

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2 メカニズムの検討

正会員 ○岡山 真之介*¹ 同 西本 篤史*²
同 上野 泰永*² 同 金 紋廷*³
同 荒木 慶一*⁴ 同 上谷 宏二*⁵

巨大地震 超高層 固有値解析
変形集中現象 幾何非線形 魚骨モデル

1. 序

その1では40層純ラーメン骨組を対象に、幾何非線形性の考慮の有無により応答が顕著に異なる場合の解析例を示した。その2では、振動固有値解析の結果に基づき、下層部変形集中現象のメカニズムの考察を行う。

2. 振動固有値解析

2.1 概要

動的応答の結果を分析する前に、振動固有値解析の結果を図1に示す。本報では、数種の塑性ヒンジ分布を仮定し、それぞれに対して接線剛性行列を作成し、式(1)の振動固有値問題を解く。

$$-\Omega[M]\{\phi\} + [K_t - K_g]\{\phi\} = \{0\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量行列、 $[K_t]$ は接線剛性行列、 $[-K_g]$ は幾何剛性行列、 Ω は振動固有値、 $\{\phi\}$ は振動固有モードである。図1は上から順に、全層梁端弾性、1-12層、1-13層、…、1-16層の梁端が塑性であると仮定した結果である。また左から順に、幾何非線形無視の1次・2次、幾何非線形考慮の1次・2次の結果である。ここでは固有値 Ω が小さいものから順に1次・2次としている。固有モード図の背景の灰色は、 $\Omega < 0$ であることを示す。

2.2 振動固有値の正負による挙動の差異

実際の動的弾塑性応答では、塑性ヒンジ分布が刻々と変化するが、塑性ヒンジ分布が同一の区間内では、各モードの運動は同一の運動方程式(2)に支配される。

$$\tilde{M}_s \ddot{q}_s + \tilde{C}_s \dot{q}_s + \tilde{K}_s (q_s - \bar{q}_s) + \tilde{f}_s = -\beta_s \ddot{u}_0 \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{M}_s$ は s 次広義質量、 $\tilde{C}_s$ は s 次広義減衰、 $\tilde{K}_s$ は s 次広義剛性、 $\tilde{f}_s$ は s 次復元力固定項、 q_s は s 次モード変位、 $\bar{q}_s$ は q_s の初期値、 $\ddot{u}_0$ は地動加速度、 β_s は s 次モードの刺激係数を表す。(2)の自由振動解は、 $\Omega > 0$ の場合は振動解となり、 $\Omega < 0$ の場合は発散解となる。発散解の場合、ドリフト現象が発生する。 Ω の値が低くモード初速度が大きいほど傾きが大きくなり、対応する固有モードが急成長する。

2.3 変形集中現象の発生メカニズム

本報では、固有値に加えて固有モードに着目しながら、変形集中現象の発生メカニズムについて考察する。

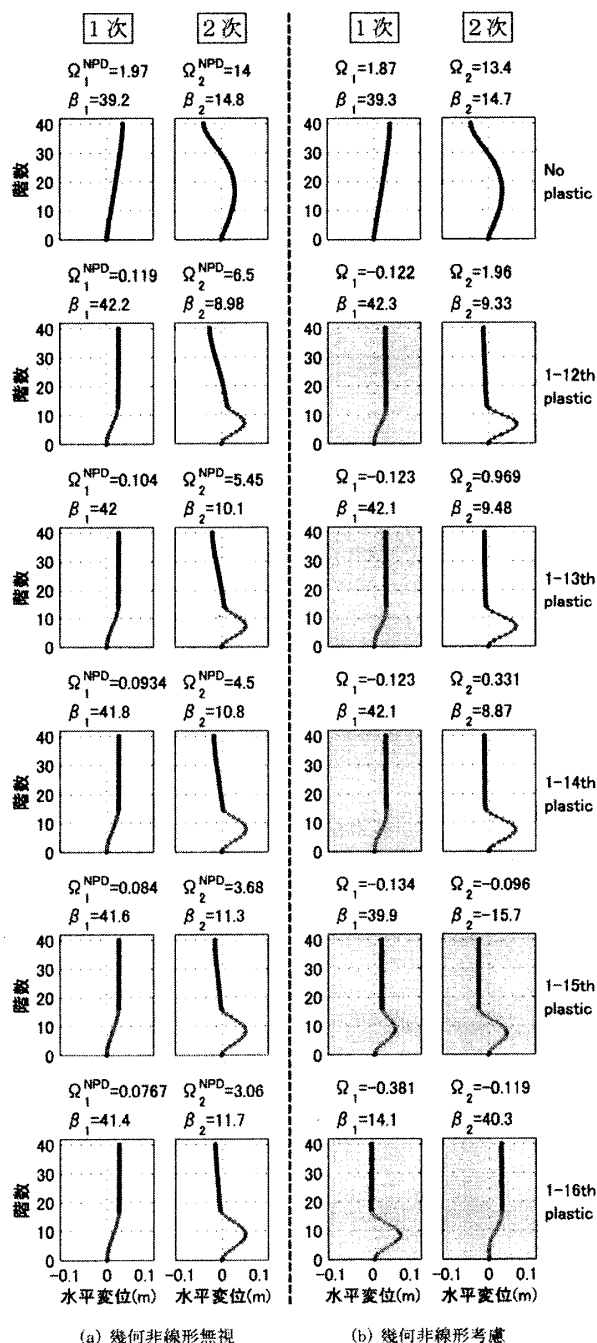


図1 振動固有値解析結果

図 1 より, 幾何非線形を考慮することで固有モード形状が大きく変わる. 塑性化領域を増加させていくと, 1-15 層が塑性化した時点 (下から 2 行目) で, $\Omega < 0$ の固有モードに「折返し形状」が現れている. 本報では, 回転角が全ての層で同じ方向になっていない形状を「折返し形状」, 下層部と異なる方向に回転している層の領域を「除荷志向領域」と呼ぶ. 図 1(b) の 1 次モードにおける除荷志向領域は, 1-15 層塑性時 (下から 2 行目) で 9-15 層, 1-16 層塑性時 (最下行) で 9-16 層である.

折返し形状を持つ固有モードが成長し卓越してくると, 除荷志向領域で除荷が起こり, 塑性化領域が減少する. 最終的に, 固有モードに折返し形状が現れない範囲で $\Omega(<0)$ の値が最も小さい塑性化領域に落ち着き, 変形が塑性化領域 (通常は下層部) に集中する. これが振動固有値解析に基づく変形集中現象の発生メカニズムである. 本モデルの変形集中領域は 1-14 階になると予測される.

3. 動的応答解析

3.1 KK-WOS EW 波応答

KK-WOS EW 波応答において, 変形集中現象が発生する時間帯 (82 秒間) の塑性ヒンジ分布と層間変形角の時刻歴を図 2(a) に示す. 図 2(b) はこれらに加えて固有値の時刻歴を示す. 図 2(b) より, 103 秒近辺で 1-16 層が塑性化領域となり, 固有値が急激に低下していることが分かる. この辺りから対称性を持つ正負交番塑性の変形状態が崩れ, 下層部で急激なドリフトが生じている. 1-16 層塑性時の 1 次モードが折返し形状となっている (図 1 参照) ことから, このモードが卓越することで 16 層に除荷が発生したと考えられる. 最終的な変形集中領域は 1-14 層であり, 振動固有値解析結果に基づく予測に合致している.

3.2 正弦波 (周期 5 秒, PGV25Kine) 応答

正弦波応答の場合も, 幾何非線形を考慮することで途中から正負交番塑性状態が崩れ, 急激なドリフトが発生した. 変形集中領域は 1-14 階で, 予測に合致している.

4. 結

振動固有値解析の結果に基づく, 変形集中現象の発生メカニズムは以下のようにまとめられる.

- (1) 塑性化する層の領域が大きくなると, $\Omega < 0$ の固有モードに折り返し形状が現れる
- (2) 折り返し形状が成長すると, 上層部で除荷が発生する
- (3) 固有モードに折返し形状が現れない範囲で, $\Omega(<0)$ の値が最も低い塑性ヒンジ分布に落ち着いていく
- (4) 落ち着いた塑性ヒンジ分布の塑性化領域 (通常は下層部) に変形が集中する

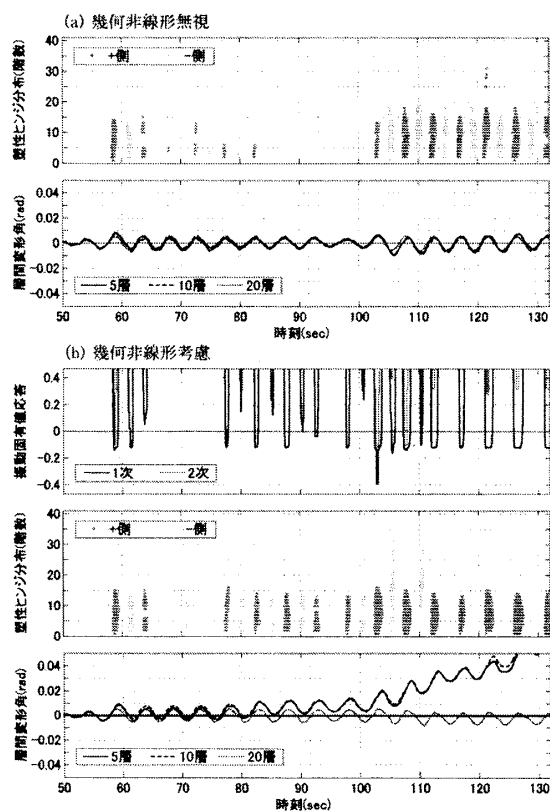


図 2 KK-WOS EW 波応答 (50~132 秒)

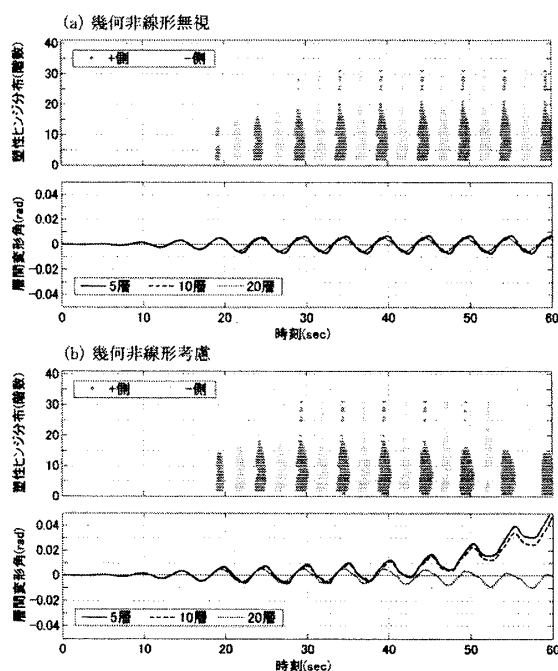


図 3 正弦波応答 (0~60 秒)

*1 大成建設 設計本部

*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

*3 国立防災研究所 (韓国) 博士 (工学)

*4 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士 (工学)

*5 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工学博士

*1 Design Dept., Taisei Corporation

*2 Graduate Student, Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

*3 National Institute for Disaster Prevention (Korea), Dr. Eng.

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

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