

神戸大学工学部 フェロー 高田 至郎
神戸大学工学部 正会員 尾崎 竜三
神戸大学大学院 学生員 ○山根 健太郎

1.はじめに

兵庫県南部地震では、液状化に伴い地盤が数メートル水平方向に移動する現象である側方流動が発生した。本地震を契機に、水際線背後地盤で護岸が大きく移動する可能性のある場合や、地表面が傾斜し広範囲にわたって液状化が発生する場合には、側方流動の影響を考慮して構造物の耐震安全性を照査することが必要となり、今後新たな知見が得られることが期待されている。本研究では、個別要素法(DEM)による液状化解析手法を用いることにより、側方流動発生メカニズムを明らかにし、側方流動量に及ぼす要因を考察する。

2.解析手法

本研究では図-1 の各メッシュの間隙面積を逐次求めて、間隙面積の変化から間隙水圧発生を推定する。メッシュ (i,j) における初期間隙面積を A_{0ij} 、ある時刻 t における間隙面積を A_{ij}^t とすれば、地震動などによりメッシュ内の要素が変位するとメッシュ中の要素によって形成される間隙面積は変化する。そして時間経過とともに大きな震動力により、メッシュ内に閉じこめられた水の過剰間隙水圧は上昇する。間隙面積の変化率 S_{ij} は、式(1)より求まり、水の体積弾性率を E_w とすると、過剰間隙水圧の増分量 ΔU_{ij} は式(2)より求まり、時刻 t における過剰間隙水圧 P'_{ij} は式(3)となる¹⁾。

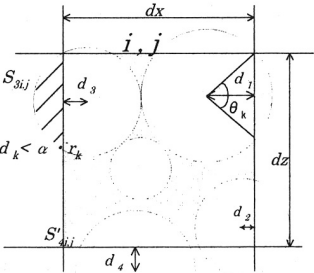


図-1 メッシュの間隙面積

$$S_{ij} = (A_{ij}^{t+\Delta t} - A_{ij}^t) / A_{0ij} \tag{1}$$

$$\Delta U_{ij} = E_w \cdot S_{ij} \tag{2}$$

$$P'_{ij} = P_{ij}^{t-\Delta t} + \Delta U_{ij} \tag{3}$$

3.解析条件

解析地盤モデルの 1 例として基準モデルであるケース 1 を図-2 に示す。モデルは深さ 2,300cm、長さ 10,000cm であり、精度検討の結果を踏まえて粒径 100cm の各要素を規則的配置にて基盤と地表面に同じ大きさの勾配をもたせ、パッキングをおこなった (要素数 2,472 個)。基盤層は 800cm、液状化層厚は 1,500cm である。本研究では、実際の現象に基づいて、半無限に広がった大地盤モデルでの側方流動現象を捉えることを目的とするため、土粒子の集まりを 1 つの要素として考え、液状化発生時にある程度の土粒子が固まりとして挙動するとして地盤モデルを作成した。また液状化層厚には過剰間隙水圧計算のためメッシュを配置している。また、解析に用いた入力パラメータを表-1 に示す。入力波は 1Hz の正弦波を 15 秒間入力した。解析ケースは、既往の予測式の濱田式²⁾において考慮されている基盤勾配 θ 、地表面からの液状化層厚 H_l 、液状化層の N 値の各要因と、濱田式には考慮されていない地表面からの非液状化層厚 H_2 、液状化層幅 L 、加振継続時間 T の各要因について、それぞれ変化させケーススタディを行った。

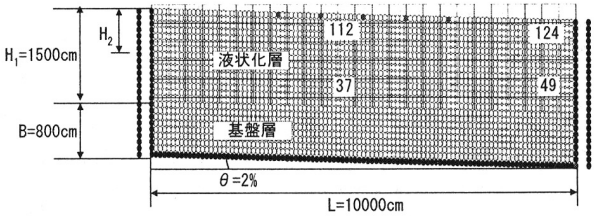


図-2 地盤モデル

表-1 要素の入力物性値

地盤	N値	単位体積重量 γ (kN/m ³)	弾性係数 E (kN/m ²)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (度)	ポアソン比	透水係数 k (cm/s)
基盤層	50	19.6	5.2×10^5	294	42.4	0.45	-
軟弱層	10	14.7	4.5×10^4	58.8	27.3	0.49	-
	5	16.6	3.2×10^4	0	23.7	0.49	5.0×10^{-3}
液状化層	3	16.6	2.1×10^4	0	23.7	0.49	5.0×10^{-3}
	1	16.6	1.3×10^4	0	23.7	0.49	5.0×10^{-3}

4.解析結果および考察

加振開始時から終了時までの各時間における側方流動量分布を図-3に示す。本図より、加振開始から1秒後ではまだ側方流動が明確に表れている地点は見られない。しかし図-4より、水圧比が1.0に達した5秒後では地表面付近に最大113.1cmの側方流動が生じ、完全液状化時での地盤の流動化が生じたことが分かる。このことから側方流動が生じるのは、完全液状化状態の目安となる地盤の過剰間隙水圧比が1.0付近まで達してからということが考えられる。その後さらに流動量および流動分布は大きくなり、加振終了時の15秒後では最大164.5cmの側方流動が見られた。また図-3の(c)より、側方流動量が最も大きく出る地点は、拘束圧の小さい地表面の中央地点に大きい流動量が生じることが知られた。

次に各解析結果から得られた各要因と側方流動量の関係の1例を図-5に示す。本図より、FEM結果²⁾との比較によりほぼ同等のオーダーの値を示しており、本DEM側方流動量の妥当性を確認できた。その他の各要因については発表時にゆずる。

また解析をおこなったすべてのケースについて、これら6つの条件を同時に考慮した線形重回帰分析をおこない、簡易予測式を提案する。結果は式(1)に示すとおりであり、DEM解析結果と本提案式による予測値の分布を図-6に示した。

$$D = 34.100 \cdot \theta + 0.154 \cdot H_1 - 0.129 \cdot N - 0.014 \cdot H_2 + 0.012 \cdot L + 0.059 \cdot T - 2.774 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.9696)$$

これらの図、式より、本分析はよい相関を示していることが知られる。以上のことより、側方流動量を予測するには、既往の予測式にも含まれていない各要因も考慮した上での流動量の予測を行う必要があると考えられる。

5.まとめ

個別要素法により液状化側方流動シミュレーションを行った。その結果、側方流動発生メカニズムには過剰間隙水圧が関与し、最大側方流動量は拘束圧の小さい地表面付近になることが知られた。また側方流動量を予測するには、既往の予測式にも含まれていない各要因も考慮した上での流動量の予測を行い、構造物の耐震設計に反映させる必要があると考えられる。

<参考文献>

- 1) Hakuno,M. and Tarumi,Y.: A Granular Assembly Simulation for the Seismic Liquefaction of Sand,Proceedings of Japan Society of Civil Engineering,No.398/ I -10 pp.129-137, 1988.
- 2) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.189-208, 1998.6.
- 3) 尾崎竜三: リアルタイム地震防災における液状化モニタリングと地震対策に関する研究, 神戸大学博士論文, pp.88-102, 1999.3.

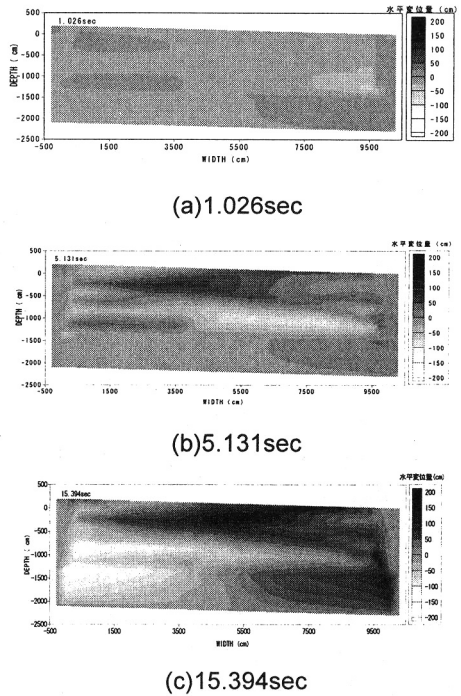


図-3 各時間における側方流動量分布図

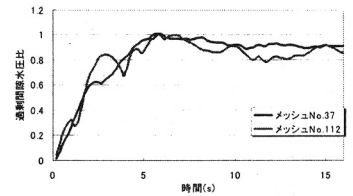


図-4 過剰間隙水圧比

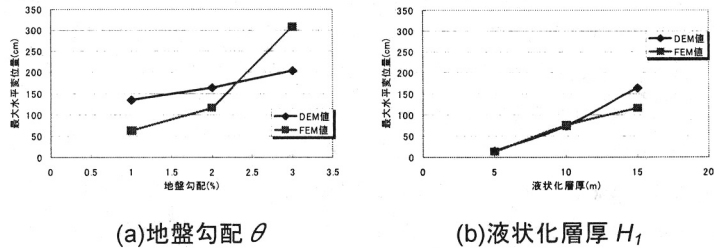


図-5 各要因と側方流動量の関係

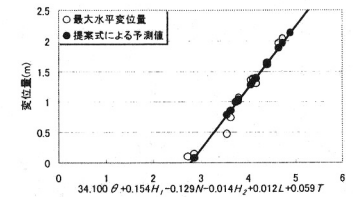


図-6 解析結果と予測値の分布