built around big cities. In this study the database about the structural design of these buildings was compiled, and the basic structural characteristics, the structural materials, the earthquake resistant designs and the time-series behavior of these terms were analyzed. The structure design method changed with the times according to the analysis results. In addition, the characteristics of the design method of earthquake resistant system, structural control system and base-isolated system were obtained.

### 1. はじめに

近年、首都圏や阪神地域をはじめとして、大都市圏では数多くの超高層住宅が建設されている。これらの超高層住宅の構造は、構造材料の発展、構造設計法の変化、社会ニーズの変化などの要因により、初期段階からこの数十年の間で大きく変化してきた。特に、高強度鉄筋コンクリート構造（以下、高強度 RC）の実用化や免震・制振（震）構造の開発は、超高層住宅の構築方法や構造性能に大きな影響を及ぼした。超高層住宅の建物概要および構造設計概要は、(財)日本建築センター発行「ビルディングレター」の超高層建築物性能評価・評価シートに掲載されている<sup>1)</sup>。筆者らは本シートをもとに超高層住宅構造設計情報データベースを作成し、建物の基本構造特性、耐震設計法およびこれらの時系列変化の調査・分析を行ってきた<sup>2)</sup>。他方、和泉らは高層 RC 造建物の分析を行い、特に RC 造超高層住宅について使用材料や構造特性の特徴を報告している<sup>3)</sup>。本報は、これらの研究をふまえ、耐震・制震・免震構造の比較を中心に構造特性を論じる。

### 2. 超高層住宅構造設計情報データベース

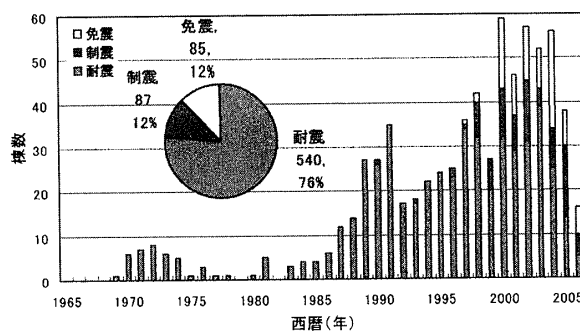


図1 超高層住宅の推移（設計完了時）

\* 建築工学科建築学専攻 \*\* 三井住友建設株式会社

対象建物は高さ 60m（1980 年以前は 45m）を超える集合住宅で、性能評価機関である（財）日本建築センター（BCJ）、（財）日本建築総合試験所（GBRC）、（株）日本 ERI、他で評定・評価を受け、ビルディングレターに性能評定・評価シートが掲載されたものである。対象期間は、1969 年 9 月～2006 年 10 月（評定・評価完了年月による）である。棟数は耐震構造が 540 棟、制震構造が 87 棟（居住性用は除く）、免震構造が 85 棟の計 712 棟である。なお、複合用途の場合は、共同住宅部分が地上階数の半数以上のものを対象とした。図 1 に建物数（棟数）の時系列変化を示す。日本の超高層住宅は 1970 年ごろから始まり、1980 年代半ばからバブルの波に乗って急激に増加した。その後一時減少したが、都市再生や都心回帰の流れの中で近年大幅に増加し、約 50 棟／年が評価を完了している。構造方式別（耐震・制震・免震）では、1995 年兵庫県南部地震以降、制震・免震が急増し、近年では半数程度がこれらの構造方式になっていることが注目される。

### 3. 超高層住宅全般の設計情報の分析

図 2 に軒高と等価アスペクト比（軒高（H）を基準階面積の平方根（ $\sqrt{A}$ ）で除したものとして定義）の関係を示す。等価アスペクト比はほぼ 2～6 の間に分布し、軒高が高くなると大きくなる傾向を示す。両者の関係は  $\alpha=0.022H+1.20$  で近似される。構造種別（図 3）は、全体では RC 造が 70%を占め、次いで SRC 造、S 造となっている。CFT 造も 4%用いられている。構造種別は時期によって大きく変化し、初期に多く用いられていた S 造・SRC 造は大幅に減少している。他方、高強度 RC の実用化によって 1980 年代後半から RC 造が大幅に増加し、最近ではほとんどが RC 造となっている。柱最大コンクリート強度  $F_c$ （図 4）は、全体では 37～48N/mm<sup>2</sup> と 49～60N/mm<sup>2</sup> を併せると 7 割を占める。 $F_c$  は年毎に大幅に上昇しており、1980 年代後半から 1990 年代前半は 28～36N/mm<sup>2</sup> と 37～48N/mm<sup>2</sup> が主であったが、それ以降は 49～60N/mm<sup>2</sup> が大幅に増加している。また、最近では 60N/mm<sup>2</sup> 超が増加する中で 100N/mm<sup>2</sup> 以上の超高強度コンクリートも多く用いられ

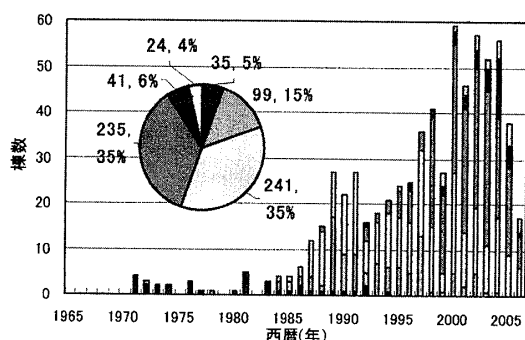
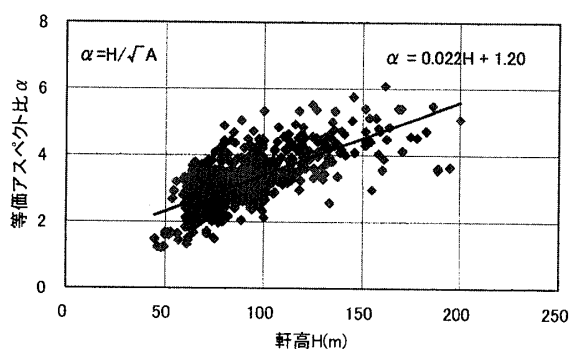


図 4 柱最大コンクリート強度  $F_c$  の推移

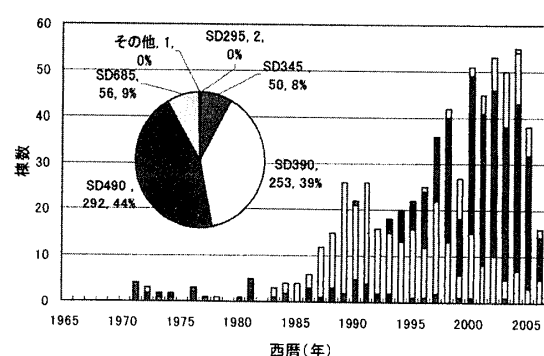
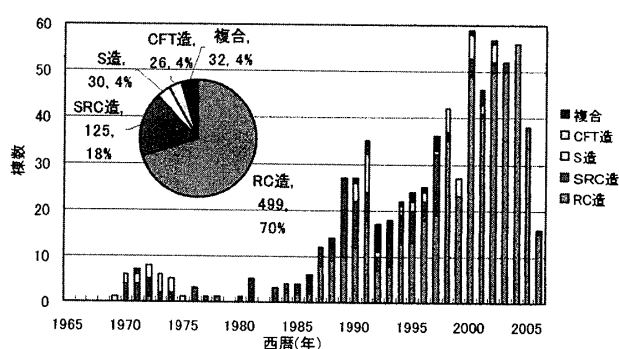


図 5 柱主筋最大強度の推移

るようになってきた。なお、重力単位系による  $F_c$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) は 1/10 を乗じて SI 単位系 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) に読み替えた。柱主筋最大強度 (図 5、芯鉄筋も含む) は、全体では SD490 と SD390 の両者で 80% 強を占める。しかし、年毎に大きく変化しており、1980 年代前半までは SD345 (当時は SD35) が主であったが、1980 年代後半～1990 年代前半は SD390 となり、それ以降は SD490 が大きな割合を占める。また、最近では SD685 の使用も増え、高強度化が進んでいる。

#### 4. 制震・免震構造の設計情報の分析

制震構造に用いられている制震ダンパーの種類 (図 6) は、低降伏点鋼が約 7 割と最も多く、次いでオイルダンパー、低降伏点鋼と粘性または粘弾性体の併用、粘性壁、粘弾性体の順である。低降伏点鋼の材質 (図 7) は、LYP235 系、LYP100 系がほぼ半々で、形態は間柱型が多く用いられている。免震構造に用いられている積層ゴムの最大径 (図 8) は、1,500mm が最も多く、1,400mm

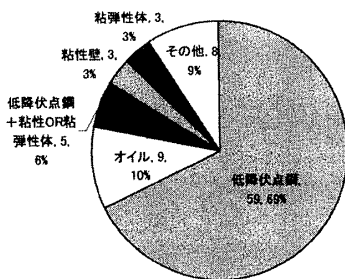


図 6 制震ダンパーの種類

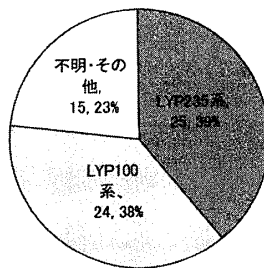


図 7 低降伏点鋼の材質

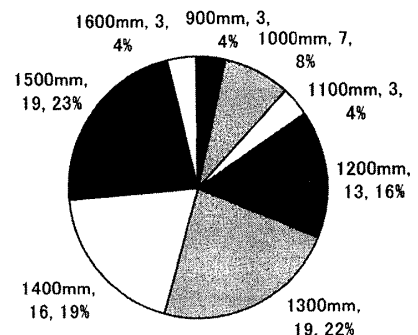


図 8 積層ゴム最大径

長期最大面圧 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

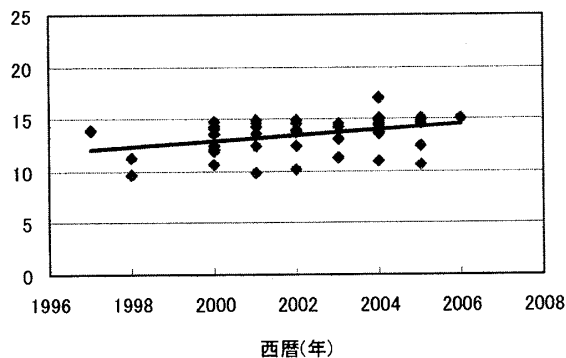


図 9 長期最大面圧の推移

固有周期  $T$  (s)

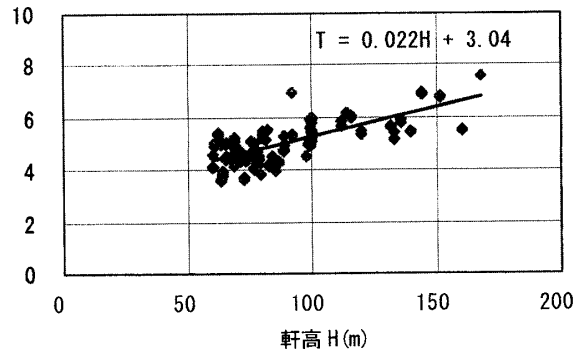


図 10 軒高－L2 固有周期の関係

免震層最大変位  $d$  (cm)

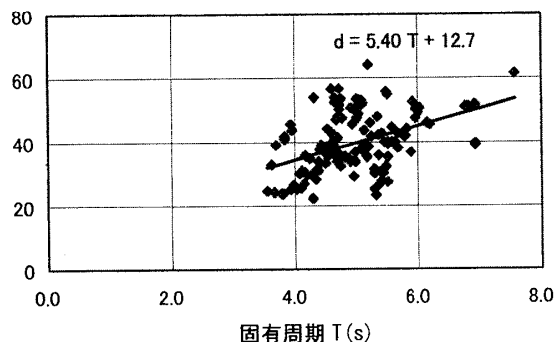


図 11 L2 固有周期－免震層最大変位の関係

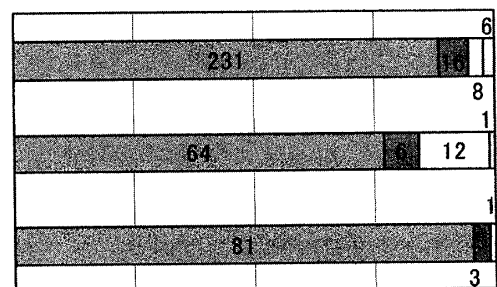


図 12 各構造方式の構造種別

以上の大径を使用した建物がほぼ半数を占める。積層ゴムの長期最大面圧（図 9）はほぼ  $10\sim15\text{N/mm}^2$  に分布し、年ごとにやや大きくなる傾向にある。軒高とレベル 2 または極稀（以下、L2）地震時固有周期の関係（図 10）は、軒高が高くなるにつれて L2 地震時固有周期が大きくなり、 $T=0.022H+3.04$  で近似される。なお、L2 地震時固有周期は、ダンパー剛性の考慮や上部構造の変形状態が不明であること等に留意しておく必要がある。L2 地震時固有周期と免震層の最大応答変位の関係（図 11）は、入力地震動レベルの違いもあってバラツキは大きい、周期が長くなるにしたがって応答変位は大きくなる傾向を示している。

## 5. 「耐震・制震・免震」の構造設計の比較

兵庫県南部地震以後、超高層住宅に制震・免震構造が本格的に適用されることになった 1997 年以降について「耐震・制震・免震」の比較・検討を行う。対象建物数は耐震構造が 261 棟（61%）、制震構造が 83 棟（19%）、免震構造が 85 棟（20%）の合計 429 棟である。

図 12 に各構造方式の構造種別を示す。全般的に RC 造が多く、特に免震はほとんどが RC 造である。これに対し、制震は他の構造方式に比べて RC 造が少なく、CFT 造や SRC 造が多い。階数分布（図 13）は耐震・免震が 20～30 階が主であるのに対して、制震は 30 階程度を主に幅広く分布している。軒高と 1 次固有周期（免震は免震層固定時）の関係（図 14）を比較すると、両者の

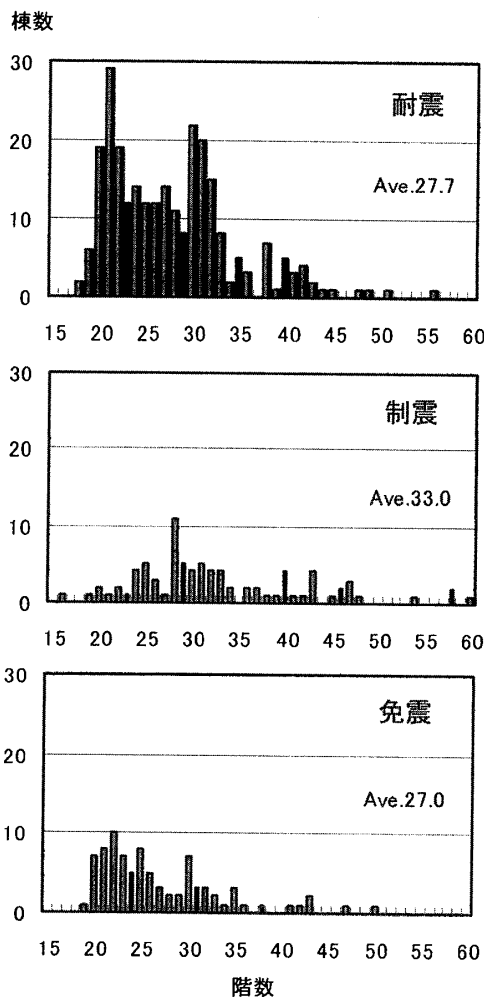


図 13 階数分布

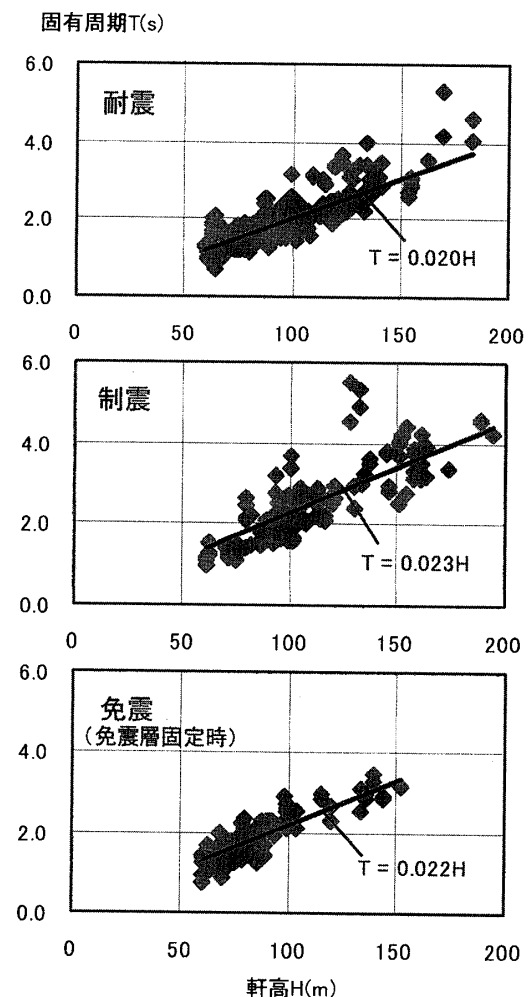


図 14 軒高－1 次固有周期の関係

関係は、耐震では  $T=0.020H$ 、制震では  $T=0.023H$ 、免震では  $T=0.022H$  で近似され、主体構造の剛性は耐震＞免震＞制震と評価される。制震の剛性が低い理由としては、高層建物が多いこと、SRC や CFT が多いこと、粘性系や粘弾性系ダンパーの使用の影響が考えられる。図 15 に軒高と 1 次設計用せん断力係数  $C_B$  の関係を、図 16 に 1 次固有周期と  $C_B$  の関係を各構造方式で比較して示す。なお、高層建築技術指針式と比較するために、図 15 には  $C_B=0.18/0.02H$  を、図 16 には  $C_B=0.18/T$  を併せて示す。耐震・制震では本式および第 2 種地盤告示式の周りにデータが分布している。軒高が 150m 以下あるいは 1 次固有周期が 3 秒以下ではこれを下回っているものも多い。また、 $C_B$  の平均値は初期に比べて年ごとに低くなっている。他方、免震については単純な比較はできないが、免震層固定時では本式を下回り、L2 地震時の等価固有周期では上回る傾向を示す。

軒高と L2 地震時最大層間変形角の関係（図 17）は、耐震・制震では  $1/100 \sim 1/150$  が多数であるが、 $1/100$  を上回るものも多い。他方、免震では  $1/200$  以下が多いが、 $1/150 \sim 1/200$  にも分布しており、中低層と比べて高層ではかなり層間変形が大きいといえる。免震構造において上部構造の変形およびエネルギー吸収をどこまで許容するかは重要な課題である。軒高と L2 地震時最大塑性率の関係（図 18）は、耐震・制震では  $1 \sim 2$  に分布するものが多く、免震では概ね 1 以下である。ただし、塑性率の定義が一義でないことに留意する必要がある。

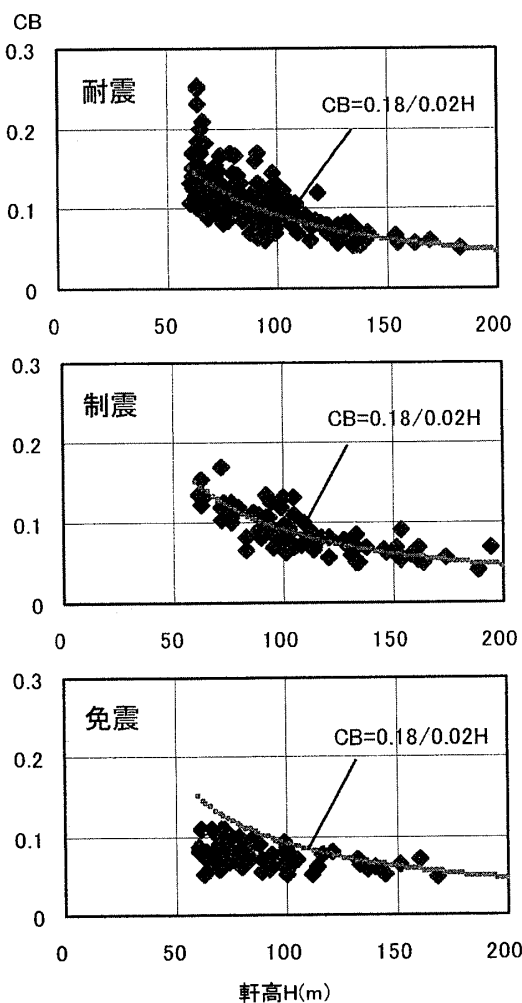


図 15 軒高- $C_B$  の関係

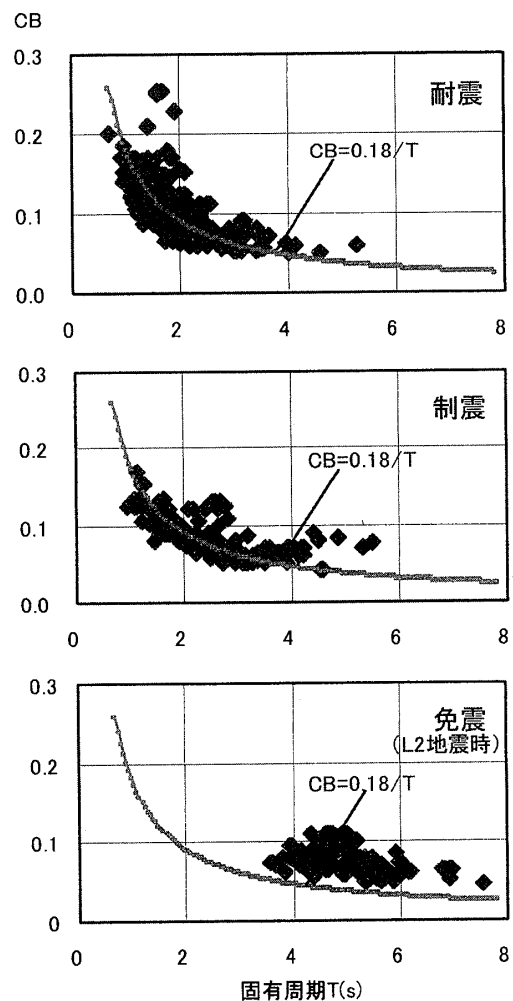


図 16 1 次固有周期- $C_B$  の関係

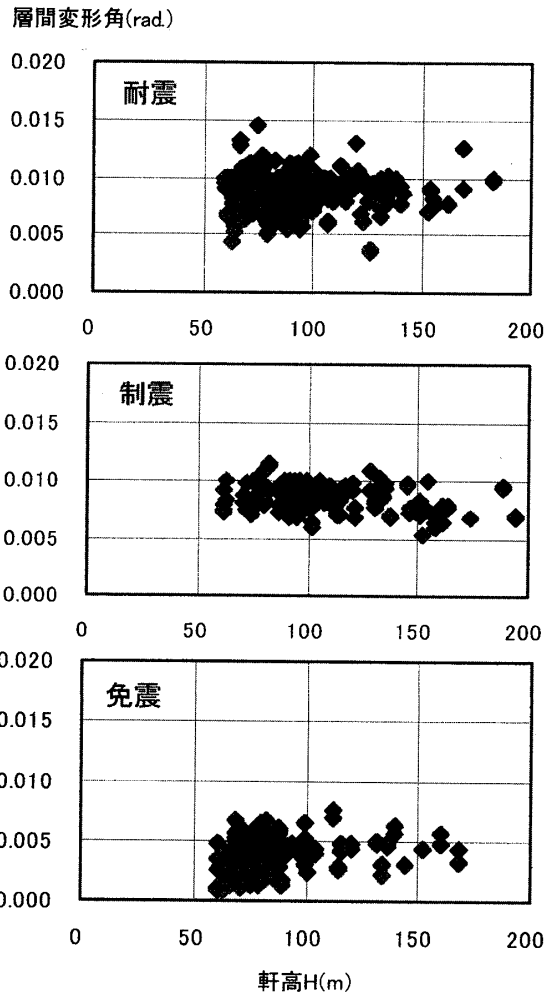


図 17 軒高－L2 最大層間変形角の関係

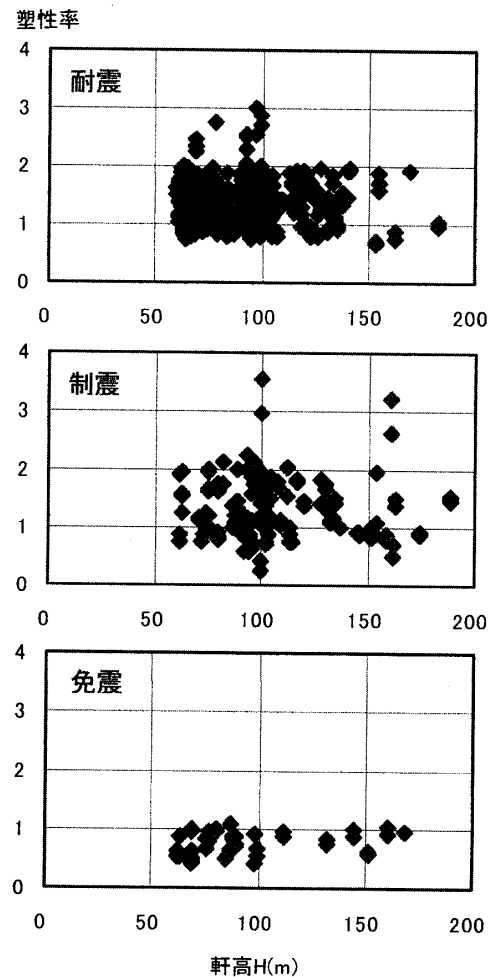


図 18 軒高－L2 最大塑性率の関係

## 6. むすび

超高層住宅の構造設計情報データベースの分析から、社会ニーズの変化、構造材料の発展、構造設計法の変化などの影響により、初期段階からこの数十年で建物の構造設計が大きく変化していることが分かった。制震構造や免震構造が一般化し、構造設計法がますます多様化する中で、上部構造のせん断力や許容変形角の他、床加速度応答や応答継続時間の評価なども含めて構造性能を評価することが今後の重要な課題と考える。

**謝辞** 本研究にあたり、(株) エーエー&サン吉田英敏氏から貴重な助言を賜りました。また、データ解析にあたり、平成 19 年度福井工業大学建築学専攻卒研究生松下正輝・松本豪氏から多大なご協力をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) (財)日本建築センター：ビルディングレター
- 2) 有松重雄他：超高層住宅の構造設計法の調査・分析（その 1）、（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.197-200、2007 年 8 月
- 3) 和泉信之他：超高強度コンクリート技術の現状 第 6 章 適用建物、日本建築学会大会 PD 資料、pp.48-53、2007 年 8 月

(平成 20 年 3 月 31 日受理)