

パラメータ設定が液状化解析結果に及ぼす影響

Effect of Variation of the Determined Parameter on Numerical Analysis
for Seismic Performance Evaluation

三上武子	Takeko MIKAMI	(応用地質(株))
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究科)
北出圭介	Keisuke KITADE	(中電技術コンサルタント(株))
濱田展寿	Nobuhisa HAMADA	((株)ウエスコ)
森鼻章治	Shoji MORIHANA	((株)不動テトラ)
米浦大輔	Daisuke YONEURA	(復建調査設計(株))
仁科晴貴	Haruki NISHINA	(広島大学大学院工学研究科)

基礎や土構造物の性能設計では、変形量を精度よく評価することが求められており、FEMをはじめとした数値解析は有効な手段となる。しかし、解析技術者が異なれば、パラメータ設定も異なり、解析結果も異なることが考えられる。本研究では、複数の解析技術者が設定したパラメータセットを用いて液状化解析を行い、パラメータの違いが解析結果に及ぼす影響について調べた。その結果、構造物の残留変形量は液状化強度よりも液状化強度曲線の影響を受けることがわかった。また、パラメータセットの変動係数に比べて構造物の残留変形量の変動係数は1オーダー程度大きく、液状化強度曲線のフィッティングの良し悪しのわずかな違いが解析結果に影響を及ぼすことがわかった。

キーワード：液状化、数値解析、パラメータ設定、ばらつき

(IGC : D-07, E-08)

1. はじめに

基礎や土構造物の性能設計では、変形量を用いて性能を評価する¹⁾ことが多く、変形量を精度よく求める手段としてFEMをはじめとした数値解析があげられる。数値解析の精度を支配する要因として『解析コードの能力』、『地盤情報の精度』および『解析技術者の能力』が挙げられる²⁾。特に、解析に必要なパラメータの設定においては指標となるものがないため、解析技術者が試行錯誤を重ねて設定しているのが現状で、解析技術者の判断や力量に大きく依存する³⁾。パラメータが異なれば、必然的に算定される変形量も異なるため、解析コード、地盤情報が同じでも、解析技術者によって解析結果が異なる現象が生じる。これは、解析結果の解釈を困難にするばかりでなく、数値解析の信頼性を損なう要因となる。解析技術者が異なっても信頼性のある結果を確保するために、パラメータ設定の目安を示すことは実務において有益であると考えられる。

本研究では、複数の技術者が設定したパラメータセットを用いて液状化解析を行い、パラメータの違いが解析結果に及ぼす影響についてとりまとめた。ここでは、液状化解析法としてFLIP⁴⁾を採用したが、検討方法や結果は他の数値解析法にも適用可能な点が多いと考えている。

2. 解析条件

2.1 パラメータセット³⁾

2つの調査地の地盤情報をもとに、10人の技術者が設定した18種類のパラメータセットを用いて解析を行った。各パラメータセットには、物理特性を規定するパラメータ2種類、動的変形特性を規定するパラメータ8種類および液状化特性を規定するパラメータ6種類がある⁵⁾。このうち、技術者の工学的判断が大きく関与していると考えられる液状化特性を規定するパラメータのみを設定の対象とし、これら以外は調査地毎に共通した値を用いた。技術者の実務経験は、「5年以下」が3名、「6～10年」が3名、「11年以上」が4名である。また、FLIPの使用実績は、「はじめて」が3名、「10回以下」が1名、「11回以上」が6名である。

パラメータ設定の対象となった調査地の物性を表-1に示す。各技術者には、表-1に加えて液状化試験結果として図-1および図-2に示す液状化強度曲線とこれらに対応する波形記録を提示した。調査地の物性は、両地点ともN値は17で、細粒分を10%程度含む砂地盤である。湿潤密度 ρ_t は調査地1では1.75g/cm³、調査地2では1.90g/cm³で、S波速度 V_s はそれぞれ152m/s、206m/sであった。また、試験技術者が設定した液状化強度曲線から求めた液状

表-1 調査地の物性³⁾

物性値	調査地 1 11.10-12.10m	調査地 2 7.00-7.80m
土質区分	細砂	細砂
N 値	17	17
ρ_t	1.75g/cm ³	1.90g/cm ³
σ_v^*	120kN/m ²	80 kN/m ²
V_p	1410m/s	1410m/s
V_s	152m/s	206m/s
F_c	10%	7%
D_{50}	0.29mm	0.36mm
R_{L20}	0.209	0.299

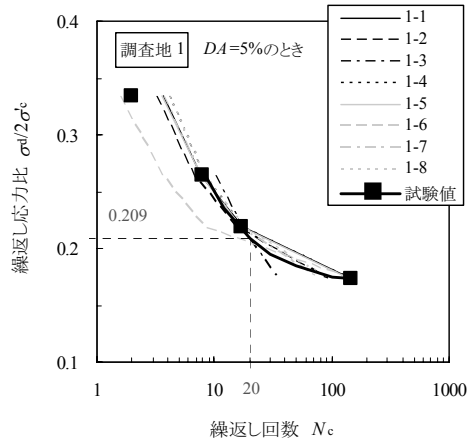


図-3 液状化強度曲線のフィッティング状況 (調査地 1)

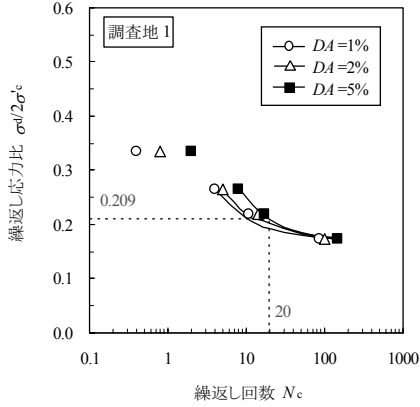


図-1 調査地 1 の液状化強度曲線³⁾

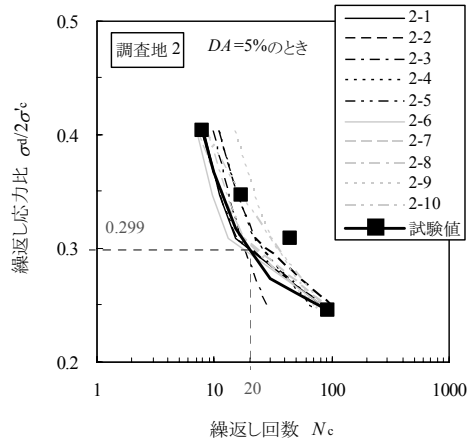


図-4 液状化強度曲線のフィッティング状況 (調査地 2)

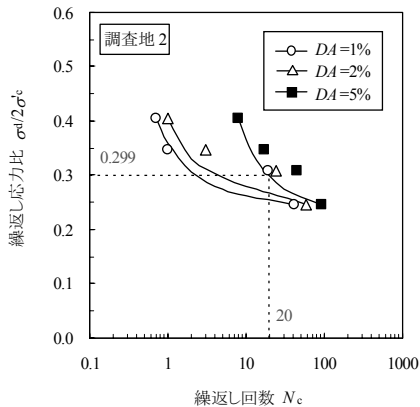


図-2 調査地 2 の液状化強度曲線³⁾

表-2 パラメータセット³⁾

No.	ϕ_p	S_1	w_1	p_1	p_2	c_1
1-1	28	0.005	10.10	0.500	0.86	2.09
1-2	28	0.005	8.50	0.500	0.80	2.08
1-3	28	0.005	16.35	0.500	0.85	1.00
1-4	28	0.005	12.50	0.400	1.00	2.15
1-5	28	0.005	10.00	0.505	0.90	2.09
1-6	28	0.005	5.00	0.500	0.85	2.13
1-7	28	0.005	8.33	0.500	0.70	2.06
1-8	28	0.005	6.70	0.550	0.55	2.06
2-1	28	0.005	17.00	0.500	0.87	3.05
2-2	28	0.005	8.00	0.500	0.53	3.15
2-3	28	0.005	22.37	0.500	0.85	1.30
2-4	28	0.005	11.00	0.650	0.60	2.90
2-5	28	0.005	17.30	0.500	0.89	3.05
2-6	28	0.005	14.50	0.500	0.85	3.07
2-7	30	0.005	11.30	0.650	0.50	2.96
2-8	28	0.005	5.50	0.400	0.50	3.28
2-9	28	0.005	10.00	0.500	0.52	3.05
2-10	28	0.005	0.17	0.500	0.25	1.00

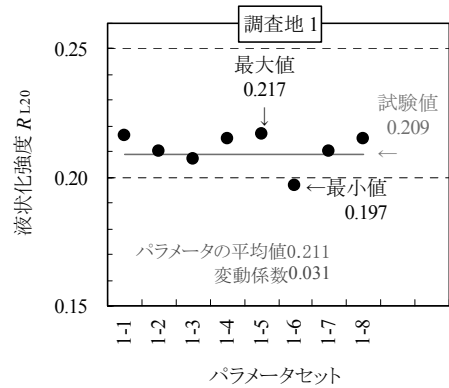


図-5 パラメータセットと液状化強度 (調査地 1)

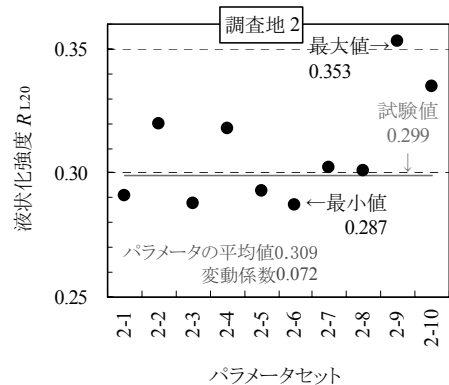


図-6 パラメータセットと液状化強度 (調査地 2)

化強度 R_{L20} (両振幅軸ひずみ $DA=5\%$, 繰返し回数 $N_c=20$ で定義) は 0.209, 0.299 であった。これらより, 調査地 1 はやや緩い砂地盤, 調査地 2 はやや密な砂地盤と位置づけることができる。これらの情報をもとに各技術者が設定したパラメータセットを表-2に示す。また, $DA=5\%$ のときの液状化強度曲線のフィッティング状況を図-3および図-4に示す。調査地 1 では, 繰返し回数 20 よりも小さい範囲でパラメータセット 1-6 の液状化強度曲線が異なるが, その他はほぼ一致している。各パラメータセットから得られた R_{L20} を図-5に示したが, 平均値は 0.211 で試験値の 0.209 にほぼ等しい。一方, 図-4より, 調査地 2 の液状化強度曲線のフィッティング状況にはばらつきが認められる。図-6より R_{L20} は 0.287~0.353 に分布し, 変動係数は 0.072 で, 調査地 1 (0.031) の 2 倍以上となっている。このばらつきは, 実験結果がばらついているために生じたものと考えられる。試験技術者は試験値の下限に液状化強度曲線を設定しているが, 技術者は必ずしもそうではなく, 平均的な液状化強度曲線を設定するケースや, $N_c=20$ 付近の試験値を目標に設定するケースなど, 技術者によって目標が異なっている。

2.2 解析モデル

解析モデルとしてケーソン式岸壁 2 種類, 矢板式岸壁および盛土の 4 種類を用いた。解析モデルの概要を図-7~図-10に示す。紙面の都合から構造物周辺のみを図示したが, 側方の境界は十分に離し, 粘性境界として処理している。なお, レーレー減衰の β 値は本来地震動毎に異なる値を用いるが, ここでは共通条件とするためケーソン式岸壁 1 と矢板式岸壁は 0.2%, ケーソン式岸壁 2 では 0.1%, 盛土では 0.5% として地震動毎に共通した値を用いた。時間積分法は Wilson の θ 法 ($\theta=1.4$) とした。また, 時間間隔は 0.01s とした。メッシュについても各パラメータセットに対して共通したものをを用いた。このように, 液状化特性を規定するパラメータ以外の解析条件は共通するように設定しており, 現実にはありうる条件とは若干乖離する可能性があることに留意されたい。図-7のケーソン式岸壁 1 は, ケーソンの背後地盤のみを液状化層としたもので, 図-8のケーソン式岸壁 2 では, 背後地盤に加えて下部地盤も液状化層としたものである。図-9の矢板式岸壁は, ケーソン式岸壁 1 と同様に背後地盤が液状化層である。図-10の盛土は, 堤体下部が液状化層である。図中の斜線部で示した液状化層を表-2に示したパラメータセットを入力して解析を行った。

2.3 入力地震動

入力地震動として, 図-11から図-13に示す衝撃型地震動,

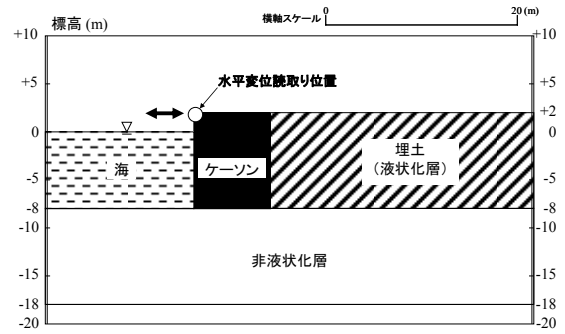


図-7 ケーソン式岸壁 1

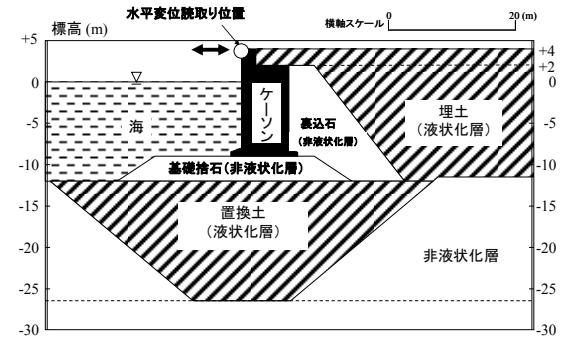


図-8 ケーソン式岸壁 2

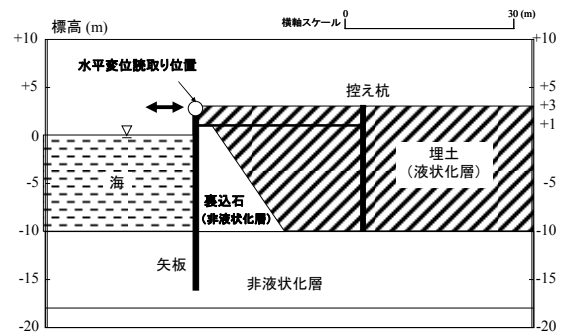


図-9 矢板式岸壁

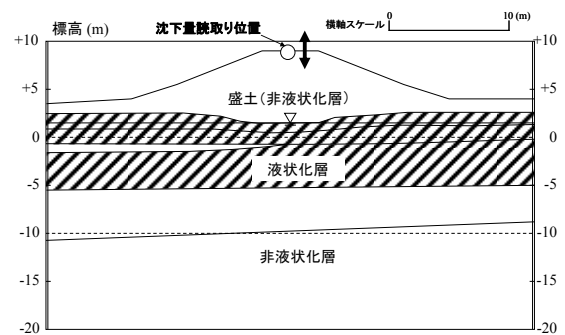


図-10 盛土

振動型地震動, 長時間継続型地震動の 3 種類を用いた。衝撃型地震動として, 1995 年兵庫県南部地震の際にポートアイランドで観測された波形を採用した。この波形の最大加速度は 544Gal で継続時間は約 10 秒である。振動型地震動には, 1968 年十勝沖地震で観測された八戸波を採用した。最大加速度は 210Gal で, 継続時間は約 10 秒である。また, 長時間継続型地震動には東南海・南海地震での想定波を採用した。最大加速度は 108Gal で他に比べて小さい

ものの、継続時間は他の 10 倍でおよそ 150 秒である。これらの地震動を、各解析モデルの水平方向に入力した。なお、本検討では FLIP Ver.3.3 相当の構成則（従来法）を用いた。

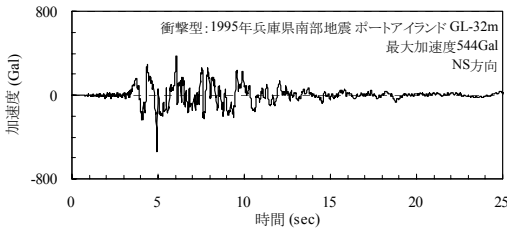


図-11 衝撃型地震動

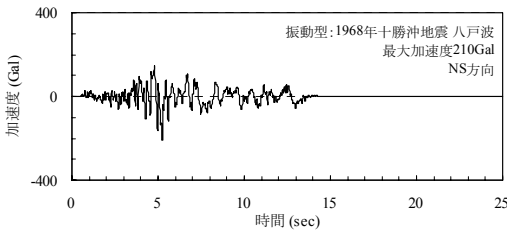


図-12 振動型地震動

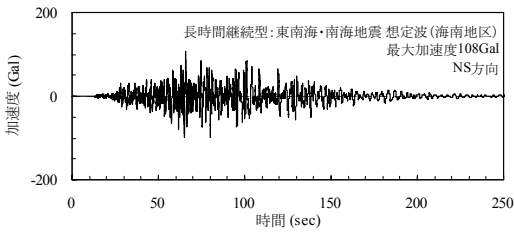


図-13 長時間継続型地震動

3. 解析結果

3.1 残留変形量

各解析モデルの残留変形量を地震動別にプロットして図-14～図-17に示す。ここで、残留変形量は、図-7～図-10に白丸で示した位置の値とした。構造物の性能にかかわる変形量として、ケーソン式岸壁および矢板式岸壁は水平変位で評価することとし、海側への変位をプラスとした。一方、盛土の残留変形量は天端中央の鉛直変位の値とし、沈下をプラスとした。また、地震動別に最大変形量を黒抜き、最小変形量を白抜きで示した。図-14のケーソン式岸壁 1 では、衝撃型地震動（以下、衝撃型と記す。）のときの残留変形量がいちばん大きく、調査地 1 の平均値は 0.99m であった。また、長時間継続型地震動（以下、長時間と記す。）の平均値は 0.43m、振動型地震動（以下、振動型と記す。）の平均値は 0.10m であった。いずれの地震動においても、最大値を与えたパラメ

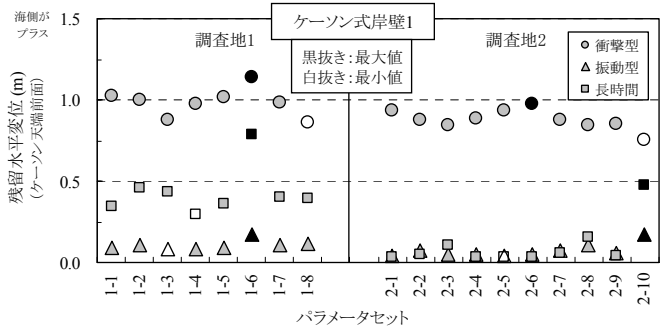


図-14 残留変形量（ケーソン式岸壁 1）

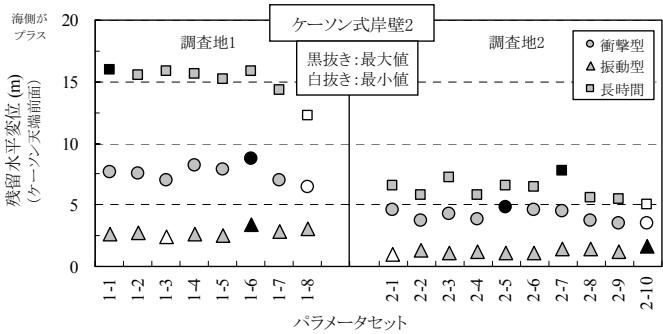


図-15 残留変形量（ケーソン式岸壁 2）

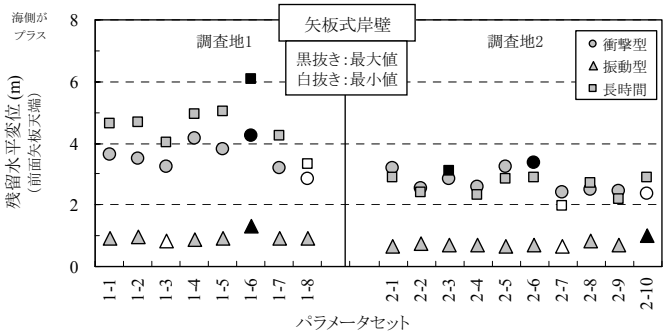


図-16 残留変形量（矢板式岸壁）

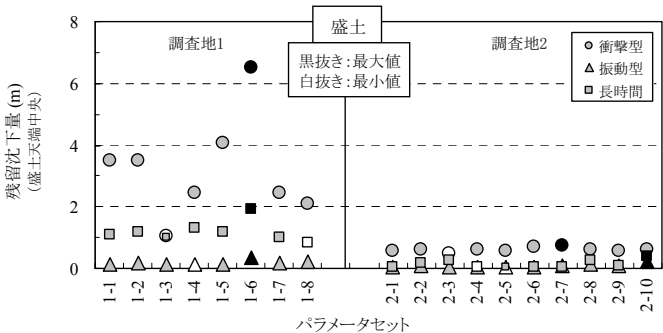


図-17 残留変形量（盛土）

ータセットは 1-6 であるが、最小値を与えたパラメータセットは地震動により異なり、衝撃型では 1-8、長時間では 1-4、振動型では 1-3 であった。調査地 2 の残留変形量は、衝撃型では 0.88m で調査地 1 の 9 割程度であるが、長時間の平均値は 0.10m で調査地 1 の 2 割程度に留まっている。振動型の平均値は 0.07m であった。パラメータセット 2-10

の残留変形量は振動型、長時間では最大値となっているが、衝撃型では最小値となっており、地震動の種類により異なった傾向を示す。

図-15のケーソン式岸壁 2 では、長時間の残留変形量が一番大きく、衝撃型、振動型の順に小さくなる。調査地 1 では 15m を超える残留変形量が発生しており、ケーソン式岸壁 1 に比べて非常に大きくなっている。これは、ケーソン背後に加えて下部地盤も液状化するためと考えられる。ただし、本検討では微小変形解析を行っており、このような大変形は適用範囲を超えているため、数値の比較は行わず傾向の比較に留める。

図-16の矢板式岸壁は、調査地 1 ではケーソン式岸壁 2 と同様に長時間の残留変形量が一番大きく、衝撃型、振動型の順に小さくなるが、調査地 2 では長時間の平均値が 2.63m、衝撃型の平均値が 2.75m でほとんど差がない。

図-17の盛土の残留変形量は、調査地 1, 2 とも衝撃型>長時間>振動型の順となっているが、他の解析モデルに比べて調査地 1 と 2 の残留変形量の差が大きい。衝撃型の場合、調査地 1 の平均値が 3.20m であるのに対して調査地 2 の平均値は 0.61m で約 2 割、長時間では調査地 1 の平均値が 1.19m であるのに対して調査地 2 の平均値は 0.14m で約 1 割となっている。また、図より調査地 1 の衝撃型の残留変形量のばらつきが他に比べて大きい。

3.2 パラメータセットの比較

調査地 1 では、ケーソン式岸壁 2 の長時間を除き、パラメータセット 1-6 の残留変形量がいずれのシリーズにおいても最大値となっている。ケーソン式岸壁 2 の長時間では 1-1 が最大値 (15.91m) であるが、1-6 の残留変形量は 15.86m でほぼ等しいことから、調査地 1 では 1-6 が他のパラメータセットに比べて残留変形量が多いことがわかる。これは、図-3および図-5に示したとおり R_{L20} が小さいことに加えて、繰返し回数 20 よりも小さい範囲での液状化強度曲線の違いが影響していると推察される。

一方、最小値を与えたパラメータセットは、解析モデルおよび地震動により異なるが、1-3, 1-4 および 1-8 の 3 種類に限定される。図-5の R_{L20} と照らし合わせてみると、1-4 および 1-8 は平均値よりも大きい、1-3 は平均値より若干小さい。また、 R_{L20} が最大値となるパラメータセットは 1-5 であるが、いずれの解析条件においても残留変形量は最小値にはなっていないため、 R_{L20} のみが残留変形量に影響しているとは考えられない。図-3の液状化強度曲線に目を向けてみると、1-3, 1-4 および 1-8 の液状化強度曲線は、他に比べて右側に位置していることがわかる。

以上より、残留変形量は R_{L20} だけでなく液状化強度曲線

全般の再現状況の影響を受けるが、液状化強度曲線の方がより影響度が高いと考えられる。ただし、調査地 2 については、前述のとおり同じパラメータが最大値となる場合もあれば最小値となる場合もある。 R_{L20} が最大で液状化強度曲線が最も右側に位置する 2-9 はいずれのケースでも他のパラメータセットに比べて残留変形量は小さいが、最小値ではないため、さらに検討を要す。

3.3 地盤条件の違いによる比較

調査地 1 と調査地 2 の残留変形量の平均値の比較を図-18に示す。ケーソン式岸壁 2 および矢板式岸壁では、地震動の種類にかかわらず、両地盤の残留変形量の比はほぼ等しいが、ケーソン式岸壁 1 および盛土では地震動によって異なることがわかる。

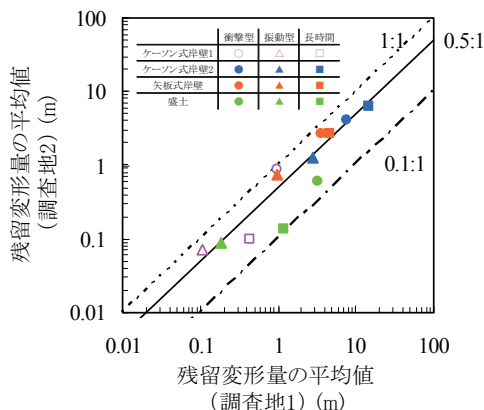


図-18 残留変形量の比較

3.4 地震動の違いによる比較

残留変形量の平均値と地震動の関係を図-19および図-20に示す。いずれの地盤においても振動型の残留変形量が最も小さいが、最大値は解析モデルにより異なる。ケーソン式岸壁 1 および盛土では衝撃型が最大値であることから、最大加速度が支配的であるが、ケーソン式岸壁 2 では長時間が最大値であることから、継続時間が支配的であると考えられる。

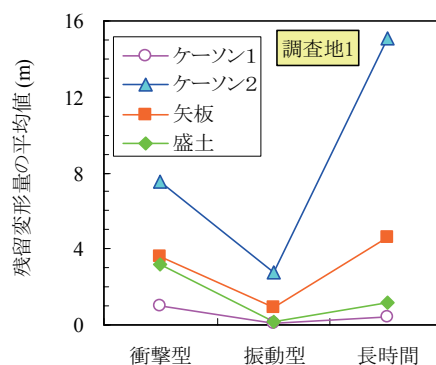


図-19 残留変形量と地震動の関係 (調査地 1)

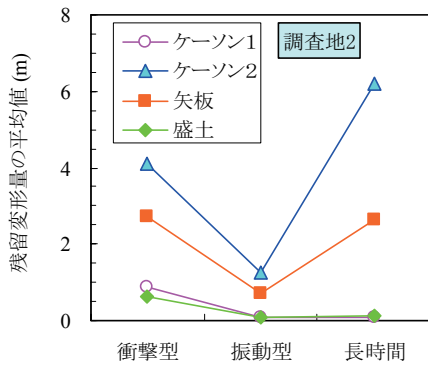


図-20 残留変形量と地震動の関係 (調査地 2)

3.5 残留変形量の変動係数

残留変形量の平均値と変動係数の関係を図-21に示す。両者の関係は右肩下がりとなっており、平均値が大きいほど変動係数が小さくなる傾向が認められる。

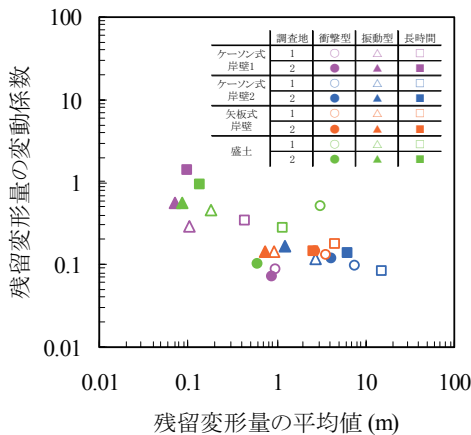


図-21 残留変形量の変動係数と平均値の関係

パラメータセットの変動係数を R_{L20} の変動係数とした場合、図-5および図-6に示したとおり調査地 1 が 0.031、調査地 2 が 0.072 であるが、残留変形量の変動係数は概ね 0.1 を超えていることから、パラメータセットに比べて 1 オーダー程度大きく、液状化強度曲線のフィッティングの良し悪しのわずかな違いが解析結果に大きな影響を及ぼす可能性がある。

4. まとめ

パラメータの違いが解析結果にどの程度影響を及ぼすか確認するため、複数の技術者が設定したパラメータセットを用いて液状化解析を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) やや緩い砂地盤の液状化試験結果をもとに設定したパラメータセットを用いて解析を行った場合、構造物の残留変形量は液状化強度 R_{L20} だけではなく液状化強度曲線全般の再現状況の影響を受けるが、液状化強度曲線の方がより影響度が高いことがわかった。一方、やや密な砂地盤の液状化試験結果から設定したパラメータセットの解析結果には、明確な傾向は得られず、さらなる検討が必要である。
- 2) 構造物の残留変形量は、最大加速度が小さく継続時間も短い振動型地震動のとき最小となる。一方、最大値は解析モデルにより異なるが、構造物の形式や地盤構成により最大加速度および継続時間の影響度が異なる。
- 3) 残留変形量の平均値と変動係数の関係は、平均値が大きいほど変動係数が小さくなる傾向が認められるが、パラメータセットの変動係数に比べて 1 オーダー程度大きいことから、液状化強度曲線のフィッティングの良し悪しのわずかな違いが解析結果に影響を及ぼす可能性があることがわかった。

今後は、液状化強度曲線のフィッティングの良し悪しを定量的に評価する手法を検討して、解析結果に及ぼす影響を明らかにするとともに、パラメータ設定の目安を定量的に示して、数値解析の信頼性を高める努力をしていきたい。

謝辞

本検討は、地盤工学会広島地区土質セミナー活動の一環として行いました。会員の皆様には、解析結果をまとめる上で貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省港湾局監修、日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007。
- 2) (社)地盤工学会関東支部：液状化を考慮した地盤と構造物の性能設計、pp.101-103、2008。
- 3) 三上武子、一井康二、植村一瑛、仁科晴貴：耐震性検討のための数値解析におけるパラメータ設定についての課題、地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設、Vol.27, No.1, pp.81-87, 2009。
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Solis and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。
- 5) 森田年一、井合進、Hanlong, L., 一井康二、佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法、港湾技研資料、No.869, pp.1-36, 1997。

(2010年7月20日 受付)