

免震建物の擁壁衝突速度を考慮した簡易地震応答解析モデル  
その1 簡易衝突モデルと3次元FEMモデルによる比較

正会員 ○岩本 裕史<sup>\*1</sup>  
// 山崎 久雄<sup>\*1</sup>  
// 佐藤 綾香<sup>\*2</sup>  
// 宮本 裕司<sup>\*3</sup>  
// 貝谷 淳一<sup>\*4</sup>

地震応答解析 免震構造 擁壁衝突  
衝突ばね 衝突速度 モデル化

1. はじめに

設計用地震動を上回る地震動が免震建物へ入力した際に、免震層が擁壁に衝突することが懸念されている。この衝突時の擁壁抵抗を、3次元非線形FEM解析結果から簡易な衝突ばねでモデル化した、設計実務でも扱いやすい算定法が提案されている<sup>1)</sup>。本算定法では、衝突時の瞬間速度が擁壁の復元力特性に影響することが考慮されており、設計で扱うには解析プログラムの対応が必要となる。

本報では3次元非線形FEM解析の結果と、擁壁衝突時の速度依存性を有する簡易衝突ばねでモデル化した質点系モデルの結果を比較し、簡易衝突ばねでモデル化することの妥当性を示す。次報では簡易衝突ばねの復元力特性が衝突速度に依存することに着目し、設計実務で扱う際の衝突速度設定について検討する。

2. 3次元FEMによる地震応答解析

解析モデルを図1に、背後地盤と擁壁の物性値を表1に示す<sup>2)</sup>。建物-擁壁間のクリアランスは50cmとし、擁壁の高さは300cm、厚さは30cmとした。建物は11階建てRC既存建物<sup>3)</sup>を参考とした質点系(履歴特性:標準トリリニア)でモデル化し、基礎部は剛体とした。上部構造のみの1次固有周期は0.724[s]で、内部粘性減衰は $h_1=0.03$ の剛性比例型とした。

免震装置は基礎盤下に各装置を集約した標準パイリニアモデルとし、免震建物の接線周期は4.6[s]、免震層の降伏せん断力係数は約2.3%とした(内部粘性減衰は非考慮)。

地盤モデルの外周の境界条件は繰返し境界を用いた。基礎盤と背後地盤は剛基礎上にあるとして底面は剛拘束とした。また、建物基礎部と擁壁の衝突面、擁壁と背後地盤との間は、すべり、剥離を考慮できる接触条件を採用した。

入力地震波として、上町断層波A4ゾーン3Cレベルのフラット波<sup>4)</sup>を6秒間、水平一方向に入力した。

3. 簡易モデルの説明

3.1. 簡易擁壁衝突ばね算定式の説明

簡易擁壁衝突ばねはギャップ変位(クリアランス)と衝突時の速度依存性を有する標準パイリニアとし、衝突時の特性値は次に示す提案式<sup>1)</sup>を用いた。擁壁衝突時の初期剛性を式(1)に、擁壁耐力を式(2)に示す。

・初期剛性  $K$ , 擁壁耐力  $Q$

$$K = 13.4 \times L^{0.847} \times D \times \frac{H - H_c}{H} \times V_k \times V_{sk} \dots (1)$$

$$V_k = \begin{cases} 1.24 \times 10^{-6} V^2 + 0.476 & (V < 650 \text{ [mm/s]}) \\ 1 & (V \geq 650 \text{ [mm/s]}) \end{cases}$$

$$V_{sk} = 0.197 \times \ln(V_s + 4.49) + 0.0848$$

$$Q = 201 \times L^{0.790} \times D \times \frac{H - H_c}{H} \times V_q \times V_{sq} \dots (2)$$

$$V_q = 2.81 \times 10^{-2} \sqrt{V}, \quad V_{sq} = 0.200 \times \ln(V_s + 47.6)$$

$L$ : 衝突面の擁壁長さ,  $D$ : 擁壁厚さ,  $H$ : 擁壁高さ,  
 $H_c$ : 衝突高さ,  $V$ : 衝突速度,  $V_s$ : 背後地盤のせん断波速度

3.2. 質点系モデル(速度依存)の説明

図2に簡易擁壁衝突ばねの履歴特性を示す。衝突ばねの速度依存性として、ギャップ変位到達時の衝突速度を初期剛性と擁壁耐力に考慮しており、擁壁耐力到達後、荷重が完全に除荷されるとスリップに移行する。そのときのスリップ点を新たなギャップ変位として更新し、背後地盤の塑性化を考慮したモデルとしている。

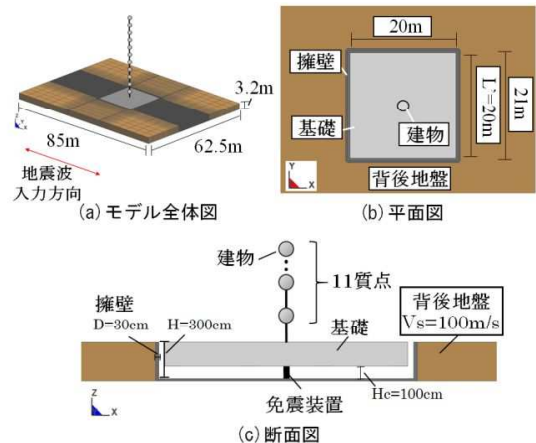


図1 3次元FEM解析モデル

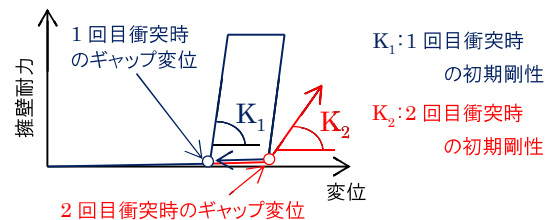


図2 簡易擁壁衝突ばねのモデル化

表1 背後地盤と擁壁の物性値

モデル	ヤング係数[N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	材料モデル
背後地盤	42	0.40	弾塑性体
擁壁	20500	0.30	弾塑性体

#### 4. 3次元 FEM と簡易質点系モデルの結果比較

3次元 FEM と簡易擁壁衝突ばねを用いた質点系モデルの結果を示す。図 3 は免震層の時刻歴応答となり、図中の塗潰し部は衝突中の時間を表している。両結果の応答変位、応答速度とも位相が一致しており、また 2 回目衝突時以降の瞬間速度においても 3次元 FEM で 132, -100 [cm/s]なのに対し、質点系モデルで 131, -104 [cm/s]と良好な対応を示した。なお、質点系モデルの場合、衝突直後の瞬間に、擁壁から一旦離れるがすぐに再衝突する傾向が見られ、正側で 2 度、負側で 4 度の衝突を経験していた。

図 4 に免震層の荷重—変形関係を示す。質点系モデルでは、1 回の衝突で衝突→非接触→再衝突する現象が見られたため、再衝突時に擁壁剛性と耐力が再評価されている。再衝突時には瞬間速度が低下しており、再評価された擁壁剛性は初回衝突時に比べ 28~43%程度低下していた。

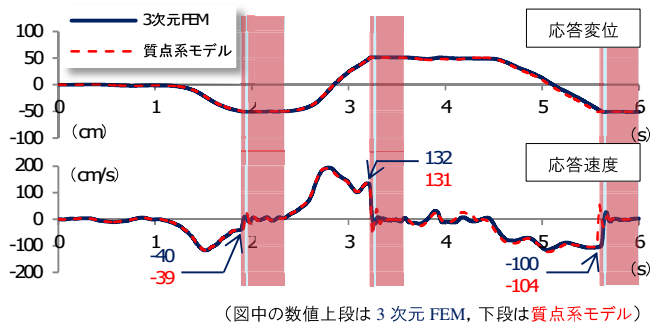


図 3 免震層の時刻歴応答波形の比較

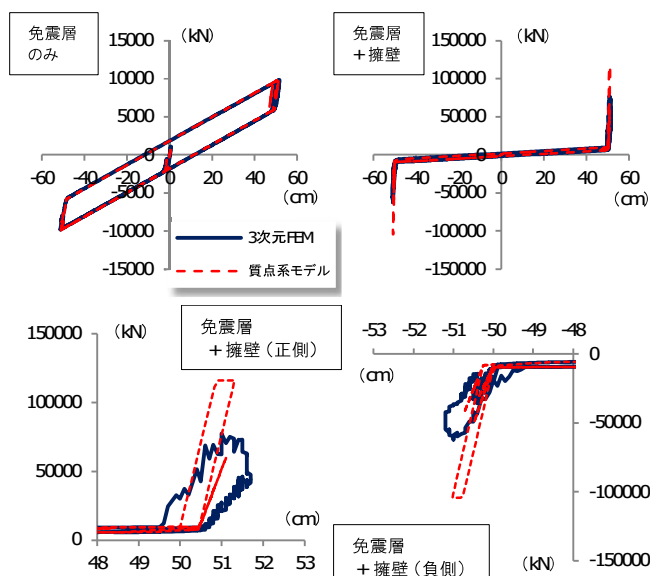


図 4 免震層の荷重—変形関係の比較

図 5 に上部構造の最大応答値を示す。免震層の最大絶対加速度、最大層せん断力は 3次元 FEM と比べ、質点系モデルの方が 1.5 倍程度大きく評価された。この差違としては、3次元 FEM では背後地盤および擁壁自身も地震入力と衝突の影響で振動していることにより衝突時の擁壁抵抗が小さくなっていることが考えられる。また、上部構造の最大層間変形角の比較においても、免震層の瞬間的な加速度の違いと、擁壁の押し込み変位の違いが、上部構造の最大変形に影響を与えていると考えられる。

#### 5. まとめ

簡易擁壁衝突ばねモデルの妥当性を調べるため、3次元 FEM との結果比較を行った。免震層の時刻歴応答の比較では応答変位、応答速度とも対応が良好であることを確認したが、免震層の最大絶対加速度および最大層せん断力は、3次元 FEM に比べ質点系モデルの方が大きく評価された。これは設計モデルとしては安全側の評価となるが、簡易擁壁衝突ばねの衝突抵抗を大きく評価していることが考えられ、今後さらに検討する。

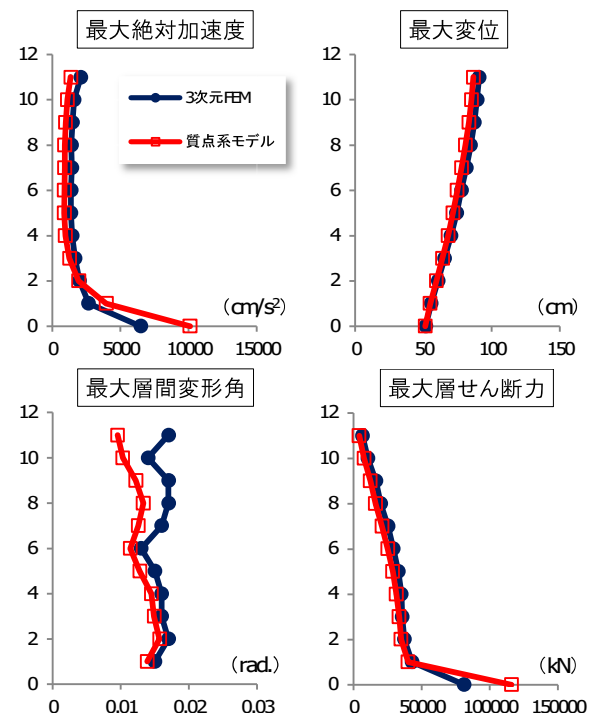


図 5 上部構造の最大応答値の比較

#### 参考文献

- 1) 山本慎也, 宮本裕司: 免震建物衝突時における擁壁抵抗の復元力特性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集 第 83 巻 第 749 号, 975-983, 2018.7
- 2) 佐藤綾香, 宮本裕司: 緩衝材を用いた免震建物の擁壁衝突応答低減に関する研究, 日本建築学会大会梗概集(東北), 2018.9
- 3) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 丸善, 2006.2
- 4) 大震研: 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015.2

\*1 ユニオンシステム

\*2 大阪大学大学院工学研究科

\*3 大阪大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

\*4 能勢建築構造研究所

\*1 UNION SYSTEM Inc.

\*2 Graduate School of Engineering, Osaka Univ.

\*3 Prof., Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.

\*4 Nose Structural Engineering

# 免震建物の擁壁衝突速度を考慮した簡易地震応答解析モデル

## その2 衝突速度に関するケーススタディ

正会員 山崎 久雄<sup>\*1</sup>  
 " ○ 貝谷 淳一<sup>\*2</sup>  
 " 岩本 裕史<sup>\*1</sup>  
 " 佐藤 綾香<sup>\*3</sup>  
 " 宮本 裕司<sup>\*4</sup>

地震応答解析 免震構造 擁壁衝突  
 衝突ばね 衝突速度 モデル化

### 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、免震建物の擁壁衝突を考慮する解析モデルに、擁壁形状および背後地盤を FEM 要素とした詳細モデルとそれをバイリニアモデルとした簡便モデルを用いた解析を行い、建物応答について両者の対応を確認した。また擁壁復元力は衝突時の瞬間速度の影響を受ける<sup>2)</sup>ため、前報で示した簡便モデルはそれを自動的に考慮している。

バイリニア特性の決定に衝突時の速度を反映させることは比較的容易ではあるが、解析プログラムの対応が必要となる。一方、バイリニア特性すなわち衝突速度を事前に設定できれば一般の汎用ライブラリによる利用も可能となる。

本報では、擁壁衝突を伴う免震建物の応答計算に衝突速度を直接指定した簡便モデルとすることについて、①衝突速度の事前予測、②指定衝突速度に関するケーススタディ、③衝突瞬間時の上部構造応答などを確認し、考察する。

### 2. 衝突速度の事前予測

図 1 は前報で示した簡便モデル（衝突速度を考慮）での免震層の変位および速度応答で、塗潰し部は衝突中の時間帯、数値は全 6 回中 3 回の衝突時速度である。また図 2 は非衝突解析による免震層の変位および速度応答で、塗潰し部は変位が 50cm（免震クリアランス）超となっている時間帯、数値は変位が 50cm を超える瞬間の速度である。

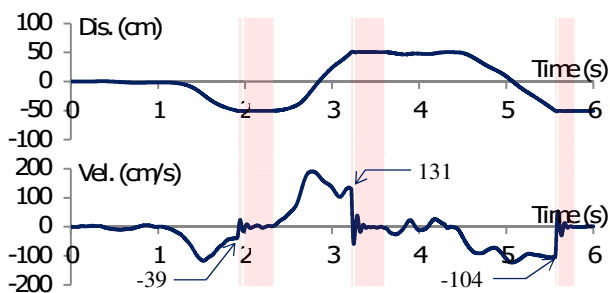


図 1 衝突を考慮した解析での免震層変位と速度応答

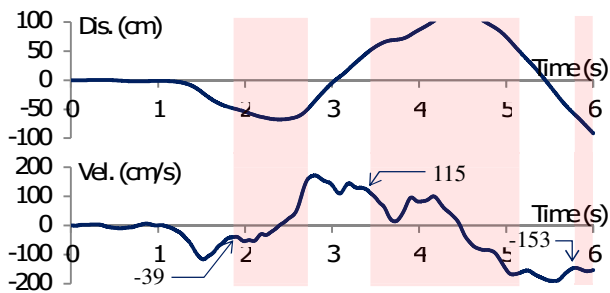


図 2 非衝突解析での免震層変位と速度応答

図 1、図 2 を比較すると、衝突の有無で応答の様子は異なるが、最初の衝突以降も両者に大きな位相のずれはない。2 回目以降の衝突が生じる時刻と非衝突解析でそれに対応する変位 50cm を超える瞬間時刻は近く、それらの速度は、2 回目 115/131、3 回目 153/104 と 88~147% の対応率である。図 1、図 2 は上部構造を非線形とした計算結果であるが、線形とした場合は 2 回衝突が生じており 2 回目の衝突速度の対応率は  $144/120=120\%$  であった（紙面の都合で図は省略）。

これらより非衝突解析結果の免震クリアランスを超えるときの最大速度と実際の最大衝突速度とは 1.5 倍程度までのばらつきが生じる可能性がある。この予測値を第一候補とし、数回の反復処理で最大応答に支配的な衝突速度が決定できるが、正負方向で大きく異なる場合は注意が必要である。

### 3. 衝突速度に関するケーススタディ

速度を自動評価して衝突ごとにバイリニア特性を設定したケース Auto (-39,131,-104cm/s で主に 3 回衝突) と、衝突速度を 25, 50, 100, 150cm/s の一定としてバイリニア特性を設定した 4 ケースによる加速度、変位、層間変形角、層せん断力（擁壁反力を含む）の各最大値を図 3 に示す。

衝突速度を大きく評価したバイリニア特性になるにしたがい、免震層の加速度と層せん断力係数が大きく評価され、加速度は免震層の直上層もやや大きくなる。しかし本例ではそれ以外への影響はほとんどない。ケース 150cm/s は Auto の最大衝突速度 131cm/s に近く、応答結果はほぼ一致した。

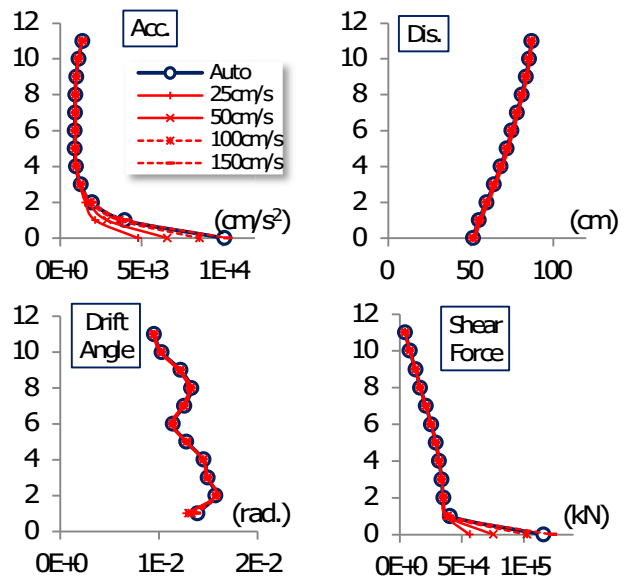


図 3 指定した衝突速度による最大応答の比較

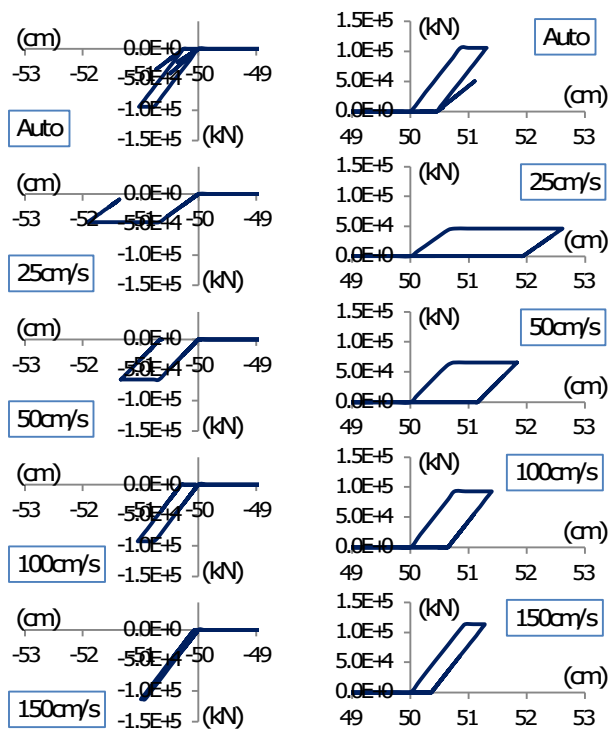


図4 指定した衝突速度による擁壁応答の比較

図4にAutoおよび各指定衝突速度の全5ケースでの擁壁の荷重-変形関係を示す。Autoでは毎衝突時の速度でバイリニア特性が再設定され、衝突速度を直接指定した場合は擁壁の剛性と最大荷重が一定値となり、特に擁壁反力と擁壁を押し込む変位に影響を及ぼす。

#### 4. 衝突瞬間時の上部構造応答

図5に衝突時の上部構造応答として1,3,5,7,9,11FLの速度、層間変位、層せん断力、転倒モーメントを示す（速度には免震層も図示）。いずれも前述の計算で衝突速度が最大となった2回目の衝突を含む3~4秒の時刻歴である。また塗潰し部は衝突中を示す。なお、衝突速度を自動的に考慮して計算した結果である。図3に示したとおり、指定衝突速度を50~150cm/sの範囲で設定し擁壁復元力を一定のバイリニア特性としても、上部構造の応答に与える影響は大きくない。ここでは、擁壁復元力の設定方法に関わらず生じるとされる上部構造の衝突時の挙動を確認する。

各階の速度時刻歴を見ると、衝突までは免震層を含め全階が1質点系のようにほぼ同一の速度応答を示していたのが、衝突により、まず免震層の速度が急激に低下する。そして、その上階への伝達には順に少なからず時間を要し、上階になるにしたがい急激な速度低下は鈍化していくことがわかる。また衝突時間中に全階の速度符号が反転している。

各階の層間変位時刻歴は速度に対応した応答となっており、下階から順に層間変位が生じ始め、衝突時間終了間際ですでに全階はピークに達しており、徐々に減少に転じ始める。

層せん断力の値は復元力特性にも影響するが、下階から順に上昇し始め、また順に減少に転じていくことがわかる。

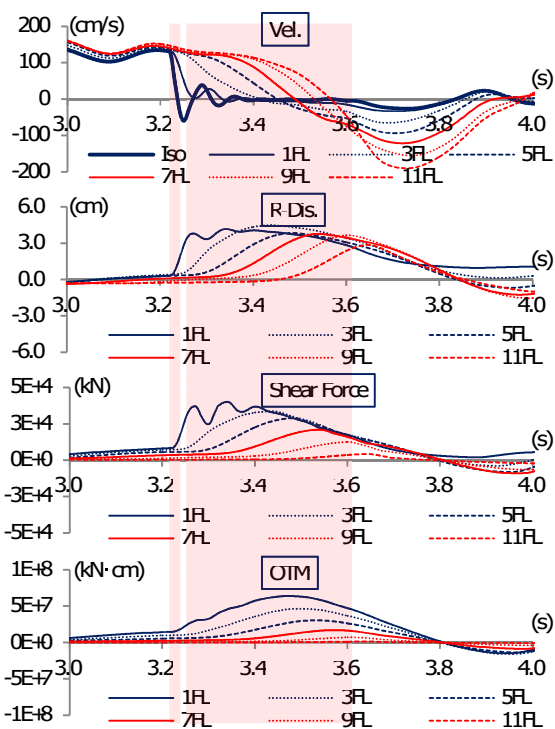


図5 衝突時の上部構造の応答（衝突速度はAuto）

転倒モーメントは本来1F脚部（図では1F）に着目すべきであるが、図ではそれより上階の3,5,7,9,11FL脚部での値も参考に示している。転倒モーメントは上階からの積分値であるため、そのピークは衝突時間の中間付近で生じている。

図5全体より、衝突の瞬間からその影響は下階から上階に時間ずれとともに伝搬され、衝突中の各階の時刻歴応答は位相差を生じるが、衝突終了直後は、衝突前と異なり、基礎固定時の多質点系におけるような応答が現れた。

#### 5. まとめ

免震建物の擁壁衝突モデルを、衝突速度を直接指定する簡便モデルを用いることについての検討を行った。

衝突速度は非衝突解析の応答変位からある程度予測できるが、本モデルより、2回目以降の衝突速度に対して1.5倍程度までのばらつきが生じる可能性があることがわかった。また本モデルでは、衝突速度は免震層と直上層での加速度、および擁壁の反力と押し込み変位に影響を及ぼし、それ以外の応答への影響は小さかった。

衝突速度が直接指定できると汎用ライブラリの機能で衝突計算を実施することができるが、応答を確認して反復処理が必要となることも十分に考えられる。また正負方向で衝突速度が大きく異なる場合などと考えると、それを逐次に評価できる解析モデルによることが合理的であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 岩本裕史, 山崎久雄, 佐藤綾香, 宮本裕司, 具谷淳一: 免震建物の擁壁衝突速度を考慮した簡易地震応答解析モデル その1 簡易衝突モデルと3次元FEMモデルによる比較, 日本建築学会大会梗概集(北陸), 2019.9
- 2) 山本慎也, 宮本裕司: 免震建物衝突時における擁壁抵抗の復元力特性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集 第83巻 第749号, 975-983, 2018.7

\*1 ユニオンシステム, \*2 能勢建築構造研究所

\*3 大阪大学大学院工学研究科

\*4 大阪大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

\*1 UNION SYSTEM Inc., \*2 Nose Structural Engineering

\*3 Graduate School of Engineering, Osaka Univ.

\*4 Prof., Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Dr. Eng.