

地震動と地盤変状の影響を同時に受ける建物の時刻歴応答解析に関する基礎的な研究

A Fundamental Study on the Transient Analysis of Building Responses under the Influence of Seismic Motion and Ground Deformation

坂 敏 秀 森 川 博 司 日 向 仁

要 約

本報告では、地震動と地盤変状が建物に同時に作用する場合の非線形時刻歴解析法に関して、基礎的な知見を整理する。まず、建物に作用する地動を地震動と地盤変状の成分に分離できると仮定する。次に、基礎方程式である運動方程式を整理する。このとき、地震動は慣性力として、地盤変状は強制変位として取り扱う。続いて、整理した運動方程式に基づく数値解析例を示し、地震動と地盤変状の影響を同時に受ける場合の建物の応答解析法の検証を示す。また、解析法の適用例として、基礎下に部分的に鉛直上向きの地盤変状を受ける場合について、地盤変状の動的な影響に関する検討結果を示し、解析法の有用性を示す。

目 次

- I. はじめに
- II. 定式化
- III. 数値解析例
- IV. おわりに

I. はじめに

近年、建物の地震被害に関して、地盤変状に着目されることが多くなってきている¹⁻⁹⁾。本報告では、地盤変状の意味するところを、文献1)を参考に、擁壁の変位・活断層の動き・地滑り・盛土層の締り・砂地盤の液状化・護岸の滑動などともなう基礎地盤の隆起・沈下・側方変位とする。これらの地盤変状の例として、新潟地震(1964年)²⁾や兵庫県南部地震(1995年)で観測された液状化・側方流動がある。また、地盤変状に起因する建物被害としては、この2つの地震被害¹⁻³⁾に加え、新潟県中越沖地震(2007年)⁴⁾、東北地方太平洋沖地震(2011年)⁵⁾、熊本地震(2016年)^{6,7)}などの地震で建物や基礎構造の被害が報告されている。

これらの被害に対して、建物被害に対する地盤変状の影響を探る研究が実験・解析の両面から多数なされているが、解析的研究の多くは静的挙動に立脚したものである^{例えば7)}。しかし、地盤変状による建物応答の評価や、建物被害の予測を行うためには、上部構造の慣性力と土圧合力の位相差に着目する必要⁸⁾が指摘されており、上部構造物の固有周期と地盤の卓越周期だけでなく、地盤変位と基礎部変位の影響を受け

る⁸⁾ことから、特に、基礎部変位を精度よく推定することが重要⁹⁾だと指摘されている。したがって、建物の応答を評価する目的に対して、建物・地盤・地震動の組み合わせの条件によっては、地盤変状の動的な効果を考慮した上で地震応答解析を実施することが適切な場合があると推測される。

地盤変状を考慮した解析法の例として、地中構造物を対象とした耐震計算に用いられる応答変位法がある。この解析法は、建物の慣性力と地盤の変位を考慮できる動的サブストラクチャー法の一つであるが、静的解析に立脚している¹⁰⁾。したがって、地盤変状の動的な影響を考慮・評価するために用いるには不適切である。

また、地盤の変位を考慮する動的な解析法として、埋め込みを考慮した動的サブストラクチャー法がある^{例えば11)}。代表的な方法は、地盤バネの計算、入力動の計算、建物-地盤バネ系の地震応答計算の3ステップにより構成される。建物-地盤バネ系の地震応答計算では、埋め込み部分に相当する建物自由度にドライビングフォースを入力する。このとき、建物と地盤バネ間は線形を仮定しているため、建物と地盤の間に接触剥離が生じる問題に対しては、剥離時のドライビングフォースを適切に処理する必要がある。

一方、地震時に生じる断層変位による土木構造物の応答を求める解析法として、変位と加速度を同時に入力する方法¹²⁾がある。この方法では、非線形時に数値的な不安定性が生じる可能性があり、静的変位応答を求めながら時刻歴解析を進める必要があるなど、手順が複雑である。また、強制外力に

キーワード: 非線形解析, 慣性力, 強制変位, 接触剥離, 重畳解析, 動的効果

Keywords: non-linear analysis, inertial force, imposed displacement, contact-separation, superimposed analysis, dynamic effect

より変位を入力する方法¹³⁾もあるが、この方法は、強制変位入力できない解析プログラムで変位の時刻歴入力を行うための便法である。そのため、入力変位用の質量と剛性を設定する際に、解析対象に応じたパラメトリックスタディが必要で、準備にひと手間かかる。

これらの既往の方法の課題に対処するため、本研究では、建物の応答を評価するにあたり、地震動と地盤変状の影響を同時に考慮可能な非線形時刻歴解析法の確立を目的とする。本報告では、地震動を地動加速度（慣性力）として、地盤変状を強制変位として取り扱う。以下では、慣性力と強制変位を同時に考慮可能な、建物の非線形時刻歴解析法を定式化し、基礎下の接触剥離を考慮した数値解析例により解析法の妥当性と有用性を示す。なお、本報告で示す解析法の特長は、地震動と地盤変状の成分を分離する仮定を明確にした点、地盤変状を強制変位として入力する際には、応答量を相対系で記述する必要があり、その基準を地震動成分に取る必要があることを明確にした点、地盤バネの固定点、すなわち無限遠方の点に自由度を与え、強制変位を与える点の3つである。

II. 定式化

本報告では、建物に作用する地動を地震動と地盤変状の成分に分離できると仮定する。その上で、地震動を地動加速度（慣性力）として、地盤変状を強制変位として取り扱う。

以下では、まず、1自由度系の運動に対して、慣性力と強制変位を同時に考慮可能な非線形の運動方程式を定式化する。続いて、多自由度系についても同様の式を示す。

1. 1質点系の運動方程式

Fig. 1(a)に示す底部を固定された1質点モデルが、地動に対して応答する問題について考える。質点1の質量を m 、減衰係数を c 、バネ剛性を k とする。質点の加速度を a_1 、速度を v_1 、変位を d_1 とする。また、入力点2（地動）の加速度を a_2 、速度を v_2 、変位を d_2 とする。なお、これらの応答を表す座標系を「絶対系」と呼ぶ。

(1) 慣性力を入力する場合

最初に、従来用いられている慣性力を入力する方法（方法1・従来法）について整理する。Fig. 1(b)のように、地動を規定する点（入力点）を固定し、入力点の動きを基準とした座標系（相対系 I）で建物の応答を表す。以下では、この相対系 I の応答量に「'」（ダッシュ）をつける。また、地動と逆向き加速度を質量に掛け合わせた慣性力（ $-ma_2$ ）が外力として質点に対して作用すると考える。したがって、相対系 I での運動方程式は次のように書ける。

$$ma_1' + cv_1' + kd_1' = -ma_2 \quad (1)$$

(2) 強制変位を入力する場合

次に、質点と入力点の2自由度系に関する運動とみなし、絶対系の応答量を用いて、運動方程式をマトリクス表記すると、次のように書ける。

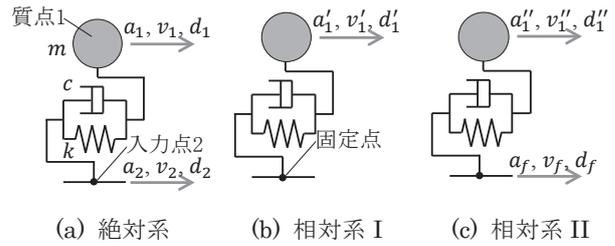


Fig.1 1質点モデルと応答の座標系 (Single Degree-of-Freedom Model)

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c & -c \\ -c & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k & -k \\ -k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、右辺の r は入力点の反力である。

式(2)では質点1の応答量が未知で、質点2の応答量は既知である。したがって、1行目は式(1)と等価であり、式(2)の実質の方程式は1行目だけである。一方、2行目は、未知量である反力 r を求める式になっている。

この式(2)のように、入力点に強制速度と強制変位を与える方法を、強制変位を入力する方法（方法2）と呼ぶ。

(3) 慣性力と強制変位に分離して入力する場合

次に、作用する地動を地震動と地盤変状の成分に分離する。

$$\begin{cases} a_2 = a_g = a_e + a_f \\ v_2 = v_g = v_e + v_f \\ d_2 = d_g = d_e + d_f \end{cases} \quad (3)$$

ここで、添え字 g は地動を意味し、添え字 e が地震動成分、添え字 f が地盤変状成分である。

続いて、Fig.1(c)のように、応答量を表現する座標系として、地震動によって生じる地動（ a_e, v_e, d_e ）を基準とするような相対系 II を考える。この座標系による質点1の応答量（ a_1'', v_1'', d_1'' など）、"」（ツェーダッシュ）をつけて表す）を用いると次のようになる。

$$\begin{cases} a_1 = a_e + a_1'' \\ v_1 = v_e + v_1'' \\ d_1 = d_e + d_1'' \end{cases} \quad (4)$$

この相対系 II の応答量（式(4)の a_1'', v_1'', d_1'' ）で式(2)の運動方程式を記述すると、次のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1'' \\ a_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c & -c \\ -c & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1'' \\ v_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k & -k \\ -k & k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1'' \\ d_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -ma_e \\ r \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(2)と同様、式(5)も1行目が質点1の応答を求める式で、2行目が反力 r を求める式であり、実質の方程式は1行目のみである。

式(5)のように、地震動の地動加速度 a_e によって生じる慣性力を外力として、地盤変状に関する地動の速度 v_f と変位 d_f を入力点に対する強制変位として扱いながら、地震動によって生じる地動を基準とする相対系の応答量に関して解く方法を、慣性力と強制変位の混合入力法(方法3・提案法)と呼ぶ。

(4) 減衰力と復元力の非線形性の考慮

減衰力および復元力の非線形性を考慮するには、方法2の式(2)または方法3の式(5)での、減衰マトリクスと速度ベクトルの積・剛性マトリクスと変位ベクトルの積の代わりに、ダッシュポットとバネの力を評価すればよい。例えば、方法3であれば、次式のように表す。

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1'' \\ a_f \end{pmatrix} + p(v_1', v_f) + q(d_1'', d_f) = \begin{pmatrix} -ma_e \\ r \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $p(v_1', v_f)$ はダッシュポットの減衰力、 $q(d_1'', d_f)$ はバネの復元力である。

2. 多質点系の運動方程式

Fig. 2のように、建物—基礎—地盤を模擬した多質点モデルに対する運動方程式を示す。式(5)と同じく、慣性力と強制変位を同時に考慮した線形の系の場合、次のように表せる。

$$\begin{pmatrix} M_{BB} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_B'' \\ a_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_{BB} & C_{BS} \\ C_{SB} & C_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_B' \\ v_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{BB} & K_{BS} \\ K_{SB} & K_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_B'' \\ d_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -M_{BB} \mathbf{1} a_e \\ r \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 M_{**} は質量マトリクス、 C_{**} は減衰マトリクス、 K_{**} は剛性マトリクス、添え字 B は建物の自由度に、 S は入力点の自由度に関連するものを意味する。 a_B'' 、 v_B' 、 d_B'' は、地震動を基準とする相対系で表した建物の応答量で、 a_f 、 v_f 、 d_f は、それぞれ入力点の地盤変状成分の加速度、速度、変位である。右辺の a_e は地動の地震動成分であり、 $\mathbf{1}$ は地震動を入力している成分が1で、その他の成分が0のブーリアンベクトルである¹⁴⁾。 r は入力点の反力である。

1自由度系と同じように式(7)は、1行目が未知量である建物の自由度の応答を求める式で、2行目は入力点に生じる反力を求める式である。実質の方程式は1行目のみである。

式(7)を解釈すると、地震動の地動加速度によって生じる慣性力を外力として、地盤変状に関する地動の速度と変位を入力点に対する強制変位として扱いながら、地震動を基準とする相対系の応答量に関して運動方程式を解けばよいことが分かる。

この定式化の特長は、強制変位を入力する点が1点に制限されず、Fig. 2のように複数点でも構わない点である。つまり、地盤変状が生じる任意の節点に対して、任意の強制変位

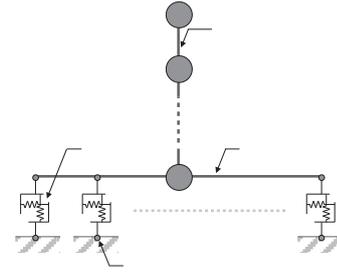


Fig. 2 多質点モデルの例 (Multiple Degree-of-Freedom Model)

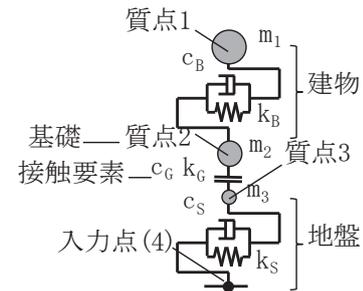


Fig. 3 3質点モデル (Three Degree-of-Freedom Model)

を与えることが可能である。したがって、地震動と地盤変状を重畳させて解くことが可能である。

なお、式(7)で、減衰力と復元力の非線形性を考慮すると、次のように表せる。

$$\begin{pmatrix} M_{BB} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_B'' \\ a_f \end{pmatrix} + p(v_B', v_f) + q(d_B'', d_f) = \begin{pmatrix} -M_{BB} \mathbf{1} a_e \\ r \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$p(v_B', v_f) = \sum_e p_e(v_B', v_f) \quad (9)$$

$$q(d_B'', d_f) = \sum_e q_e(d_B'', d_f) \quad (10)$$

ここで、 $p(v_B', v_f)$ は減衰力、 $q(d_B'', d_f)$ は復元力で、 $p_e(v_B', v_f)$ は要素 e の減衰力、 $q_e(d_B'', d_f)$ は要素 e の復元力である。陰解法による直接時間積分を実施する際には、式(8)に基づいて、Newton-Raphson法などの非線形解法を用いなければならない。

III. 数値解析例

1. 線形モデルでの検証

本節では、提案法の検証を目的として、地動加速度が作用する場合の地震応答を方法1～3によって求める。慣性力を入力する線形の問題を例に、3ケースの計算結果を比較し、方法2と方法3の応答を確認する。

Fig. 3の3質点モデルを用いた線形解析での計算例を示す。モデルの定数は次のとおりである。質点1と質点2の質量はそれぞれ50万t、15万tとする。建物のバネ剛性は $k_B=2.0 \times 10^9$ kN/mとする。地盤のバネ剛性は $k_S=1.2 \times 10^8$ kN/mと

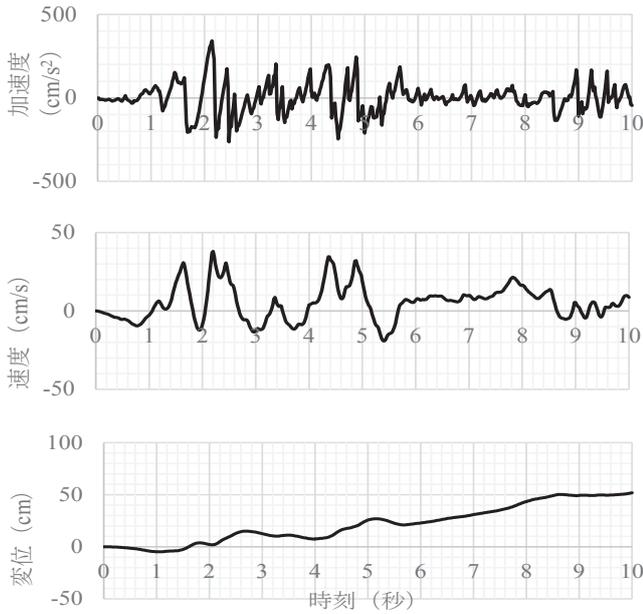


Fig. 4 入力波形
(Input Wave: El Centro NS)

し、接触要素に相当する線形バネの剛性 k_g は地盤の 1,000 倍とする。減衰係数は建物と地盤でそれぞれ $c_B=2.9 \times 10^6$ kNs/m, $c_S=5.5 \times 10^5$ kN·s/m とする。このモデルの連成系の 1 次固有周期は 0.5 秒である。

入力地震動は、継続時間 10 秒までの El Centro NS 波とする。また、方法 2 と 3 で用いる速度と変位の波形は、加速度波形を Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$) の加速度-速度-変位の関係に基づいて積分して求める。これらの波形を Fig.4 に示す。なお、方法 3 では式(3)における地震動 (慣性力) と地盤変状 (強制変位) の割合を 50%ずつとする。

計算条件は、時間刻みを 0.02 秒とし、時間積分法として Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$) を用いる。

得られた結果のうち、質点 1 の応答波形を Fig.5 に示す。なお、応答加速度は絶対系の値 a_1 で、応答変位は、入力点を基準とした相対系の値 d_1' で比較している。波形は重なっており、図から方法の違いは確認できない。

得られた節点 1 の応答最大値はいずれも、応答加速度が 1,075 cm/s^2 、応答変位が 5.90 cm である。

以上より、慣性力を入力する線形の問題において、強制変位を与える方法 2 および慣性力と強制変位を同時に考慮可能な方法 3 を検証した。

2. 非線形モデルでの検証

前節に続き、提案法の検証を目的として、慣性力を入力する非線形の問題を例に、方法 2 と方法 3 の応答を確認する。

Fig.6(a)に、解析モデルを示す。上部を 1 質点とし、80m 四方の剛な基礎の建物が、接触要素を介して地盤上に建っている。接触要素は軸方向が離間し、すべり方向は摩擦を考慮せずに固着状態を維持すると仮定した。

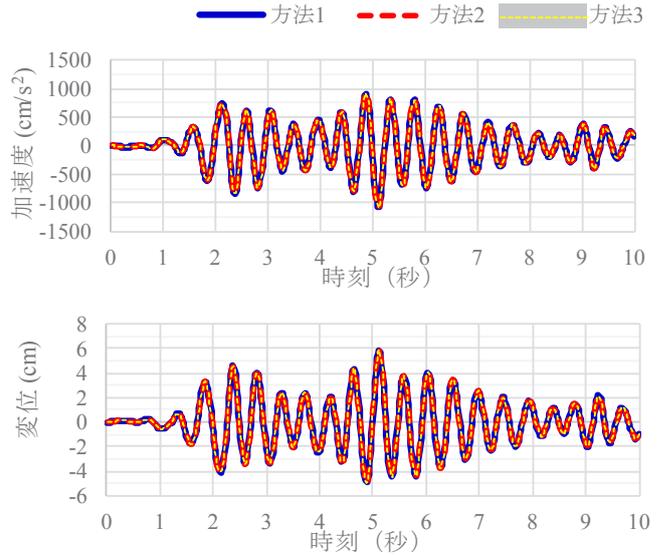


Fig. 5 質点 1 の応答波形
(Responses of Node 1)

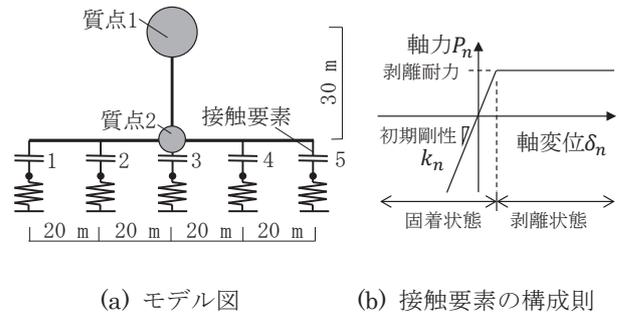


Fig. 6 解析モデル
(Numerical Model)

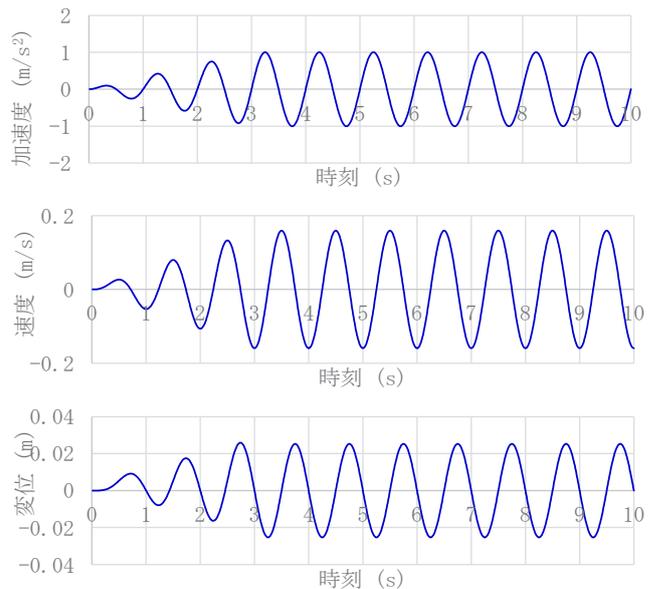


Fig. 7 入力波形
(Input Wave)

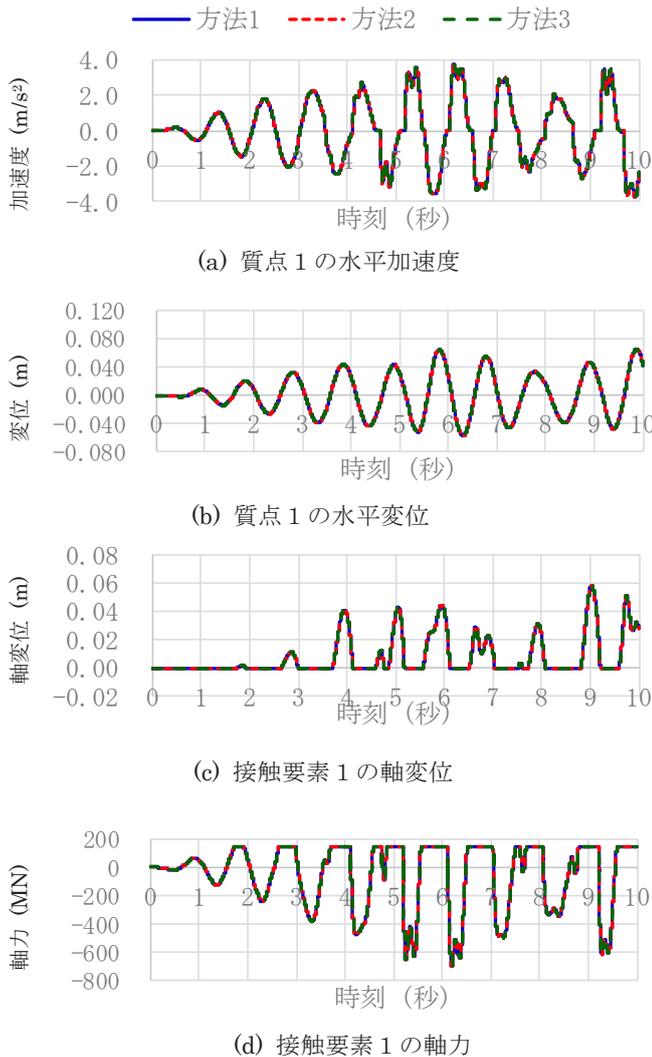


Fig. 8 応答波形
(Typical responses)

質点1と2の質量はそれぞれ48万t、16万tとする。建物の剛性を表現する曲げせん断棒は、ヤング係数 $E=20$ GPa, せん断弾性係数 $G=8.3$ GPa, 断面積 $A=2800$ m², 断面2次モーメント $I=2.3 \times 10^6$ m⁴とする。地盤バネは、単位面積当たりの剛性で、水平方向が 1.0×10^4 kN/m/m², 鉛直方向が 3.0×10^4 kN/m/m²とする。

接触要素は、Fig.6(b)に示すようなパイリニアの非線形弾性特性を軸方向に与える。初期剛性は、地盤ばねの剛性の1,000倍とし、剥離耐力は190 kN/m²とする。剥離状態での接線剛性は0とする。

建物の減衰は内部粘性減衰とし、連成系の1次固有周期0.7秒に対し3%を与える。地盤の減衰は、同じく5%とする。

入力加速度は、周期1s, 継続時間10s, 片振幅1m/s²のテーパ付き正弦波(3秒まで漸増)を用いる。この入力加速度をNewmark-β法(β=1/4, γ=1/2)の加速度-速度-変位の関係に基づいて、速度と変位の波形を求める。これら3つの波形をFig.7に示す。入力速度、変位は方法2, 3で用

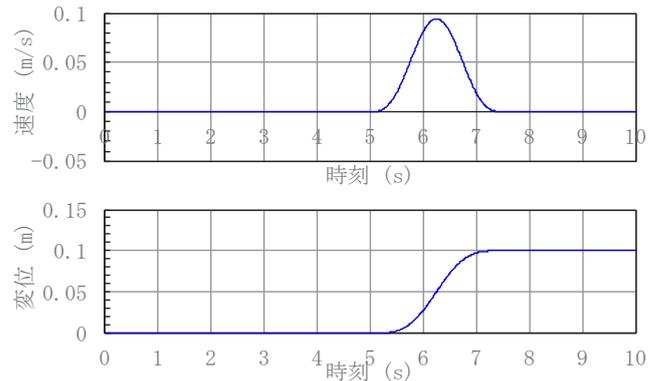


Fig. 9 入力波形(鉛直変位成分)
(Input Wave: Vertical Displacement)

いる。方法3では、慣性力と強制変位の割合を50%ずつとする。

時間刻みは、再接触後の加速度波形が安定するように、1/4,000秒とし、時間積分法はNewmark-β法(β=1/4, γ=1/2)を用いる。

Fig.8に、計算結果を示す。(a)に質点1の水平加速度、(b)に同じく水平変位、(c)に接触要素1の軸変位、(d)に同じく軸力の波形を示す。いずれの波形も重なっており、結果は十分一致していることが確認できる。

以上により、慣性力を入力する非線形の問題に対して、強制変位を与える方法2および慣性力と強制変位を同時に考慮可能な方法3を検証した。

3. 重畳解析の検証

前節に続き、提案法の検証を目的として、地震動と地盤変状の影響を同時に受ける問題を、強制変位を与える方法2および慣性力と強制変位を同時に考慮可能な方法3の2種類で解き、両者の応答が一致することを確認する。なお、この問題では、地盤変状の成分を慣性力として入力できないため、方法1は使えない。

解析モデルと入力地震動は前節で用いたもの(Fig.6と7)をそのまま用いる。地盤変状に相当する鉛直変位は、Fig.6(a)の左側2つの固定点に上向きに入力する。その波形は次式で定義する。

$$d_f(t, t_0) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_0 \\ \frac{A}{16} \left(\cos \frac{6\pi(t-t_0)}{T} - 9 \cos \frac{2\pi(t-t_0)}{T} + 8 \right) & t_0 \leq t < t_0 + \frac{T}{2} \\ A & t_0 + \frac{T}{2} \leq t \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 d_f は地動の地盤変状成分の変位、 t は時刻、 t_0 は変位の生起時刻、 A は変位の最大値、 T は波形の卓越周期である。

Fig.9に入力波形を示す。ただし、変位の生起時刻 $t_0=5.0$ 秒、変位の最大値 $A=0.1$ m、波形の卓越周期 $T=5$ 秒とする。

解析ケースは、方法2と方法3の2ケースとする。方法2

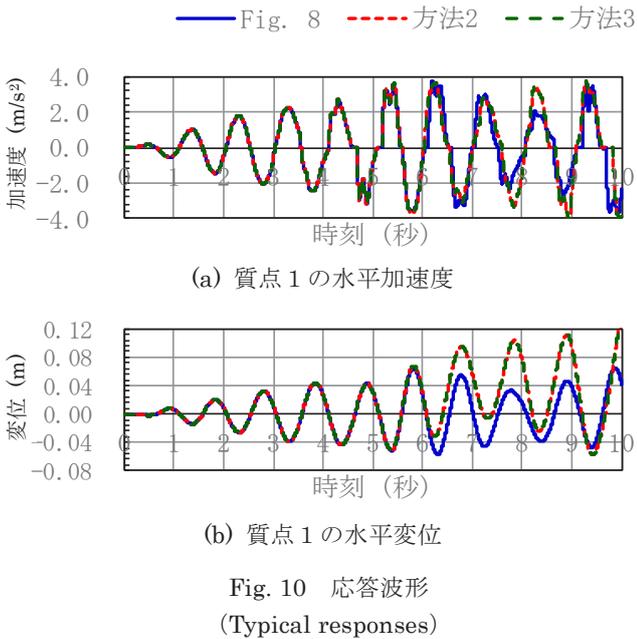


Fig. 10 応答波形
(Typical responses)

では、地震動を強制変位として水平方向に作用させる。方法3では、地震動を慣性力として水平方向に作用させる。両者とも、鉛直変位は強制変位として作用させる。

時間刻みは前節と同じく 1/4,000 秒とし、時間積分法は Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$) を用いる。

Fig. 10 に解析結果を示す。(a)に質点1の水平加速度、(b)に同じく水平変位を示している。方法2と方法3の結果は重なっており、両者の応答が一致していることを確認できる。また、青線で示した Fig. 8 の結果と比較すると、時刻約6秒以降の波形に違いが生じている。地盤変状成分の影響が現れていると考えられる。

以上により、地震動と地盤変状の影響を同時に考慮するための非線形の時刻歴解析法として、慣性力と強制変位を同時に考慮可能な方法3を検証した。

4. 地盤のモデル化の検討例

本報告で提案した解析法に基づいた検討例を示す。本節では、地盤のモデル化の妥当性を確認するための検討例を示す。解析対象は、IIIの2節の建物と地盤の条件とする。

Fig. 11 に解析モデルを示す。地盤のモデル化は、(a) 接触要素と地盤バネを直列につなぎ、接触要素は固着時に剛、剥離時に無剛性を表現するモデル1と、(b) 接触要素のみとし、固着時に地盤剛性、剥離時に無剛性を表現するモデル2の2通りとする。モデル1はIIIの2節のモデルと同一である。なお、モデル1の接触要素には固着時に剛とするための硬いバネがあるが、モデル2にはそれがなく、数値計算における安定性を保ちやすいと考えられる。

接触要素は、軸方向は Fig.6(b)の構成則に従って接触剥離し、すべり方向は固着状態とする。剥離耐力は $190kN/m^2$ とする。初期剛性は、モデル1では地盤ばねの剛性の1,000倍、モデル2では等倍とする。剥離時の接線剛性は0とする。

減衰は、内部粘性減衰とする。減衰定数は、連成系の1次

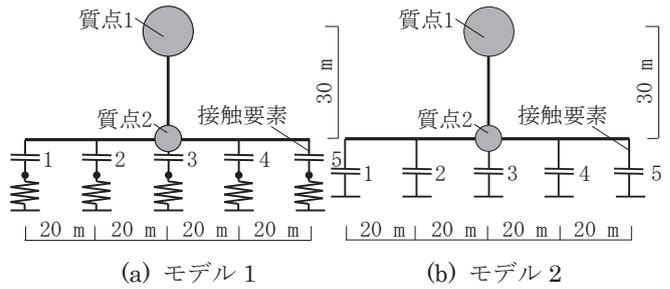


Fig. 11 解析モデル
(Numerical Models)

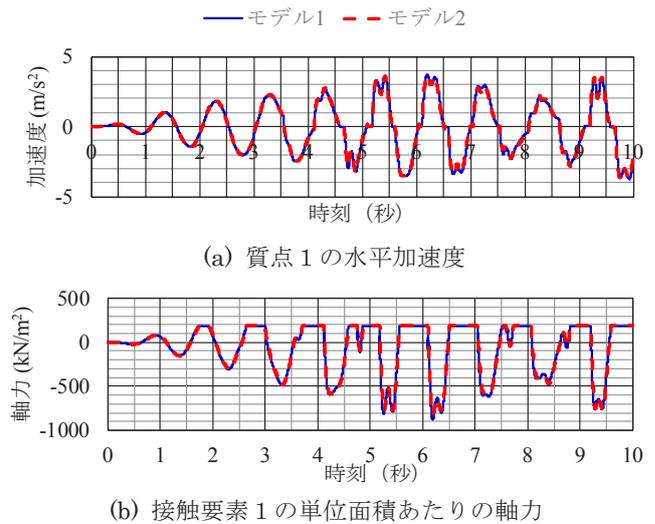


Fig. 12 応答波形
(Typical responses)

固有周期0.7秒に対して、建物が3%、地盤が5%とする。剥離状態の減衰力が0となるように、モデル1は初期剛性比例型で、接触要素の減衰定数は0%、モデル2は瞬間剛性比例型で、接触要素の減衰定数は5%とする。

時間刻みは前節と同じく 1/4,000 秒とし、時間積分法は Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\gamma=1/2$) を用いる。

Fig.12 に応答波形を示す。(a)は、質点1の水平加速度波形、(b)は接触要素1の単位面積当たりの軸力である。モデル1と2を比較すると、ピークに若干の違いが生じているが、ほぼ一致している。違いが生じる原因は、地盤と接触要素のモデル化の違いに起因している。

Fig.11 に示す2つの地盤のモデルによる解析結果を比較し、両者はほぼ一致することを確認した。地盤を接触要素のみでモデル化した場合でも、提案法を適用した際に大きな問題がないことを把握した。

5. 地盤変状の動的な影響の検討例

提案法を用い、建物の基礎下に鉛直変位を動的に作用させる解析を実施する。解析法の適用性を示すとともに、建物応答に対する鉛直変位入力の変動的な影響を検討する。

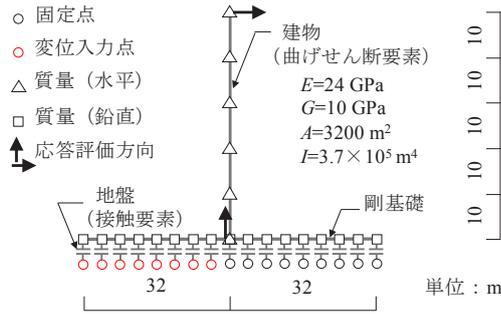


Fig. 13 解析モデル (Numerical Model)

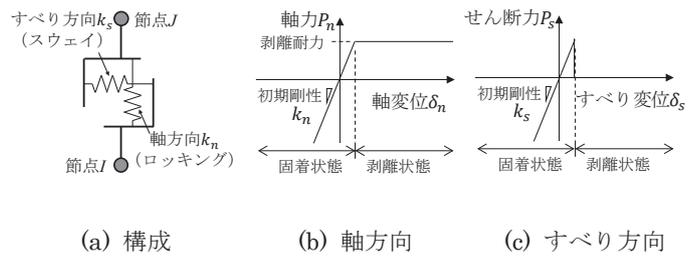


Fig. 14 接触要素のモデル化 (Contact Elements)

Table 1 仮定した地盤定数 (Soil Properties)

名称	Vs400	Vs1500
せん断波速度 (m/s)	400	1,500
スウェイばね (kN/m)	5.9×10^7	6.0×10^8
ロッキングばね (kN·m/rad)	7.2×10^7	5.1×10^{11}
系の1次固有周期 (s)	0.48	0.19

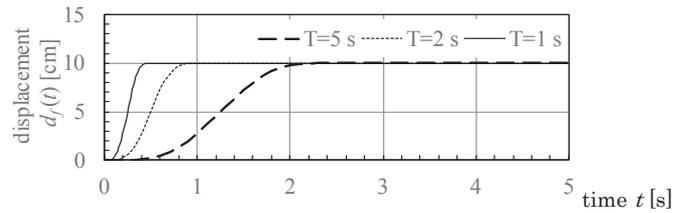


Fig. 15 入力波形 (最大振幅 A=10 cm) (Input Wave: A=10 cm at maximum)

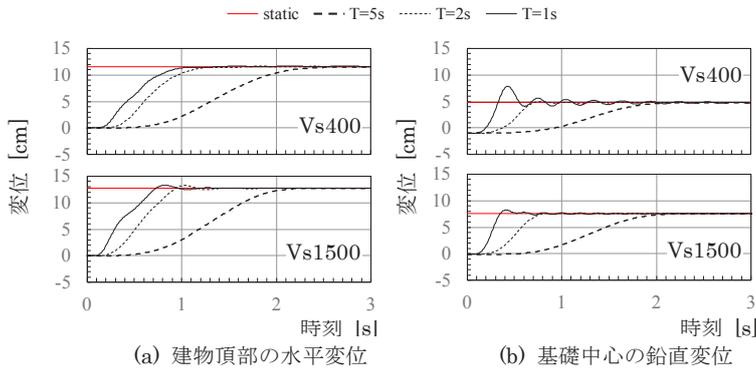


Fig. 16 変位の時刻歴波形 (Displacement Response)

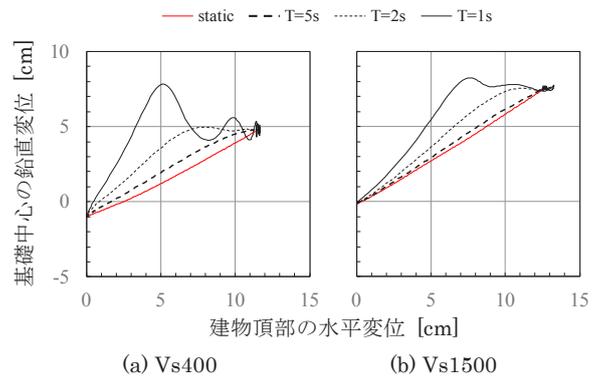


Fig. 17 変位の履歴 (Displacement Hysteresis)

Fig.13 に示す基礎剛の多質点モデルを用いる。建物は弾性とする。建物の総質量を 20 万 t とし、水平方向の質量は曲げせん断要素に、鉛直方向の質量は剛基礎に分布させる。地盤は、せん断波速度 400, 1,500 m/s の 2 種類を仮定し、半無限地盤上の正方形剛基礎の仮定¹⁵⁾より地盤ばねを求め (Table 1), スカラーの分布ばねに置換する。接触要素は、Fig.14 に示すモデル化とし、初期剛性は地盤ばねの剛性の値、剥離耐力は 0 とし、静的な自重解析により初期状態を設定する。なお、摩擦すべりは生じず、剥離時にせん断力を解放すると仮定する。減衰は、瞬間剛性比例型の内部粘性減衰とし、建物と地盤ともに、連成系の 1 次固有周期に対して 3% を設定する。また、時刻歴解析に先立ち、静的な自重解析を実施し、解析モデルの初期状態を定めた。

Fig.15 に、入力する変位波形 (式(3)の d_f) を示す。前述の式(11)に従うものとし、生起時刻 $t_0=0$ 秒、最大振幅 $A=10$ cm とし、波形周期 T は、系の卓越周期より長い 5, 2, 1 秒の 3 種類とする。この変位波形を時間微分して速度波形 (式(3)の v_f) とする。この変位と速度を Fig.13 で示した変位入力点に鉛直上向きに入力し、1/8,000 秒の時間刻みで応答解析する。解析結果について述べる。Fig.16 に建物頂部の水平変位と基礎中心の鉛直変位の時刻歴波形を示す。いずれも静的な結果に収束する。Vs400 より Vs1500 の方が大きな値である。水平変位は、Vs400 ではほぼ単調に右方向に変位し、Vs1500 では僅かに振動しながら変位する。鉛直変位は、 $T=1$ 秒では大きめの振幅を、 $T=2$ 秒では僅かな振幅を示し、 $T=5$ 秒では単調に鉛直上向きに変位する。なお、Vs400 の方が振幅は大

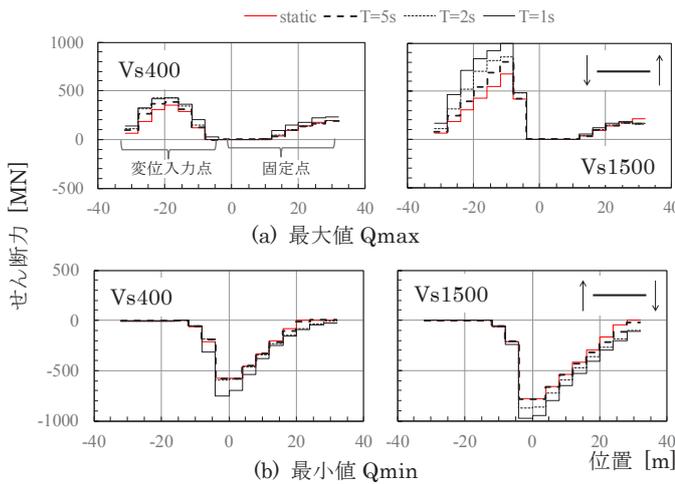


Fig.18 剛基礎の最大せん断力分布
(Maximum Shear Force)

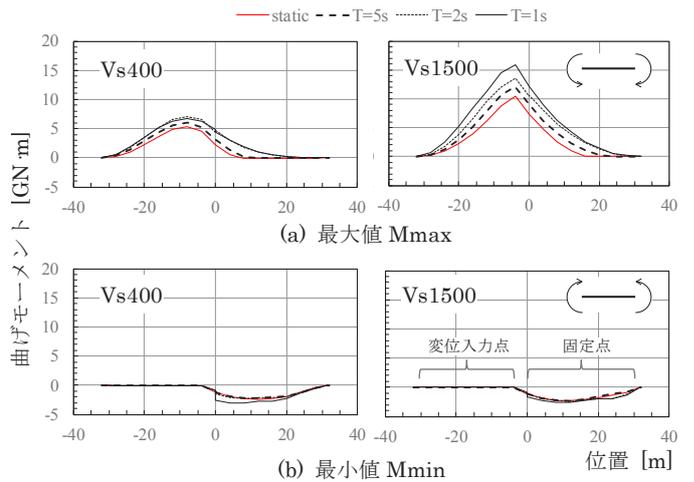


Fig.19 剛基礎の最大曲げモーメント分布
(Maximum Bending Moment)

きい。

Fig.17 に、Fig.16 の時刻歴波形を用いた履歴を示す。波形周期 T が小さくなるにつれて、鉛直変位の動きから遅れて水平変位が生じ、静的解析の結果からかい離する。 T が小さいほど動的な影響が大きいことが分かる。なお、本検討では、波形周期は系の卓越周期より長い場合、このような傾向になったと考えられる。波形周期が系の卓越周期より短い場合については、別途検討が必要だと考えられる。

次に、剛基礎の応力に対する動的な影響を検討する。応力は、剛基礎の節点に働く力と釣り合うものとして求めた。なお、曲げモーメント M の符号は上側引張を正とし、 Q の符号は $Q=dM/dx$ の向きを正とする。

Fig.18 に、剛基礎に生じるせん断力 Q の最大値 Q_{max} と最小値 Q_{min} の分布を示す。 Q_{max} の変位入力点側と Q_{min} の固定点側で、 T が小さくなるにつれて応力が大きくなっており、動的な影響が明確である。絶対値が最大となるせん断力は、変位入力点と固定点の境界で生じ、その絶対値は $Vs400$ より $Vs1500$ の方が大きい。なお、絶対値が最大となるせん断力の符号は、変位入力点と固定点の境界で切り替わっている。

Fig.19 に、剛基礎に生じる曲げモーメント M の最大値 M_{max} と最小値 M_{min} の分布を示す。 M_{max} では、 T が小さくなるにつれて応力の値が大きくなっており、動的な影響を確認できる。 M_{min} の変位入力点側には曲げモーメントが生じず、固定点側には動的な影響があまり生じない。絶対値が最大となる曲げモーメントは、 M_{max} の基礎中心やや左で生じ、その絶対値は $Vs400$ より $Vs1500$ の方が大きい。

以上により、慣性力と強制変位を同時に考慮可能な非線形時刻歴解析法を用い、多質点モデルに鉛直変位を入力した際

の建物応答に対する動的な影響を検討した。その結果、入力波形の卓越周期が長くなると、動的解析の応答変位は静的解析の結果に収束することを確認した。また、静的解析とは異なる変位履歴となることや、静的解析よりも大きな最大応力が生じることを確認し、建物応答に動的な影響が生じることを把握した。なお、動的な影響が現れるかどうかは着目する部位や応力（最大値・最小値）によって異なり、今回のように入力変位の波形周期が系の卓越周期より長い場合、入力変位の周期が短いほど影響が大きいことが分かった。

最大応力の定量的な評価は、今後更なる検討が必要だが、入力変位の波形周期によっては、応力の評価に動的な効果を考慮すべき場合があると考えられる。

IV. おわりに

本報告の成果を以下にまとめる。

- 地震動と地盤変状の影響を同時に考慮可能な非線形時刻歴応答解析法のための運動方程式を定式化した。入力点を含む多自由度系の運動方程式を基本とし、地震動によって生じる地動を基準とするような座標系を選ぶことにより、地震動を慣性力として、地盤変状を強制変位として与えることが可能になることを示した。
- 地震動を入力とする問題に対して、線形解析と非線形解析で、慣性力入力する従来法と、本報告で整理した強制変位を入力とする方法（方法2）と、慣性力と強制変位を同時に入力する方法（方法3）の3者の結果が一致することを確認した。
- 地震動と地盤変状が同時に作用する問題に対して、強制変位を入力とする方法と、慣性力と強制変位を同時に入力する方法の2者の結果が一致することを確認した。

以上により、地震動と地盤変状の影響を同時に考慮し、重畳解析が可能な非線形時刻歴解析法を提案し、数値解析例により解析法を検証した。

また、次の2つの検討例を示し、提案法の有用性を示した。

- ・ 地盤のモデル化を、剛な接触要素と地盤バネを直列につないだもの(モデル1)と、接触要素のみで接触剥離と地盤バネの両方を表現するもの(モデル2)の2種類用意し、両者の応答がほぼ一致することを確認し、モデル2でも大きな問題がないことを把握した。
- ・ 剛基礎の建物モデルの基礎下に、部分的に鉛直変位が生じるような地盤変状の問題に対し、地盤変状の動的な影響の定性的な傾向を把握した。

残された課題として、地盤を分布スカラーバネでモデル化することの妥当性の確認や、建物の非線形性を考慮した際の建物応答の傾向の把握などが挙げられる。

なお、本報告は文献(16-19)を整理し加筆したものである。

参考文献

- 1) 山肩邦男;兵庫県南部地震による基礎構造の被害と地盤変状との関係,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),1996, pp.583-584.
- 2) 浜田政則;液状化による地盤変状(新潟地震(1964年)によって提起された宿題は解決できたか),振動部門パネルディスカッション,建築雑誌,1992, pp.133-134.
- 3) 多田公平,時松孝次,浅香美治;液状化・側方流動に伴う地盤変形を考慮した杭の変位・応力分布,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東),1997, pp.771-772.
- 4) 新井洋,田村修次,時松孝次,肥田剛典,坂本忠,前田修宏;新潟県中越沖地震における柏崎市西本町の木造住宅被害の要因分析,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),2008, pp.691-692.
- 5) 島田侑子,山田哲,吉敷祥一,伊山潤,松本由香,浅田勇人;東北地方太平洋沖地震等による鉄骨造文教施設の被害と地盤変状,日本建築学会技術報告集,第19巻,第42号,2013, pp.573-578.
- 6) 丹裕也,護雅史,福和伸夫;2016年熊本地震で被災した低層RC造杭基礎建物の非線形相互作用解析,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),2017, pp.765-766.
- 7) 山村彩華,川添千華,杉野未奈,柏尚稔,林康裕;断層変位による杭支持構造物への影響評価に関する基礎的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国),2017, pp.527-528.
- 8) 田村修次,肥田剛典;地震時土圧と側面摩擦力を考慮した応答変位法による杭応力評価 -液状化地盤上に乾燥砂層が存在するケース-,日本建築学会構造系論文集,第76巻,第670号,2011, pp.2115-2121.
- 9) 肥田剛典,田村修次;基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法による液状化地盤の相対密度が杭応力に及ぼす影響の検討,構造工学論文集B,Vol.57,2011, pp.101-106.
- 10) 立石章;応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究,土木学会論文集, No.441/I-18, 1992, pp.157-166.
- 11) 市川隆之,中井正一,渡辺孝英,広谷勉,室井一夫;動的サブストラクチャー法による埋込みを有する構造物の簡易地震応答解析,清水建設研究報告,第42号,1985, pp.31-40.
- 12) 宮崎涼太,中野友裕,太田良巳;断層変位を受けるPCラーメン橋の動的応答解析,コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, 2008, pp.937-942.
- 13) 大塚久哲,古川愛子,中村壮;断層変位を受ける鋼斜張橋の動的解析,地震工学論文集,29巻,2007, pp.450-457.
- 14) 柴田明德;最新耐震構造解析,森北出版,1981.
- 15) 建築学会編;入門・建物と地盤の動的相互作用,1996, pp.341-342.
- 16) 坂敏秀,森川博司;動的な慣性力と強制変位を同時に考慮可能な建物の時刻歴解析法,日本建築学会関東支部研究報告集I,2018, pp.265-268.
- 17) 坂敏秀,日向仁,森川博司;動的な慣性力と強制変位を同時に考慮可能な非線形時刻歴解析法(その1)定式化と線形モデルでの検証,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),2018, 275-276.
- 18) 日向仁,坂敏秀,森川博司;動的な慣性力と強制変位を同時に考慮可能な非線形時刻歴解析法(その2)非線形モデルでの検証,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),2018, 277-278.
- 19) 坂敏秀,森川博司;動的な慣性力と強制変位を同時に考慮可能な非線形時刻歴解析法(その3)建物応答に対する鉛直変位入力の動的な影響の検討,日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),2019, pp.349-350.

A Fundamental Study on the Transient Analysis of Building Responses under the Influence of Seismic Motion and Ground Deformation

Toshihide Saka, Hiroshi Morikawa and Hitoshi Hinata

This study examined the fundamental nonlinear transient responses of buildings under the influence of seismic motion and ground deformation. First, the ground motion of interest is assumed to be separated into seismic motion and ground deformation. Second, the equation of motion is derived in which the seismic motion is treated as inertial force and the ground deformation is treated as imposed displacement. Third, numerical examples are indicated to demonstrate the effectiveness of the proposed method for obtaining the nonlinear transient responses of a building under both seismic motion and ground deformation. The examples include the case in which a building is partially affected by the ground deformation beneath the rigid foundation and the dynamic effect of the ground deformation is investigated.