

3次元弾塑性静的・動的有限要素法による杭基礎の耐震評価

木村 亮¹・張 鋒²・田中隆一郎³

¹正会員 工博 京都大学大学院工学研究科助教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 岐阜大学工学部助教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 中央復建コンサルタンツ(株) (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-8-29)

兵庫県南部地震のような大地震における杭基礎の耐震性を評価する際、通常、震度法と応答変位法が用いられる。地盤・構造物の非線形性を考慮した地盤・基礎工・上部工の一体系3次元非線形動的解析により杭基礎の耐震評価を行うのは理想であるが、解析手法やコンピュータの制限により、この方法は現段階では確立されていない。そこで、本報告では、一体系の静的・動的解析コードDGPILE-3Dを新たに開発し、一体系3次元弾塑性動的解析を行い、震度法、応答変位法の妥当性を検討する。

Key words: Seismic evaluation, pile foundation, dynamic analysis, nonlinear

1. まえがき

兵庫県南部地震のような大地震における杭基礎の耐震性の評価に関する研究が活発に行われているが、その多くは分離法あるいは応答変位法といった簡易法が用いられる。分離法(木村・張, 1997)で検討する場合、まず、地盤と杭基礎の相互作用を等価バネで評価し、簡略されたSwing-Rockingモデル(SRモデル)を対象に、動的解析を行う。次に、この動的解析で得られたバネの最大発生力を外力として、再度静的解析により杭の断面力を求める。応答変位法で検討する場合、上部工による地震力と地震による地盤の変形を外力として地盤及び杭基礎に与えて、杭の断面力を求める。一方、一体系動的解析を行う場合、地盤・構造物の弾塑性挙動を考慮した地盤・基礎工・上部工の一体系3次元非線形動的解析による杭基礎の耐震評価は解析手法やコンピュータの制限により、現段階ではほとんど確立されていない。本研究は、地盤の破壊までを対象とする弾塑性構成式に基づいた一体系静的・動的有限要素解析コードDGPILE-3Dを開発し、一体系3次元弾塑性動的解析を行うことにより、群杭基礎の耐震性評価の数値解析方法を検討する。

2. 地盤・部材の非線形特性

大地震の場合、杭基礎の塑性化と地盤の降伏が予想され、この非線形挙動を適切に評価しなければならない。足立ら(1994)は群杭の終局挙動を表現しうる3次元弾塑性静的有限要素の解析コード(GPILE-3D)を開発し、水平載荷を受ける群杭の終局状態の力学挙動をシミュレートした。GPILE-3Dを用いて解析を行う場合には、地盤を弾完全塑性体のDrucker-Prager規準と仮定し、関連流れ則を適用するものとする。しかし、Drucker-Prager規準と仮定した関連流れ則を用いる場合、ダイレータンスシーが常に膨張側にあり、正規圧密粘土あるいはゆるい砂に対して、この理論が適切とはいえないことがよく知られている。そこで、本報告では、Drucker-Prager規準と仮定した非関連流れ則を用い、繰返し載荷を考慮できる等硬化化モデルに基づいて、3次元弾塑性静的・動的有限要素の解析コード(DGPILE-3D)を開発した。式1~8にこのモデルの概要を示す。図1に中空ねじりせん断試験のシミュレーションを示す。また、解析に用いられる地盤特性は式(6)~(8)に示

すように標準貫入値 N で推定することとする。

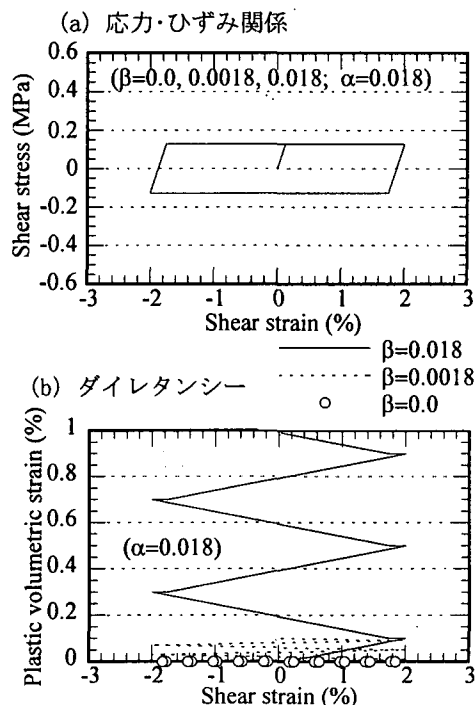


図1 地盤の非線形特性 (Drucker-Prager model)

$$\text{流れ則: } d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} df_y \quad (1)$$

$$\text{降伏関数: } f_y = \sqrt{J_2} - 3\alpha \sigma_m - \kappa_s \quad (2)$$

塑性ポテンシャル:

$$f_p = (J_2)^{1/2} - 3\beta \sigma_m - \kappa_s = 0 \quad (3)$$

$$\text{負荷基準: } \begin{cases} f_y = 0, df_y > 0: \text{載荷} \\ f_y = 0, df_y = 0: \text{中立負荷} \\ f_y = 0, df_y < 0: \text{除荷} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)}, \quad \kappa_s = \frac{6\cos\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \quad (5)$$

$$c = q_u/2 = 1/160 \text{ N (MPa)} \quad (\text{Terzaghi - Peck}) \text{ 粘土} \quad (6)$$

$$\phi = 1.85 \left(\frac{N}{\sigma_v + 0.7} \right)^{0.6} + 26 \text{ (°)} \text{ 砂} \quad (7)$$

$$E = \begin{cases} 100 - 250 \bar{N} \text{ (tf/m}^2\text{)} & \text{粘土} \\ 250 \bar{N} \text{ (tf/m}^2\text{)} & \text{砂} \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 c 、 ϕ 、 E はそれぞれ地盤の粘性、内部摩擦角とヤング係数である。

柱・杭部材の非線型特性には、終局挙動を適切に表現するために、部材の弾塑性履歴を考慮するビーム要素を導入する。図2に、部材の曲げモーメント・曲率関係($M-\phi$ 関係)の弾塑性履歴を考慮するトリリニアモデルを示す。

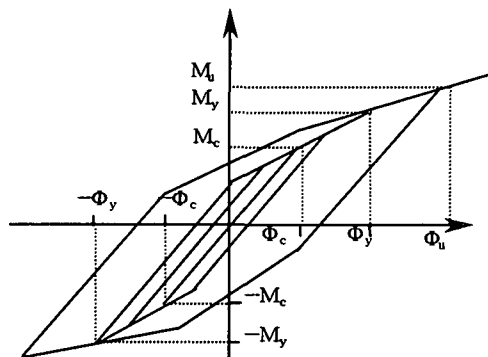


図2 杭・柱部材の非線型特性

3. 群杭基礎の耐震評価

検討の対象とする高架橋の構造一般図および地盤・構造物一体系モデルは図3に示す通りである。杭基礎は、2×2本の直径1.2m、長さ20mの場所打ち杭からなる。地盤の影響を調べるために、2種類の地盤を対象として、検討を行う。表1に地盤の土質定数を示す。杭・柱部材の諸元は表2に示す通りである。杭・柱部材の非線型特性は表3に示すとおりである。また、以下の一連の静的、動的解析はすべて DGPPILE-3D により実施することとする。解析は全応力状態でを行い、地盤の液化化が考慮されていない。

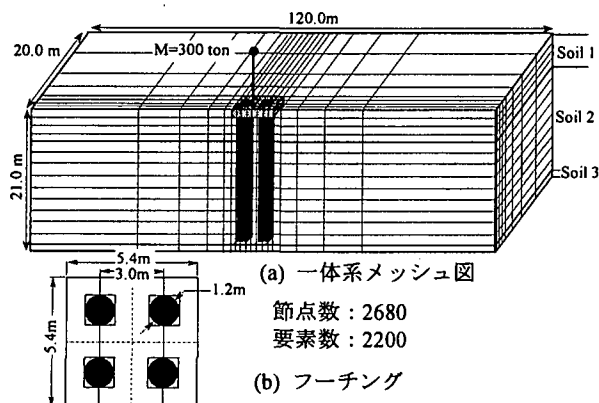


図3 地盤・構造一体系モデル図

分離法で検討する場合、地盤と基礎の相互作用の非線形等価バネ値を求めるために、計5回の3次元静的弾塑性有元要素解析を行う。表5に解析で得られた水

平バネ K_x 、 K_y 、鉛直バネ K_z 、回転バネ $K_{\theta x}$ 、 $K_{\theta y}$ の値を示す。次に、簡略されたSRモデルを対象に、動的解析を行う。得られた等価バネの最大発生力を外力として、再度静的解析により杭の断面力を求める。水平荷重を受ける杭基礎の場合には水平荷重が杭の発生断面力に与える影響が最も大きいので、等価バネの最大発生力を水平バネの力が最大時の諸バネの力に設定する。動的解析の入力地震動は図4に示すように、鉄道設計基準のG0C波を用いることとする。動的解析の場合、等価バネの減衰を10%、柱の減衰を5%に設定した。解析手法は直接積分法により、Newmark- β 法で時刻間隔が0.01秒である。

表1 地盤の土質定数

	Layer	Depth (m)	Soil	Density (ton/m ³)	N	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
地盤1	1	4	Silty	1.60	8	20.0	0.40	0.044	4
	2	16	sand	1.80	20	50.0	0.33	0.0	30
	3	1	elastic	2.00	50	100.0	0.30	—	—
地盤2	1	4	sand	1.80	8	20.0	0.33	0.0	30
	2	16	clay	1.60	2	5.0	0.40	0.044	4
	3	1	elastic	2.00	50	100.0	0.30	—	—

表2 杭・柱部材諸元

	Strength of concrete	Strength of reinforcement	Reinforcement
杭	24.0 (MPa)	300.0 (MPa)	D29-24
柱	24.0 (MPa)	400.0 (MPa)	D35-44

Young's modulus of concrete = 2.5×10^4 (MPa)

表3 柱・杭の非線型特性

	M_c (kN*m)	M_y (kN*m)	M_u (kN*m)	Φ_c (1/m)	Φ_y (1/m)	Φ_u (1/m)
杭	702.2	1591.0	2230.2	0.000276	0.00233	0.0110
柱	2591.0	8799.0	11867.0	0.000201	0.00189	0.00629

表4 水平方向の等価非線型バネ ($k_x=k_y$)

	P_c (MN)	P_y (MN)	P_u (MN)	δ_c (cm)	δ_y (cm)	δ_u (cm)
地盤1	10.4	12.8	16.4	3.93	9.54	58.1
地盤2	10.0	16.0	20.0	2.49	5.02	53.8

表5 等価線型バネ

	k_z (MN*m/m)	$K_{\theta x}$ (MN*m/rad)	$P_{\theta y}$ (MN*m/rad)
地盤1	1724.1	9857.6	9857.6
地盤2	1052.6	5521.5	5521.5

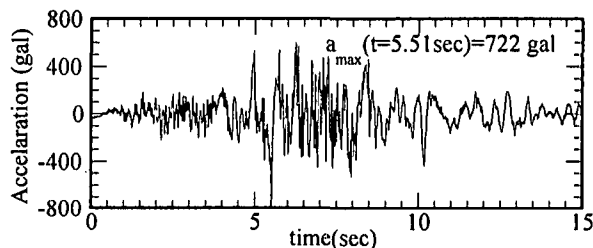


図4 入力加速度

FEM 応答変位法で検討する場合、地盤の変形を正弦波分布と仮定し、その地表面の変位を地盤のみの動的解析により得られた地表面最大変位とする。地表面最大変位は地盤1の場合には27.7cm、地盤2の場合には42.2cmであった。応答変位法で検討する場合、本来なら上部工の慣性力も考慮する必要があるが、位相差の評価が難しいため、ここで慣性力を無視することとする。強制変位の作用位置の影響を調べるために、解析において、フーチング両サイドからそれぞれ0.6m、1.9mと5.9m離れた2鉛直面に強制分布変位を与えて、増分法で解析を行う。図5に、応答変位法により得られ

た杭の曲げモーメント分布の比較を示す。地盤 1 の場合には、強制変位の作用位置がほとんど影響がなく、ほぼ同様な曲げモーメント分布が得られた。これは、地盤が比較的固いために、力の伝達が遠いところまで及ぶと考えられ。一方、地盤 2 の場合には、地盤が軟弱であるために、強制変位の作用位置が断面力に強い影響を与え、作用距離に近いほど、曲げモーメントが大きい結果となった。

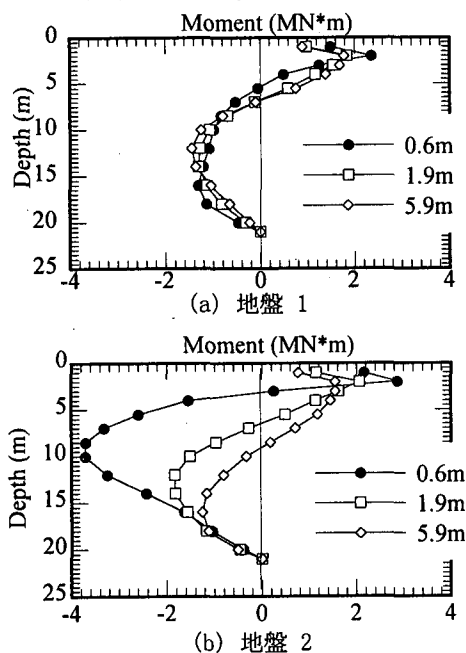


図5 応答変位法による杭体モーメント比較

一体系動的解析の場合、地盤の減衰を 10%、杭と柱の減衰を 5% に設定した。剛性比例型の減衰を使うために、動的解析を行う前に、ヤコビ法とサブスペース法を兼用する固有値解析を行った。その結果、地盤 1 と地盤 2 の場合の一体系 1 次固有値はそれぞれ 0.856sec、2.544sec であった。動的解析手法は分離法と同様に、Newmark- β 法で時間刻みが 0.01 秒である。解析に用いる地盤の FEM メッシュは静的解析と同様である。また、地盤境界の扱いは底面が固定で、側面が等変位境界を用いることとする。

一体系動的解析の入力地震動が基盤面に入力するのに対して、SR モデルを用いる動的解析の入力地震動は地表面地震動でなければならない。そこで、まず地盤のみの地震動解析を行い、地表面地震動を求める。次に、得られた地表面地震動を入力地震動として、SR モデルの動的解析を行う。図 6, 7 にそれぞれ一体系動的

解析と SR モデルを用いる分離法により得られた柱上端の応答加速度と柱下端の M- ϕ 履歴関係を示す。いずれの地盤においても、両者の差がほとんどないことがわかった。いわば、上部工だけを着目すると、分離法の有効性が一体系動的解析により実証された。また、軟弱地盤の場合、地盤が軟弱化することにより、かえって地震動の増幅が緩和されることもわかった。

図 8 に各手法により得られた杭の曲げモーメント分布の比較を示す。分離法で得られた杭の断面力が小さく、動的解析と応答変位法で得られた断面力分布が形状とオーダーが一致していることがわかった。

図 9 は一体系動的解析で得られた最大時の同時刻地盤変形を示したものである。地盤 1 の場合には、せん断ひずみはほとんど比較的柔らかい上層部で発生している。水平変形は杭基礎の周辺部を除いて水平方向でほぼ均一に分布している。一方、鉛直変形は杭基礎の周辺で卓越したロッキングが見られた。その範囲はほぼ杭長に相当する。地盤 2 の場合には、せん断ひずみはほとんど軟弱層と基盤の境界面に集中している。その境界面以上の地盤はほぼ一体として揺れている。鉛直変形において、ロッキングが見られる範囲は地盤 1 より小さい。これは地盤が軟弱であるため影響範囲が小さくなったと考えられる。

4. まとめ

次のような知見が得られた。

- 1) 上部工だけに着目すると、分離法が有効である。
- 2) 地盤の変形による杭の発生断面力が支配的であり、無視できない。
- 3) 応答変位法で杭基礎耐震検討を行う場合、強制変位の作用位置を慎重に選択しなければならない。
- 4) 分離法で得られた杭の断面力が過小評価されている。一方、動的解析と応答変位法で得られた曲げモーメント分布は形状とオーダーがほぼ一致している

参考文献

- Kimura, M., Yashima, A. and Shibata, T. 1991. Three-dimensional finite element analysis of laterally loaded piles, Proc. of 7th Int. Conf. Computer Method and Advance in Geomechanics, pp. 145-150. Cairns: Balkema
- Adachi, T., Kimura, M. and Zhang, F. 1994. Analyses on ultimate behavior of lateral loading cast-in-place concrete piles by three-dimensional elasto-plastic FEM, Proc. of 8th Int. Conf. Computer Method and Advance in Geomechanics, Vol. 3, pp. 2279-2284, Morgantown: Balkema.

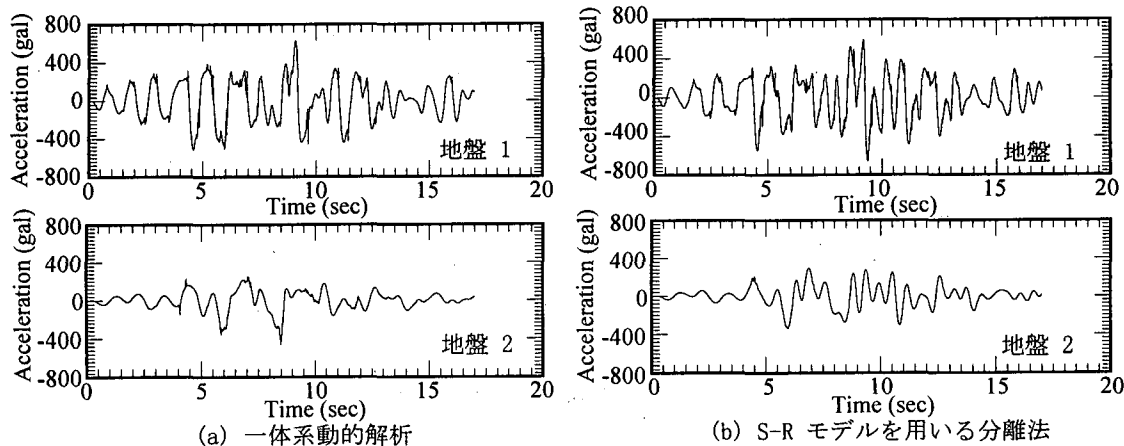


図6 動的解析による柱上端の応答加速度

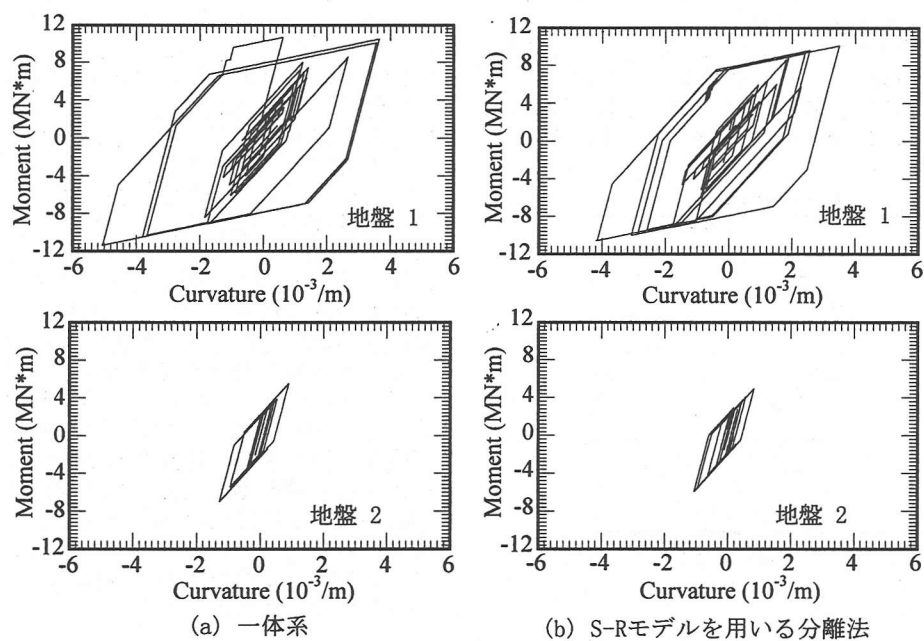


図7 動的解析による柱下端のM-φ関係

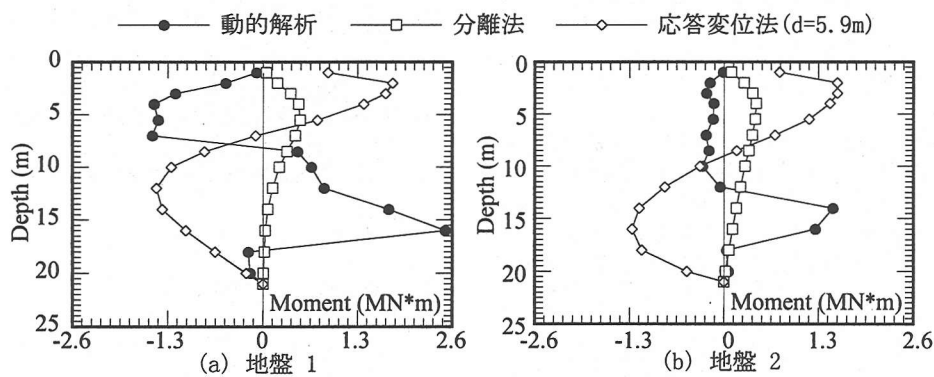


図8 違う方法による杭体断面力分布の比較

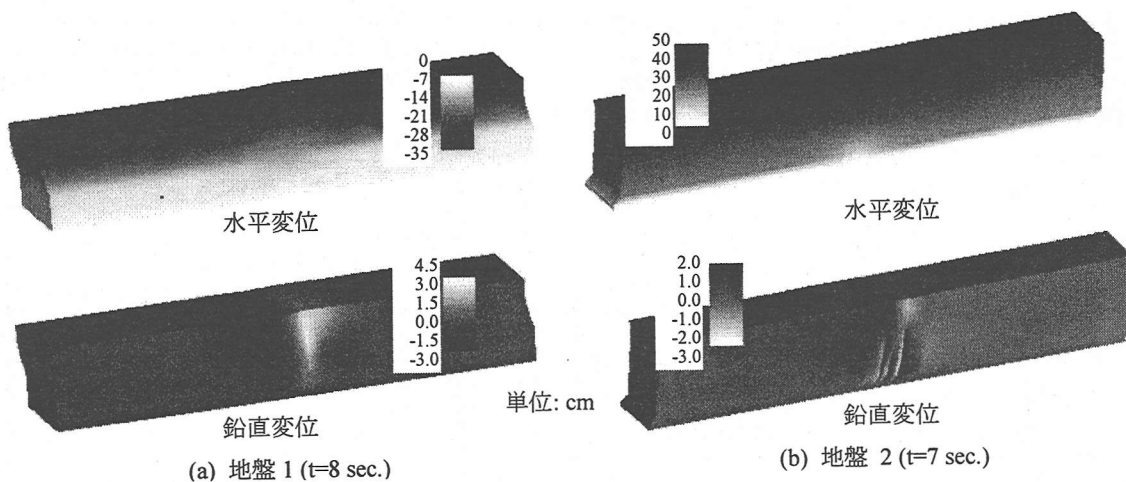


図9 動的解析による地盤変形