

東北地方太平洋沖地震における仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭 2 号岸壁の
液状化による被災程度の再現解析

東亜建設工業株式会社 正会員 ○住谷 圭一
東亜建設工業株式会社 正会員 田代 聡一
株式会社応用解析 曲 伝軍
独立行政法人港湾空港技術研究所 正会員 小濱 英司
広島大学 正会員 一井 康二

1. はじめに

プレート境界で発生する海溝型地震は、継続時間が長いという特徴を有し、このような地震を対象として液状化解析を実施する場合、より精度の高い解析結果を得るためには、排水条件を考慮した解析手法を用いる必要がある。本稿では、2011 年東北地方太平洋沖地震(以下、東日本大震災)の地震動に対して被災した仙台塩釜港仙台港区高砂埠頭 2 号岸壁Ⅱ区(図 1 参照)を対象に FLIP¹⁾による再現解析を実施し、排水を考慮したカクテルグラスモデル²⁾の妥当性を確認することを目的とした。岸壁の被災状況は、図 2 に示すとおりである。全体としての水平変位は 25cm~33cm であったが、一部で 68cm の孕み出しが観測された。

2. 土質定数の設定

土層構造は岸壁設計時の想定土層を基本とし、地震後の土質調査結果を考慮して設定した。図 3 は 68cm の変位が観測された地点の土層構造であり、岸壁背面の沖積砂層(As1)の上に粘性土(Ac1-1)が存在した。なお、それ以外の地点では粘性土が存在していなかった。表 1 と表 2 に示す土質パラメータは、被災後に実施された標準貫入試験、PS 検層および非排水繰返し三軸試験等の結果に基づいて設定した。

3. 構造部材定数の設定

本岸壁は 2001 年 3 月に竣工しているため、鋼材の断面性能に関しては、竣工から東日本大震災発生までの 10 年間の腐食を考慮して設定した。なお、鋼管部材はバイリニア型の非線形はり要素、タイ材は引張のみを受け持つ非線形バネ要素でモデル化した。

4. 解析条件

図 4 に解析メッシュを示す。本岸壁は背面を埋め立てた矢板式岸壁であるため、初期自重解析の方法としては 3 段階法³⁾を採用した。地震応答解析には図 5 に示す波形を与えた。この波形は、検討地点における事後推定によって得られた波形⁴⁾を、岸壁直角方向に合成したものである。

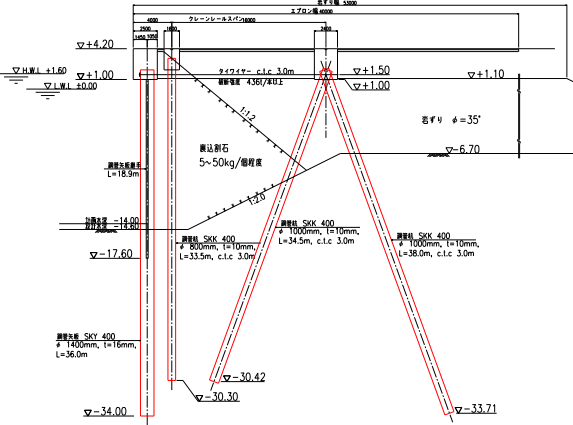


図 1 解析対象岸壁断面図

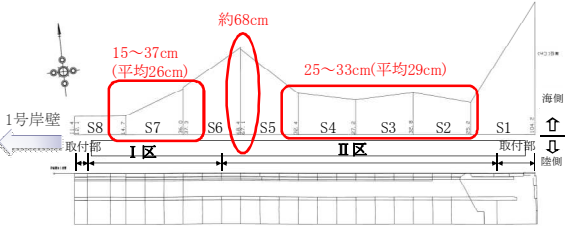


図 2 被災状況(岸壁天端変形量)

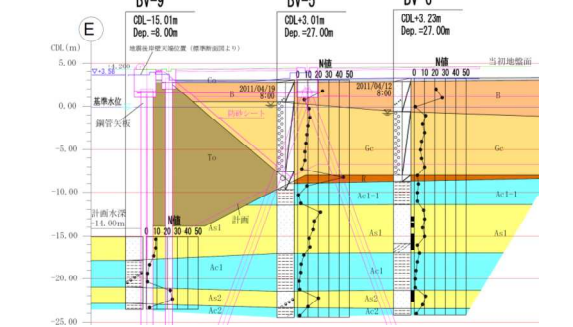


図 3 解析対象地点の土層構成

表 1 土層パラメータ(動的変形特性)

記号	土質	ρ (t/m^3)	σ_{v1}' (kN/m^2)	σ_{v2}' (kN/m^2)	V_s (m/s)	G_{max} (kN/m^2)	m_v	K_{eq} (kN/m^2)	m_c	ϕ_1 ($^\circ$)	h_{max}	n
B	堆土(堆積土)	1.80	27	21	160.0	46080	0.5	120200	0.5	41	0.24	0.45
Gc	切込路石(粗礫)	2.00	88	66	150.0	45000	0.5	117400	0.5	39	0.24	0.45
R	液流土(礫土)	1.70	125	94	180.0	52800	0.5	143600	0.5	40	0.24	0.45
Ac1-1	粘性土	1.60	136	102	180.0	51840	0.5	135200	0.5	30	0.20	0.55
As1	砂質土	1.70	166	124	220.0	82280	0.5	214600	0.5	40	0.24	0.45
Ac1	粘性土	1.58	203	152	160.0	40450	0.5	105500	0.5	30	0.20	0.55
As2	砂質土	1.70	222	166	160.0	43520	0.5	113500	0.5	39	0.24	0.45
Ac2	粘性土	1.75	241	181	160.0	44800	0.5	116800	0.5	30	0.20	0.55
Ds~Dg	細~粗砂~砂礫	2.00	286	215	290.0	168200	0.5	438600	0.5	40	0.24	0.45
To	礫込石	2.00		98	300.0	180000	0.5	469400	0.5	40	0.24	0.45

キーワード 有効応力解析, 液状化, 体積収縮, 東北地方太平洋沖地震

連絡先 〒161-1031 東京都新宿区西新宿 3 丁目 7 番 1 号 新宿パークタワー 3 1 階 TEL 03-6757-3844

5. マルチスプリングモデルによる解析結果

図 6 に加振後の解析結果を示す。これらは、カクテルグラスとの比較のために実施したものである。非排水条件による解析であるため、間隙水圧の消散は再現できないが、加振後の変位は Ac1-1 層有りの場合で 15.8cm、無しの場合で 16.7cm となった。これは、実際の被災状況に対して小さめの結果である。

6. カクテルグラスモデルによる解析結果

図 7 に加振後の解析結果を示す。岸壁天端の水平変位は 15 ～ 16cm 程度であり、マルチスプリングの結果とほぼ整合している。Ac1-1 層の有無による計算結果と比較すると、Ac1-1 層有りの場合は、Ac1-1 層無しの場合と比較して砕石直下に存在する As1 層の間隙水圧が高い結果となっている。また、Ac1-1 層無しの場合は、As1 層の水圧の消散が始まっているように見える。この結果から、液状化層(As1)の上に不透水層(Ac1-1)が存在する場合は、地震後に水圧の消散が困難になることが示唆できる。東日本大震災では本震後 30 分以内に数回にわたって比較的大きな余震が発生していることから、液状化層の上に不透水層が存在する断面では液状化層の水圧が完全に消散しないまま、再び地震によるせん断を受けることで、変形を増大させた可能性がある。よって、今後は地震後の過剰間隙水圧消散過程の再現解析を実施し、不透水層の有無による水圧消散過程の差異を調べ、余震と岸壁変形との関係についての考察が必要である。

7. まとめ

被災状況を完全に再現するまでには至らなかったが、従来のマルチスプリングモデルとの比較からカクテルグラスモデルの有用性を示唆することができた。今後、水圧消散後の変形量についての考察を加えると共に、砕石の揺すり込みが岸壁の変形に与えた影響についても触れ、隣接する 1 号岸壁の状況(無被災)を考慮した検討を進める予定である。

謝辞：本検討は FLIP の改良と高度利用法の研究を推進する目的で設立された一般社団法人 FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである。関係者の方々、特に貴重なデータを提供頂いた国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所に謝意を表します。

参考文献：1) Iai, S. et al. : Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Report of the Port and Harbour Research Institute. Vol.29, No.4, pp57-83, 1990. 2) Iai, S. et al. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, Int J Numer Anal Meth Geomech, 2010. 3) 井合ら：地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.809-812, 2001. 4) 2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動の事後推定

: http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn/research_jpn_2011/jr_404.html 5) 石原ら：地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下予測, 第 26 回土質工学研究発表会, 1991.

表-2 土質パラメータ(液状化特性: As1)

マルチスプリング						
ϕ_p	S_1	w_1	p_1	p_2	c_1	備考
28.00	0.005	6.50	0.50	0.90	2.20	Temp 7
カクテルグラスモデル						
ε_d cm	$r \varepsilon_d$	$r \varepsilon_d$	q_1	q_2	$H_{max} L$	I_k
0.20	0.70	0.65	5.00	0.92	0.24	2.00
r_k	r_k^*	S_1	c_1	q_4	r_{γ}	r_{mmp}
0.50	0.50	0.005	2.20	1.00	0.10	0.50

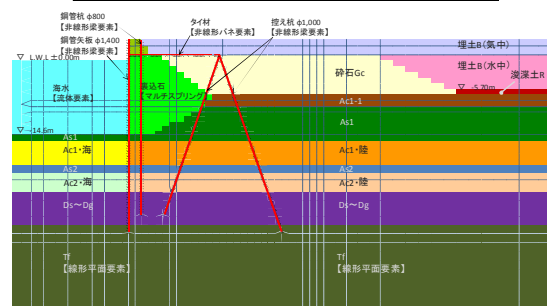


図 4 メッシュ図(粘性土あり)

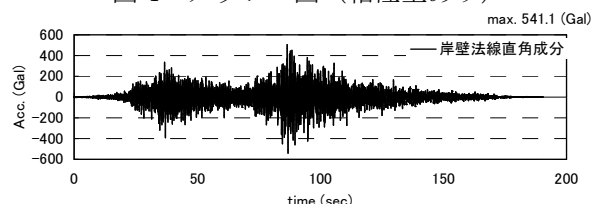


図 5 入力地震動

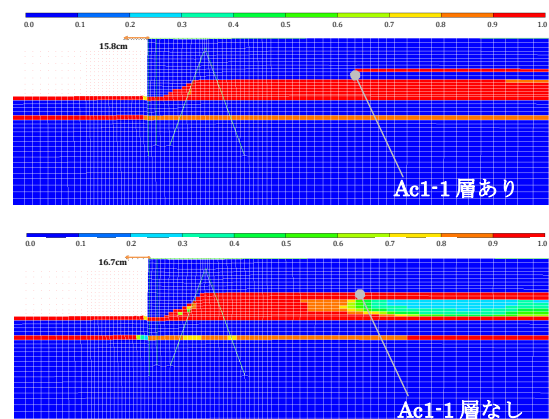


図 6 過剰間隙水圧比分布(マルチスプリング)

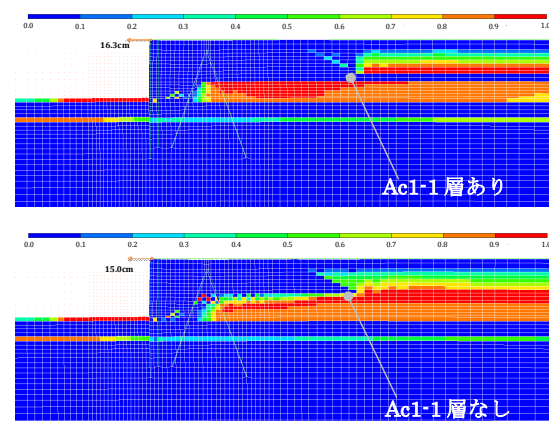


図 7 過剰間隙水圧比分布(カクテルグラス)