

液状化層厚の空間分布を考慮した有効応力解析による地盤変状評価

東京大学大学院（元鉄道総研）

鉄道総合技術研究所

ジェイアール東日本コンサルタンツ（元鉄道総研）

正会員 ○松丸 貴樹

正会員 佐藤 武斗

正会員 工藤 敦弘

1. はじめに

地震時の液状化による地盤変状は種々の要因によって様には生じない。これまでに、例えば液状化対策工による地盤変状の低減効果の検討を目的とした模型振動台実験¹⁾が行われているが、液状化地盤の層厚や強度などの自然堆積状態と地盤変状を関連づけた研究は少ない。本研究では2011年東北地方太平洋沖地震で液状化被害の生じた地盤を対象とした有効応力解析を行い、液状化層厚の空間分布が地盤変状に与える影響について考察を行う。

2. 解析手法

土骨格の構成式には比較的簡便な繰返し弾塑性構成式²⁾を用いた。具体的には、せん断による降伏を考慮した相当応力比一定型の降伏関数、非線形移動硬化則、非関連流動則、Cam-Clay型の塑性ポテンシャル関数を用いた。この構成式を基に、大きなひずみを表現できるよう塑性相当ひずみの大きさに応じた塑性剛性の低減も行っている。

基礎式は二相混合体理論に基づき、土骨格の変位 u^s および間隙水圧 p^w を未知数とする混合体のつりあい式と間隙水の連続式から成る³⁾。空間離散化には混合型の有限要素法を、時間積分にはNewmarkの時間積分法を適用した。

3. 実際の被災事例を対象とした解析による地盤変状の評価

(1)対象とする事例の概要^{4),5)} 対象とする事例は、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した石炭焼却灰が堆積する鉄道車両基地の地盤である。地表面からGL-22m程度までN値が概ね1程度の軟弱な地盤であり、表層には液状化層である石炭焼却灰(B層)が、下部には軟弱な沖積粘土(Ac1・Ac2層)が堆積している。地下水位はGL-1m程度と高い。B層は、その不攪乱試料を用いた繰返し非排水三軸試験により液状化に至ることが確認されている。現地では表面波探査と測量がなされ、B層は下端位置がGL-2~4mで空間分布を有した状態で堆積していると想定されること、その層厚と地震後の相対的な鉛直変位にある程度相関があることが示されている。

(2)解析条件 解析はCase1・2として1次元、Case3として2次元解析を行った。有限要素モデルを図1・2に示す。Case3では表面波探査で得られたB層の分布を考慮したモデルとした。Case1・2のB層の層厚は2.5mおよび1.0mであり、Case3での最大・最小の層厚となる。

解析に用いた構成式のモデルパラメータを表1に示す。液状化層となるB層および粘土層のAc1・2層は2で述べた弾塑性モデルを用いた。このうちAc1・2の粘土層は液状化が生じない設定とした。最下段のMc層は弾性体とした。

解析に用いた入力地震動を図3に示す。用いた地震動は、2011年東北地方太平洋沖地震の際にK-net水戸で観測されたEW成分の波形を、観測地点の基盤に引き戻し地表面まで距離減衰式により補正を行い、200秒間の時刻歴波形を解析に用いた。その後、排水に伴う沈下を求めるために圧密解析を9800秒間行った。

(3)解析結果および考察 各ケースの解析終了時の地表面沈下量の分布を図4に示す。図中には、現地での軌道の相対変位⁵⁾も示している。

Case3の解析では距離程20~80mでの地盤変状

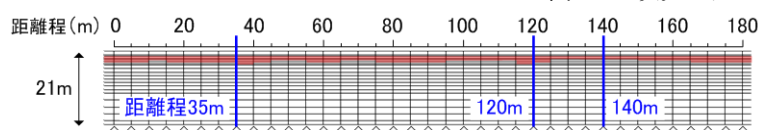
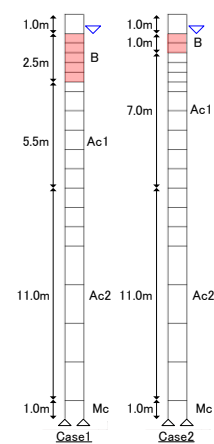


図2 2次元モデル (Case3)

表1 モデルパラメータ

	B	Ac1	Ac2	Mc
初期間隙率, n_0	0.638	0.783	0.711	0.51
土粒子の実質密度, ρ^{sr} (t/m ³)	2.326	2.541	2.633	2.710
透水係数, k (m/s)	1.42×10^{-5}	6.39×10^{-9}	6.61×10^{-9}	7.51×10^{-7}
無次元化体積弾性係数, K^*	1263	586	726	--
無次元化せん断弾性係数, G^*	583	126	156	--
移動硬化パラメータ, a_0	1200	300	400	--
移動硬化パラメータ, a_1	100	20	30	--
移動硬化パラメータ, b	-1.73	-1.77	-1.36	--
移動硬化パラメータ, C_f	3500	2000	2000	--
限界状態の応力比, M_m	1.73	1.77	1.36	--
ダイレイタンス係数, D	0.1	--	--	--
弾性域の大きさ, k	0.05	0.05	0.05	--
弾性係数, λ (kPa)	--	--	--	703033
弾性係数, μ (kPa)	--	--	--	247000

キーワード 液状化層厚, 地盤変状, 有効応力解析

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院 TEL 03-5841-6137

の程度や、120m 付近で沈下量が最大となることを再現できている。最大の沈下量は 30cm 程度であり、この値は現場での観測と概ね一致している。距離程 20~50m では B 層の層厚が 2.0~2.5m, 130~150m では 1.0m であり、これらの層厚に対応する Case1・2 の解析では概ね同等の変位となっている。

以降では、1・2 次元解析での挙動の相違や 2 次元解析で地盤変状の空間分

布が生じる要因の考察を行うために、Case3 の解析では代表位置として液状化層厚が 2.5m の地点である距離程 35m および 120m, 1.0m の地点である 140m の挙動に着目する。地表面での鉛直変位の時刻歴を図 5 に示す。この図から、地震中のみでなく地震後も各節点で挙動が大きく異なることがわかる。

各要素での地震中の過剰間隙水圧比 (EPWPR) の時刻歴を図 6 に示す。Case1 では約 50 秒で、Case2 では約 80 秒で EPWPR が 1 となり液状化に至っている。2 次元モデルの Case3 の挙動をこれらと比較すると、距離程 35m および 120m では Case1 に、140m では Case2 に類似している。次に地表面での

加速度応答の時刻歴を図 7 に示す。EPWPR の上昇過程の違いの影響を受け、Case2 に比べ Case1 では 50 秒以降で大きく応答が減衰している。2 次元解析の Case3 では EPWPR の違いを反映した加速度応答となっているが、Case1・2 ほどの違いはなく空間内である程度均一化されたものとなっている。特に距離程 120m では約 50 秒で液状化に至るにも関わらず加速度応答は大きい。

また、地震後の挙動として GL-1.75m での EPWPR と地表面での鉛直変位速度の時刻歴を図 8 に示す。Case3 の距離程 35m および 120m の位置では Case1 と、140m 位置では Case2 と挙動が類似しており、EPWPR

の低下には B 層の層厚が大きく影響している。この EPWPR の挙動と変位速度の時刻歴は似た形状となっており、地震後の鉛直変位速度の大きさやその収束に至る時刻が各節点位置で異なっている。ただし、距離程 120m では同じ液状化層厚の距離程 35m 位置や Case1 と比較すると、地震後の鉛直変位速度が幾分か大きく変位の収束も遅い。このことに起因して、節点間での変位差が地震終了時点に比べて大きくなることにつながる事が示唆される。

4. まとめ

本研究では、実際の被災事例を対象として液状化層厚の空間分布を考慮した解析を行い、被災状況の再現と地盤変状が生じる要因を検討した。その結果、解析により実際の被害を概ね再現できるとともに、液状化層厚の空間分布に起因して地震中の地盤応答や地震後の間隙水圧消散が変わり、地盤変状に大きく影響を及ぼすことがわかった。

謝辞 現場でのデータ活用に当たっては日本貨物鉄道殿・東日本旅客鉄道殿のご協力をいただいた。また、解析に用いた地震動作成には、防災科学技術研究所の強震観測網 (K-net) のデータを活用させていただいた。

参考文献 1) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 佐伯嘉隆: 格子間隔が広い格子状改良直上のアスファルト舗装の変形に関する模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.227-241, 2014. 2) 松丸貴樹, 渦岡良介: 不飽和土の繰返し弾塑性構成式を用いた三相系多孔質体理論に基づく盛土の地震応答解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.70, No.4, pp.395-411, 2014. 3) Uzuoka, R. and Borja, R.I.: Dynamics of unsaturated poro-elastic solids at finite strain, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.36, pp.1535-1573, 2012. 4) 工藤敦弘, 松丸貴樹, 黒津英一, 星智和, 長谷川弘, 高野幸宏, 木口峰夫: 石炭焼却灰を含んだ鉄道盛土材料の液状化抵抗特性, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2013. 5) 佐藤武斗, 星智和, 長谷川弘, 篠崎有司, 川上哲, 工藤敦弘, 松丸貴樹: 石炭灰で構成される鉄道盛土の液状化とその影響評価, 土木学会第 69 回年次講演会講演概要集, Vol.69, No. I-383, pp.765-766, 2014.

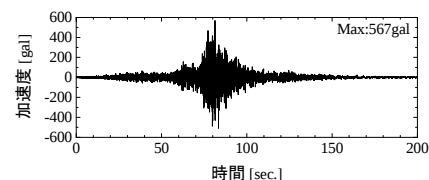


図 3 入力加速度の時刻歴

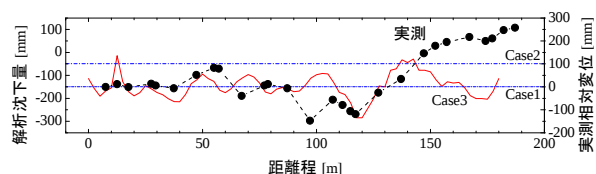


図 4 解析での地表面沈下量と現地での軌道相対変位

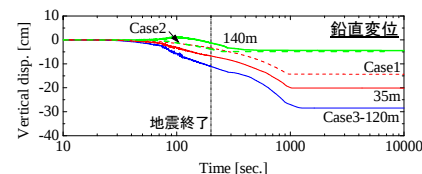


図 5 地表面での鉛直変位時刻歴

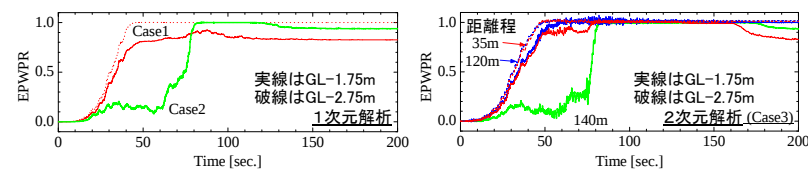


図 6 地震中の過剰間隙水圧比の時刻歴

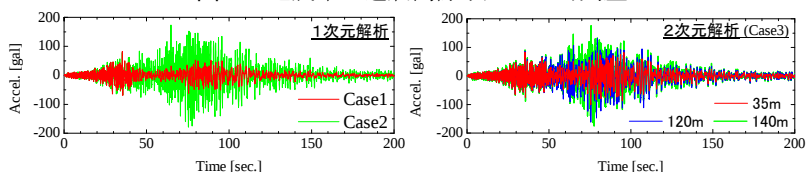


図 7 加速度応答の時刻歴

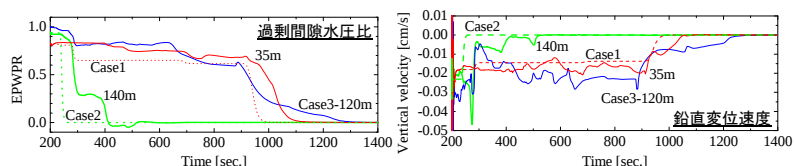


図 8 地震後の過剰間隙水圧比と鉛直変位速度の時刻歴