

巨大地震に対する超高層建物の動的応答における下層部変形集中現象 その4 超高層建物の耐震安全性に関する私見

正会員 ○上谷 宏二*¹ 同 荒木 慶一*²

超高層建物 耐震安全性 私見

近代都市の耐震安全性を論じる場合、先ず取り上げなければならない最も重要な項目の一つに超高層建物の安全性がある。もし仮に超高層ビルが倒壊したらどのような事態になるか。未曾有の被害がもたらされることは論をまたない。地震国に摩天楼を建設するという快挙が初めて実現されたのが1968年の霞が関ビルであり、その後の経済発展に連れて超高層ビルの建設は加速され、今では千を超える棟数を数えるに至っている。超高層建物の設計に対しては動的応答解析をはじめとする高度な検討と高い安全基準のクリアーが特別に義務付けられ、その安全性の担保が図られている。それでは、現行の安全検証法に問題はないのか。盲点はないのか。ことの重要性に鑑み、敢えて歯に衣着せず私見を述べることにする。

現在の構造設計は全てコンピュータによる建物の挙動解析に基づいてなされている。しかし、これらの挙動解析は、静的解析であっても地震応答に対する動的解析であっても、幾何学的非線形効果は無視した解析が行われている。幾何学的非線形効果とは構造物の変形によって生じる力の作用点の移動の効果であり、通称「PΔ効果」とも呼ばれる。座屈という現象は幾何学的非線形効果を取り入れた理論によってはじめて捉えることができる不安定現象であり、これを無視した初等力学理論では扱えない。それでは実務設計で無視されているPΔ効果を取り入れて超高層建物の地震応答解析を行ってみたらどのようなになるであろうか。弾性域を超え、梁端部の塑性変形箇所のある限界に達したときから、梁降伏型に設計された骨組であっても、「下層部変形集中現象」と称する特異な現象が突然に現れ、PΔ効果は無視した解析とは全く異なる挙動を建物は呈することになる。下層部変形集中は揺れが繰り返されるに連れて加速度的に増幅され、これによって柱に塑性変形が誘発されると倒壊に至る。

超高層建築物は大地震に対しても十分な安全性を確保できるよう、層間変形角や塑性率の応答が十分安全な範囲内に収まるように設計されている。従って、現行規準が定める設計用地震動に対して下層部変形集中現象が現れることは殆どない。しかし、長周期地震動では継続時間が長く多数の繰返し塑性変形が想定されるため、変形

集中現象を誘発する危険性は極めて高くなる。今までの研究によると、大半の超高層建築物は長周期地震動に対しても下層部変形集中現象を起こさないレベルの安全性を保持していると思われる。しかし、現存する全ての超高層建築物がこの安全域にあるとは言い切れないという結果が出ているのも事実である。

具体例として本報その1とその2で報告したように、想定長周期地震動に対する40層超高層純ラーメン鋼構造骨組の解析では、PΔ効果は無視した場合は最大層間変形角が1/100以下に収まっているのに対し、PΔ効果を考慮した場合は下層部変形集中現象が発生し、最終的には柱に塑性変形が生じ倒壊に至る。さらに、本報その3で報告したように、現行規準を満足し制振ダンパーを備える建物においても、下層部変形集中現象が起きる危険性があることが明らかになりつつある。(参考として、各階の10秒間隔の変位(細線)と残留変位(太線)を図1に示す。)

ここで論じてきた問題の社会的重大性を考え、下記の諸点を改めて指摘しておきたい。

- (1) 下層部変形集中現象は一種の塑性座屈現象であり、PΔ効果は無視した理論や解析では全く捉えることがない現象である。
- (2) 地震動のレベルを拡大していけば、どのような超高層建物においても下層部変形集中現象は必ず現れる。
- (3) 下層部変形集中現象の発生による応答解析の差は突然に現れる。そのためPΔ効果を考慮した解析を行ったとしても、現象の発生しない段階においては応答解析の差が殆ど現れず、PΔ効果の影響は無視しても差し支えないと判断されてしまいがちである。

最近、設計用地震動を中心に耐震基準を見直す動きが活発化している。これまでに採取された強震動記録や理論的に導き出された予測地震動は現行の設計用地震動を超える地震動が我が国の国土を襲う可能性を示唆しており、このことが今回の見直しの根底にある。設計用地震動の設定は建物の耐震安全性レベルを左右すると同時に、建設業界、ひいては我が国の経済活動全般に大きな影響を及ぼす。このような視点に立てば、数百年に一度来るか来ないかの巨大地震に対する備えを一般の建物に一樣

に求めることは適当でない。しかし、超高層建築物に求められる安全性の程度は、一般の建物と同格に置くことはできない。推測や人為的要因を一切排除して考え、事実に基づいた冷静な判断が求められる。都市の耐震安全に対して責任を負う立場にある者は、学術、技術、経済、社会のあらゆる観点を総合して賢明な判断を行う必要がある。

さて私見に立ち戻るが、社会的重要度が極めて大きい超高層建築物に対しては一般の建物に比して格段に高い安全性が求められると考える。少なくとも下層部変形集中現象は絶対に起こさないよう万全を期する必要がある。これは許容応力度のような制約条件とは異質の条件である。許容応力度が限界を超えたとしても建物がいきなり倒壊の危機に晒されることはない。下層部変形集中現象については、建物の地震応答がその発生限界を超えたとしたらどうであろうか。幸い下層部変形集中現象に対する安全性の度合いは $P\Delta$ 効果による剛性低下を調べることで比較的簡単に評価できる。また抑止対策の面でも、発生メカニズムを踏まえた効果的かつ実行可能な対処策を講じることが可能である[9]。下層部変形集中現象に対して十分な安全性が保障されない超高層建物に対しては、国が補助金を出してでも補剛を義務付けるなど思い切った行政措置が必要であろう。東京、名古屋、大阪などの超高層建築物が林立する大都市は、未だ巨大地震の洗礼を受けていないのである。

参考文献

- [1] 日本建築学会：長周期地震動と建物の耐震性，丸善，2007
- [2] 日本建築学会：各種波形予測手法に基づいた海溝型巨大地震の予測強震動波形収集資料，2007.
- [3] 金紋廷，荒木慶一，山川誠，田川浩，五十子幸樹：極大地震動に対する純ラーメン超高層鋼構造骨組の動的応答に及ぼす $P\Delta$ 効果の影響，日本建築学会構造系論文集，第 644 号，pp. 1861-1868，2009.
- [4] 金紋廷：長周期地震動に対する超高層鋼構造建物の応答に及ぼす $P\Delta$ 効果の影響に関する解析的研究，京都大学大学院博士論文，2010.
- [5] K. Uetani, T. Nakamura: Symmetry Limit Theory for Cantilever Beam- columns Subjected to Cyclic Reversed Bending, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 31(6), pp.449-484, 1983.
- [6] K. Uetani: Cyclic plastic collapse of steel planar frames, In *Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading*, (ed. Y. Fukumoto and G. Lee), CRC press, pp.261-271, 1992.
- [7] Koji Uetani and Hiroshi Tagawa: Criteria for suppression of deformation concentration of building frames under severe earthquakes. *Engineering Structures*, 20, pp. 372-383, 1998.
- [8] <http://www.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~tada/CLAP.html>
- [9] 荒木慶一，金紋廷，濱田征彦，木村寛之：高強度鋼間柱を用いた塑性化後層剛性制御による過大残留変形の抑制，日本鋼構造協会鋼構造論文集，第 17 巻，第 65 号，pp. 63-70，2010.

謝辞：本研究に関して科学研究費補助金基盤研究(B) No. 20360254 の補助を受けた。本研究で用いた C-SAN EW 波は国土交通省中部地方整備局より提供を受けた。解析プログラム CLAP は大阪大学の多田元英先生から提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

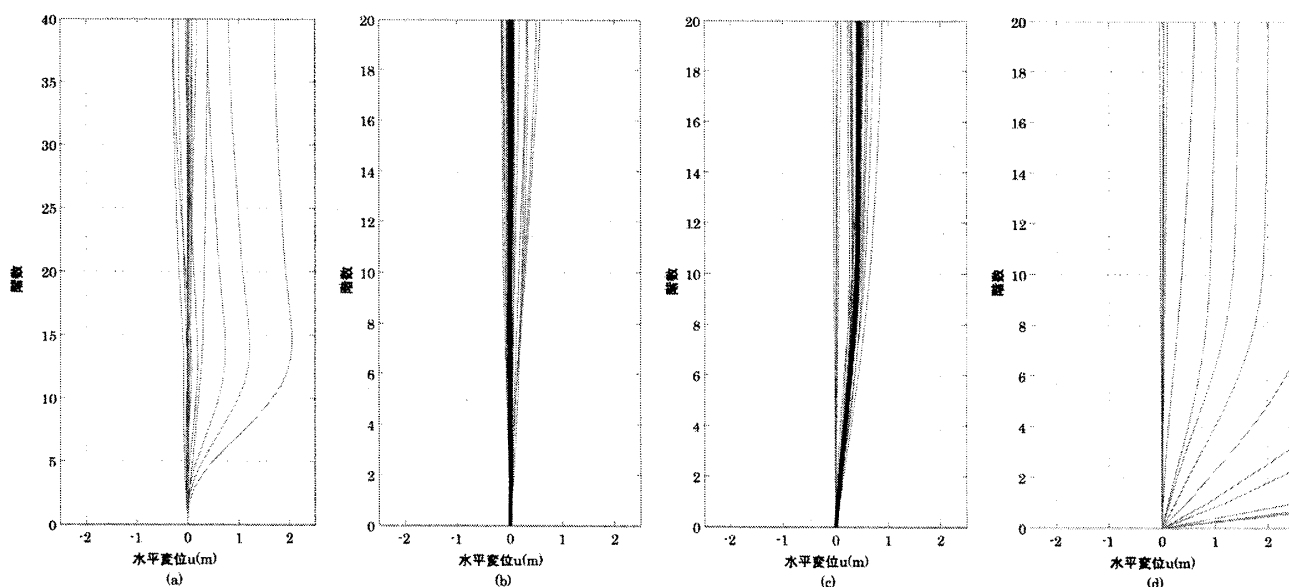


図1 変形図：(a)40層魚骨モデル(KK-WOS EW波，25Kine，幾何非線形効果考慮)，(b)20層フルフレームモデル(C-SAN EW波 $\Phi=1.3$ 倍，幾何非線形効果無視)，(c)20層フルフレームモデル(C-SAN EW波 $\Phi=1.3$ 倍，幾何非線形効果考慮)，(d)20層フルフレームモデル(C-SAN EW波 $\Phi=1.3$ 倍，幾何非線形効果および劣化考慮)

*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工学博士

*1 Prof., Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

*2 Associate Prof., Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.