

# 大地震時における建築物の水平構面の最大面内応答予測

Prediction of maximum in-plane response of horizontal plane of structures under strong earthquake

京都大学 准教授 聲高 裕治

## (研究計画ないし研究手法の概略)

### 1. 研究の目的と対象

本研究では、体育館の屋根や吹抜けを有する床などの剛床仮定が成立しない水平構面を対象とし、水平構面上の質量分布を考慮した地震時の面内挙動の把握と要求性能の提案を目指している。対象は図1のような1層2スパン骨組とし、外力の入力方向はy方向とする。鉛直構面の層せん断剛性、床スラブの質量分布は中央の構面（構面①）に関して対称で、各鉛直構面の保有水平耐力は層せん断剛性に比例し、復元力特性は完全弾塑性型とする。

図1の対象骨組は、中央構面（構面①）に関する対称性より、図2に示す1スパンの力学モデルに縮約することができる。地震時における図2の挙動を、構面①の水平変位  $\delta_0$ 、 $\delta_1$  と水平構面のy方向変位が最大となる位置 ( $x=X_m$ ) の水平変位  $\delta_m$  の3自由度で表す。

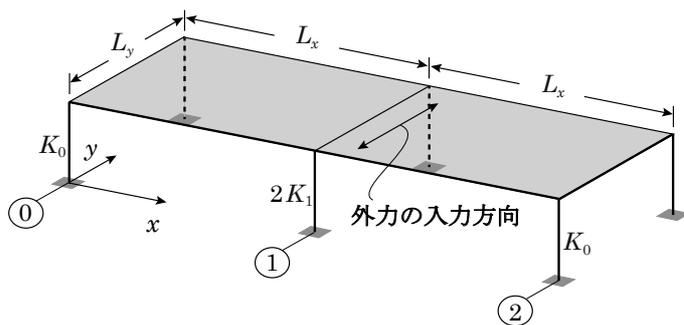


図1 対象骨組

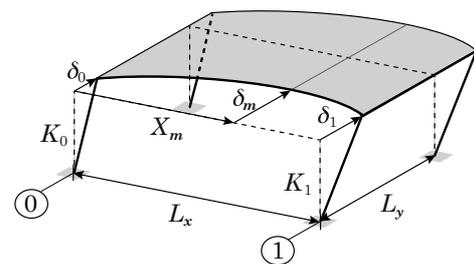


図2 力学モデル

### 2. 最大面内応答の予測法

図2に示す3自由度系力学モデルを用いて、鉛直構面の塑性化状態を考慮した場合の水平構面に生じる最大面内せん断力ならびに構面間変位の最大値の予測法を提案する。

対象骨組の場合、各鉛直構面の降伏層間変位  $\delta_y$  は同一となるが、水平構面の面内剛性が小さいと各鉛直構面の塑性化が同時に発生せず、層せん断剛性が小さい構面が先に降伏する。ここでは  $K_0 \geq K_1$  と考え、各構面の層間変位が最大となるときの骨組の状態を、構面①の塑性化の有無により以下の2つの場合において予測式を導く。

(I) 構面①の塑性化後、構面②は弾性域にとどまる場合： $\delta_{0max} < \delta_y$

(II) 構面①の塑性化後、構面②も塑性化する場合： $\delta_{0max} \geq \delta_y$

$\delta_{0max}$  は構面①の最大層間変位であり、両構面とも弾性を保つと仮定して次式で求める。

$$\delta_{0max} = {}_1u_0 \cdot {}_1\beta \cdot {}_1S_D({}_1\omega, {}_1h) \quad (1)$$

ただし、 ${}_1u_0 \cdot {}_1\beta$  は1次の刺激関数、 ${}_1S_D({}_1\omega, {}_1h)$  は1次固有円振動数  ${}_1\omega$  と1次減衰定数  ${}_1h$  に対応する変位応答スペクトルである。同様の考え方に基づいて、構面①が降伏層間変位  $\delta_y$  に到達したときの構面①の変位  $\bar{\delta}_0$  を(2)式で求める。

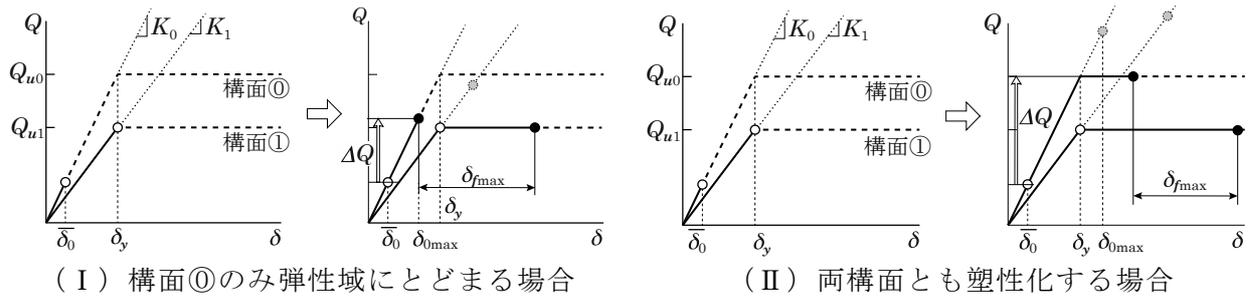


図3 各構面の塑性化状態

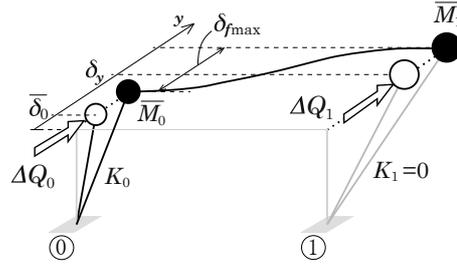


図4 構面①の塑性化後の力学モデル

$$\bar{\delta}_0 = (1 - {}_1u_0 / {}_1u_1) \delta_y \quad (2)$$

ただし、 ${}_1u_0 / {}_1u_1$  は 1 次固有モードである。

つぎに、構面①が降伏層間変位  $\delta_y$  に達して (図3の○印の時点) から最大層間変位に達する (図3の●印の時点) までの間に増加する層せん断力  $\Delta Q$  を、(I) と (II) のそれぞれの場合で次式で求める。

$$(I) \quad \Delta Q = K_0 (\delta_{0\max} - \bar{\delta}_0) \quad (3.a)$$

$$(II) \quad \Delta Q = Q_{u0} - K_0 \cdot \bar{\delta}_0 \quad (3.b)$$

対象骨組では構面①が塑性化後、図4に示すように層せん断剛性が0となるため、水平構面の  $y$  方向変位が最大となる点は構面①上 ( $x=L_x$ ) となる。したがって図2の力学モデルは、図4のように2質点系に置き換えることができ、(3)式の層せん断力  $\Delta Q$  は構面①上の質点に作用する慣性力  $\Delta Q_0$  と構面①上の質点に作用する慣性力  $\Delta Q_1$  にわけられる。このうち  $\Delta Q_0$  は次式で求められる。

$$\Delta Q_0 = \frac{\Delta Q}{1 + (M_1 / M_0) \cdot (\ddot{y}_1 / \ddot{y}_0)} \quad (4)$$

ここで、 $\ddot{y}_1 / \ddot{y}_0$  は構面①塑性化後の構面①と構面②の絶対加速度の比であり、ここでは図4の水平構面に水平力を作用させたときの構面①と構面②の水平変位の比を代用する。

以上のように求めた  $\Delta Q_0$  と  $\Delta Q_1$  が各構面に作用したときの構面間変位差を  $\Delta \delta$  とすると、構面間変位の最大値  $\delta_{f\max}$  および最大面内せん断力  $Q_{f\max}$  はそれぞれ次式で求められる。

$$\delta_{f\max} = \delta_y - \bar{\delta}_0 + \Delta \delta \quad (5)$$

$$Q_{f\max} = K_0 \cdot \bar{\delta}_0 + \Delta Q \quad (6)$$

### 3. 数値解析による検討

(5), (6) 式で示した水平構面の最大面内応答の予測式の妥当性を検証するために、図5の11質点系解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行う。解析モデルにおいて、鉛直構面と水平構面の節点における境界条件は、構面①上で回転と  $x$  方向変位が拘束されており、構面②上で

回転のみ拘束されているものとする。

解析パラメータは、平面構面の面内剛性と骨組の層せん断剛性の比（以下、面内剛性比  $k_f$ ）、構面①の層せん断剛性と骨組全体の層せん断剛性の比（以下、層せん断剛性比  $k_0$ ）、水平構面上の質量分布（図5参照）、水平構面の辺長比、構造特性係数  $D_S$ （(7)式参照）であり、2000ケースをこえる膨大な数値解析を実施した。骨組全体の保有水平耐力  $Q_{uT}$  は構造特性係数  $D_S$  を用いて(7)式で算出する。

$$Q_{uT} = D_S \cdot R_t \cdot W_T \quad (7)$$

上式中の  $R_t$  は振動特性係数であり、1.0とする。また  $W_T$  は骨組全体の重量であり、ここでは単位面積あたりの床重量を  $10\text{kN/m}^2$  として求める。水平構面が剛な場合の骨組の1次固有周期を0.5秒とし、減衰特性は、減衰定数が2%の初期剛性比例型とする。

入力地震動はBCJ L2（人工地震動）、El Centro NS, JMA Kobe NS（観測波）の3種類とする。BCJ L2およびJMA Kobe NSについては原波を用い、El Centro NSについては最大速度を0.5m/sに規準化したものを用いる。

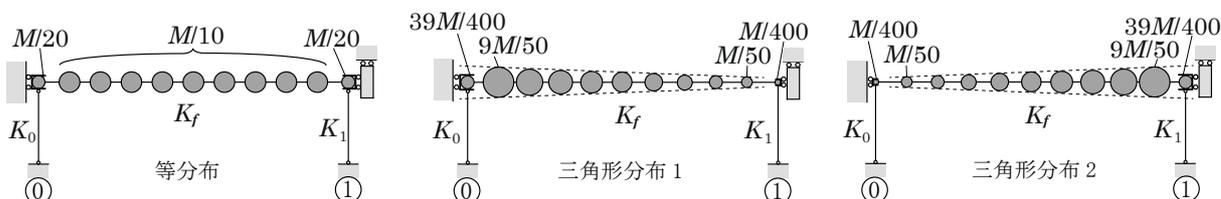


図5 11質点系解析モデル

### （実験調査によって得られた新しい知見）

#### 4. 解析結果と考察

図6に水平構面の最大面内せん断力  $Q_{f\max}$ ，図7に構面間変位の最大値  $\delta_{f\max}$  について、それぞれ時刻歴応答解析結果と予測結果を比較して示す。いずれも横軸は面内剛性比  $k_f$  であり、図6の縦軸は  $Q_{f\max}$  を骨組の全質量  $M$  と剛床の場合の擬似加速度応答スペクトル  $S_A$  の積で無次元化したもの、図7の縦軸は  $\delta_{f\max}$  を剛床の場合の変位応答スペクトル  $S_D$  で無次元化したものである。

まず、入力地震動がBCJ L2、水平構面の辺長比が0.65、質量分布が等分布の場合の最大面内せん断力  $Q_{f\max}$  について考察する。図6より、予測結果は時刻歴応答解析結果とよく対応していることがわかる。また、骨組が弾性域で挙動する場合は、面内剛性比によって最大面内せん断力が増加し、その値は  $k_0 \cdot M \cdot S_A$  に近づいていくのに対し、骨組が塑性化すると面内剛性比に関わらず最大面内せん断力は  $k_0 \cdot Q_{uT}$  ( $= Q_{u0}$ ) となることが確認できる。この傾向は、他の解析結果でも同様である。

つぎに、水平構面の辺長比が0.65、層せん断剛性比  $k_0$  が0.8の場合の構面間変位の最大値  $\delta_{f\max}$  について考察する。図7より、いずれの場合も予測結果と解析結果が概ねよい対応を示していることがわかる。ただし、入力地震動がBCJ L2で  $D_S=0.5$  の場合に限り、 $k_f$  が0.15以下の範囲で予測結果が解析結果を過大評価している。

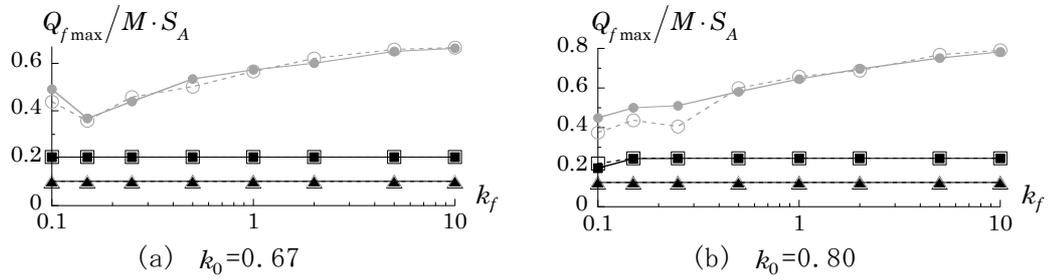
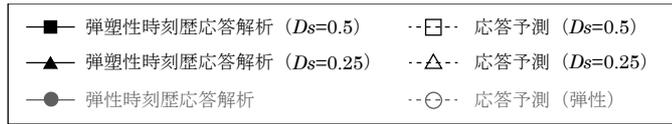


図6 最大面内せん断力  $Q_{fmax}$   
(質量等分布, 辺長比0.65, BCJ L2)

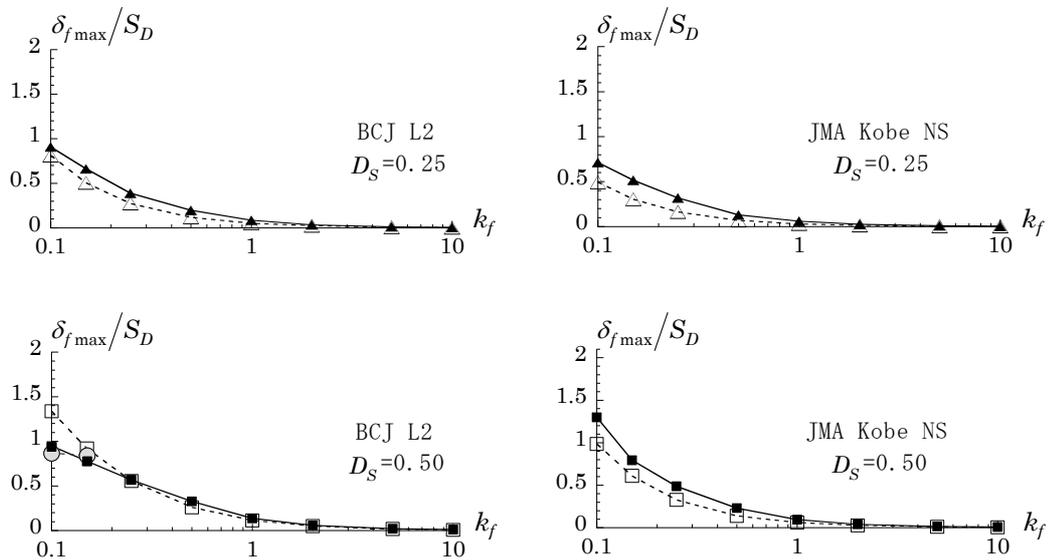


図7 最大面内せん断力  $Q_{fmax}$   
( $k_0=0.80$ , 辺長比0.65, 質量等分布)

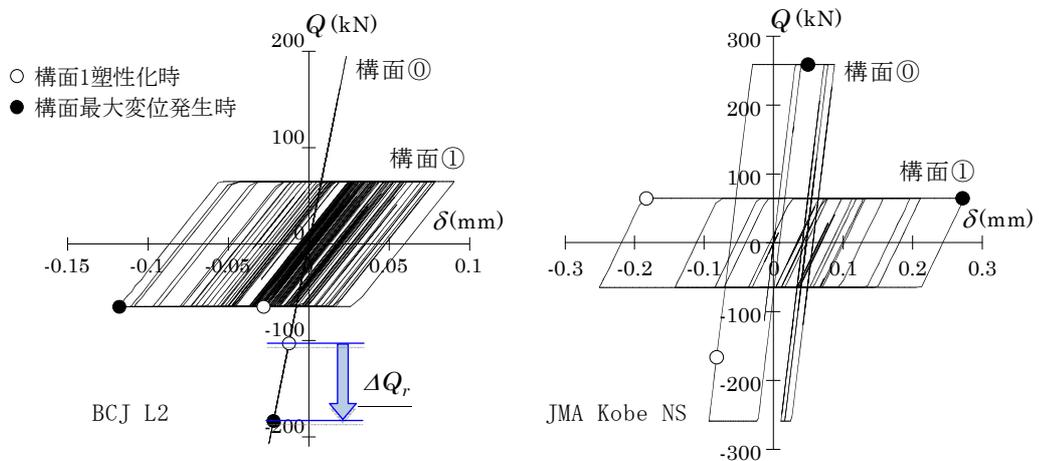


図8 層せん断力 - 層間変位関係  
( $D_s=0.50$ ,  $k_f=0.1$ ,  $k_0=0.80$ , 質量等分布, 辺長比0.65)

上記の点を考察するために、図8に $D_s=0.5$ 、 $k_f=0.1$ 、質量分布が等分布のときの時刻歴応答解析による各構面の層せん断力と層間変位の関係を示す。図7において予測結果が解析結果を過大評価するBCJ L2では構面⑩は弾性域にとどまっているのに対し、両結果が概ね良い対応を示すJMA Kobe NSでは両構面とも塑性化している。このように、構面間変位の最大値を予測式が過大評価する理由としては、応答予測において両構面とも塑性化すると判定しても、実際には構面①だけが塑性化し、構面⑩は弾性域にとどまっているからであると考えられる。つまり、構面①の塑性化後から最大変位到達までの間に骨組全体に増加する $\Delta Q$ を過大評価していることに起因する。図8に示す地震動がBCJ L2のときのせん断力増加分 $\Delta Q_r$ を(6)式に代入した場合の予測結果(図7中の○)を時刻歴応答解析を比較すると、両者はよい対応を示していることがわかる。

## 5. 得られた知見と今後の課題

本研究でより得られた知見を以下にまとめる。

- [1] 骨組が塑性化する場合、水平構面の最大面内せん断力は、面内剛性比が極めて小さな場合を除いて、層せん断剛性が高い鉛直構面の保有水平耐力と一致する。
- [2] 構面間変位の最大値は、予測結果と時刻歴応答解析結果は概ね良い対応を示すが、面内剛性比が極めて小さい範囲では、予測結果が時刻歴応答解析結果を過大評価する場合がある。これは、提案する予測法では両構面が塑性化すると判定しても、時刻歴応答解析結果では片構面のみが塑性化している場合で、剛性の低い構面が先に塑性化してから最大変位に達するまでに増加する層せん断力を過大評価しているためである。

上記の知見をふまえて、今後は面内剛性比が小さい範囲での構面間変位の最大値の予測精度の向上を図りつつ、多スパン骨組・多層骨組の応答評価法について検討を進める。さらに、地震動が任意方向から入力する場合の水平構面の挙動把握にも努め、最終的には剛床仮定が成立しない水平構面の要求性能の提案をめざす。

### ( 発表論文 )

- ・吹野由佳，聲高裕治，吹田啓一郎：1層弾塑性骨組における水平構面の面内地震応答予測法，日本建築学会近畿支部研究報告集，第55号・構造系，pp.93-96，2015.6（掲載予定）
- ・吹野由佳，聲高裕治，吹田啓一郎：1層弾塑性骨組における水平構面の面内地震応答予測法，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，2015.9（投稿中）