

重力式岸壁における背後地盤の液状化を伴う二次元有効応力解析

Two-dimensional effective stress analysis of gravity type quay wall regarding liquefaction of backfill ground during an earthquake

渡邊潤平¹,吉田望²,三浦均也¹ Jumpei WATANABE¹, Nozomu YOSHIDA², and Kinya MIURA¹

¹豊橋技術科学大学建設工学系, Dept. of Architecture and Civil Eng., Toyohashi University of Technology ²東北学院大学環境建設工学科, Department of Civil and Environmental Engineering, Tohoku Gakuin University

SUMMARY: A large scale test gravity type of quay wall with insufficient seismic resistance was constructed in the Port of Kushiro, Hokkaido. When the test quay wall was strongly shaken by the 2003 Tokachi-oki earthquake, the backfill ground was partly liquefied with sand boiling. In this paper, the dynamic behavior of gravity type quay wall is analyzed by means of two-dimensional effective stress nonlinear finite element method with liquefied backfill ground. The dynamic behaviors were calculated both for the liquefaction area and non-liquefaction area. And the calculated values in this site are verified with the observed behavior in the project. Also, the effect of the liquefaction in the backfill ground on the deformation of gravity type quay walls is discussed.

1 はじめに

北海道釧路港西港区で実施された実大規模の重力式岸 壁の地震時挙動観測プロジェクトでは、2003年十勝沖 地震で震度 V+の地震動を受けた[1,2].本研究では、重力 式岸壁の地震時土圧・滑動量を含めた被災メカニズムを明 らかにするため、この地震時挙動観測プロジェクトのサイ トにおける背後地盤の液状化を考慮した二次元有効応力 解析を行う.これにより算出されたケーソン滑動時の作用 外力、および背後地盤の液状化の影響を、観測結果を基に 分析する.解析では、汎用の二次元有効応力解析コード STADAS を使用した[3].

2 地震後の観測地点の様子

Fig. 1 は地震時観測プロジェクトの試験岸壁平面図である.この試験岸壁は,背後地盤の液状化による挙動の違い



を観測する目的で,背後地盤をシートパイルで2つの領域 に分け,東側だけをサンドコンパクションパイルにより液 状化対策を施してある.液状化対策領域における試験岸壁 の断面図をFig.2に示す.ケーソンは前面に波圧計,背面



Fig. 3 Acceleration of the backfill ground surface



Fig. 4 Analytical mesh

Table 1 Property of materials

材料	層圧	湿潤密度	せん断弾性 定数	体積弾性 定数	内部摩擦角	透水係数	間隙率
	m	Kg/m ³	k Pa	k Pa	degree	m/s	
埋立土Bf1	1.8	1940	27930	65170	40.9	4.90E-05	0.46
埋立土Bf2	9.4	2040	29370	68530	31.1	4.90E-05	0.46
改良士SCP	9.4	1730	56050	130783	36	4.00E-04	0.46
裏込石Bfg1	9.1	2000	101000	200492	35	1.00E-03	0.45
裏込石Bfg2	4.6	2140	101000	200492	35	1.00E-03	0.45
基礎捨石Bf	1.5	2000	180000	357313	35	1.00E-03	0.45
細砂As1-1	2.3	1840	225000	624056	40.6	9.00E-06	0.46
細砂As1-2	2	1840	225000	624056	40.6	1.00E-05	0.46
細砂As2	1.5	1840	225000	624056	44	1.00E-05	0.45

に土圧計,さらに,上端および下端に速度計と加速度計が 設置されているほか,背後地盤地表面にも加速度計,また, 間隙水圧計などが多数設置されている.ケーソン本体は意 図的に通常よりもスリムな形状をしており,100Gal 程度 の地震動で滑動する設計になっている.

地震後における観測地点の状況は,液状化対策を施して いない未対策領域で,背後地盤の液状化の発生を示す噴砂 跡および,泥水が確認された.一方で,液状化対策を施し た領域では,噴砂および,泥水は確認されず,背後地盤の 液状化は発生していないといえる.加えて,Fig.3は両方 の領域における背後地盤地表面の加速度記録であるが,液 状化未対策領域での加速度波形に液状化の発生を示す,サ イクリック・モビリティーが確認される.このことからも, 液状化未対策領域の背後地盤において,液状化が発生した ということわかる.

背後地盤の液状化によって,液状化未対策領域のケーソ ン天端は海側へ 20 c m程度滑動した.この結果に対し, 液状化対策を施した領域においても,隣接するケーソン同 士の一体化の影響(何らかの原因により独立に変位しなか った),また,ケーソンを設置している透過性の捨石マウ ンドの崩壊などの影響により,海側への滑動量は同様に 20 cm 程度という結果となった.

3 解析手法の特徴

本研究では,背後地盤の液状化を伴う二次元有効応力解 析手法として,汎用のコードである,STADASを使用して いる.以下に,その主な特徴を示す[3].

材料	А	В	С	D
埋立土Bf1	1	1.6	80	5
埋立土Bf2	1	1.6	40	5
改良土SCP	1	1.5	90	1
細砂As1-1	1	1.5	50	1
細砂As1-2	3	1.5	80	1

表中のA, B, C, Dは(1)式に対応

STADAS は有効応力に基づく地盤と構造物の解析に関する汎用コードで,その特徴は次のようなものである.

- ・有効応力に関しては Christian 流の u-p 形式による定式化
 をしている.
- ・盛立,掘削,静的加力などの静的解析から圧密,地震応答,動的加振まで幅広い解析機能を備えている.
- ・多くの液状化に関する構成則を備えているほか、ユーザ
 ーが定義構成則を用いることも可能である。
- ・水の出入りを考えたジョイント要素を備えている.

これらの解析機能のうち,本研究では,盛立解析と地震 応答解析を行った.

4 解析の概要

解析は,液状化対策領域と液状化未対策領域の2断面に ついて行った.Fig.4に観測サイトの解析メッシュ図を示 す.解析に用いた断面は,海底地盤を-14m まで考慮し, この水平境界に観測結果から得られた,この深度における N-S 方向の加速度(TA8)を入力した.入力加速度は,液状 化対策領域および液状化未対策領域で同様の加速度記録 を使用した.

ケーソンは,透過性の基礎捨石マウンド上に設置され, また,裏込め地盤には裏込め材として礫材を用いているの で,解析では地震時挙動に及ぼすそれらの影響を考慮でき るようにモデル化した.

背後地盤は浚渫土で埋立てしたが,液状化対策領域では サンドコンパクションパイル工法(SCP)による動的変形特 性と液状化強度の改善を考慮している.現地における貫入 試験, PS 検層などに基づいて推定して用いた各材料の基 本的な物性を Table 1 に示す.解析における要素の初期応 力は,解析コード内の静的解析である盛立解析を用いて,



Fig.5 Displacement of analytical mesh; (a)treated area, (b)untreated area

地盤を弾性条件と仮定して算定を行った.

本研究では,観測地点の弾性定数と液状化強度曲線に基 づき,要素試験のシミュレーションを行い,地震時挙動観 測サイトにおける液状化強度曲線とのフィッティングを 行い,体積ひずみの構成則パラメータを決定した.解析で 使用した構成則は,せん断変形には双曲線モデル,体積変 化は増分弾性,ダイレイタンシーは Bowl モデルであり, 地震応答解析については,非排水条件を仮定し,透水の影 響は考慮しなかった.

ここで,ダイレイタンシーによる体積ひずみは次式で表わされ,要素試験のシミュレーションによって決定された 地盤のパラメータを Table 2 に示す.

$$\mathcal{E}_{vd} = -Ae^{B} + \frac{\int de}{C + \int de/D} \tag{1}$$

5 解析結果の考察

Fig. 5 は,液状化対策領域・液状化未対策領域における 解析後のメッシュ(変位量 10 倍)を示している.解析後にお けるケーソン天端の変位は,液状化対策領域で海側へ 6cm 程度,液状化未対策領域では,海側へ 11cm 程度という結 果が得られた.さらに,Fig. 5 からケーソン全体の変位の 様子は,液状化未対策領域において,ケーソン天端が海側 へ,より大きく傾いていることがわかる.

観測結果では,前述の通り,両方の領域において,ケー ソン天端で20cm 程度の滑動量が確認され,計算結果より も大きな値を示している.これは解析メッシュにおける, ケーソン底面および背面に設置されたジョイント要素の パラメータの影響によるものであると考えられる.しかし,



Fig. 6 Shear stress τ vs. strain γ relationship

ケーソン天端が傾くという全体の変位の様子は観測結果 においても同様の傾向を示している.

背後地盤の変形の様子は、ケーソンから最も離れた埋立 土(Bf2)の部分で、液状化対策領域および、液状化未対策領 域において、ほぼ同様の変形が確認できる.しかし、液状 化対策領域において、液状化強度の改善を施した部分の変 形は、未対策領域と比べるとその変形の様子が小さい.

Fig. 6 には,液状化強度の改善を施した領域および液状 化未対策の領域における,深度-0.5m (tp1, up1) および, -4.5m (tp3, up3) での,せん断応力 - ひずみ関係を示してお り,図はそれぞれ,15 秒から25 秒,25 秒から38 秒の間 に区切って示してある.Fig. 6 によると,深度-0.5m では, 25 秒から38 秒の間において,液状化未対策領域で液状化 の発生を示唆するせん断強度の低下が見られた.また,深 度-4.5mでの,25 秒から38 秒の間における,液状化未対 策領域において,液状化の発生を示すサイクリック・モビ リティーが確認できる.一方で,液状化強度の改善を行っ た部分については,上記のような傾向が見られないことか ら,計算結果は,観測結果と同様に,液状化対策領域では 液状化の発生は抑制され,液状化未対策領域では,背後地 盤で液状化が発生したということができる.

Fig. 7 は,地震時にケーソンに作用した動的外力を示している.Fig. 7 は,上から動水圧 P_w,動土圧 P_{en},慣性力 F_i,底面せん断力 F_{bs}を示している.ここで,底面せん断 力は,ケーソンに作用した動的外力の合力に対する反力と して定義され,この力が正の値のとき,ケーソンを海側へ 滑動させようとする方向に力が作用しているものとする.

観測結果と計算結果を比較すると、ケーソン前面の動水 圧と、背面の動土圧の値が、計算結果で大きいことがわか る.これは、前述の計算結果におけるケーソンの滑動量が 観測結果よりも小さいことに関連していると考えられ、特 に、ケーソン背面の動土圧については、ケーソンがあまり 滑動せずに、土圧に抵抗したため、観測結果では土圧の値 が低下している約 32 秒以降でも、土圧は低下しなかった と考えられる.

また,底面せん断力については,振幅の大きさの違いは 見られるものの,その挙動に関しては,32秒付近および 36秒付近でのピークを表現している.

Fig. 8 には,ケーソンの滑動量と底面せん断力の関係を 示している.ここで,観測結果におけるケーソンの滑動量 は,観測された加速度記録を積分することにより算出した. Fig. 8 から,観測結果では,底面せん断力がピークに達し た 32s 付近と 36s 付近でケーソンが大きく滑動しているこ とが確認できる.この傾向は,計算結果においても同様で, 底面せん断力がピークに達した 32 秒付近と 36 秒付近にお いて,ケーソンが滑動を開始するという傾向が確認できた.

6 あとがき

本研究では,背後地盤の液状化の影響を考慮した二次元 有効応力解析を行い,液状化の有無で作用外力が異なり, ケーソン滑動量に違いが表れることがわかった.また,ケ ーソン滑動のタイミングに関しては,ある程度観測結果を 再現できた.今後は解析メッシュ数,裏込め石の動的挙動, ケーソン底面および背面に設置されたジョイント要素な どについて詳細に検討を行い,地震時土圧および滑動量の 算定における精度の向上を図る予定である.

参考文献

- Sasajima, T. et al.: A Project for the Field Observation of Seismic Behavior of Full-Sized Test Gravity Type Quay Wall, The 13th WCEE, No.1178, 2004.
- [2] Sasajima, T. et al.: Liquefaction Induced Deformation of Test Quay Wall in Kushiro Port during the 2003 Tokachi-oki Earthquake, Geo-Frontiers2005
- [3] Yoshida, N.: A computer program of ground and soil-structure interaction problem (2D Version) Manual (STADAS)





Fig. 7 Time history of external forces on caisson; (a) calculated, (b) observed





Fig. 8 Relation between displacement and base shear force; (a) calculated, (b) observed