

レベル2地震動下における有効入力動の評価

白戸真大*・福井次郎**

*正会員 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 研究員(〒305-8516 つくば市南原1-6)

**正会員 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 上席研究員

基礎への有効入力動は、レベル2地震動下のように地盤の非線形性が顕著になる場合の特性について不明な点が多い。また、地盤が多層系の場合、その影響を定量的に評価する手法は明らかになっていない。そこで、弾塑性の有限要素法を用いて、深度が同一で一層系・三層系の4ケースの地盤に根入れが一定で基礎幅を変えた3ケースの基礎を設置して、レベル2地震動下における有効入力動の評価を行った。解析の結果、レベル2地震動下でも有効入力動を用いることにより合理的な設計となることが期待できること、また、有効入力動は、地盤の固有周期、地盤構造、基礎幅に依存することが分かった。そして、解析結果を整理し、地盤の固有周期、地盤構造、基礎の根入れ比を考慮して有効入力動を算定する近似式を提案した。

Key Words : effective input motion, level 2 earthquake motion, nonlinear, FEM

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、耐震設計において想定する地震動の規模が従来に比べて非常に大きくなった。想定する地震動が大きいくほど、構造物に与える影響を合理的に評価することが重要であり、その中で、有効入力動の定量的な評価は期待されるものの一つである。

しかし、有効入力動に関する検討の多くは、地盤を線形体と仮定している場合や、地盤と基礎が密着して振動している場合に対して行われている^{1),2),3)}。したがって、レベル2地震動下において地盤に顕著な非線形性が生じる場合にも、有効入力動の効果が従来の検討と同等に見込めるのかは十分に解明されていない。

そこで、本研究では、地盤の構成則として降伏関数をMohr-Coulombモデル、塑性ポテンシャルをDrucker-Pragerモデルとした非関連流れ則⁴⁾を用いた有限要素法による非線形動的解析を行い、レベル2地震動下での有効入力動を算定する。ここに、本研究では、周辺地盤の一次固有周期が比較的長くなる根入れが深い柱状体基礎を対象として、深度が同一の一層系または三層系の4ケースの地盤構造を対象とした。そして、解析結果を整理し、地震動の規模、地盤の構造、基礎の寸法を反映させて、地表面動の加速度応答スペクトルを有効入力動に関して補正する近似式を提案する。

2. 有限要素解析による有効入力動の定量評価

(1) 試算地盤、基礎

試算地盤は、道路橋示方書V⁵⁾のIII種地盤で、表-1に示す4ケースである。ここに、地盤の固有周期 T_G は文献⁵⁾に従って算出した。基礎は、GL-30m砂礫層を支持層とし、幅を6m, 13m, 20mに変化させた。

(2) 入力地震波と解析ケース

各地盤における有限要素底面への入力地震波は、次元の重複反射理論に基づく等価線形解析(使用プログラム: SHAKE)により、下記の基盤入射波をGL-40mでの入射波として算定した。ここでの地盤の非線形特性は、岩崎らの研究^{7),8)}に基づき設定した。

本解析で用いた基盤入射波は、兵庫県南部地震での観測波に基づいた次の3波である。

- ポートアイランド基盤入射波形 (PI-79NS Base)⁶⁾
- 神戸海洋気象台観測波 NS 成分
- 東神戸大橋基盤入射波形: 東神戸大橋 GL-35m の観測波 (EW) と観測位置の地盤条件から次元重複反射解析により取り出した GL-68.5m での入射波成分。

以下、それぞれの地盤ケースの入力波に対して、ポートアイランド基盤入射波形から得た入力波をPI波、神戸海洋気象台観測波から得た入力波をJ-KOBE波、東神戸大橋基盤入射波形から得られた入力波をE-KOBE波と呼ぶものとする。

解析ケースを表-2に示す。

(3) 有限要素解析

有限要素解析は、微小変位、平面ひずみ条件で行う。要素は4節点アイソパラメトリック一次要素である。有限要素メッシュは、水平方向に400mの領域を、深さ方向に40mの領域をモデル化し、深さ方向には等分割で20分割した。なお、基礎は、その中心線上に存在する。要素の奥行きは全ての解析ケースで一定値とした。境界条件は、領域底面を固定条件とし、その他の節点は自由である。減衰は剛性にのみ比例させたRayleigh減衰とし、一次固有振動数に対して5%を設定した。

表-1 試算地盤

深度 (m)	地盤 1	地盤 2	地盤 3	地盤 4
-0.0	軟弱地盤一層 (T_G : 0.71s)	極軟弱地盤一層 (T_G : 1.20s)	強度漸増型三層 (T_G : 0.72s)	中間硬質層 (T_G : 0.8s)
-10.0			粘性土 ($N \approx 2$) $\gamma = 14\text{kN/m}^3$ $V_s = 120\text{m/s}$ $c = 30\text{kN/m}^2$	粘性土 ($N \approx 1$) $\gamma = 14\text{kN/m}^3$ $V_s = 100\text{m/s}$ $c = 20\text{kN/m}^2$
-20.0	粘性土 ($N \approx 5$) $\gamma = 15\text{kN/m}^3$ $V_s = 170\text{m/s}$ $c = 50\text{kN/m}^2$	粘性土 ($N \approx 1$) $\gamma = 14\text{kN/m}^3$ $V_s = 100\text{m/s}$ $c = 20\text{kN/m}^2$	粘性土 ($N \approx 6$) $\gamma = 15\text{kN/m}^3$ $V_s = 180\text{m/s}$ $c = 50\text{kN/m}^2$	砂質土 ($N \approx 30$) $\gamma = 19\text{kN/m}^3$ $V_s = 250\text{m/s}$ $\phi = 37^\circ$
-30.0			粘性土 ($N \approx 14$) $\gamma = 16\text{kN/m}^3$ $V_s = 240\text{m/s}$ $c = 100\text{kN/m}^2$	粘性土 ($N \approx 6$) $\gamma = 16\text{kN/m}^3$ $V_s = 180\text{m/s}$ $c = 100\text{kN/m}^2$
-40.0	砂礫 ($N > 50$), $\gamma = 19\text{kN/m}^3$, $V_s = 300\text{m/s}$, $c = 2\text{kN/m}^2$, $\phi = 45^\circ$			

γ : 単位体積重量, c : 粘着力, ϕ : 内部摩擦角, N 値は想定したもの。

表-2 解析ケース (○: 解析を行ったケース)

基礎幅	入力波	地盤			
		1	2	3	4
6m	PI	○	○	○	○
	J-KOBE				
	E-KOBE	○	○	○	○
13m	PI	○	○	○	○
	J-KOBE	○	○		
	E-KOBE	○	○	○	○
20	PI	○	○	○	○
	J-KOBE				
	E-KOBE				

地盤の Young 率はせん断波速度 V_s に対して設定し、ポアソン比は砂質土で 0.33, 粘性土で 0.45 とした。また、塑性流動則のパラメータは表-1 より設定した。

基礎は、弾性体とし、かつ簡単のため充実断面を仮定した。基礎部分の要素は、 $\sigma_{ck} = 21\text{kN}$ 程度のコンクリートの Young 率 $2.45 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ とポアソン比 1/6 を設定した。

解析手順は、以下のとおりである。

1. 自由地盤のメッシュを作成し、自重解析を行ない、地盤の初期応力を算定する。
2. 有効入力動を算定する場合には 3. に進む。基礎の存在しない自由地盤の解析を行う場合は、ここで領域底面に地震波を入力して地盤の応答を算定する。
3. 有効入力動を算定する場合は、基礎部分の要素の単位体積重量を零とし、基礎のヤング率、ポアソン比を設定する。その他、節点座標や地盤の応力状態は 1. の結果を用いる。ただし、基礎底面に上方への変位が生じないように、別途、基礎の死荷重を節点力として底面地盤に載荷するものとする。
4. 領域底面に地震波を入力し、基礎・地盤の応答を算定する。

(4) 解析結果

(3)の解析結果を用いて、同一の入力地震波において、基礎天端での水平動から算出される加速度応答スペクトル S_{Ae} と、基礎の存在しない自由地盤表面の水平動から算出される加速度応答スペクトル S_{A0} の比 S_{Ae}/S_{A0} を検討する。この S_{Ae}/S_{A0} は、構造物-基礎系に有効入力動が入力されたときの構造物の応答と、自由地盤の地震動が入力されたときの応答の違いを表すものである。ここで、加速度応答スペクトルは、すべて減衰定数 η を 5% とし算出した。

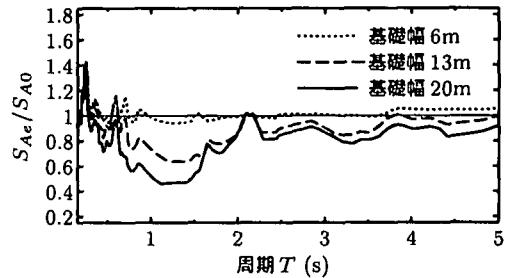
図-1 応答スペクトル比 S_{Ae}/S_{A0} (地盤 1, PI 波)

図-1 に、地盤 1 に PI 波を入力したときの結果を示す。基礎幅が 6m 程度と小さい場合には S_{Ae}/S_{A0} はほぼ 1 であるが、基礎幅が 13m, 20m と大きくなると S_{Ae}/S_{A0} は 1 より小さくなり、基礎が存在することによる応答の低減が生じることが分かる。応答の低減が特に大きい周期帯は、地盤の固有周期に相当する 0.7s 程度から約 2 倍である 1.6s 程度までである。このように、既往の研究^{1),2),3)}と同様に、 V_s から求まる地盤の固有周期に相当する付近で応答の低減が見られる。また、地盤の固有周期の 3 倍程度の周期 (2.1s) より長周期の領域では低減効果が小さくなる。

また、基礎幅を 6m とし、その曲げ剛性が基礎幅が 20m の時と同じになるように基礎部分の要素の Young 率を大きくして解析してみたが、解析結果は図-1 の基礎幅 6m の場合にほとんど一致し、曲げ剛性には依存しなかった。

図-2 は、基礎幅 13m, 入力波が PI 波のときの各地盤の結果を比較したものである。地盤 2 は、地盤 1 と同じ一層系であるが、固有周期が長い地盤である。地盤 2 では、応答の低減が特に大きくなる周期や、低減効果が小さくなり始める周期が地盤 1 に比べて延びているが、これは図-1 でも考察したように応答の低減が大きくなり

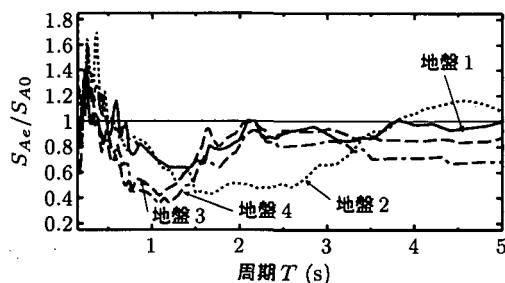


図-2 地盤構造による応答スペクトル比の違い (PI 波, 基礎幅 13m)

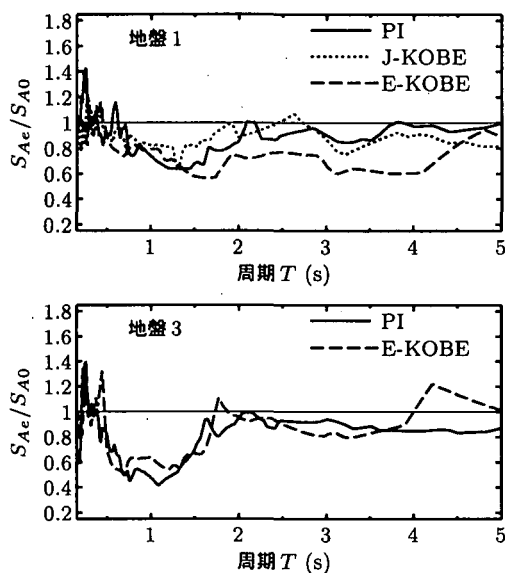


図-3 入力地震波による応答スペクトル比の違い (基礎幅 13m)

始める周期が地盤の固有周期に近くなる傾向があるためである。地盤 3, 4 は、地盤 1 に比べて、同じ基礎幅であっても応答の低減が大きくなっている。これは、地盤 1 に比較して下層地盤、中間地盤が堅固であるため、同じ固有周期を持つ地盤ではあるが地盤 1 とは異なる振動状態にあったためと考えられる。

図-3 に、地盤 1・3、基礎幅 13m とし、入力地震波による違いを比較した結果を示す。違いは比較的小さく、特に、地盤の固有周期に近い 0.7s 付近や橋梁に多い固有周期帯である 1.0s 前後の値は良く一致している。

以上より、地盤の非線形性が大きくなるレベル 2 地震動下でも、水平動に対する有効入力動の効果 (応答の低減) が期待でき、地盤の固有周期は応答の低減が見込める周期帯に、また、地盤構造と基礎の寸法は応答の低減度合いに影響を与えることがわかった。

3. 低減効果の近似式

ここでは、文献^{1),2)}の近似式を参考に基礎幅、地盤の固有周期、地盤構造を考慮した近似式を考えてみる。文

献^{1),2)}の近似式にならない、固有周期 T ではなく周波数 ω を用いて記述すると、

$$S_{Ae}/S_{A0} = \begin{cases} 1 - \{1 - f(L'/D)\} \frac{\beta\omega - \alpha\omega_s}{\beta\omega_s - \alpha\omega_s} \leq 1 & : \omega < \omega_s \\ f(L'/D) & : \omega \geq \omega_s \end{cases} \quad (1)$$

である。ここに、

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_s = \frac{\pi V'_{seq}}{2H}, \quad V'_{seq} = \frac{4H}{\alpha T_G} \quad (2)$$

であり、 H は当該地盤厚 (基礎の根入れ長) である。 L' は、新たに導入した量で次式で定義する。

$$L' \equiv \int_0^{L'} (V_s(z)/V_{seq}) dz, \quad V_{seq} = \frac{4H}{T_G} \quad (3)$$

ここに、 z は深度で、地表面を 0 とする。

応答の低減は、地盤の固有周期に近い周期帯で大きく現れるが、 α は、地盤の振動変形による剛性低下により当該地盤の固有周期が延びることを考慮するための係数である。2.(4)の結果から、低減効果が特に大きい周期帯は初期の固有周期 T_G からその 2 倍程度の周期までであることから、 α は 2 とする。表-3 に入力波の算出の際に同時に求まる地盤の収束剛性より算出した地盤の固有周期 T'_G を示すが、この結果からも $\alpha=2$ は妥当な値と考えられる。

また、 β は、初期の固有周期 T_G の β 倍以上の周期領域では低減効果がほとんどないことを考慮するための係数である。2.(4)の結果から β は 3 とおく。

$f(L'/D)$ は、応答の低減が最も顕著である周期帯での低減量を、地盤構造と基礎幅に依存して与えるために導入した関数である。 L' は、地盤構造の違いを考慮するために導入した長さであり、 V_{seq} に対する各層のせん断波速度 $V_s(z)$ の比を重みとして深度方向にある z まで積分した値と、その z が等しくなる時の深さである。たとえば、深さおよび速度構造が同一の 2 層系で、かつ上層に比べて下層のせん断波速度が大きい地盤では、下層のせん断波速度が大きいほど L' は小さくなる。このように、 L' は、当該地盤における地盤振動のうち、基礎に与える影響が支配的である領域を表す長さと考えられる。

そこで、各地盤で表-1 の T_G と表-3 に示す T'_G 間における S_{Ae}/S_{A0} の平均値を求め、これと L'/D の関係を求めてみた。結果を図-4 に示す。また、すべてのデータに対して最小自乗近似した結果も図-4 に併せて示す。 S_{Ae}/S_{A0} は L'/D に比例すると考えられ、これを整理すると次式で表すことができる。

$$f(L'/D) = 0.12(L'/D) + 0.35, \quad \text{ただし、} 0.5 \leq f \leq 1.0 \quad (4)$$

表-3 入力波算出時の収束後剛性による地盤の固有周期 T'_G

地盤	T'_G (s)	T'_G/T_G
1	1.20	1.69
2	2.61	2.18
3	1.45	2.01
4	1.74	2.18

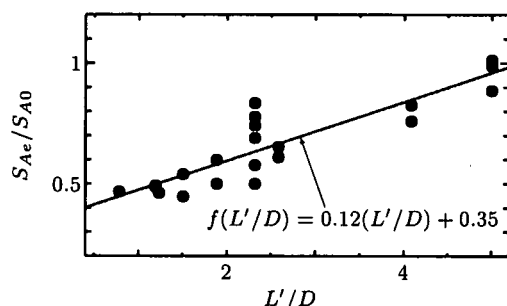


図-4 有効入力動に及ぼす L'/D の影響

ここでは、データの範囲から、 f には下限を設定した。

図-5 に、提案式と有限要素法による解析結果の比較を示す。ここに、地盤 4 の近似式は基礎幅 13m と 20m は同じである。提案式は、基礎幅、地盤の周期特性、地盤構造に応じて FEM 結果を再現できている。

4. まとめ

非線形有限要素解析より、基礎幅が大きい場合には、レベル 2 地震動下であっても有効入力動の効果があることを確認した。したがって、柱状体基礎を持つ構造物の耐震設計では積極的に有効入力動を用いることができるように、今後、研究を進める必要がある。

また、設計実務では構造物の応答の算出や動的解析に用いる地震動の設定を加速度応答スペクトルから行うことが一般的であることを考え、基礎の寸法、地盤の周期特性、地盤構造の影響を取り込んで、有効入力動を用いた場合の入力の低減を考慮して地表面動の加速度応答スペクトルを補正する近似式を提案した。

しかし、実際の構造物の挙動は、入力との相互作用と慣性力の相互作用の両者が現れるものである。また、回転動が構造物の応答に与える影響はここでは扱っていない。今後の設計実務への適用に当たっては、これらを検討して行く必要がある。

参考文献

- 1) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄: 有効入力動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, 第 362 号 /I-4, pp. 435-440, 1985.
- 2) 土木学会耐震工学委員会 動的相互作用小委員会: 基礎・

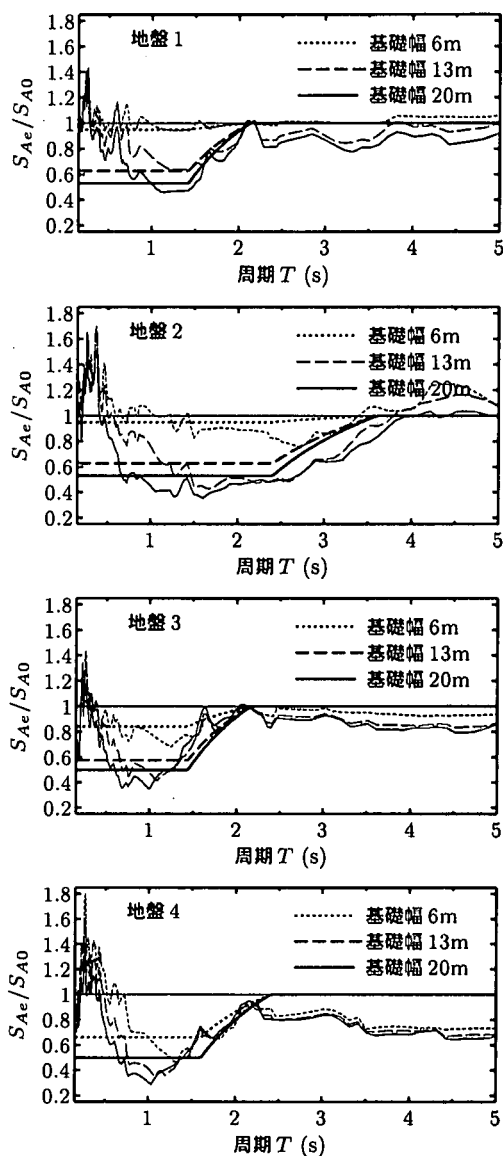


図-5 提案式と解析結果の比較 (太線: 近似式, 細線: PI 波を入力したときの FEM の結果)

地盤・構造物系の動的相互作用 —相互作用の耐震設計への導入—, 1992.

- 3) Saito, M., Muro, Y. and Nishimura, A.: Study on effective input seismic motion of caisson foundation with flexural and rocking motions, 10th JCEE.
- 4) 田中忠次: 有限要素法による変形・安定解析 (主として砂質土を対象にして), わかりやすい土質力学原論 (第 1 回改訂版), 土質工学会, pp. 109-154, 1992.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 1996.
- 6) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 7) 岩崎敏夫, 常田賢一, 吉田精一: 沖積粘性土の動的変形特性—せん断剛性率のヒズミ依存性—, 土木研究所資料, 第 1504 号, 1979.
- 8) 岩崎敏夫, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究 II—広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性—, 土木研究所報告, 第 153 号, 1980.