

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
改良土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

Table 2 Parameter of materials

材料	A	B	C	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、

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・モビリティが確認される。このことから、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20cm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20cm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]。

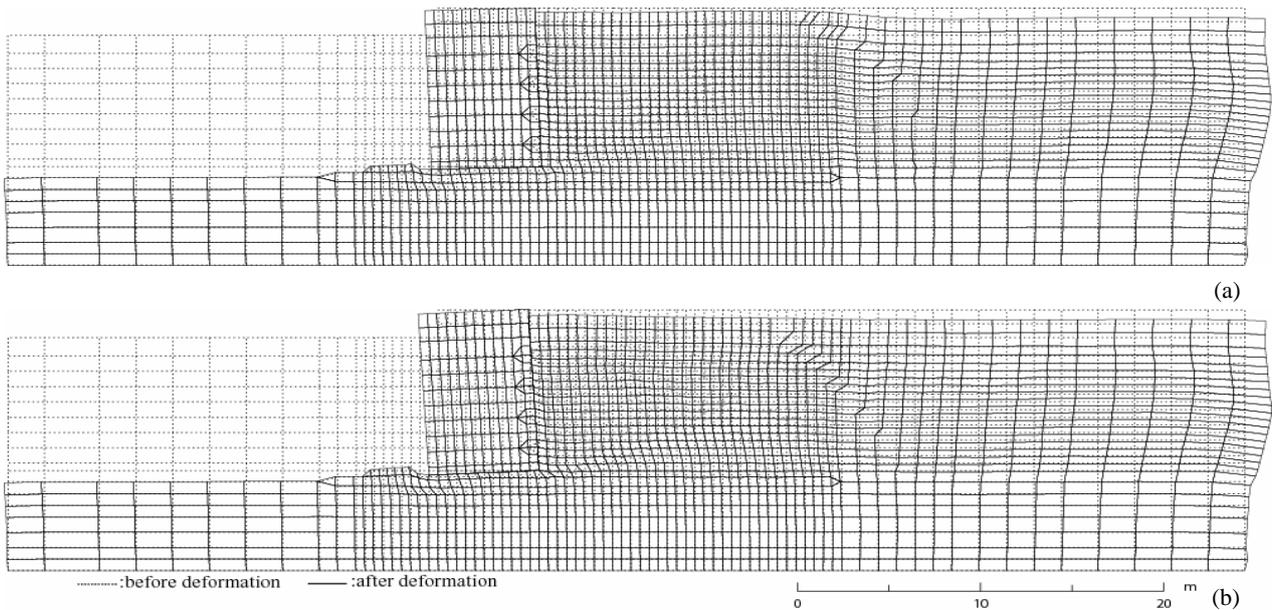


Fig.5 Displacement of analytical mesh; (a)treated area, (b)untreated area

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、ダイレイタンスーは 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、ダイレイタンス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。

$$\varepsilon_{vd} = -Ae^B + \frac{\int de}{C + \int de/D} \quad (1)$$

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、

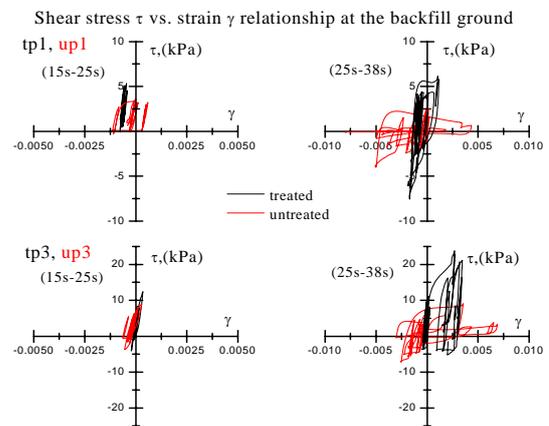


Fig. 6 Shear stress τ vs. strain γ relationship

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が

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出来る。

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_{em} 、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动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动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动せずに、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、ケーソンの滑动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动量は、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动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、ケーソンが滑动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、ケーソン滑动量に違いが表れることがわかった。また、ケーソン滑动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动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

- [1] 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)

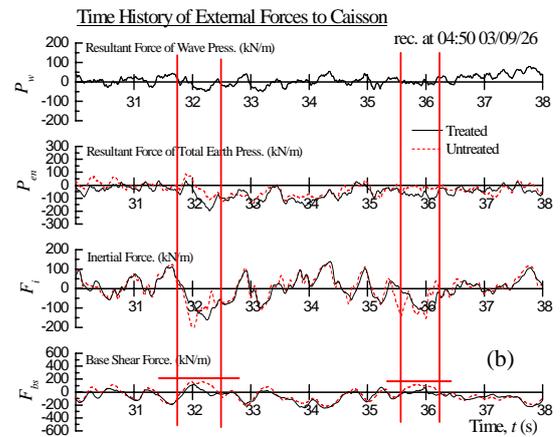
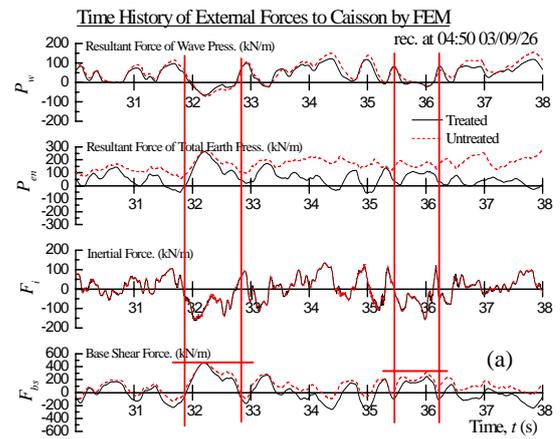


Fig. 7 Time history of external forces on caisson; (a) calculated, (b) observed

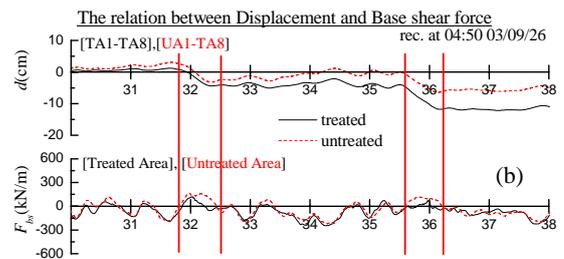
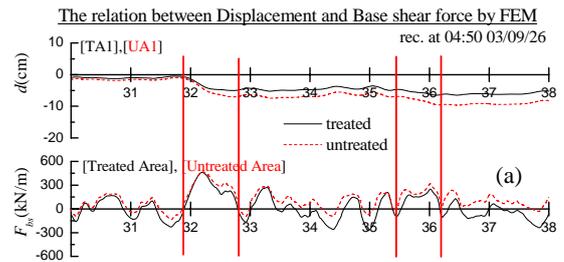


Fig. 8 Relation between displacement and base shear force; (a) calculated, (b) observed