

非排水有効応力地震応答解析における捨石材のモデル化に関する検討 (その1)

佐藤成¹・大竹省吾²・亀山和弘³・佐藤靖彦⁴・飯田典生⁵・大塚夏彦⁶・土屋善浩⁷
森浩章⁸・小堤治⁹・井合進¹⁰・安田進¹¹

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

²正会員 オリエンタルコンサルタンツ (株) (〒450-0009 名古屋市中村区名駅 3-32-2)

³正会員 五洋建設 (株) (〒栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

⁴正会員 西松建設 (株) (〒神奈川県大和市下鶴間 2570-4)

⁵正会員 日本港湾コンサルタント (株) (〒150-0022 東京都渋谷区恵比寿南 1-15-1)

⁶正会員 北日本港湾コンサルタント (株) (〒003-0029 札幌市白石区平和通 2-北 11-18)

⁷正会員 (株) エイトコンサルタント (〒700-0087 岡山市津島京町 3-1-21)

⁸正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター (〒102-0092 千代田区隼人町 3-16)

⁹正会員 株式会社日本科学技術研修所 (〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 5-10-9)

¹⁰正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

¹¹正会員 東京電機大学理工学部 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

非排水条件での有効応力地震応答解析 (FLIP) において、捨石材は $c=0$, $\phi'_d=40^\circ$ とし、水の体積弾性係数 $K_f=2.2 \times 10^6$ (kPa) とするモデル化が広く行われてきた。本検討では、ケーソン岸壁の捨石材に着目した想定モデルを対象に地震応答解析を行い、排水および非排水条件の初期の振動特性を比較した。その結果、水の体積弾性係数 K_f がゼロに近い値をとれば排水条件と同等になることを確認した。また、捨石材における水の体積弾性係数 K_f を小さくするだけではなく、室内試験で確認されている $c=20$ (kPa), $\phi'_d=35^\circ$ の設定を行わないと、ケーソン周辺で局部的に破壊領域に至り、ケーソンの残留変位が大きくなることが明らかとなった。

KeyWords : dynamic, effective stress model, finite element analysis, rubble material

1. はじめに

従来、2次元有効応力法地震応答解析プログラム FLIP を用いた岸壁等のモデル化において、捨石材は表-1のような諸元で設定されていることが多かった。これらの値は基準等¹⁾に示される一般値を参考に定めたものであるが、捨石材の高透水性を考慮すると地震時において間隙水が容易に抜けることが想像でき、非排水条件での解析を前提とする FLIP では、モデル化に何らかの工夫を凝らす必要がある。

表-1 基礎捨石材の一般的な解析定数

ρ_s (t/m ³)	G_{ms} (kPa)	σ'_{ms} (kPa)	c (kPa)	ϕ'_d (°)
2.0	180000	98	0	40

※水の体積弾性係数 $K_f=2.2 \times 10^6$ (kPa)

本報告は、基礎捨石材に関する室内試験や現位置試験の資料を収集整理するとともに、ケーソン岸壁の捨石材に着目した想定モデルを構築し、これを基にしたパラメータスタディーを行うことで捨石材の適切なパラメータの設定方法について提案するものである。

2. 基礎捨石材の強度特性について

偏心傾斜荷重を受ける支持力の模型振動実験及び

現地実験の結果によれば、三軸圧縮試験から求められた強度定数を用いてビショプ法による円弧滑り解析を行えば精度の高い解析が行えることが明らかになっている²⁾。また、捨石の大型三軸圧縮試験から、粒度の大きい粒状体の強度定数は均等係数の等しい相似粒度の材料から求められる値にほぼ等しいことが確認されている³⁾。よって、捨石の強度定数を正確に推定するには相似粒度の試料を用いた三軸圧縮試験を実施することが望ましいが、強度試験を行わない場合には、一般に用いられている標準的な強度定数として、粘着力 $c_d=20$ (kPa)、内部摩擦角 $\phi_d=35^\circ$ の値が用いられている。これらは碎石の大型三軸圧縮試験の結果から、やや安全側に求めた値である。なお、 $c_d=20$ (kPa) としているが、これは碎石の内部摩擦角の拘束圧による変化を考慮するための見掛けの粘着力である。

母岩の一軸圧縮強度と強度定数の関連を調べた結果によると、これらの標準値が適用できるのは母岩の一軸圧縮強度が 30 (Mpa) 以上の石材である。30 (Mpa) 以下の弱い石材をマウンドの一部として用いる場合、強度定数は $c_d=20$ (kPa)、内部摩擦角 $\phi_d=30^\circ$ となる⁴⁾。

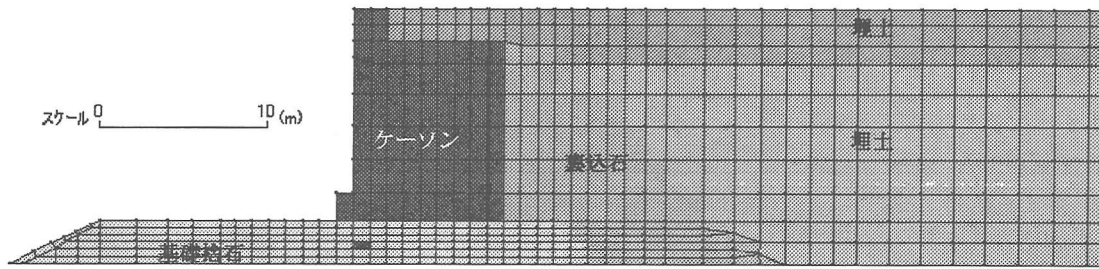


図-1 FEM メッシュ図

表-2 地盤の解析定数

地盤	$\rho_i(t/m^3)$	間隙率 n	h_{max}	c (kPa)	$\phi'_r(^{\circ})$	G_{ma} (kPa)	K_{ma} (kPa)	σ'_{ma} (kPa)	m_G	m_K
埋立土	1.8	0.45	0.3	0	36	79380	207000	63	0.5	0.5
基礎捨石	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5
裏込石	2.0	0.45	0.3	0	40	180000	469000	98	0.5	0.5

※ $G_0 = G_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_G}$ $K_0 = K_{ma} (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{m_K}$ と考えられる。

3. 捨石材に関するパラメータスタディー

本検討では図-1に示すケーソン岸壁の捨石材に着目した解析モデルを構築し、これを対象にパラメータスタディーを行った。表-2に解析パラメータを示す。基礎捨石および裏込石はマルチスプリングモデル⁵⁾によりモデル化した。ここで、粘着力 c を指定した場合でも、有効拘束圧が0のときに剛性が0となるようにし、負圧は負担しないものとした。なお、基盤は固定境界とし、入力地震動は神戸市開発局が設置したポートアイランドの鉛直アレー地震観測網による1995年兵庫県南部地震の際のGL-32mの地震計のNS成分およびUD成分の記録波形を用いた。

(1)排水条件と非排水条件での振動特性比較

まず、碎石の透水係数を与えた排水条件下での応答と間隙水の体積剛性 K_f を変化させた場合の非排水条件下での応答を比較検討した。表-3に検討条件を示す。ここでは0~5secに地震動を区切り、また、全要素初期剛性を用いた線形弾性とした。

表-3 検討ケースの設定

排水条件での検討	非排水条件での検討
・捨石、裏込石の透水係数を0.1(m/sec)に設定 ・捨石表面・裏込石地下水面で間隙水圧=0に設定 ・捨石底面・裏込石・埋土接触面間隙水流量=0に設定	・基礎捨石、裏込石の間隙水のレーレー減衰係数 $\beta = 0$, 他は $\beta = 0.002$ ・水の体積弾性係数 $K_f = 100\% \sim 1\%$ に変化

図-2はケーソン天端の時刻歴応答水平加速度および時刻歴応答角加速度を周波数領域にフーリエ変換して求めた伝達関数である。これによると、水の体積弾性係数を1/100程度に下げることにより、排水条件での伝達関数に近い特性となっていることが明らかである。よって、基礎捨石および裏込石の間隙水の体積剛性は0に近い数値を設定することが妥当

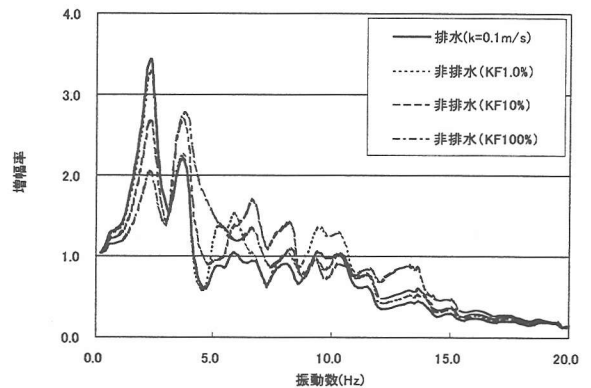


図-2 ケーソン天端水平加速度／基盤水平加速度

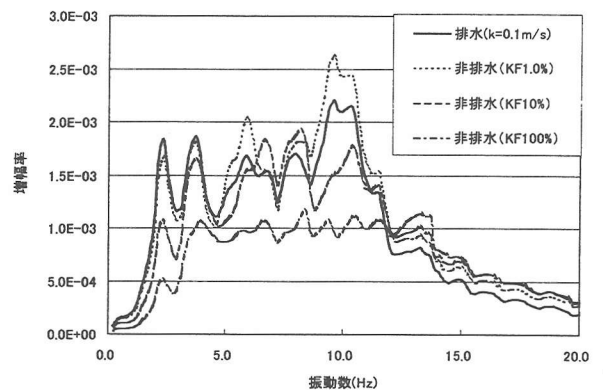


図-3 ケーソン天端角加速度／基盤水平加速度

(2)非排水条件におけるパラメトリックスタディー

ケーソン構造物の応答に与える影響について、基礎捨石のパラメータスタディーを行った。本検討での着目は、基礎捨石材のせん断強度特性の差異と間隙水の体積弾性係数 K_f の変化による影響である。なお、レーレー減衰を用いているため、 K_f の変化に伴って減衰の効果が異なる可能性がある。このため、減衰についても2ケース設定した。

表-4 着目する基礎捨石のパラメータ

せん断強度特性	間隙水要素の体積弾性係数	レーレー減衰
$c = 0$ (kPa) , $\phi_f = 40^\circ$ $c = 20$ (kPa) , $\phi_f = 35^\circ$ 上記2ケース設定	$K_f = 2.2 \times 10^6$ (kPa) を100%として, 100%, 10%, 1%, 0.1%, 0%の5ケース設定	- 全要素 $\beta = 0.002$ - 基礎捨石間隙水 $\beta = 0$, それ以外 $\beta = 0.002$ 上記2ケース設定

図-4～図-5に代表的な応答値の比較としてケーソンの残留変位量を示す。 $c = 0$ (kPa)としたケースでは K_f を小さくすると残留変位は大きくなる傾向が認められる。また、 $c = 20$ (kPa)のケースでは K_f の減少に伴い残留変位は小さくなっている。しかし、その変化量は $c = 0$ (kPa)のケースに比べ小さく、安定している。なお、図-4と図-5の結果はほぼ同じであり、減衰の相違による残留変位への影響は小さいことが明らかとなった。

(3)基礎捨石挙動の評価

図-6～図-7に残留変形モード図の例を示す。これによると、ケーソン直下および前・背面の基礎捨石が変形してケーソンの変位を大きくしており、 $c = 0$ (kPa)のまま K_f を小さくしたケースにおいて基礎

捨石要素の変形が大きくなっていることがわかる。また、図-8にケーソン海側直下の基礎捨石要素における時刻歴応答応力を示す。これによると、 K_f の値を通常の 2.2×10^6 (kPa)とすると σ'_m の値はほぼ一定の値となっているが、 σ'_m は大きく変動しており、結果として間隙水圧が変動していることがわかる。また、 $(\sigma'_y - \sigma'_x)/2$ の変動は τ_{xy} の変動に比べ小さくなっている。これに対し、 K_f を小さくすると σ'_m と σ'_m は等しくなり、さらに τ_{xy} と $(\sigma'_y - \sigma'_x)/2$ がほぼ同等の挙動を呈しており、 σ'_m の変動にほぼ同期していることがわかる。この性状から、 K_f を小さくすることによって τ_{xy} や $(\sigma'_y - \sigma'_x)/2$ が大きくなるのと同期して拘束圧が大きくなっているため、大きなせん断強度が発揮されていることがわかる。

以上から、非排水条件を前提としたプログラムでは、基礎捨石等の間隙水の体積弾性係数 K_f の設定が、力学的なメカニズムに大きく影響を及ぼすことになるため、 K_f の値を適切に設定する必要があることが明らかとなった。

次に要素の変形性状を把握する目的で1要素モデルによる検討を行った。ここではケーソン前面の基礎捨石要素に注目し、図-9に示すように排水条件で

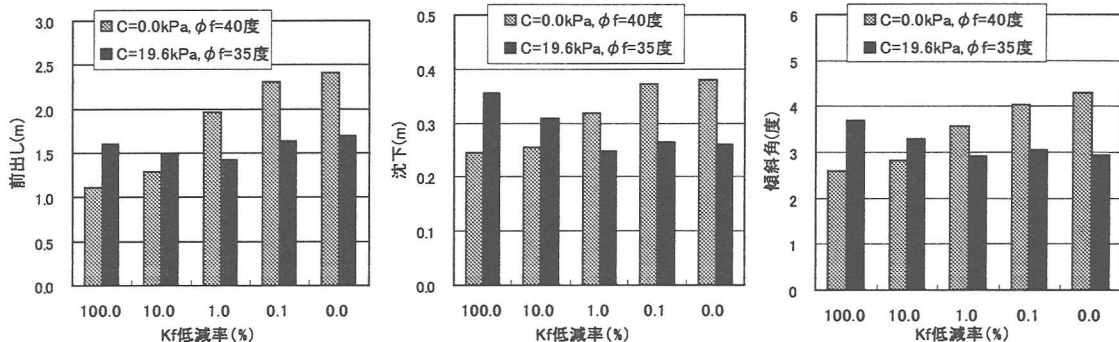


図-4 ケーソン天端残留変位: ($\beta = 0.002$)

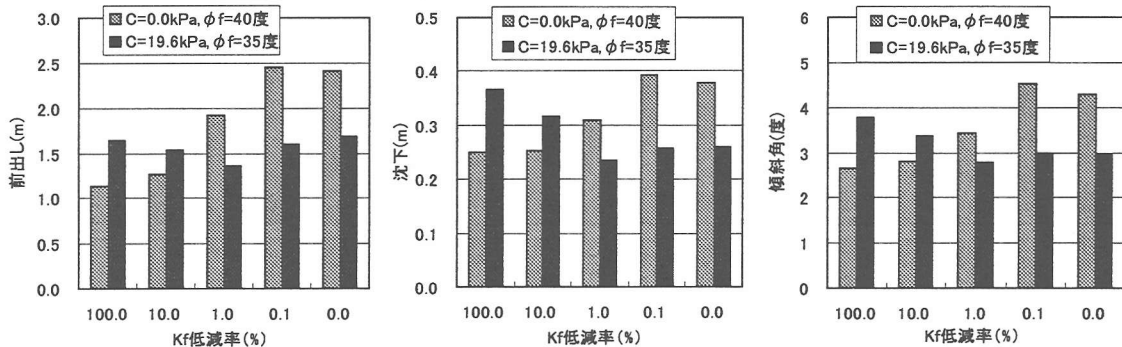


図-5 ケーソン天端残留変位: (捨石の間隙水 $\beta = 0$, 他 $\beta = 0.002$)

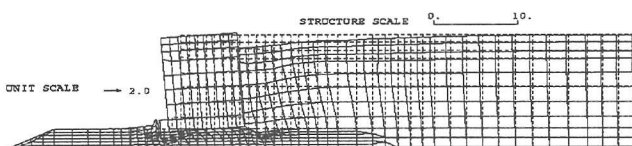


図-6 変形モード図($c = 0$ kPa, $\phi_f = 40^\circ$, $K_f = 1\%$)

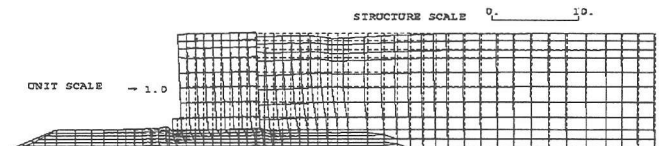
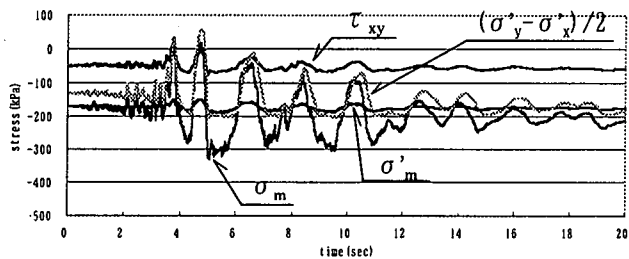
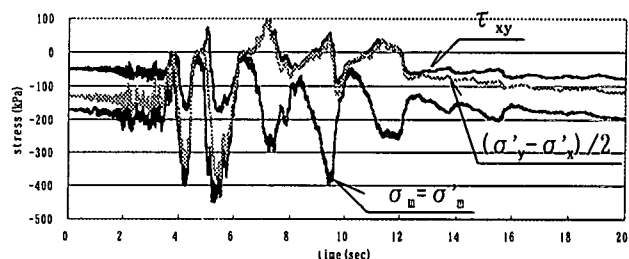


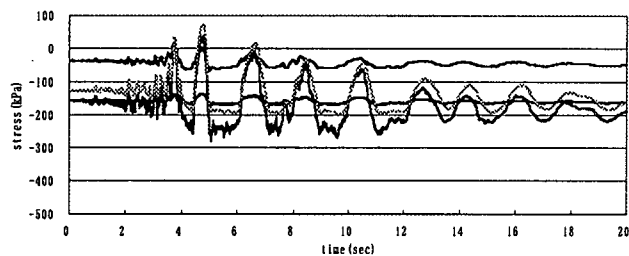
図-7 変形モード図($c = 20$ kPa, $\phi_f = 35^\circ$, $K_f = 1\%$)



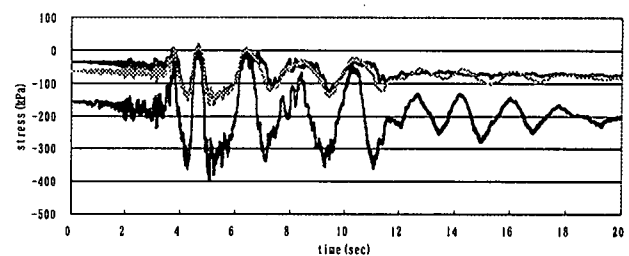
(a) $c=0\text{kPa}$, $\phi'_f=40^\circ$, $K_r=100\%$



(b) $c=0\text{kPa}$, $\phi'_f=40^\circ$, $K_r=1\%$



(c) $c=20\text{kPa}$, $\phi'_f=35^\circ$, $K_r=100\%$



(d) $c=20\text{kPa}$, $\phi'_f=35^\circ$, $K_r=1\%$

図-8 ケーソン海側直下基礎捨て石要素の時刻歴応答応力

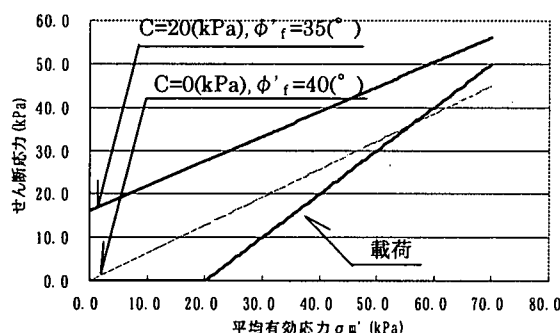


図-9 载荷曲線および破壊線

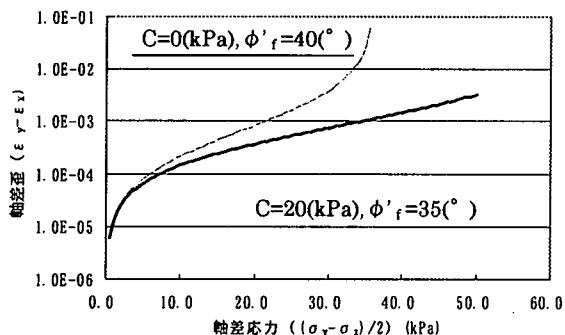


図-10 軸差応力～軸差ひずみ関係

等方圧密を行った後に側圧を増大させ、その挙動を確認した。図-9から明らかなように、拘束圧が小さいので $c=0\text{kPa}$, $\phi'_f=40^\circ$ の条件の方が $c=20\text{kPa}$, $\phi'_f=35^\circ$ に比べて破壊線が低くなっている。このため、図-10に示すように軸差応力が大きくなるにしたがい、 $c=0\text{kPa}$ の条件では破壊に達し、軸差ひずみが増大することがわかる。

よって、低拘束圧下では試験等で確認されている見かけの粘着力を適切に評価することが解析上重要であることが明らかとなった。

4. まとめ

本検討の結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 基礎捨て石の強度特性は $c=20\text{kPa}$, $\phi'_f=35^\circ$ が試験等から確認されている。
- 2) 非排水と排水条件で線形弾性応答解析を行った結果、水の体積弾性係数 K_r を小さくすることで排水条件の振動特性とほぼ同等となる。
- 3) 非排水条件を前提としたプログラムでは、基礎捨て石等の間隙水の体積弾性係数 K_r の設定が、力学的なメカニズムに大きく影響を及ぼすことになるため、 K_r の値を適切に設定する必要がある。
- 4) 低拘束圧下では見かけの粘着力を適切に評価することが解析上重要である。

謝辞: 本論文は、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 FLIP 研究会(事務局: (財) 沿岸開発技術研究センター他)の活動の一環として実施された研究成果を取りまとめたものである。ご協力いただいた方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 平成 11 年 4 月
- 2) 小林正樹、寺師昌明、高橋邦夫、中島謙二郎: 捨て石マウンドの支持力の新しい計算法; 港湾技術研究所報告 Vol.26 No.2, 1987 年 6 月
- 3) 庄司喜博: 大型三軸試験による捨て石材のせん断特性に関する考察; 港湾技術研究所報告 Vol.22 No.4, 1983 年
- 4) 水上純一、小林正樹: マウンド用石材の大型三軸試験による強度特性; 港湾技術研究所資料 Vol.699 1991 年
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992
- 6) 佐藤、林、亀山、佐藤、飯田、大塚、土田、森、小堤、井合、安田、非排水有効応力地震応答解析における捨て石材のモデル化に関する検討(その2), 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 2001 (投稿中)