

解析手法や境界条件等の違いが 地盤—基礎—上部構造物からなる系の 動的挙動に与える影響評価

宇野州彦¹・塩尻弘雄²・川口和広³・仲村成貴⁴・中原知洋⁵・大島貴充⁶

¹修(工) 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:Kunihiko.Uno@mail.penta-ocean.co.jp

²工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

E-mail:shiojiri@civil.cst.nihon-u.ac.jp

³修(工) JIPテクノサイエンス(株) 東京テクノセンタ (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町1-2-5)

E-mail:kawaguti@tokyo.jip-ts.co.jp

⁴博(工) 日本大学助手 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8)

E-mail:masa@civil.cst.nihon-u.ac.jp

⁵修(工) 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail:Tomohiro.Nakahara@mail.penta-ocean.co.jp

⁶修(工) 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木設計部 (同上)

E-mail:Takamitsu.Ooshima@mail.penta-ocean.co.jp

近年、各種構造物の基準類改訂に基づき、構造物の設計は性能規定型へと移行している。それにより、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した耐震設計がより重要となっている。そこで本研究では、地盤—基礎—上部構造物のFEM解析における主要な選択肢である、周波数応答解析と時刻歴応答解析、種々の境界条件等の設定の違いが解析結果に及ぼす影響を検討した。その結果、入力地震動が小さい場合には、周波数領域の等価線形解析でも適用可能であることが確認できた。また、周波数応答解析で適用可能であれば、境界条件としてエネルギー伝達境界が最も有効であること、さらに時刻歴応答解析では、設定する境界条件によっては、地盤領域のモデル化範囲が構造物の地震時挙動に影響を及ぼすことが示された。

Key Words : Frequency domain analysis, Time domain analysis, Boundary condition, Soil-structure interaction, FEM model

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、橋梁や地中構造物、ライフライン施設等の土木構造物に激甚な被害をもたらした。その後の耐震設計法に多大な影響を及ぼした。これまでの耐震設計は、設計地震力や基準の詳細のみを規定した仕様設計が中心であり、それに従って設計が行われてきたため、構造物がどの程度の地震力に耐えうる性能を有しているかということについては検討されていなかった。しかし兵庫県南部地震以降、地震荷重に対して構造物ごとの目標性能を設定し、これを満足するように設計する性能設計が主流となりつつある¹⁾。性能設計は、地震時における構造物全体系の動的挙動において、上部構造物のみではなく地盤条件を考

慮した解析が必要であり、そのため、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した耐震設計が不可欠と考えられる。このような構造物の動的挙動を把握するために、構造物全体系を地盤—基礎—上部構造物からなる系の動的相互作用を含めた形でモデル化し、地震応答解析を行うことで、その動的特性を明らかにできると考えられ、様々な研究も行われている^{2)~7)}。

地震応答解析の手法として、周波数領域で解析を行う場合と、時間領域で解析を行う場合の2つの方法が考えられる。周波数応答解析では、線形解析、等価線形解析を選択でき、時刻歴応答解析では、線形解析、非線形解析が選択できる。どの解析手法を用いるかは実務者が適宜判断しなければならない。

また、有限要素法を用いた解析(以下、FEM解析と

呼ぶ)を行うことで、地盤と構造物の相互作用力が、地盤と構造物の剛性・質量差に基づき自動的に考慮されるため、地盤等のインピーダンスマトリックスの評価といった手順を経ることなく動的挙動を表現できる。またメッシュ分割に留意することで解析精度も良く、近年のコンピュータ技術の進歩と実務における変形解析のニーズの高まりから、FEM 解析が行われる機会が増えてきている。

しかしながら、FEM 解析においては、無限に広がる地盤を有限領域でモデル化せざるを得ないため、地盤の側方と底面には実際に存在しない境界を設ける必要がある。その境界条件に関しては、周波数領域の解析では、エネルギー伝達境界、境界要素との組み合わせ等利用することができ、時間領域の解析では、周期境界や粘性境界等、両解析ともに様々な設定が可能であり、設計者が構造物等の要求される性能に応じて、解析手法や境界条件を選択する必要がある。

そこで本研究では、地盤—基礎—上部構造物の動的相互作用を考慮した FEM 解析において、周波数応答解析と時刻歴応答解析による手法の違いやそれに伴う応答の差異、境界条件の設定の違いによる解析結果の影響を検討し、FEM 解析を行う上で留意すべき点を示すこととする。

2. 解析手法と境界条件

前節で述べたように、解析手法として周波数領域における解析と時間領域における解析があり、系の非線形性を考慮する場合には、等価線形解析（等価線形化法）と非線形解析を選択することができる。ここでは、簡単にそれらの解析手法について述べる⁸⁾⁹⁾。

有限要素法のように空間を離散化する方法では、座標と時間に関する連立偏微分方程式が、時間に関する連立常微分方程式に置換され、以下のような多自由度系の運動方程式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

これは、1 自由度系の運動方程式と同様の形式であるが、連立常微分方程式となるため直接解くことはできない。そこで時刻歴応答解析では、Newmark β 法等の時間積分公式を適用して、時間に関する連立常微分方程式を連立代数方程式に置換して解を求める。これに対して周波数応答解析では、線形あるいは等価線形とした、式(1)を時間に関してフーリエ変換し、

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{U(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2)$$

のように連立代数方程式に置換する。この式(2)は、通常の連立方程式の解法により解くことができる。ただし、係数行列が振動数 ω に依存する複素行列となる。なお $\omega=0$ のときの解は、静的解に一致する。式(2)の外力として、ある一つの自由度に単位調和外力を作用させることを想定し、これを全自由度に関して全て連立させて行列表示することとする。結果として、右辺の外力ベクトルは単位行列 $[I]$ となり、得られる解は伝達関数行列 $[H(\omega)]$ となる。

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{H(\omega)\} = [I] \quad (3)$$

この結果を用いると、時刻歴応答 $\{u(t)\}$ は、

$$\{u(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H(\omega)]\{F(\omega)\}e^{i\omega t} d\omega \quad (4)$$

と求められる。

一般に数値計算上は、フーリエ変換およびフーリエ逆変換には、高速フーリエ変換 (FFT) が用いられる。FFT は、有限フーリエ級数近似に基づいているので、連続な時間関数を周期 T で無限に繰り返す等間隔 Δt の離散関数で近似する。FFT の高速性は離散時間点数を 2 の冪乗とすることにより実現するので、後続に 0 の値を付け加えて時点数をその値に合わせることが行われる。後続の 0 の付加は、無限に繰り返す前の周期の影響を避けるためにも有効である。

等価線形解析に関しては、本来は時間領域の解法で用いることも可能であるが、本論文では周波数応答解析での等価線形解析、時刻歴応答解析での非線形解析という位置づけで述べることとする。

等価線形解析は、 $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係を直接用いて、ある程度の非線形性を簡単に考慮できる手法であるため数多く用いられている。周波数領域の解法では、応答を各周波数成分からの寄与の積分（重ね合わせ）で表すため、系は線形である必要がある。そのため、非線形の応力—ひずみ関係を線形に置換する必要がある。一般には、最大ひずみ $\gamma_{\max}$ と係数 α を用い、有効ひずみ γ_{eff} を、

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\max} \quad (5)$$

で求め、有効ひずみに対応する割線せん断定数 G と減衰定数 h を用いて応答を計算する¹⁰⁾¹¹⁾。有効ひずみ換算係数 α の最適値は、波形の性質や包絡線、土の非線形性、求める解の種類によって変わり、0.5~0.7 の値をとるが、 $\alpha=0.65$ が採用される場合が多い。本論文においても波形の性質を考慮して、 $\alpha=0.65$ を採用している。ここで、係数 α は振幅がランダムな波形を、パワーが等価な等振幅の波形に置換する係数で、SHAKE が開発された当初から 0.65 が当然のように用いられている。しかし波形の種

類、性質により最適値を変えなければならないとの指摘もある¹²⁾。東海、東南海、南海地震連動型のようなシナリオ地震等では、プレート境界タイプの地震動が数分間続くとされており、このような正弦波に近い波形では α は0.65よりも大きな値を用いるべきである。

周波数応答解析では、運動方程式は複素フーリエ級数展開され、 G と h は合わせて複素剛性として評価されるので、複素剛性法とも呼ばれる。複素剛性法では変位と速度に位相差を発生させ、これによって応力—ひずみ関係が履歴を描き、エネルギーを吸収させる。このため、応力—ひずみ関係は楕円形を基本としたものとなる。しかし、非線形性が著しくなると、最大応力と最大加速度を過大評価する¹³⁾、応答スペクトルを過小評価する¹⁴⁾、高振動数の増幅を過小評価する¹⁵⁾、などの欠点が指摘され、その改良法も提案されている^{14)~16)}。しかし、文献^{14),15)}は最大応力と最大加速度の過大評価に対しては考慮されておらず、結果として大地震に対しては最大応力と最大加速度はSHAKE以上に大きくなる¹⁶⁾。文献^{10),16)}では、応答スペクトルや増幅比レベルでは1%程度のひずみまで適用可能であることが報告されている。ただし、これは常に1%まで適用可能という意味ではなく、全応力法を用いた非線形解析で適用可能であれば、等価線形解析でも適用可能であることを意味している。例えば飽和した砂地盤において、ひずみが1%になると、たとえ液化化しなかったとしても過剰間隙水圧はかなり上昇するため、全応力解析では適用範囲外となる。

非線形解析と等価線形解析を比較すると、応力—ひずみ関係のパラメータ設定と減衰特性に大きな違いがある。

先述したように、土の非線形性は $G\sim\gamma$ 、 $h\sim\gamma$ 関係で示され、一般には特定の γ に関する値として離散点で与えられる。等価線形解析では、これらのデータをそのまま用いることができるが、非線形解析では一般に応力—ひずみ関係は数式で表現されるため、 $G\sim\gamma$ 、 $h\sim\gamma$ 関係から適切な数式のパラメータを設定する必要がある。しかしその方法が一意的ではないため、設計者によって差が生じる。

また減衰特性においては、等価線形解析では減衰が $h\sim\gamma$ 関係等からほぼ一意的に導入されるのに対して、時刻歴応答解析では速度比例減衰が用いられるのが一般的であるため、非線形挙動時に速度比例減衰と履歴減衰が存在することになる。速度比例減衰により非線形解析の数値計算を安定させることができるが、設定によっては、変形を抑制してしまい、解析結果に影響を与えることもある。また速度比例減衰では、一般にRayleigh減衰が用いられるが、減衰の振動数依存性を表現するには限界がある^{17)~20)}。

非線形解析は、先述した応力—ひずみ関係のモデルや積分手法、積分時間間隔といった、設計者が選択する項目が多く、設計者によって解析結果が異なる可能性が高い。ただし、最近の研究では、積分間隔を小さくすることで積分手法によらず結果に差異が見られなくなることや²¹⁾、離散点でしか与えられていない入力データの補間法による誤差は工学的にはあまり影響しないこと²²⁾が明らかになってきており、逐次積分非線形解析の誤差は検証可能となりつつあると言える。

次に境界条件に関して簡単に述べる。境界条件の一つである粘性境界は、波動の入射エネルギーを境界における粘性応力によって吸収する境界である。ただし、粘性境界は波動エネルギーを粘性力のみによって吸収するものと考えするため、境界に作用する地盤反力の影響が明確ではない。実体波(P波やS波など)を吸収する粘性境界は、加振力の振動数に独立であり、容易に有限要素法による動的解析に適用できる。しかし、地表面で波動エネルギーの伝播に大きな役割を果たしている表面波を吸収するための粘性境界は、振動数の関数となる。また、基礎に対する加振に対して、境界までの距離をRayleigh波の波長と同程度の大きさにとることが必要であり、したがって粘性境界を用いると、大きな領域を有限要素法によって離散化するため、動的解析においては膨大な計算を必要とする。

これに対して、無限長の成層地盤を鉛直方向に離散化し水平方向に解析解で表して、その応力状態を境界における等価な反力として変位と対応すれば、地盤における波動の伝播は有限化された領域において表すことができる。このようにして表現される境界をエネルギー伝達境界と呼ぶ。

また、側方境界部分の鉛直方向を拘束し、水平方向を自由としている水平ローラー境界や、側方境界両端の同じ高さにある節点同士の水平、鉛直方向の変位を等しくした周期境界等、境界条件の設定方法は様々あり、周波数応答解析でのみ設定可能である等の条件もある。しかしながら、以上のことを踏まえて構造物に対して具体的にどの程度の地盤領域をモデル化する必要があるのかを、境界条件をパラメータとして検討した事例は少ない。先述したように、今後FEM解析が主流となるため、上記のような比較検討を行っていく必要があると考えられる。

3. 解析対象および観測波形

本論文では、実際の建物を対象に検討を行った。解析対象は、日本大学理工学部船橋キャンパス内14号館北塔で、建屋は地下1階、地上6階のSRC7層構造である。対象建物を写真-1に示す。



写真-1 解析対象建物

また、この建物では地震観測が行われており、その観測装置（加速度計）の設置箇所を図-1に示す。本論文では、観測値と解析値との比較において、この装置により観測されたデータを用いている。

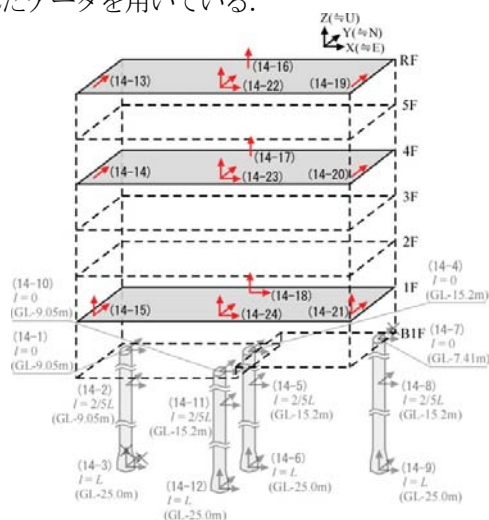


図-1 14号館観測装置の配置状況

この観測装置において過去に観測された地震動を、図-2に示す。本検討では、これらの地震動のうち矢印で示す地震動を使用することとする。その入力地震動を図-3に示す。

4. 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-4に示す。結果の出力位置に関しては、図-1で示した観測位置と一致する箇所である。

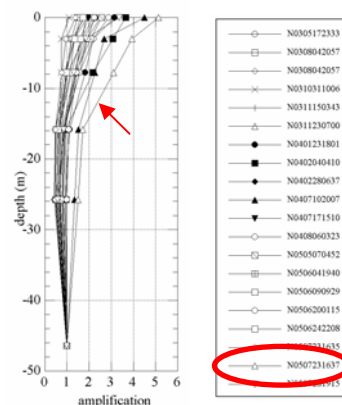


図-2 観測波形

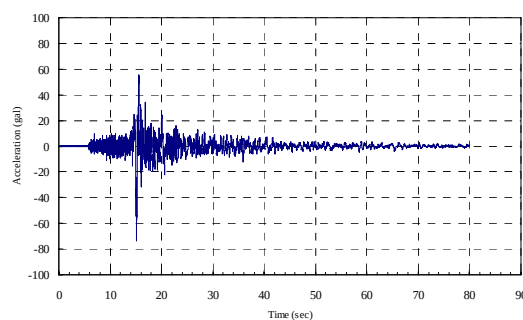


図-3 入力地震動

SRC造建物の地上部は2次元はり要素を用い、建物の梁、柱の奥行き方向の断面積および断面2次モーメントを総和し、単位奥行きに換算して2次元にモデル化している。地下部（図-4の桃色箇所）や底版（図-4の青色箇所）は線形平面要素でモデル化している。杭は2次元はり要素でモデル化し、梁や柱と同様、奥行き方向の杭の本数分を合計し、奥行き距離で割ることで、単位奥行きの物性としている。

地盤は平面ひずみ要素でモデル化し、各物性値はPS検層の結果を用いて算出した。地盤のモデル化領域は、底面は工学的基盤まで、側方に関しては、建物両端からそれぞれ40mの範囲をモデル化したものを標準ケースとする。その他の解析条件として、周波数応答解析においては、地盤のひずみ依存特性は対象地層の三軸試験結果に基づいて設定した。また時刻歴応答解析においては、数値積分法はNewmark β 法 ($\beta=0.25$) による直接積分法で行っている。積分時間間隔は0.005秒とした。減衰定数に関しては、両解析手法とも建屋および杭（2次元はり要素）は2%で設定しており、時刻歴応答解析では、固有振動解析によって得られた主要モードでRayleigh減衰を設定している。解析コードは、周波数応答解析はSuperFLUSH/2D、時刻歴応答解析はDIANAを使用している。

解析ケースとして、まず解析手法の違いによる影響という観点から、観測値と周波数応答解析、時刻歴応答解

表-1 検討ケース

検討ケース	比較項目
Case1	観測値と解析値（振動数応答解析と時刻歴応答解析）の比較
Case2	エネルギー伝達境界，粘性境界，周期境界，水平ローラー境界の比較（地盤領域40m）標準ケース
Case3	エネルギー伝達境界，粘性境界，周期境界，水平ローラー境界の比較（地盤領域20m）

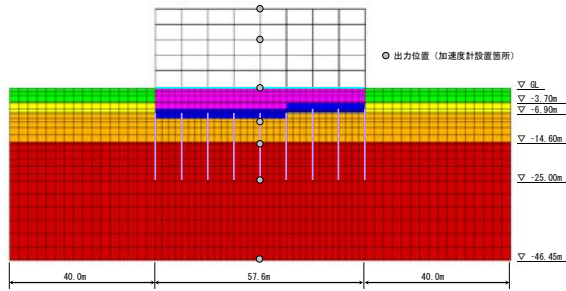


図-4 解析モデル

析の比較，次に境界条件の違いによる応答の変化，さらに地盤モデル領域による応答の変化を境界条件ごとに比較するものとする．側方境界として，エネルギー伝達境界，粘性境界，水平ローラー境界，周期境界を設定する．検討ケースをまとめたものを表-1に示す．

5. 解析結果および結果の分析

各検討ケースにおいて，解析した結果を以下に示す．なお今回は，建物最上部での観測値および解析値の結果に関して比較する．

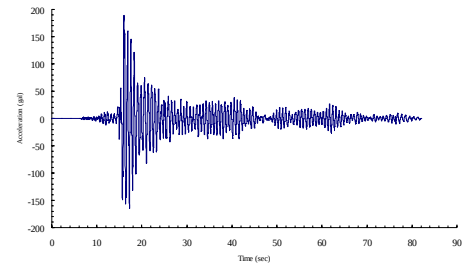
観測値と解析値（周波数応答解析および時刻歴応答解析）を図-5に示す．解析モデルの地盤条件は，側方，底面ともに粘性境界で，地盤領域40mの標準ケースである．

図より，観測値と両解析値に違いがあるが，これは建物の壁（特に加震方向壁）を解析モデルで考慮していないことや，2次元モデルの奥行きを考え方等のモデル化誤差，減衰の設定方法，入力地震動の誤差等が要因として挙げられる．これは今後検討していく必要がある．

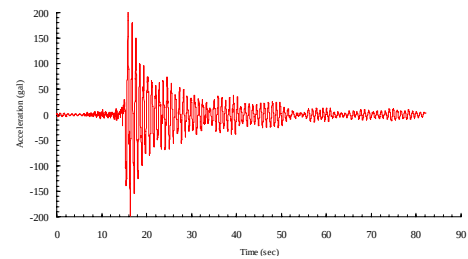
また解析値に着目すると，周波数応答解析と時刻歴応答解析は，ほぼ一致している．したがってこの入力レベルの地震動であれば，発生するひずみ等も小さいため，等価線形解析でも十分解析可能であると言える．

次に，地盤領域40mにおける各種境界条件の比較を図-6に示す．エネルギー伝達境界，粘性境界，ローラー境界，および周期境界でそれぞれ設定した際の建物最上部における応答加速度時刻歴およびフーリエスペクトルが示されている．どの境界条件で設定しても応答にそれほど影響は見られない．これはフーリエスペクトルからも確認できる．ただ，若干ではあるがローラー境界と周期境界において応答が早めに小さくなる．

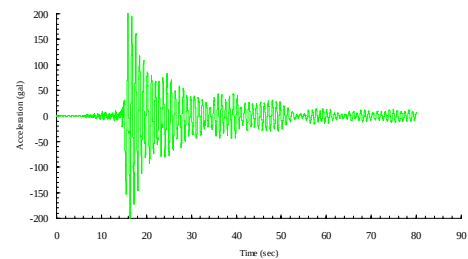
さらに，地盤領域20mにおける各種境界条件の比較を図-7に示す．応答加速度時刻歴に着目すると，エネルギー



(a) 観測値



(b) 振動数応答解析



(c) 時刻歴応答解析

図-5 観測値と解析値の比較

一伝達境界に関しては，地盤領域が40mの場合と20mの場合を比較すると，ほとんど変化が見られない．粘性境界に関しては，フーリエスペクトルにおいて地盤領域が40mの場合と比べ20mの場合，若干の応答の減少が確認できるものの，それほどの変化は見られない．ローラー境界や周期境界に関しては，地盤領域40mの場合と比較して20mの場合，応答加速度においてもフーリエスペクトルにおいても応答が減少しているのが窺える．したがってこれらの検討結果から，ローラー境界や周期境界で境界条件を設定した場合は，解析結果がモデル化する地盤領域に影響を受けやすいことが分かる．また粘性境界でも若干の変化が確認される．

そこでローラー境界や周期境界を設定する場合，地盤のモデル化領域が応答にどれほど影響を与えるかを確認するため，さらに地盤領域を80mまで広げ，粘性境界，ローラー境界，周期境界がどれほど変化するかを確認した．図-8～図-10に，地盤領域を20m，40m，80mと変化した際の建物最上部における応答加速度を示した．

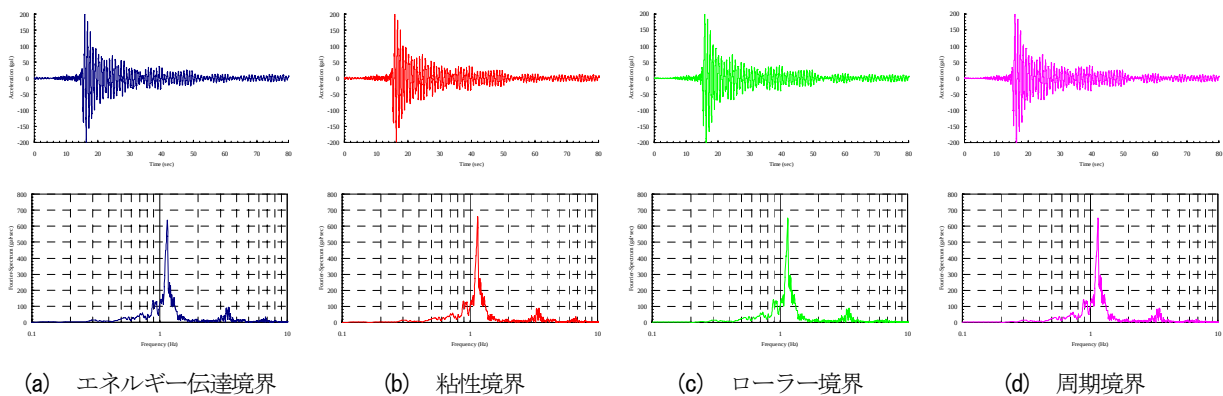


図-6 地盤領域 40m における各種境界条件の比較

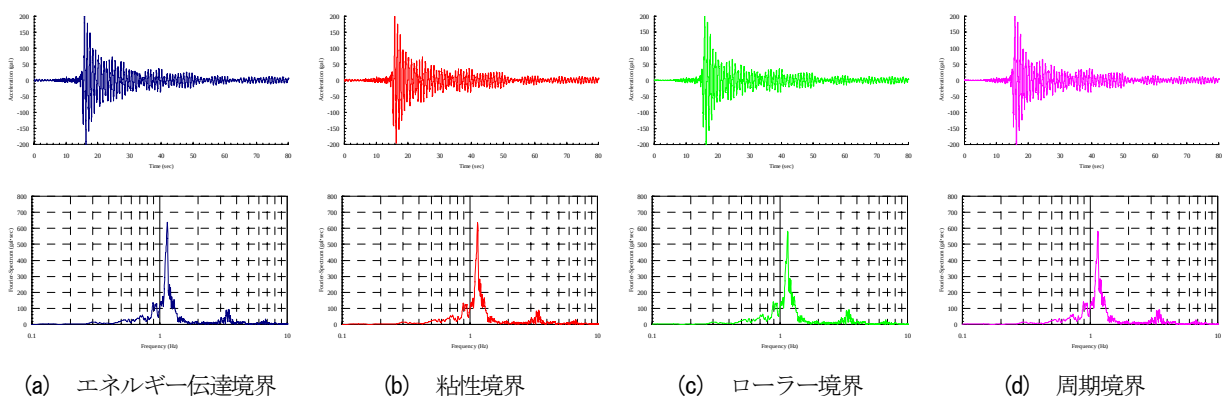


図-7 地盤領域 20m における各種境界条件の比較

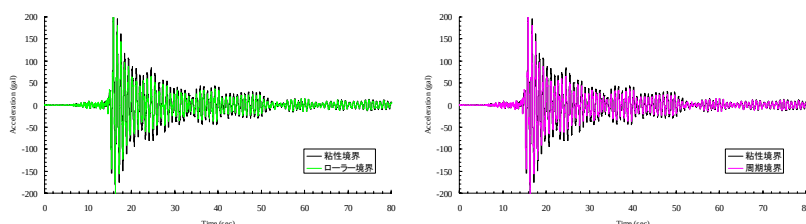


図-8 建物最上部における応答加速度時刻歴の違い (地盤領域 20m)

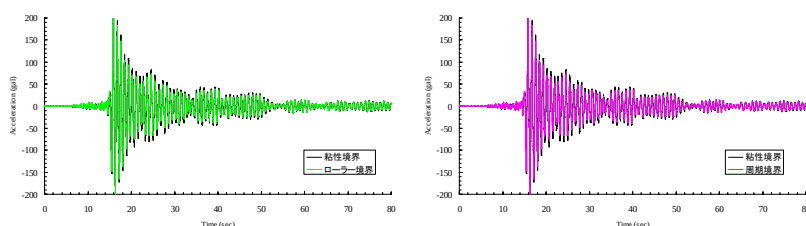


図-9 建物最上部における応答加速度時刻歴の違い (地盤領域 40m)

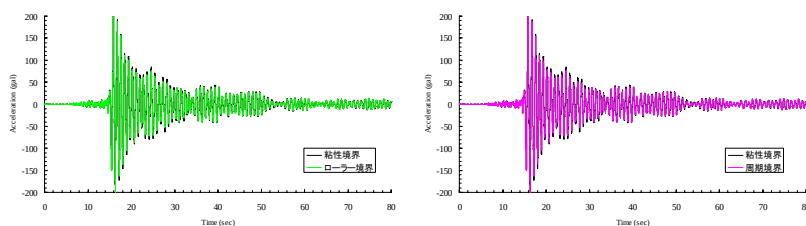


図-10 建物最上部における応答加速度時刻歴の違い (地盤領域 80m)

図-8や図-9に着目すると、粘性境界に比べ、ローラー境界、周期境界ともに応答が小さく現れているのが確認できる。しかし図-10のように地盤領域を80mまで広げてモデル化すると、若干粘性境界の応答が大きいものの、概ね一致している。

これらの結果から、エネルギー伝達境界は地盤領域を20mまで縮小しても応答が変化せず、狭い領域でも正確な境界条件を与える。粘性境界は、境界位置の依存性は存在するものの小さい。ローラー境界や周期境界で境界条件を設定する場合には、境界位置の依存性が大きく、今回のような地盤条件、構造条件でモデル化した場合では、地盤領域を少なくとも80m程度モデル化する必要があると言える。エネルギー伝達境界は周波数応答解析においてのみ設定できる境界条件であるため、時刻歴応答解析での非線形解析を適用する必要がある場合には、これらのことを踏まえて解析モデルを作成しなければならない。

6. 結論

FEM 解析においては、無限に広がる地盤を有限領域でモデル化するため、地盤の側方と底面に実際に存在しない境界を設ける必要がある。本研究では、実建造物の観測地震応答を対象として、周波数応答解析と時刻歴応答解析による手法の違いやそれに伴う応答の差異、境界条件の設定の違いによる解析結果の影響を検討した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 等価線形解析と非線形解析では応答の差異は見られず、今回のような地震動の入力エネルギーが小さい場合には、等価線形解析でも適用可能であることが示された。
- 境界条件をエネルギー伝達境界で設定した場合、ある程度地盤領域を狭くしても、応答に与える影響はほとんどないことが確認できた。周波数応答解析が適用可能な場合であれば、エネルギー伝達境界を用いることが地盤領域のモデル化の点で効果的であると言える。
- ローラー境界や周期境界で境界条件を設定した場合、自由地盤とのエネルギー伝達が基礎と建造物の応答に影響を与えないためには、ある程度の地盤領域をモデル化する必要があると言える。

エネルギー伝達境界は、周波数応答解析の場合にのみ適用されるため、今後より一層使用される傾向にある時刻歴応答解析では、上記で示したような問題が起こる可能性がある。実務設計者はそれぞれの解析手法、それぞれの境界条件の特性を十分に熟知した上で、地盤—基礎—建造物のFEM解析における評価を行うことが重要であると考えられる。

今後は、より設計で重要となる基礎に作用する応力や建造物の残留変形にも着目し、より定量的に評価する必要がある。また今回のモデルはSRC造であり、なおかつ地盤が堅いことから、より動的相互作用効果が見られるようなモデル（RC造等）の検討、2次元モデルと3次元モデルとの比較、さらに切欠きの影響等を考慮する必要がある。境界条件においても時刻歴応答解析に適用可能な高精度のPML境界²³⁾等、その他の境界条件でも比較する必要があると思われる。

謝辞：本研究で用いた地震観測値は、平成16年度文部科学省学術フロンティア推進事業「環境・防災都市に関する研究」（研究代表者：石丸達治氏）の一環で得られたものである。また、14号館の数学モデルは、飛島建設(株)久保田雅春氏、日本大学理工学部の石垣秀典講師から提供して頂いた。さらに解析モデルに関しては、金沢大学の松本樹典教授に貴重なアドバイスを頂いた。また五洋建設(株)の新屋氏には文献等のお手伝いを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002.3
- 2) 小倉裕介，岡田太賀雄，西田秀明，運上茂樹：相互作用を考慮した基礎地盤バネの減衰定数に関する考察，第28回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1-7，2005.2
- 3) 土岐憲三，清野純史，小野祐輔，古川愛子：杭基礎-地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.235-245，2002.7
- 4) 齋藤正人，池亀真樹，棚村史郎，渡邊啓行：複合する非線形条件下における大型基礎の周波数応答特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.131-142，2004.4
- 5) Novak, M. and Nogami, T. : Soil-pile interaction in horizontal vibration, Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics, Vol.5, pp.263-281, 1977
- 6) 木村至伸，河野健二：非線形性を有する地盤—構造物系の地震応答解析に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.599-606，2001.3
- 7) 原田隆典，山下典彦，坂梨和彦：地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の周期と減衰定数に関する理論的研究，土木学会論文集，No.489/I-27，pp.227-234，1994.4
- 8) 入門・建築と地盤との動的相互作用，日本建築学会，1996
- 9) 吉見吉昭，福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術，技報堂出版，2005
- 10) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No.EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972
- 11) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H.B. : FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No.EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975
- 12) 船原英樹，M.チュブリノフスキー，藤井俊二：軟弱粘性土地盤の地震応答解析—等価線形化法と非線形逐次積分法の適用性の検討，第32回土質工学研究発表会講演論文集，pp.875-876，1997

- 13) 吉田望：実用プログラムSHAKEの適用性，軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.14-31，1994
- 14) 清田芳治，荻原庸嘉：地盤の歪依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法 その2地震観測結果に対する解析的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.489-490，1992
- 15) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析に関する一考察，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58，1994
- 16) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. : equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping , Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002
- 17) 吉田望，澤田純男，中村晋：減衰が地盤の地震応答解析に与える影響と精度，日本地震工学論文集，第4巻，第4号，pp.55-73，2006
- 18) 松田泰治，大塚久哲，宇野州彦：PC連続ラーメン橋の減衰性評価に関する一考察，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.143-148，2004.1
- 19) 宇野州彦，松田泰治，大塚久哲：ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰性評価に関する一考察，第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.61-68，2005.2
- 20) 宇野州彦，松田泰治，大塚久哲：ゴム支承を用いた水平力分散構造の地震時挙動に与える減衰設定の影響評価，平成16年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，I-69，pp.137-138，2005.3
- 21) 酒井久和，吉田望，澤田純男：非線形地盤振動解析における時間積分法の誤差，土木学会論文集，No.794/I-72，pp.291-300，2005
- 22) 酒井久和，吉田望，澤田純男：時刻歴応答解析における地震動の区間線形化の影響，第28回地震工学研究発表会報告集，pp.1-7，2005.6
- 23) 宇野亨：FDTD法による電磁界およびアンテナ解析，コロナ社，1998

(2007. 06. 29 受付)

INFLUENCE OF ANALYTICAL METHOD AND BOUNDARY CONDITION ON DYNAMIC BEHAVIOR OF SOIL-PILE-STRUCTURE SYSTEMS

Kunihiko UNO, Hiroo SHIOJIRI, Kazuhiro KAWAGUCHI,
Masataka NAKAMURA, Tomohiro NAKAHARA and Takamitsu OSHIMA

Recently, the structural design has shifted to the performance design, and seismic design considering soil-structure interaction becomes more important. In this study, the difference between the frequency domain analysis and the time domain analysis, and the performances of various boundary conditions are examined. It is made clear that equivalent linear analysis is applicable when the input earthquake motion is small, and that the energy transmitting boundary was most effective in modeling semi-infinite soil. In addition, it is confirmed the effects of the range of modeling in the ground area on the response of structure during earthquake when conventional boundary conditions are used.