

液状化解析結果の定量的な妥当性評価事例の作成

一井康二*

1. 研究の目的と方法

性能に基づく耐震設計において、FLIP 等の液状化解析がよく利用されているが、その妥当性について、定量的に評価する手法の開発が求められている。そこで、ASME 等の V&V 手法（検証及び妥当性確認の手法）にもとづき、解析結果の妥当性を評価する手法を検討し、事例を作成した。

2. 液状化解析プログラム FLIP における解析ケースの設定例

プログラムのバージョンアップに伴う 3 ケースの比較をベースとし、技術者によって解析条件が異なる可能性がある微小レーレー減衰の値を変化させた解析を実施した解析ケースのまとめを表 1 に示す。ケース A は、全ての要因について従来モデル、ケース B は要因 a~c について改良モデルだが要因 d のみ従来モデル、ケース C は全影響要因について改良モデルを採用している。もちろん、改良モデルがベストであると考えてられており、ケース C がプログラムのバージョンアップ後では推奨モデルとなる。実際の解析においては種々の不確かさ要因があり、どのレベルまで不確かさを考慮するべきかの判断は難しい。そこで、このように不確かさの要因を分類し、可能ならその特性の評価を行ったうえで、解析ケースを設定することが重要である。

実際の護岸の被災事例に対する解析結果を表 2 に示す。理想的には推奨モデル（ケース C）が最も実測に近い結果を示すことが望ましいが、それほど単純ではない。評価指標としていた岸壁天端の変形量（水平変位である前だし量と沈下量）だけをみれば、実測値にばらつきがあることを考慮しても、従来モデルのケース A が最も実測に近い。

表 1 解析結果に及ぼす不確かさの分類と解析ケースの設定例

分類	解析結果に大きく影響する諸要因	解析ケース
① 砂の力学モデル	a. 変相線を越えた応力空間におけるせん断仕事の負のダイレーションへの寄与評価法の違い	ケース A：従来モデル ケース B：修正モデル ケース C：修正モデル
② 二相系の運動方程式とその数値解析法	b. 応力ひずみ関係の非線形反復法の違い	ケース A：従来モデル ケース B：修正モデル ケース C：修正モデル
	c. ジョイント要素の滑り挙動へのレーレー減衰の影響の評価方法の違い	ケース A：従来モデル ケース B：修正モデル ケース C：修正モデル
	その他、微小レーレー減衰の値の違いや大変形効果の影響の考慮の有無	全ケースについて、微小レーレー減衰の影響を考慮
③ 境界条件・接触条件・杭-地盤相互作用系のモデル	境界条件の位置や杭-地盤相互作用系における 3 次元効果の考慮の有無	境界条件は全ケースで固定（ベストな条件を想定） 杭構造は存在しない
④ 初期状態の設定法	地層断面・土層分割の違いや初期応力状態の評価法の違い	境界条件は全ケースで固定（ベストな条件を想定）
⑤ 砂以外の土や材料あるいは各種部材に関する力学モデル	d. 捨石の力学モデル	ケース A：従来モデル ケース B：従来モデル ケース C：修正モデル

*関西大学社会安全学部・教授

表 2 護岸の被災事例を対象とした解析結果の例¹⁾

	ケーソン 上部工 前出し量 (cm)	ケーソン 上部工 沈下量 (cm)	ケーソン 底部 前出し量 (cm)	ケーソン 残留回転角 (度)	ケーソン 背面上部 地表面段差 (cm)
ケース A	371 / 541	149 / 251	343 / 462	1.22 / 3.39	0 / 0
ケース B	240 / 264	55 / 58	160 / 174	3.46 / 3.84	86 / 63
ケース C	285 / 308	63 / 71	192 / 212	3.99 / 4.12	107 / 69
実測値(最大値)	464	198	238	6.4	200
実測値(平均値)	370	158	—	3.1	—

※1 一つのセルの二つの値は、左側が $\beta=0.002$ 、右側が $\beta=0.001$ に対応する。

※2 回転角は、ケーソン頭部が海側に傾くのを正とする。

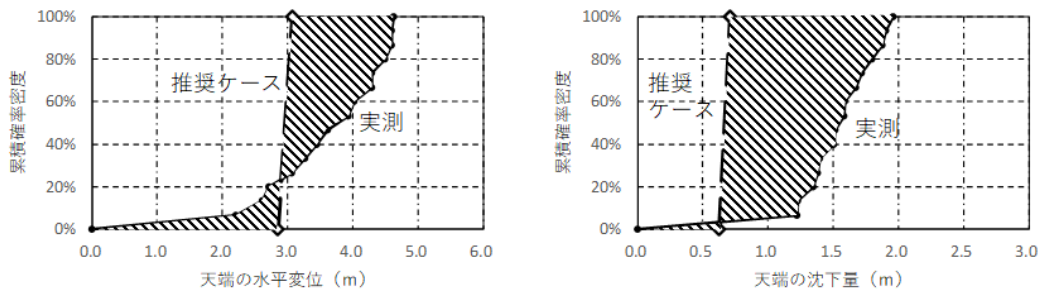


図 1 ASME V&V 10.1-2012 のアプローチによる不確かさの算定結果の例(護岸構造物)

3. 不確かさの定量化の事例

次に再現性の定量化 (Quantification) を行った例を示す。ここでは、ASME V&V 10.1-2012²⁾ の Validation approach に基づく検討結果の例を図 1 に示す。被災事例に関しては、各ケーソンの変形量が異なるので、それぞれのケーソンの天端の水平変位及び沈下量から累積分布関数 (累積の確率密度) を算定した。また、解析結果は全 6 ケースが同様に確からしいものと想定し、累積分布関数を算定した。さらに、分布関数の差の絶対値の総和を平均値で除することで、システム応答量の計測基準を求めると、水平変位で 25.1%、沈下量で 54.8%であった。実測の平均値 (累積確率で 50% のあたり) に対する誤差として考えると、水平変位で約 25%、沈下量で約 50% という誤差評価は、感覚的には、ほぼ妥当な値なのではないかと考えられる。

4. 謝辞

本検討は土木学会地震工学委員会「地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会」の議論を参考にさせて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 第四期 FLIP 研究会 14 年間のまとめ WG 編：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務～マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果～【理論編】、<https://www.flip.or.jp/file/riron.pdf> (確認 2020 年 8 月 24 日)
- 2) ASME: An illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10.1, 2012.