

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

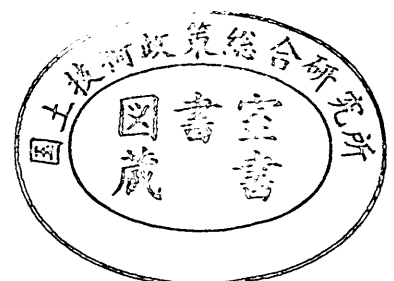
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 37

NO. 2

June 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第37巻 第2号 (Vol. 37, No. 2), 1998年6月 (June 1998)

目 次 (CONTENTS)

着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動北詰昌樹・山本浩司	3
Stability of group column type DMM groundMasaki KITAZUME, Hiroshi YAMAMOTO	
ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果菊池喜昭・新舎 博・江口信也	29
Effects of the back-filling to the stability of a caissonYoshiaki KIKUCHI, Hiroshi SHINSHA, Shin-ya EGUCHI	
大阪湾洪積粘土の三軸せん断特性と大型護岸構造物の安定性渡部要一・土田 孝・足立格一郎	59
Undrained Shear Strength of Osaka Pleistocene Clay And Stability of Large Scale Seawall StructureYoichi WATABE, Takashi TSUCHIDA, Kakuichiro ADACHI	
鋼管杭式棧橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察横田 弘・竹鼻直人・南 兼一郎・高橋邦夫・川端規之	75
Consideration of Design Seismic Coefficients of An Open Type Wharf Based on Dynamic Response AnalysesHiroshi YOKOTA, Naoto TAKEHANA, Ken'ichiro MINAMI, Kunio TAKAHASHI, Noriyuki KAWABATA	
信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第3報) ーレベル1, 2の設計法の適用性総括ー長尾 毅・大久保昇・川崎 進・林由木夫	131
Evaluation of Safety of Breakwaters by the Reliability Based Design Method (3rd Report: Concluding the Applicability of Reliability Based Design Method)Takashi NAGAO, Noboru OKUBO, Susumu KAWASAKI, Yukio HAYASHI	
棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計長尾 毅・横田 弘・竹地晃一郎・川崎 進・大久保昇	177
Fatigue Limit State Design Method for Superstructures of Open Type Wharves in view of Cargo Handling Machine LoadsTakashi NAGAO, Hiroshi YOKOTA, Koichiro TAKECHI, Susumu KAWASAKI, Noboru OKUBO	

水中レーザー視認装置による画像化実験

……秋園純一・佐藤栄治・田中敏成・高橋義明・朝妻春和・小林 健・斎藤利貴 ……221

Imaging Experiments of Underwater Laser Viewing System

……Jun'ichi AKIZONO, Eiji SATO, Toshinari TANAKA, Yoshiaki TAKAHASHI,
Harukazu ASATSUMA, Takeshi KOBAYASHI, Toshitaka SAITO

歩行式水中調査ロボットの開発

－（第4報）歩容及び軌道の実時間計画法－

……田中敏成・秋園純一・高橋英俊・佐藤栄治・鈴木健治・米田 完・
金山 裕・Robert B. McGhee・竹内俱佳 ……259

Development of Aquatic walking Robot for Underwater Inspection

－（The 4th report）A Method of Real-time Gait, Trajectory and Path Planning－

……Toshinari TANAKA, Jun'ich AKIZONO, Hidetoshi TAKAHASHI, Eiji SATO, Kenji SUZUKI,
Kan YONEDA, Yutaka KANAYAMA, Robert B. McGhee, Tomoyoshi TAKEUCHI

ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果

菊池喜昭*・新舎 博**・江口信也***

要 旨

防波堤などに用いられるケーソンの波力に対する安定性を高めるために、ケーソン背後に裏込めを用いることがある。しかし、裏込めによる安定性の増加はケーソンの回転量や水平変位量、および捨石マウンドの特性や裏込めの形状などによって変化するため、安定性の増加を一義的に定めることは困難であると考えられる。そこで、裏込めを有するケーソンを対象として、捨石マウンドの拘束条件、載荷方法、裏込め形状の各条件を変化させた大型の模型滑動実験を行い、捨石マウンドと裏込め内部の変位挙動からすべり面を推定し、実験での裏込めの滑動抵抗力と設計値との比較を行った。また、既存の安定計算方法では十分に現象を表現できないことを示し、実験結果を考慮できる円弧すべり面法に基づく新しい安定計算方法を提案し、その妥当性についても評価した。

それらの結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1)裏込めを有するケーソン式混成堤は裏込めの存在により安定性が高められる。この時の水平抵抗力の増加量やケーソンの変形挙動は裏込めの形状の影響を強く受ける。
- 2)裏込めを有するケーソン式混成堤では滑動、転倒、支持力の安全率が独立な関係には無く、これらを融合させた形での安定性の検討が必要である。
- 3)裏込めの受働抵抗を考えることにより水平抵抗力の増加量の概略を検討することができるが、裏込め形状の違いを十分に説明することができない。
- 4)新しく提案した円弧すべり面法を適用することにより、滑動と支持力の安定性を同時に検討することが可能である。

キーワード：ケーソン、裏込め、捨石マウンド、滑動、すべり面、港湾

* 土質部基礎工研究室長

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, 電話0468-44-5024 FAX : 0468-44-0618 E-Mail: kikuchi@phri.go.jp)

** 五洋建設(株)土木部門

*** 五洋建設(株)技術研究所

Effects of the back-filling to the stability of a caisson

Yoshiaki KIKUCHI*

Hiroshi SHINSHA**

Shin-ya EGUCHI***

Synopsis

It is well known that using the back-filling to a caisson improves the stability of it. But, the extent of the improvement of the stability is affected by the interaction among the back-filling and the caisson and the foundation. To reveal the effects of the interaction to the stability, the series of the model loading tests are carried out. In this series, horizontal static load is applied to the model caisson having the back-filling. The shape of the back-filling, the confining condition of the mound, and the loading point are changed in each test case. The applied load, the movement of the caisson, and the deformation of both the back-filling and the mound are measured. Discussions as to the test results on the existing design method, failure mode, and the sliding resistance are made. They show that the existing design method is not enough to explain the effect of back-filling. Finally new design method is presented in this report.

Key Word: caisson, back-filling, rubble mound, sliding, failure surface, port and harbor

* Chief of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division
(Nagase3-1-1, Yokosuka 239-0826, JAPAN, PHONE:+81-468-44-5024 FAX:+81-468-44-0618
E-mail: kikuchi@phri.go.jp)

** Civil Engineering Divisions Group, Penta-Ocean Construction Co. Ltd.

*** Penta Institute of Technology, Penta-Ocean Construction Co. Ltd

目 次

1. はじめに	33
2. 裏込めの滑動抵抗力に関する既往の研究	33
3. 大型模型実験	34
3.1 碎石の基本特性	34
3.2 実験装置の構成	38
3.3 載荷方法と計測方法	40
4. 実験結果	41
4.1 捨石マウンドの変形を拘束した実験(シリーズ1)	41
4.2 捨石マウンドの変形を許容した実験(シリーズ2)	43
5. 考察	49
5.1 ケーソンとマウンドの間の摩擦係数	50
5.2 裏込めを有するケーソン式防波堤の水平荷重に対する抵抗特性	50
5.3 支持力安定性の検討	52
5.4 円弧すべり面法による裏込め式ケーソン防波堤の安定計算方法	53
6. 結 論	54
7. おわりに	55
参考文献	55
付録A. 側壁面摩擦の補正	55
付録B. 終局破壊時の相対変位ベクトル	57

1. はじめに

港内の静穏度の向上などを目的として、既設防波堤の天端を嵩上げする場合、何等かの補強策を施して堤体の安定性を確保する必要がある。また、地震や異常波浪への対応、および従来の設計波高をより大きな値へと修正する場合にも、既設防波堤の補強が必要となる。さらに、近年における港湾の建設は、大水深地点に計画される場合が多く、このため港湾施設の設計波は、より高波浪となる傾向がある。沖合人工島の建設構想などにより、この傾向は今後一層強まるものと考えられる。

高波浪に対する防波堤の安定性を向上させる方法としては、

- (1) 中詰材の単位体積重量を大きくする。
- (2) ケーソンと基礎マウンドの摩擦抵抗を大きくする。
- (3) 堤体背後に裏込めを設置して補強する。

などが考えられる。上記(3)は裏込め式ケーソン防波堤と呼ばれ、この方法はケーソンとその背後の裏込めの滑動抵抗力によって波圧に対する安定性を確保するものであり、効果的な補強が期待できる(図-1)。

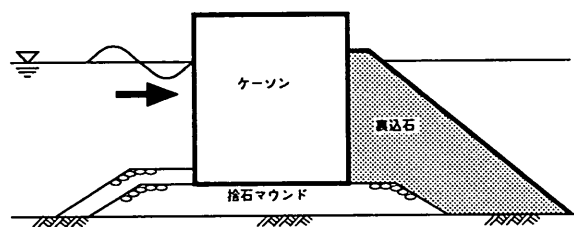


図-1 裏込めを有するケーソン式混成堤

一方、大型港湾工事では、工期短縮の必要性から護岸を先に施工して、防波堤を最後に建設するという事例がある。このような護岸先行施工型の埋立工事では、施工時の一時期は護岸にも防波堤機能が必要であり、ケーソン堤の断面がしばしば施工時の波浪条件によって決定されることがある。この場合には、護岸完成時に必要とされるケーソン堤の断面に比較すると不経済になるので、裏込め石を一部先行施工し、裏込め石による滑動抵抗力の増加を期待することによって、ケーソン幅を護岸完成時に必要とされる断面に一致させることを行うことがある。

既に行われている研究成果^{1),2)}によって、裏込めの存在による滑動抵抗力の増加は算定できるようになっているが、これまでの研究は裏込めに方塊を用いた小型モデルが主であったため、礫材などの粒状体を使用した場合の特性としては不明な点が多い。

また、これまでの研究では裏込めの剛体滑動にのみ焦

点当てられている。しかし、裏込めを有するケーソンの滑動抵抗力はケーソンと捨石マウンドや裏込めの間の相互作用によって決まると考えられ、また、よほど地盤の条件の良い場合を除き、ケーソンの安定問題では裏込めの変形と同時にマウンド自体の変形も生じるので、ケーソンは滑動とともに支持地盤の強度の不足からくる回転挙動もするものと考えられる。こうした条件では、捨石マウンドを含めた堤体全体の変形挙動を把握して、ケーソンの安定性の算定を行う必要があると考えられる。

したがって、この種のケーソン式混成堤の合理的な設計を行うためには、ケーソンと裏込めの変形挙動やマウンドの変形を考慮に入れる必要があると考えられる。

そこで、ケーソン滑動時のケーソンと裏込めの挙動を把握し、裏込め石でできた裏込めによる滑動抵抗力の増加を調べる目的で、実物の1/10スケールの大型模型を用いて静的載荷実験を行った³⁾。実験は捨石マウンドとケーソン、および裏込めを作成し、気乾状態で水平力をケーソンに作用させることによりケーソンを強制的に変位させるものである。この実験では、捨石マウンドの変形拘束条件、裏込め形状、載荷方法を変化させて、載荷荷重、ケーソンの変位挙動、裏込めの変形などを測定した。

本報告では、ケーソンへの水平載荷実験の結果に従い、滑動抵抗力について既往の研究成果に基づき提案されている設計値との比較を行っている。さらに、裏込めの破壊挙動を考慮した新しい設計方法を提案し、その妥当性を検討した結果についても報告する。

2. 裏込めの滑動抵抗力に関する既往の研究

防波堤の堤体背後に設置された裏込めが、堤体の滑動抵抗力に寄与する影響については、これまでにいくつかの研究がなされている^{1),2)}。以下にその内容を紹介する。

伊藤ら¹⁾は、防波堤の安定性に関して、波の不規則性から波力を受ける構造物の動的解析にいたるまでの総合的な研究を行っている。その中で堤体背後に設置された裏込めの抵抗についても言及しており、水理模型実験による検証を行っている。実験では厚さ20cmの捨石マウンド上に、高さ25cm、天端幅20cmの小型ケーソン模型(水深40cm)を設置し、その背後に2種類の高さ(ケーソン天端高さおよびその1/2)で裏込めを設けて規則波を作用させ、堤体の滑り出しに対する安定性を検討している。検討結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 裏込めによる滑動抵抗力は、裏込め石間の摩擦係数を0.8とし、ケーソン底面と同一水平面で裏込めがせん断されるものとして算出できる。

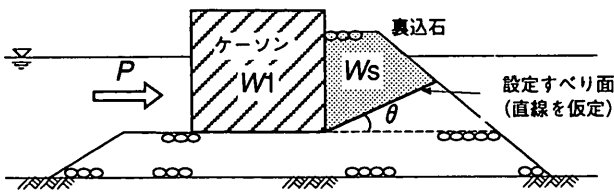


図-2 裏込め内の設定すべり面

(2) ケーソンの転倒を考える場合には、裏込めの抵抗は(1)で求めた滑動抵抗力が裏込め高さの1/3に水平に作用するものとして算出する。

以上の方法により、堤体の滑動と転倒の安定性に関して実験結果を良く説明できるとしている。ただし、裏込め高さがその幅に対して過度に低い場合は、一体となって抵抗する前に局部的な崩壊を生ずる危険性があること、また、堤体が滑動しながら僅かでも傾斜すると、外力は大きくなくても容易に転倒に達し得ること、さらに、土圧論の考え方にならぬ、裏込め内ではあらゆる方向のすべり面を仮定して滑動抵抗力を求め、安定性の評価には最小の滑動抵抗力を用いる必要があることを述べている。

赤塚らは、堤体の背後にコンクリート方塊を設置した場合と割石を設置した場合について、模型実験を行った。一連の実験では、高さ60cm、天端幅50cm、奥行き100cmの小型ケーソン模型(水深50cm)が用いられ、裏込めの設置形状を種々変えて、静的載荷実験と波圧による動的載荷による実験を行っている。ただし、割石の捨石面より上方の厚さは、5~15cmとしてあり、裏込め量としては比較的小さい。背面の裏込めによる滑動抵抗力については、当時から用いられていた図-2に示すようなすべり面を仮定する暫定的な設計法との対比を行っている。それは、(1)式を用いて滑動抵抗の増分を計算し、試行的に θ を変えて、 R の最小値を発揮される滑動抵抗力の増分とする方法である。

$$R = W_s \times \tan(\theta + \phi) \quad (1)$$

ここに、

R : 裏込めによる滑動抵抗力の増分

W_s : すべり面より上の裏込め石の水中重量

θ : すべり面の水平とのなす角度

ϕ : 割石の内部摩擦角

(1)式は滑動抵抗として裏込めの受働抵抗を考えていることになる。彼らは、すべり面が捨石マウンド面とほぼ等しいという実験結果から、滑動抵抗力を次式のようにして求めることができるとしている。

$$R = \mu_2 \times W_2 \quad (2)$$

ここに、

W_2 : 捨石マウンド上の裏込め石あるいは方塊の水中重量

μ_2 : 捨石と裏込め石あるいは方塊の摩擦係数

実験結果は以下のようにまとめられる。

- ・静的載荷試験の結果、裏込めが割石の場合には μ_2 は1.5程度であり、方塊の場合には、0.7程度である。波力実験の結果では、割石の場合の μ_2 は1.1程度、方塊の場合0.45程度となる。割石の場合のこれらの係数から求められる滑動抵抗力は、(1)式から求められるものより大きい。

- ・割石の場合のすべり面は基礎捨石面上あるいはそのやや上方に水平に発生し、(1)式で求められるすべり面の位置とは一致しない。

3. 大型模型実験

実現象のシミュレートを縮尺モデル実験で行う場合、実験の種類に関わらず、縮尺の影響(相似則)を考慮する必要がある。しかし、今回の問題のように碎石の変形挙動を問題とする場合には、モデルスケールの違いが粒状体の挙動に及ぼす影響を評価しにくいと、できるだけ実際に近いスケールで行うことが望ましい。そこで、実験上の制約を鑑み、実物の約1/10スケールで模型実験を実施することにした。

以下に実験に用いた碎石(裏込めと捨石マウンドに使用)の基本特性、実験装置の構成、および載荷方法と各種計測項目と計測方法を示す。

3.1 碎石の基本特性

港湾工事で用いられる基礎捨石は、捨石1個あたりの質量で規定されている。しかし、その規定は各地域ごとに様々である。これは各地域における石材産地や、現場での自然条件などが加味されて、経験的に規格が定められているためと考えられる。実際に使用する基礎捨石、および裏込め石の粒径は10~100cm程度であるが、本実験では捨石マウンドおよび裏込め材料とも、人工的に砕いて粒径10~40mm程度の均等大きさにした碎石(福島県いわき市産花崗岩)を用いた。

(1) 基本特性試験

模型実験に先立ち、母岩と碎石の基本特性試験を行った。母岩に関しては比重、吸水率、弾性波速度、強度特性について計測した。母岩の基本特性を表-1に示す。また、碎石に関しては比重、吸水率、粒子形状、強度特性、粒度組成、締固め特性などを測定した。表-2に試験項目、表-3に基本特性を示す。

図-3に碎石の粒度分布を示す。碎石の粒径は9.5mm~37.5mmの範囲にあり、均等係数 U_c は1.30であり、非

表-1 母岩の基本特性

いわき市好間町榎小屋地区産砕石：S-40 (3号)			
項目	試験/算定方法	結果	備考
供試体作成	(JIS M 0301)		粒径約30cmの母岩塊
弾性波速度	縦波速度： V_p 横波速度： V_s	5342 m/sec 2489 m/sec	
一軸圧縮試験	一軸圧縮強さ： q_U (JIS M 0302)	818 kgf/cm ²	供試体寸法 $D=5\text{cm}$, $H=10\text{cm}$
圧裂引張試験	圧裂引張強さ： σ_t (JIS M 0303)	149 kgf/cm ²	供試体寸法 $D=5\text{cm}$, $L=5\text{cm}$
ポアソン比： ν	$\nu = (2V_s^2 - V_p^2) / (2(V_s^2 + V_p^2))$	0.361	
表乾比重： G_a	$G_a = B/(B-C)$, $G_b = A/(B-C)$, $G_g = A/(A-C)$, $Q = (B-A)/A \times 100$, $G_a = G_b(1+Q/100)$, $G_g = G_b(1-G_b \times Q/100)$ ここに、 A：乾燥後の試料の質量 B：表面乾燥飽和状態の試料の質量 C：試料の水中重量	2.715	(JIS A 1110)
絶乾比重： G_b		2.699	
真比重： G_g		2.651	(JIS A 1202)
吸水率： Q		0.657 %	

表-2 砕石の試験項目

試験項目	試験方法または算定方法	備考
比重、吸水率	(JIS A 1110)	
砕石の粒子形状	(Zinggの分類法)： $P \sim Q$ 座標にプロット $P=c/b$, $Q=b/a$ ここに、 a：砕石の長辺長 b：砕石の中辺長 c：砕石の短辺長	
砕石の点載荷圧裂引張試験	点載荷圧裂引張強さ： S_t 粒子径 $D \sim S_t$ 座標にプロット	対象は粒子径19.1mm以上
粒度試験	(ふるい分け法)：粒径加積曲線、最大粒径 ・均等係数 $U_c = D_{60}/D_{10}$ ・曲率係数 $U_c' = D_{30}'/(D_{60} \times D_{10})$	側圧4kgf/cm ² の三軸圧縮試験後にも測定
締め固め試験 e_{max} , e_{min}	(上載式振動締め固め法)：JSFT531 ・モールド： $D=30\text{cm}$, $H=60\text{cm}$ ・締め固め層厚：12cm/1層 (30cmモールド)	締め固め時間6分時の間隙比を e_{min} とした。
粒子破碎率： B	(ふるい分け法) ：粒径加積曲線から、粒度分布の差より求める $B = \Sigma(-\Delta A)$ (%)	三軸の側圧4kgf/cm ² 試験前後の粒度試験結果から求める。

常に均等な粒径の砕石であると言える。また図-4は、三軸圧縮試験(後述)後の粒度分布を示したものである。試験後の均等係数 U_c' は 1.91 である。

砕石の締め固め試験は直径 ϕ 30cm のモールド内に、砕石をできるだけ緩い状態で層状(層厚12cm)にまきだし、上部加振式振動機を用いて締め固めた。図-5に砕石層の乾燥密度の経時変化を示す。ここでは粒子破碎が生じずかつ間隙比が最小の状態にできるだけ近い値として、便

宜的に締め固め時間6分時のときの値で e_{min} を規定した。 e_{min} は 0.734 であり、上述の人工的な緩詰め状態における e_{max} は 0.890 である。

この砕石を既往の実験試料と比較した結果を表-4に示す。今回の実験試料は比重および吸水率が他の試料よりも大きい値であった。母岩の一軸圧縮強度は他の試料の 50~60% であるが、圧裂引張強度は約2倍の値であった。また、三軸圧縮試験での相対密度が $Dr=90\%$ と高い

表-3 砕石の基本特性

粒 径 (通過質量百分率)	37.5~26.5mm (33.0)	26.5~19.0mm (64.1)	19.0~9.5mm (2.7)
粒子形状 (Zinggの分類)	棒状~塊状	板状~塊状	板状~塊状~棒状
表乾比重	2.716	2.716	2.680
飽乾比重	2.700	2.693	2.630
吸水率	0.595%	0.820%	1.796%
粒度特性	均等係数 $U_c = 1.30$ 曲率係数 $U_{c'} = 0.94$		
粒子破碎率	Marsalの粒子破碎率: $B = 13.3\%$		
締固め試験	$\rho_{dmax} = 1.543 \text{ g/cm}^3$ ($e_{min} = 0.734$) $\rho_{dmin} = 1.415 \text{ g/cm}^3$ ($e_{max} = 0.890$, 人工的な緩詰状態) $\rho_d = 1.529 \text{ g/cm}^3$ ($D_r = 90\%$, 三軸試験時) (三軸試験供試体: $\phi 30 \text{ cm} \times H 60 \text{ cm}$)		

($\text{kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$)

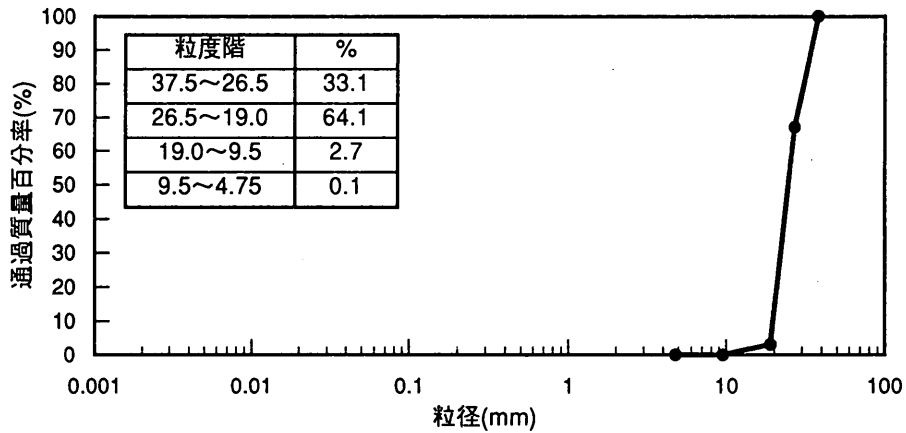


図-3 粒径加積曲線

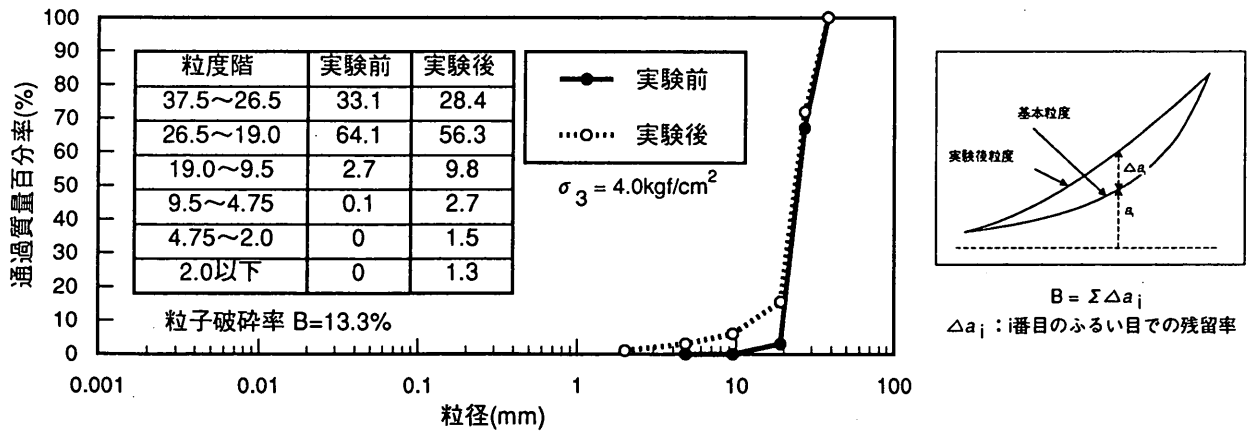


図-4 粒子破碎による粒度分布の変化

表-4 他の実験試料との比較

試験項目		試料		
		今回の試料	運輸省港湾技術研究所*	農林水産省水産工学研究所*
試料		福島県いわき市産花崗岩	福島県いわき市産花崗岩	茨城県笠間市産硬質砂岩
岩	比重	2.715	2.635	2.681
	吸水率	0.657%	0.400%	0.147%
	一軸圧縮強度	818 kgf/cm ²	1600 kgf/cm ²	1300 kgf/cm ²
	圧裂引張強度	149 kgf/cm ²	60 kgf/cm ²	-
碎石	最大粒径	40.0 mm	63.5 mm	37.5 mm
	均等係数 U_c	1.30	1.20	2.00
	三軸試験試料の 相対密度 D_r	89.9%	80~120%	-

* 実験場所

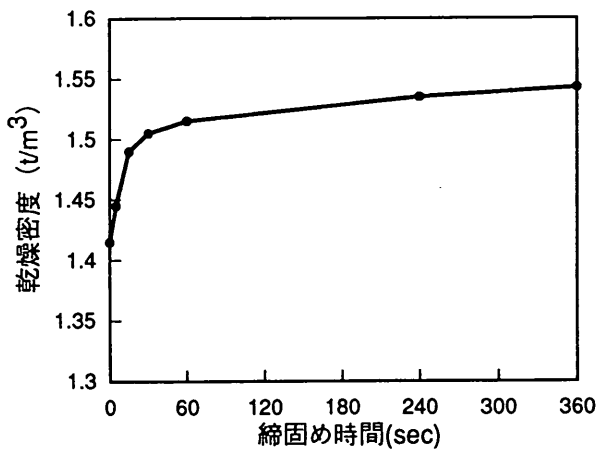


図-5 締め固め試験結果

値になっているが、他の試料でも80~120%という、計算上100%を越える相対密度もある。これは、締め固め試験で最小乾燥密度 ρ_{dmin} を求める際の試験方法に、明確な規定がないことによる誤差を多分に含んでいるためと考えられる。

(2) 大型三軸圧縮試験

碎石に関しては、内部摩擦角 ϕ_d を求めるために、拘束圧力を0.5, 1.0, 2.0, 4.0 kgf/cm² (49, 98, 196, 392 kN/m²) の4種類に変化させて大型三軸圧縮試験を行った。供試体寸法は直径 ϕ 30cm × 高さ H 60cm である。表-5 に試験条件、表-6 に試験結果、写真-1 に試験状況を示す。また、図-6 には排水せん断時の応力~ひずみ関係を、図-7 にはモールの応力円から内部摩擦角 ϕ_d を算定した結果をそれぞれ示す。図-6 より、拘束圧力が小さい ($\sigma_3 = 0.5, 1.0$ kgf/cm²) 場合は、正のダイレイタンスが表れており、拘束圧力が大きくなると ($\sigma_3 = 2.0, 4.0$ kgf/cm²)、体積減少が生じることがわかる。また、図-7

表-5 碎石の大型三軸試験

試験項目	試験方法または算定方法
供試体寸法	直径 ϕ 30cm × 高さ H 60cm
相対密度: D_r	目標乾燥密度 $\rho_d = 1.529$ g/cm ³ , $D_r = 93\%$
載荷方法 (単位: kgf/cm ²)	[NO.1]: 側圧0→0.5等方圧縮→側圧0.5排水せん断→破壊 ($\epsilon_1 = 20\%$) [NO.2]: 側圧0→1.0圧縮→1.0排水せん断→破壊 [NO.3]: 側圧0→2.0圧縮→2.0排水せん断→破壊 [NO.4]: 側圧0→4.0圧縮→4.0排水せん断→破壊
等方圧密試験	体積ひずみ増分量: $\Delta \epsilon_v = 0.02 \sim 0.05\% / \text{hr}$ で終了
軸ひずみ速度	0.5% / min
排水条件	排水

表-6 三軸圧縮試験結果

データNo.	No.1	No.2	No.3	No.4
圧縮過程の初期条件				
初期密度 ρ_0 g/cm ³	1.517	1.525	1.519	1.528
初期間隙比 e_0	0.763	0.754	0.761	0.751
側圧 σ_3 kgf/cm ²	0.5	1.0	2.0	4.0
せん断過程の初期条件				
圧縮後の密度 ρ g/cm ³	1.517	1.528	1.526	1.544
圧縮後の間隙比 e	0.762	0.751	0.753	0.733
せん断試験結果				
最大軸差応力 q_{max} kgf/cm ²	2.551	5.004	7.865	12.266
破壊時軸ひずみ ϵ_{af} %	12.36	12.37	14.95	14.98

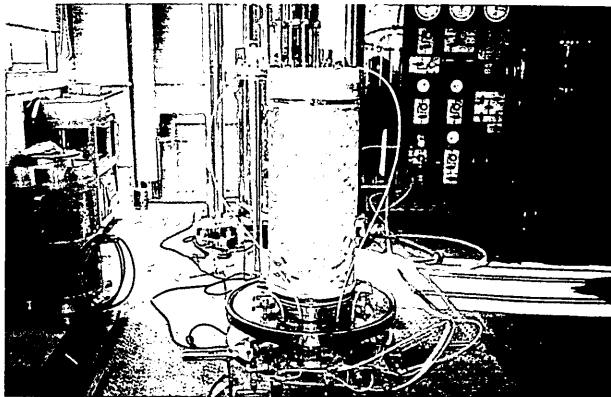


写真-1 大型三軸試験

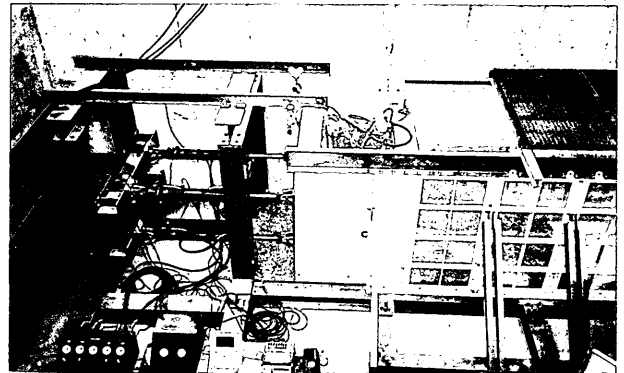


写真-2 実験状況

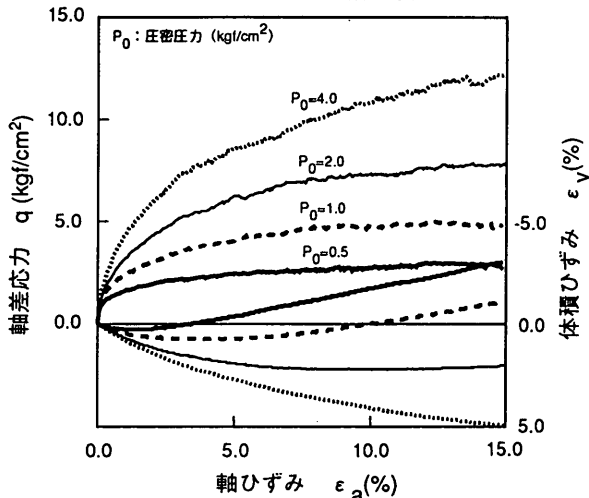


図-6 排水せん断時の応力ひずみ関係

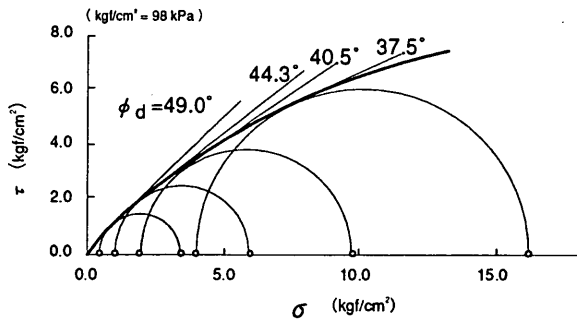


図-7 モールの応力円

より拘束圧力が大きくなると ϕ_d が減少することがわかる。このように、拘束圧力の増加にともなって ϕ_d の低下が生じるのは、主にダイレイタンスー特性の変化および粒子破碎の増大と密接な関係を持っていると考えられている。小林、寺師、高橋らによると、均等係数 U_c が小さくなると、圧縮・せん断による粒子破碎が急激に増加し、圧縮・せん断中に試料に加えられたエネルギーが粒子破碎に消費され、ダイレイタンスーが卓越しなくなることが報告されている。

試験結果より、内部摩擦角は低拘束応力時には $\phi_d = 49^\circ$

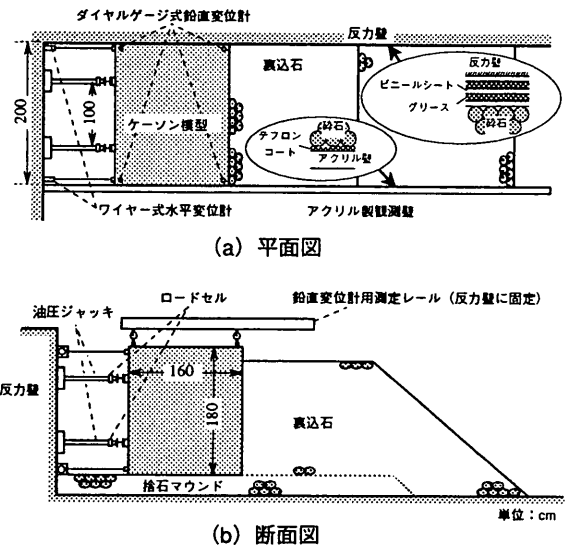


図-8 実験装置

であり、拘束応力が大きくなると、 ϕ_d は拘束応力に依存して低下することがわかる。

3.2 実験装置の構成

写真-2に大型模型実験の装置全景を示す。実験は、幅7m×長さ20m×深さ5mの半地下土槽内の一角を利用して実施した。図-8に、実験装置の断面図および平面図を示す。実験に用いたケーソン模型は鉄筋コンクリートで作製し、幅B1.6m×高さH1.8m×奥行きL2.0m、単位体積重量は2.1tf/m³(20.6kN/m³)である。

本実験では最初に観測壁を組立て、次に捨石マウンドを作成し、ケーソン模型を設置してから、裏込め碎石を積み上げ、最後に載荷用の油圧ジャッキと各種計測機器をセッティングした。

(1) 観測壁の設置

観測壁は厚さ25mmの亚克力板を鋼製枠にボルトで固定して作製した。水平載荷実験は平面ひずみ状態で行うため、鋼製枠をH型钢およびアングルで補強し、観測

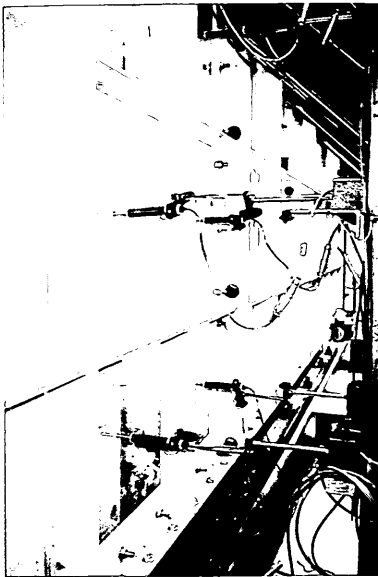


写真-3 アクリル壁変位計測状況

壁の水平方向へのはらみ出し変位をできる限り拘束した。写真-3に観測壁の変位計測状況を示す。水平載荷実験中の観測壁の最大たわみ量は、中央部で1.5mm程度であり、平面ひずみ条件をほぼ満足しているものと考えられる。また、裏込め石と両側壁面の間には、テフロンコーティング(観測壁側)またはビニールシートとグリースの互層(反力壁側)を施し、側壁面摩擦をできる限り低減した(付録A. 側壁面摩擦の補正参照)。

(2) 捨石マウンドの作成

捨石マウンドは落下高のない状態で碎石を静かに置き、粒子破碎が生じない程度に締め固めて作成した(写真-4)。各捨石マウンドの平均単位体積重量は表-7に示すとおりであり、実験ごとの平均単位体積重量のばらつきは $0.05\text{tf/m}^3(0.5\text{kN/m}^3)$ 以内である。

捨石マウンドの厚さは30cmと100cmの二種類とした。30cm厚のケースではマウンド後端をH形鋼で固定した。これは捨石マウンドの変形を拘束する構造とすることによって、ケーソンが水平移動した場合でもマウンドが変形しない条件を模擬するためである。100cm厚のケースはケーソンが変位する際にマウンドの変形を許すことで大規模マウンドの条件を模擬したものである。

(3) ケーソンの据え付け

捨石マウンドの据え付け面を水平にならした後、クレーンによりケーソン模型を据え付けた。ケーソン模型と両側壁面の間はそれぞれ1cmずつのクリアランスを設け、ケーソンと側壁面の間での摩擦が生じないように配慮した。

(4) 裏込めの積み上げ

裏込めは、捨石マウンドの作成と同様に落下高ゼロの

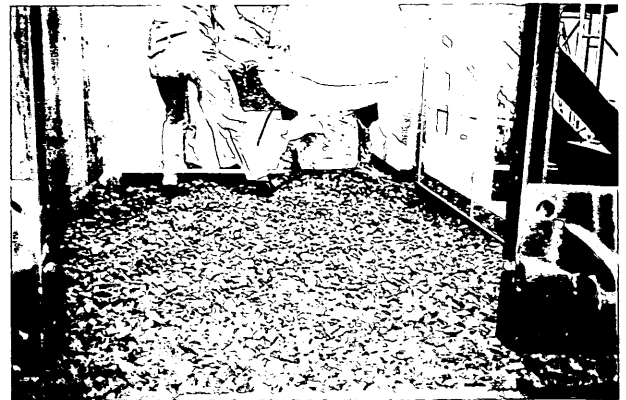


写真-4 捨石マウンドの作成

表-7 捨石マウンドと裏込めの平均単位体積重量

捨石マウンド30cm厚		捨石マウンド100cm厚	
case	γ (tf/m ³)	case	γ (tf/m ³)
301	1.505	1000	1.535
302	-	1002	1.527
303A	1.516	1003	1.548
303B	1.520	1004	1.539
304A	1.520	1005	1.541
304B	1.525	1006	1.558

* 実験実施せず

(tf/m = 9.8 kN/m)

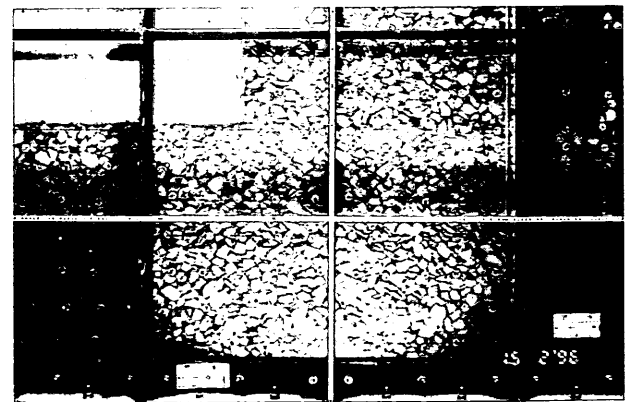


写真-5 ターゲット配置例

状態で積み上げて作成し、背面法勾配は碎石の安息角とほぼ等しい勾配の1:1.2を標準とした。実験ケースすべてにおける裏込めの平均単位体積重量は $\gamma_d = 1.53\text{tf/m}^3(15.1\text{kN/m}^3)$ 、平均相対密度は $D_r = 91\%$ である。この相対密度はやや大きいように感じられるかもしれないが、地盤作成方法としては密度を高くするような施工を行ったわけではない。また、裏込め及びマウンド内部の変位挙動を観測するため、裏込め内部に変位計測用ターゲット

ト(φ7mm, 長さ30cmのボルト)を, ボルト頭頂部が観測壁から見えるように10~20cm間隔で格子状に配置した。写真-5にターゲット配置の様子を示す。

(5) 載荷用油圧ジャッキの取り付け

ケーソンへの載荷装置として油圧ジャッキを用いた。この実験では, ジャッキを用いてケーソンに静的に水平力を作用させており, 作用のさせかたは次の2種類である。すなわち, ケーソンが水平に移動するように作用させる方法(水平変位載荷)と波圧合力が作用する位置に作用させる方法(偏心載荷)である。

水平変位載荷時には最大推力30tf(294kN), 最大ストローク1000mmのジャッキを, 鉛直方向2段, 奥行き方向2列, 計4本配置した。この時の上のジャッキの高さは110cm, 下のジャッキの高さは37.5cmとした。

偏心載荷時には最大推力100tf(980kN), 最大ストローク1000mmのジャッキ2本を, 波圧合力の作用高さに並列配置して載荷した。なお, この場合の波の条件は実スケールでの想定条件を捨石マウンドの天端水深-13.0m, 設計波高11.4m, 周期14.0secとしてある。載荷高さは92cmを標準とした。

3.3 載荷方法と計測方法

今回の実験では, 気中で静的に水平載荷してケーソンを強制的に変位させ, その際のケーソン挙動と裏込め内部の変位挙動などを計測した。ケーソンへの載荷は以下の2種類で行った。なお, 両載荷方法とも, ジャッキのストローク速度は1cm/minを標準とした。

(A) 水平変位載荷: 鉛直方向2段(各段に2本計4本)に油圧ジャッキを配置し, ケーソンの傾斜をモニターしながら個別に油圧を調整して, 強制的にケーソンを水

平変位する(回転させない)よう載荷する。

(B) 偏心載荷: 合田による波力算定式⁹⁾で求めた波圧合力の作用高さに水平配置した油圧ジャッキ(2本)により, ケーソンに集中荷重を載荷する。載荷はローラーを介して行い, ケーソンが傾斜しても載荷力が常に波圧合力位置に水平に作用するように留意した。

(A)の載荷は2.で述べた既往の研究結果を考慮し, 捨石マウンド面で裏込めが水平に変位する事例を検討するために行った。この場合は, 捨石マウンドの厚さを薄くし, その後端をH型鋼により固定することによって捨石マウンドの変形を拘束した実験とした。(B)の載荷は実際のケーソン防波堤の荷重条件を考慮して行うものである。特定のケースについては偏心載荷の偏心量の影響を見るために, 載荷高さを高く設定した実験も行った。

計測は, 載荷力, ケーソン模型の三次元的な移動, および裏込めと捨石マウンドの内部変位について行った。各計測機器の設置状況を図-8に示す。載荷力は油圧ジャッキ先端にロードセルを設置して測定した。ケーソン模型の移動については, ケーソン載荷面の水平変位(上下四隅)はワイヤー式変位計を用いて, ケーソン上面四隅の鉛直変位はケーソン上方に設置したダイヤルゲージ式変位計を用いて測定した。これらの測定結果から, ケーソンの平均水平変位量(ケーソン重心位置の水平方向移動量)と回転量を計算した。裏込めの内部変位に関しては, 碎石の間に配置されたターゲットの移動を側面から写真により定点撮影し, 画像解析を行って各ターゲットの座標変化をもとめ, その結果から裏込め内部の変位と変形を求めた。なお, 捨石マウンド厚100cmの各ケースではマウンドにも変形が生じるので, マウンド内

表-8 実験ケース一覧

シリーズ	実験ケース	マウンド厚さ(cm)	天端長b(cm)	裏込め高h(cm)	裏込めの法勾配	裏込め断面積(m ²)	載荷方法 (())内は合力の作用高さ)	滑動抵抗力最大時		備考
								抵抗力(tf/m)	平均水平変位量(cm)	
1	300	30	-	-	-	0	水平変位載荷	4.50	0.1	裏込めなし
	301	30	18	80	1:1.2	0.528	水平変位載荷	6.27	5.4	
	303A	30	18	160	1:1.2	1.824	水平変位載荷	9.10	5.1	
	303B	30	18	160	1:1.2	1.824	偏心載荷(92cm)	9.25	14.9	
	304A	30	180	160	1:1.2	4.416	水平変位載荷	10.23	4.6	
	304B	30	180	160	1:1.2	4.416	偏心載荷(92cm)	11.57	11.5	
2	1000	100	-	-	-	0	偏心載荷(92cm)	3.68	11.0	裏込めなし
	1001	100	114	80	1:1.2	1.296	偏心載荷(92cm)	5.88	10.8	
	1002	100	276	80	1:1.2	2.592	偏心載荷(92cm)	9.55	15.0	
	1003	100	18	160	1:1.2	1.824	偏心載荷(92cm)	6.33	10.0	
	1004	100	180	160	1:1.2	4.416	偏心載荷(92cm)	12.10	15.4	
	1005	100	18	160	1:1.823	2.622	偏心載荷(92cm)	9.20	13.8	
	1006	100	18	160	1:1.2	1.824	偏心載荷(112cm)	7.03	16.7	

部にもターゲットを配置した。

載荷力は連続的に測定した。ケーソン模型の挙動と裏込めの変位の計測は、載荷用ジャッキのストローク量が所定の値になったときに行うこととし、これらの計測中は油圧を保持したまま各ジャッキのストロークを停止させた。計測後、さらに載荷を続けて行った。

各実験ケースにおいて裏込めの法面崩壊(表層すべり)が生じたところで実験を終了した。載荷終了時のケーソンの平均水平変位量は40～60 cm程度であった。

4. 実験結果

実験ケースの一覧を表-8に示す。実験は大きく二つのシリーズに分けられる。シリーズ1は、マウンドの層厚を薄くしマウンド後端で変形を拘束したもので、マウンドの剛性が高く支持力が十分に大きい場合を想定している。シリーズ2はマウンドの層厚を厚くしマウンドの変形を拘束しないようにして実験を行っており、マウンドの支持力がさほど大きくない場合を想定している。各シリーズごとに、ケーソンへの載荷方法、裏込めの形状を変化させた実験を実施した。

4.1 捨石マウンドの変形を拘束した実験(シリーズ1)

このシリーズの模型断面の概要を図-9に示す。このシリーズでは水平変位載荷を中心に実施し、中断面(ケース303)と大断面(ケース304)については、水平変位載荷と偏心載荷の両方を実施した。なお、ケース300は、ケーソン底面とマウンドの摩擦抵抗を調べたもので、他のケースと異なり、載荷位置は据付け面から約5cmと、できるだけ低い位置で載荷した。

図-10に、ケーソンの平均水平変位量と載荷荷重の関係を示す。ここで、載荷荷重はケーソンの単位奥行き長さあたりの値である。図-10を見ると、裏込めが大きくなるほど最大載荷荷重が大きくなるのがわかる。摩擦係数を求めようとしたケース300の場合は、少ない変位量で載荷荷重が最大となり、その後荷重がほぼ一定に保たれている。一方、ケース300以外のケースでは、水平変位載荷の載荷荷重は裏込めの形状に関わらず平均水平変位量が約5～10cmで最大となり、その後はほぼ最大載荷荷重を維持して変位している。このように裏込めが全く無いケース300の平均水平変位量と載荷荷重の関係は裏込めのある場合と抵抗特性が異なっている。このことから裏込めの有無によってケーソンの抵抗特性が変化することがわかる。ところで、ケース303と304では、A、Bと2種類の載荷方法で実験を実施している。これらと比較すると平均水平変位量と載荷荷重の関係には載荷方法の違いによる違いがほとんどみられないが、偏心載荷

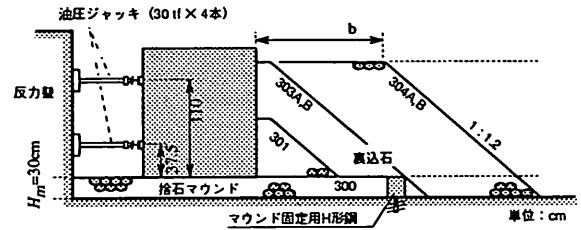


図-9 実験装置 (捨石マウンド厚30cm, 水平変位載荷)

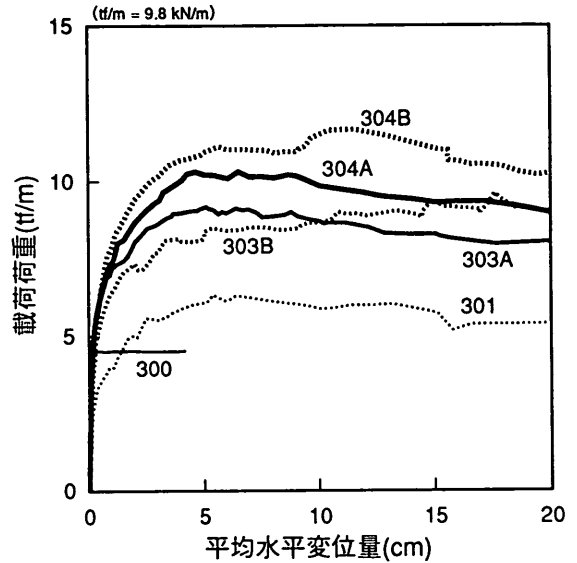


図-10 平均水平変位量と載荷荷重(シリーズ1)

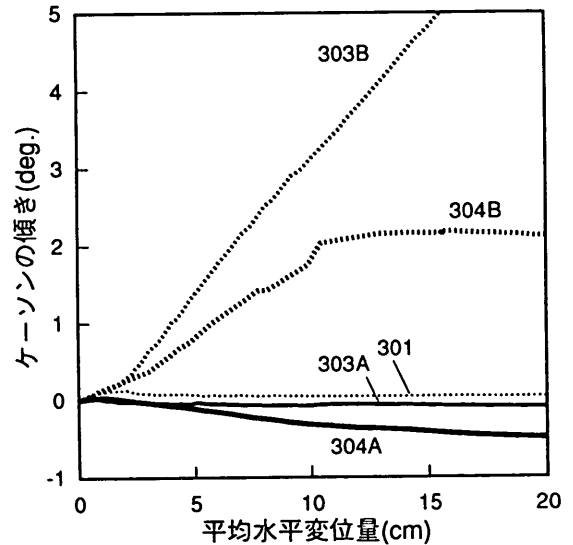


図-11 平均水平変位量とケーソンの傾斜角(シリーズ1)

のほうが載荷荷重の最大値がわずかに大きくなる傾向があることがわかる。

なお、ケース300の最大載荷荷重からケーソンと捨石マウンドの摩擦係数を求めると $\mu \approx 0.75$ となる。これまでに行われたいくつかの実験結果の例では、捨石または碎石とコンクリートの摩擦係数は $\mu = 0.60 \sim 0.80$ 程度に

なるようであるので、本実験はやや大きめではあるが、
 妥当な値である。

図-11には平均水平変位量とケーソンの傾斜角度の
 関係を示す。水平変位载荷(ケース301, 303A, 304A)の
 結果では平均水平変位量が増加してもケーソンの傾斜は
 ほとんど進行しておらず、ほぼ水平にケーソンを押し
 ていることがわかる。一方、偏心载荷(ケース303B, 304B)
 の結果では、平均水平変位量が2cmに達したあたりから
 回転挙動が顕著となり、その後はケーソンは回転をと
 もなって変位している。また、大変形が生じると裏込めの
 断面形状の違いによって回転挙動が異なるようになり、
 ケース303Bの回転挙動の方がケース304Bの回転挙動よ
 り大きい傾向にある。このように裏込め断面が大きい場
 合には、裏込めによって回転が押さえられる効果がある
 ようである。

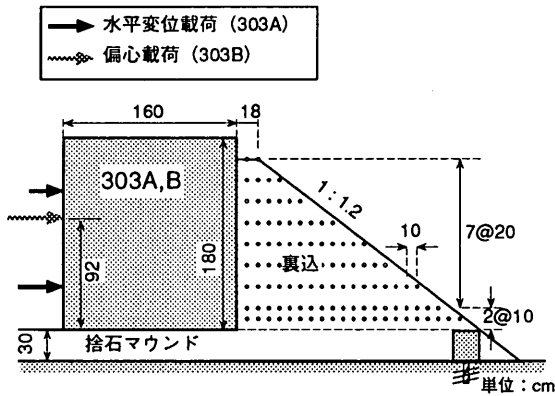


図-12 観測用ターゲット配置例

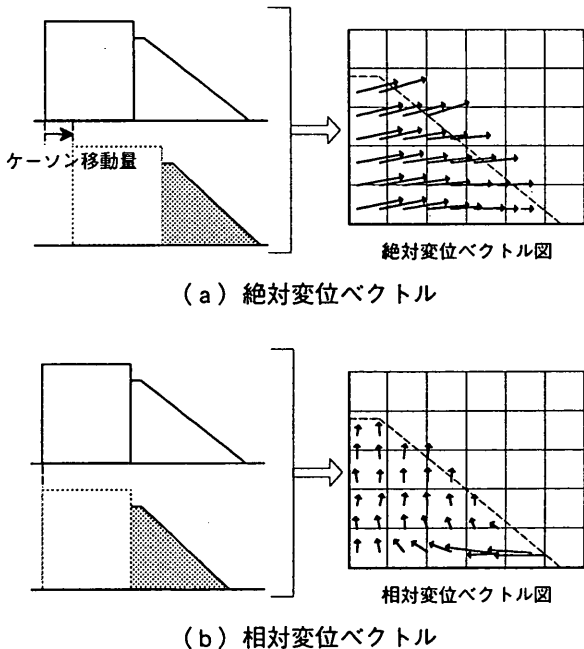


図-13 絶対変位ベクトルと相対変位ベクトル

図-12に裏込めの変形を求めるために、配置したター
 ゲットの配置位置を示す。裏込め内部の変位を可視化す
 る手法としては、ターゲットの変位をベクトル化する方
 法と、ターゲットの座標分布から、せん断ひずみの分布
 を示す方法が考えられるが、このシリーズではターゲッ
 トの設置量が少なかったため、おもにターゲットの移動
 量を中心に検討した。

図-13に、ターゲットの移動量をベクトルで表する
 二つの方法を示す。図-13(a)の図のように、ターゲッ
 トの移動量を絶対座標による変位ベクトル(以下、絶対変
 位ベクトルと呼ぶ)で表すと、鉛直方向の移動量に対し
 て水平方向の移動量が非常に大きい場合には、各測点間
 の相対的な変位の把握が困難となる。一方、図-13(b)に
 示すように、各ターゲットの絶対変位ベクトルからケー
 ソンの平均水平変位量(ケーソン重心の水平方向移動量)
 を差し引いてターゲットの変位を表す(以下、相対変位
 ベクトルと呼ぶ)と、ケーソンの平均水平変位量と等距
 離を移動するターゲットは、鉛直方向成分のみのベクト
 ルとなり、一方ケーソンの平均水平変位量ほど移動しな
 いターゲットは、ケーソンに近づくベクトルとして表さ
 れることになる(付録B. 終局破壊時の相対変位ベクトル
 参照)。もし、ケーソンが回転挙動をしない場合には、相
 対変位ベクトルを用いると裏込めのケーソンに対する相
 対的な動きがそのまま示せることになる。また、回転挙
 動を含む場合は、ケーソンの中央付近の高さでは、相対
 変位を示すことができるが、ケーソンの上部と下部では
 多少水平方向の相対変位を適切には表わせなくなるが、
 相対変位の概略をつかむことが可能である。

図-14に、水平载荷をしたケース303Aについて、滑
 動抵抗力が最大となった時(平均水平変位量5.1cm、
 図-14(a))と変位がかなり大きくなった時(平均水平変
 位量37.3cm、図-14(b))の相対変位ベクトル図を示す。
 変位方向の把握を容易にするために、図ではベクトルを4
 倍の大きさで表示している。载荷荷重が最大となった時
 には、ケーソン背面の裏込めは水平方向にほとんど相対
 変位せず、若干上方へ変位している。この傾向は変位が
 かなり大きくなった時にはより顕著となり、裏込め全体
 が大きく上方に変位していることがわかる。また、裏込
 めの法尻下端付近においては、相対変位がケーソン方向
 (図中左向き)に移動しているターゲットがあり、この変
 位方向の境界部をすべり面と仮定すると、当実験ケー
 スでのすべり面は、ケーソン下端から法尻のやや上部に向
 けて生じていると考えられる。

図-15に、偏心载荷をしたケース303Bの場合の、載
 荷荷重が最大となる前(平均水平変位量5.4cm、図-15(a))

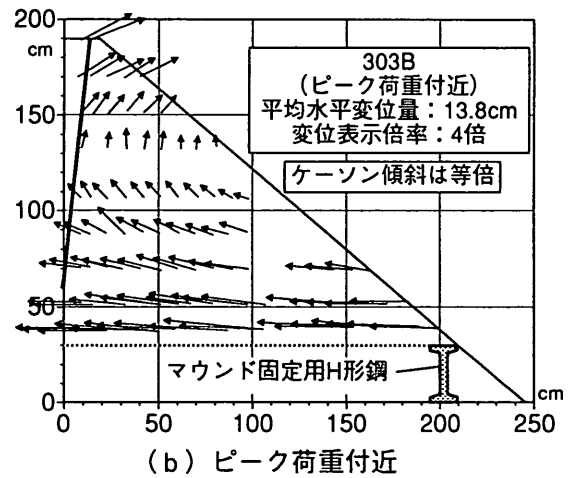
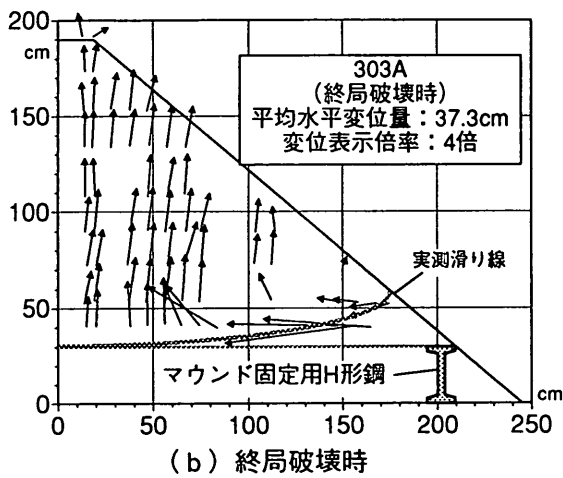
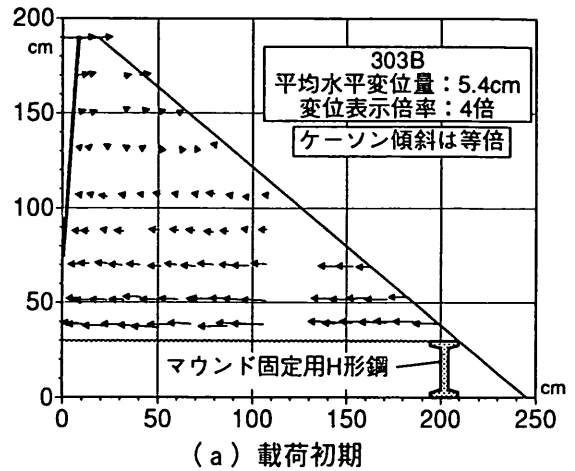
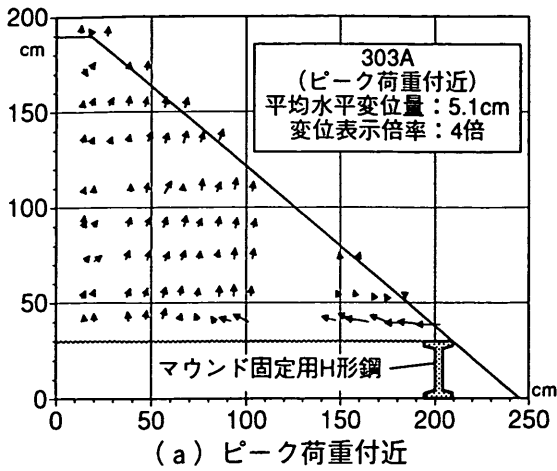


図-14 相対変位ベクトル図(303A)

図-15 相対変位ベクトル図(303B)

と荷重荷重が最大になった時(平均水平変位量 13.8cm, 図-15(b))の相対変位ベクトルを示す。水平変位荷重の場合とは異なり、荷重初期には裏込めの上方向の変位はほとんど認められない。しかし、荷重荷重が最大値に達すると、ケーソン背面の裏込めは上方へ変位するようになる。このとき上方への相対変位量は裏込めの高さ方向に異なり、下に行くほど小さくなっている。このような挙動はケース303Aの場合とは少し異なっている。ケース303Bの場合には、裏込め部分の中に明確なすべり面を求めることは困難であった。

図-10に示したとおり、荷重方法が異なっても荷重と変位の関係にはほとんど違いがなかったが、図-14と図-15から裏込めの変形挙動には大きな違いがあることがわかった。裏込めの変形挙動が異なる場合には荷重方法によってケーソンが裏込めから受ける反力の分布には違いがあると考えられるので、これらの実験でも荷重方法によって裏込めの反力分布は異なっていたものと考えてよい。

4.2 捨石マウンドの変形を許容した実験(シリーズ2)

4.1の実験ではマウンド厚を薄くして裏込めの影響によって滑動に対する抵抗の増加を検討しようとした。しかし、現実問題としては裏込めの存在による水平荷重に対する抵抗力の増加を単に滑動抵抗の増加として捉えるのは適切ではなく、むしろマウンドの変形までを考慮した堤体全体の安定性の増加として捉えるべきであると考えられる。そこで、マウンド層厚を大きくしてマウンドの変形を許す実験を実施した。

マウンドの変形を許容した実験では、偏心荷重条件下の実験を行い、裏込めの形状を変えることによる荷重荷重に対する抵抗特性の変化に注目する実験を行った。図-16に実験断面の概要を示す。実験ケース一覧は表-8に示してある。裏込めの形状は、シリーズ1のケース303, 304を基本とし、裏込め高さが低くて天端幅の長いケース(ケース1002)と、ケース1002とほぼ同じ裏込め断面積を持つが背面法勾配が異なるケース(ケース1005)も実施した。荷重方法は、裏込めなしのケースも含

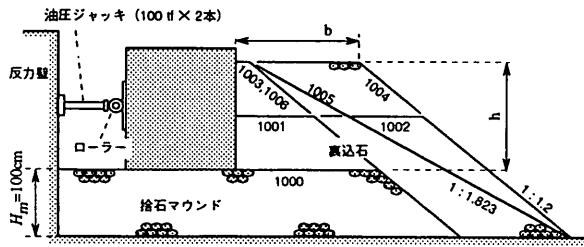


図-16 実験装置 (捨石マウンド厚 100cm, 偏心荷)

めて全て偏心荷であるが、載荷力の偏心量の影響を調べるために、載荷高さを他ケースの+20cm高とした偏心量が大きなケース(ケース1006。ケース1003と裏込め形状が同じ)も実施した。

図-17に、ケーソンの平均水平変位量と載荷荷重の関係を示す。ここに示した一連の実験の中で、裏込めをしたことにより最大載荷荷重が裏込めのない場合に比較して最大で4倍になっており、裏込めの効果が大きいことが分かる。最大載荷荷重はシリーズ1のときと同じように裏込め量が多いほど大きくなる傾向がある。ただし、ケース1002と1005を比較してわかるように同じ裏込め量であっても裏込めの形状によって載荷荷重になるまでの変形挙動には差があるようである。また、ケース1003とケース1006は裏込めの形状は同じであるが、偏心量が異なるケースである。これらの二つの実験では平均水平変位量と載荷荷重の関係の間にはあまり違いが見られない。

図-17に示した裏込めの無い、ケース1000の結果を見るとシリーズ1のケース300とは挙動が大分異なっている。なお、ケース300の場合にはマウンドの変形を拘束し、水平に変位するように載荷しており、ケース1000ではマウンドの変形を許す条件で偏心荷重を載荷している。ケース1000では多少データの欠落があるが、図-10と比べると最大載荷荷重に達するまでの変位量が比較的多いこと、最大載荷荷重がケース300に比べて小さいことなどの点で挙動が異なっている。また、ケース1000では、滑動時にはケーソンが傾斜して載荷側の底部は完全に捨石マウンドから浮き上がり、裏込め側の底部下端が捨石マウンドの表層5cm程度を次々と局部破壊しながら移動する様子が見られた。これはケース300でケーソンが捨石マウンド上を滑りながら移動する挙動とは全く異なるものである。ちなみに、載荷荷重の最大値を用いてケーソンと捨石マウンドのいわゆる摩擦係数を求めると $\mu = 0.61$ となり、摩擦実験で求めた摩擦係数 ($\mu = 0.75$) の約8割に相当する結果であった。

図-18に平均水平変位量とケーソンの傾斜角度の関係を示す。このシリーズの結果を概括すると、載荷初期は

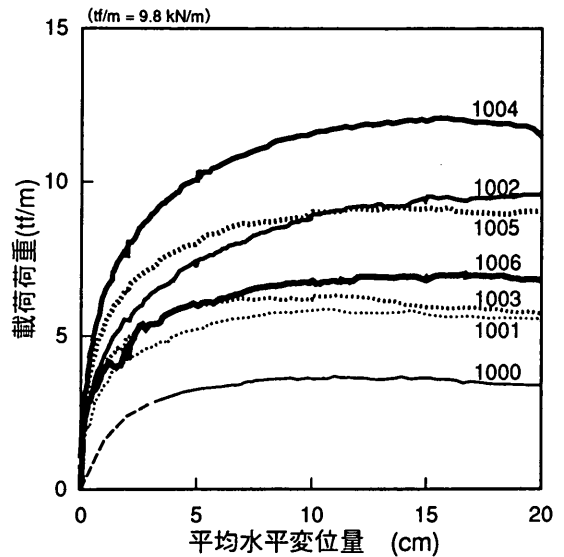


図-17 平均水平変位量と載荷荷重 (シリーズ2)

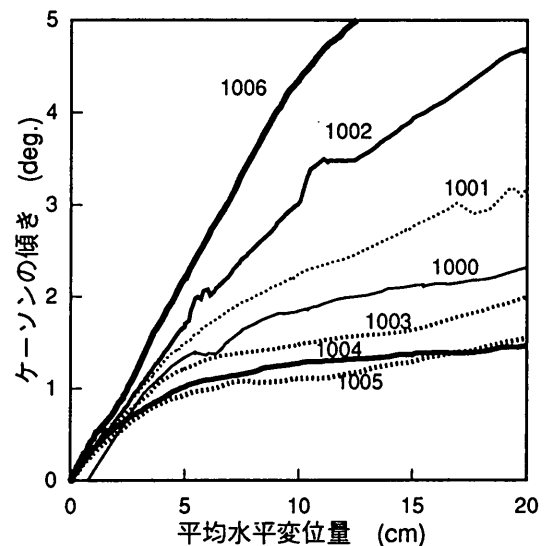


図-18 平均水平変位量とケーソンの傾斜角 (シリーズ2)

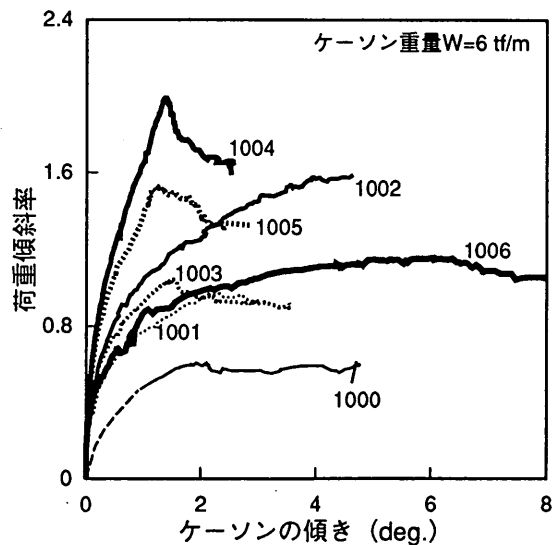


図-19 ケーソンの傾きと載荷荷重の荷重傾斜率

載荷荷重とともにケーソンの回転量が増加するが、載荷荷重が最大値に達するあたりからは、裏込めの形状によってケーソンの変位モードが異なってくる傾向がある。偏心載荷の作用位置の同じ実験について比べてみると、裏込め天端高さが高いケース(ケース1003, 1004, 1005)については、平均水平変位量とケーソンの傾きの関係にはあまり差が見られないが、天端高さが低い場合(ケース1000, 1001, 1002)には、裏込め量の多い方が同じ平均水平変位量に対してケーソンの傾きが大きくなる傾向にある。また、図-17では違いが無いようにみえたケース1003と1006については、水平変位量とケーソンの傾きの間には大きな違いがあり、水平荷重に対する変位挙動に違いがあることがわかる。

図-19に載荷荷重による荷重傾斜率(=水平載荷荷重 P /ケーソン自重 W)とケーソンの傾斜角度の関係を示す。図-19に示しているように、載荷荷重による荷重傾斜率が同じであってもケーソンの傾きは異なり、載荷荷重に

よる荷重傾斜率に対するケーソンの回転抵抗剛性は、裏込め量の多い方が大きいことがわかる。また、裏込め量のほぼ等しいケース1002と1005の結果を比較すると裏込め天端高さを高くした方が回転抵抗剛性が大きいことがわかる。またケース1003と1006を比べると回転抵抗剛性は載荷高さの低いケース1003の方が大きく、破壊が近づくに連れて載荷高さの高いケース1006では回転挙動が卓越していくことがわかる。また、裏込めの天端高さが高い場合には、載荷荷重が最大値に達した後に、荷重の低下が見られ、それ以降はケーソンの傾斜角度が増加しながら載荷荷重が減少している。

図-20は各実験ケースでのケーソンの変位挙動を、載荷初期(平均水平変位量5cm)、最大滑動抵抗力付近(平均水平変位量15cm)、大変形時(裏込めがほぼ破壊に達したとみなせる時。平均水平変位量40cm)について図示したものである。ケース1004と1005では水平変位量が卓越しており、回転挙動が小さいが、それ以外のケースでは

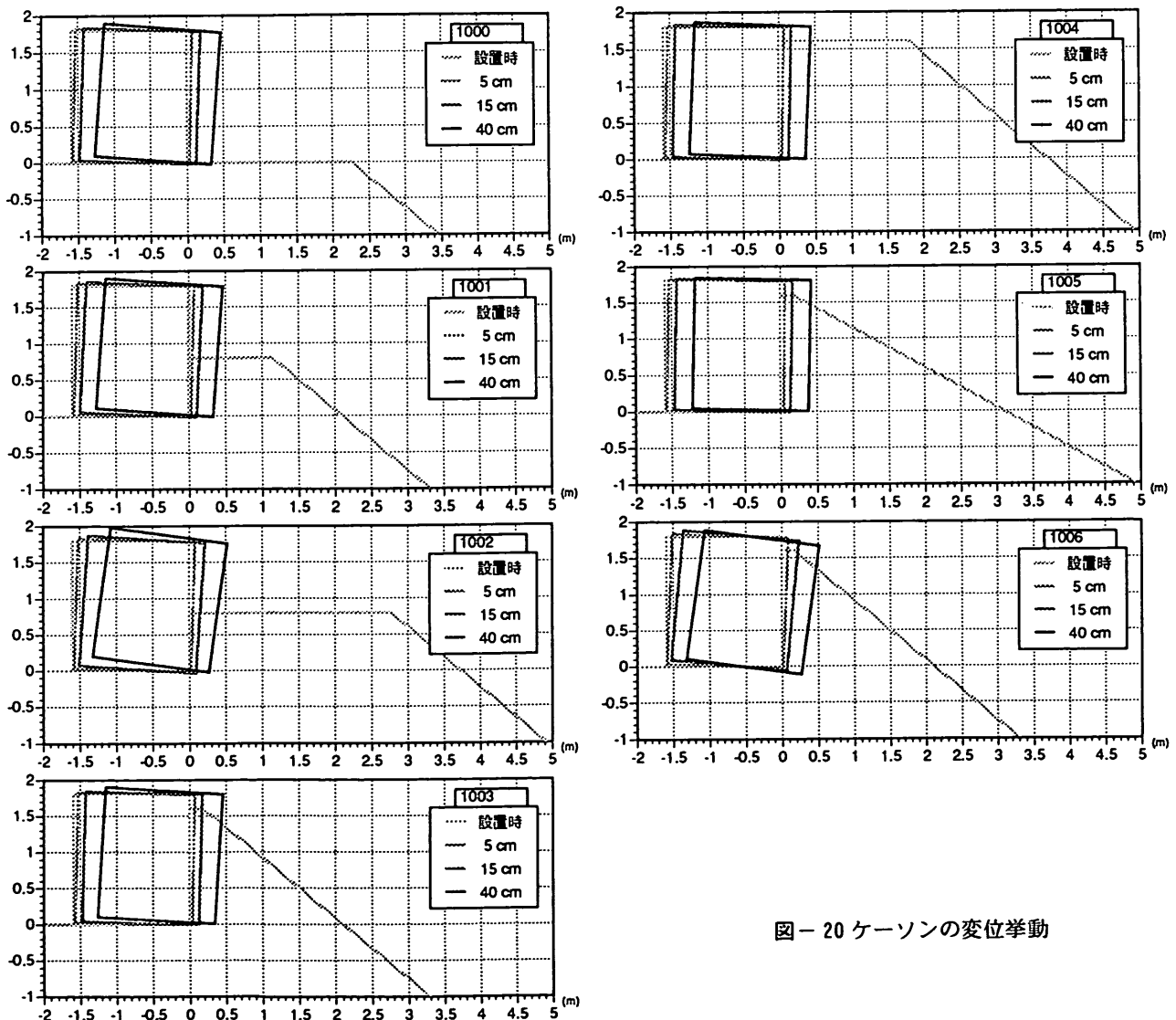


図-20 ケーソンの変位挙動

回転しながら水平に変位しているのがわかる。裏込め量がほぼ等しいケース1002と1005を比較すると、裏込めの天端高さが低いケース1002の方がケーソンの回転挙動が大きいことがわかる。ケース1001や1002では、ケーソン後趾のマウンドへのめり込みが顕著ではない状態で傾斜していくのに対し、載荷位置が20cm高いケース1006では、捨石マウンドにめり込みながら傾斜しているのがわかる。

図-21にシリーズ2でのターゲット配置例を示す。このシリーズでは、捨石マウンドと裏込めの内部に多くのターゲットを配置した。ここでは、隣接する3点のターゲットで構成される三角形要素を考えて、マウンドと裏込めを有限要素に分割し、各頂点の座標変位から要素内のせん断ひずみを計算した。このせん断ひずみ分布から、捨石マウンドおよび裏込め内部の卓越領域を求め、ここではその卓越領域を終局的なすべり面と仮定することとする。

図-22に、マウンドの変形を許容して偏心載荷を行ったケース1006の載荷荷重が最大になった時点(平均水平変位量10cm)での相対変位ベクトルを示す。図-22を見

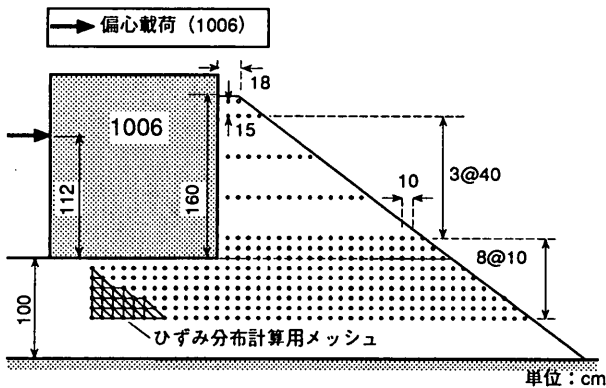


図-21 観測用ターゲット配置例

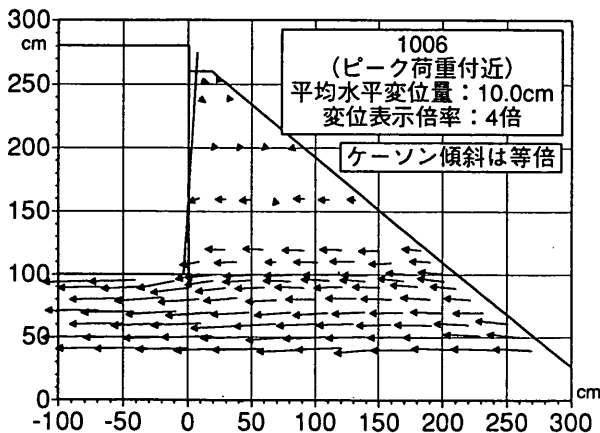


図-22 相対変位ベクトル図(ケース1006)

ると、マウンド部の相対変位量は大きいですが、裏込め部は下部を除いて目立った相対変位をしておらず、特に鉛直変位はほとんど見られない。これは、図-15(b)の場合とは大きく異なる傾向である。また、この時点では、ケーソン後趾周辺のマウンド部で下向きの変位が生じている。これは、ケーソンが捨石マウンドの中にめり込んだことを示しているが、こうしためり込みはマウンドに対して局部的に影響を及ぼすのみで、捨石マウンド全体へはほとんど影響していない。

捨石マウンドの変形を許容した全ての実験において、捨石マウンドと裏込めのせん断ひずみ分布を算出した。図-23に、各実験ケースの載荷初期(平均水平変位量5cm)、載荷荷重が最大となる付近(平均水平変位量10cm)、裏込めの終局破壊時(平均水平変位量40cm)におけるせん断ひずみ分布図を示す。

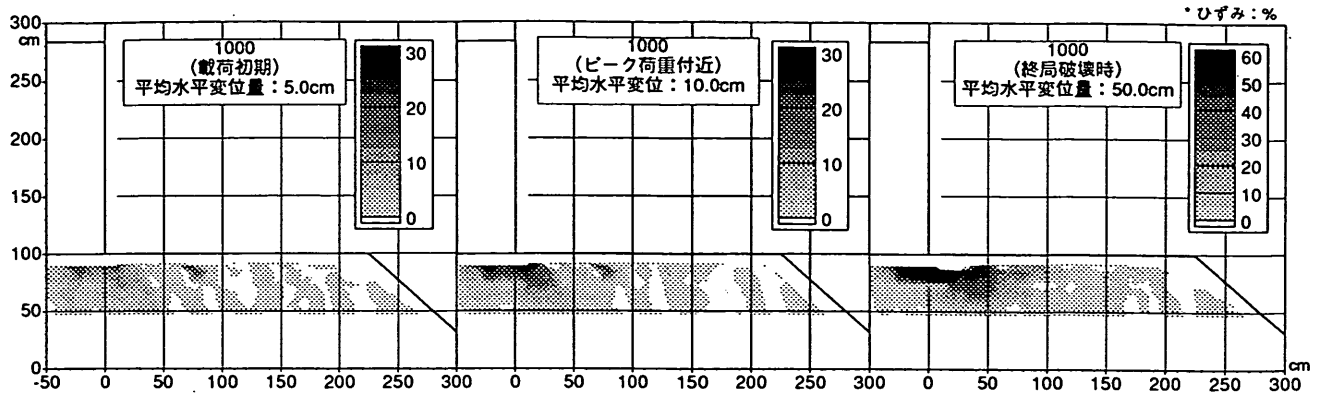
図-23(a)に示したケース1000の場合のひずみ分布図より、終局破壊時であっても裏込めがない場合にはケーソン後趾付近の捨石マウンドの表層部のみ局部破壊が生じることがわかる。

図-23(b)~(g)に示した裏込めのある全ての実験ケースでは、平均水平変位量が5cmの時にはマウンド内に生じるひずみの卓越領域は明確でないが、載荷荷重が最大になる変位の付近では、ひずみの卓越領域がケーソン後趾付近から捨石マウンドの法尻方向に向けて発達しはじめ、終局破壊時には明確な滑りを生じるようになる。ところで、裏込め部分では平均水平移動量が5cmの段階から全体的に0~10%程度のひずみが生じるが、荷重最大値時までにはひずみはあまり発達しない。終局破壊時に至っても全体的に10%程度の一様なひずみ分布になる程度であった。このように、裏込めは全体としては剛体的に挙動し、すべり面となる部分だけにひずみが集中することが分かる。

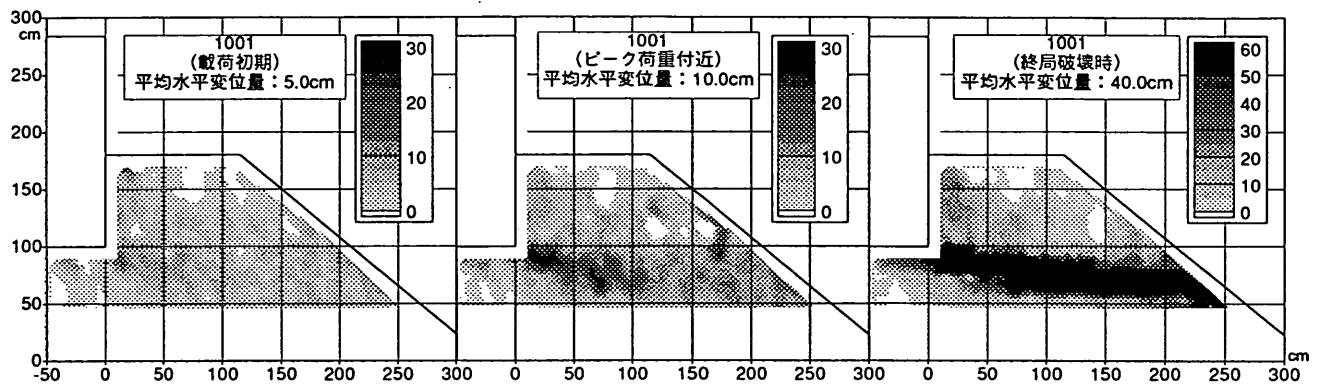
個別に見ると、裏込め高さが低く、ケーソンが大きく傾斜したケース1002では、ケーソン背面直後の裏込め上部でひずみの卓越する場所が認められる(図-23(e))。また、ケーソンの背面下端から法尻までの距離が短いケース1001, 1003, 1006では、滑動抵抗の最大時において破壊が法尻近傍まで達している(図-23(b), (c), (d))のに対して、この距離が長いケース1002, 1004, 1005では、滑動抵抗の最大時にはまだ破壊がマウンド全体に達していない傾向があるが、終局破壊時にはマウンド全体にひずみの卓越領域が生じ、裏込めがある場合の終局的なすべり面は各ケースとも法尻付近に達するものと判断できる(図-23(e), (f), (g))。

以上のように、ターゲットの移動からせん断ひずみ分

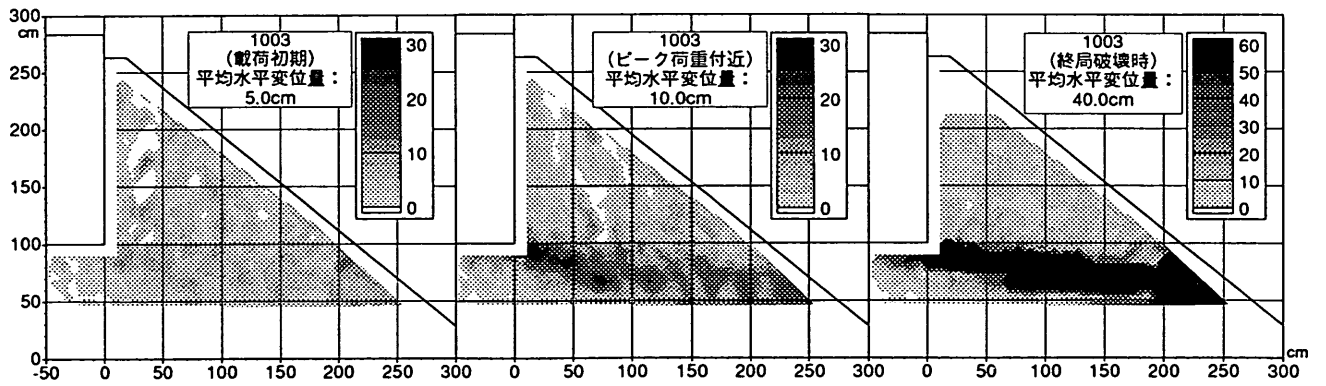
ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果



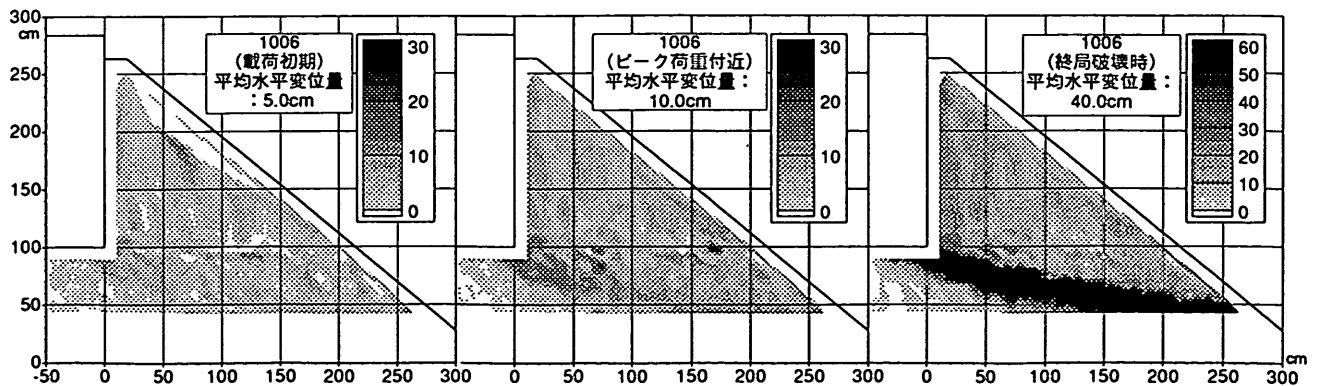
(a) ケース 1000



(b) ケース 1001

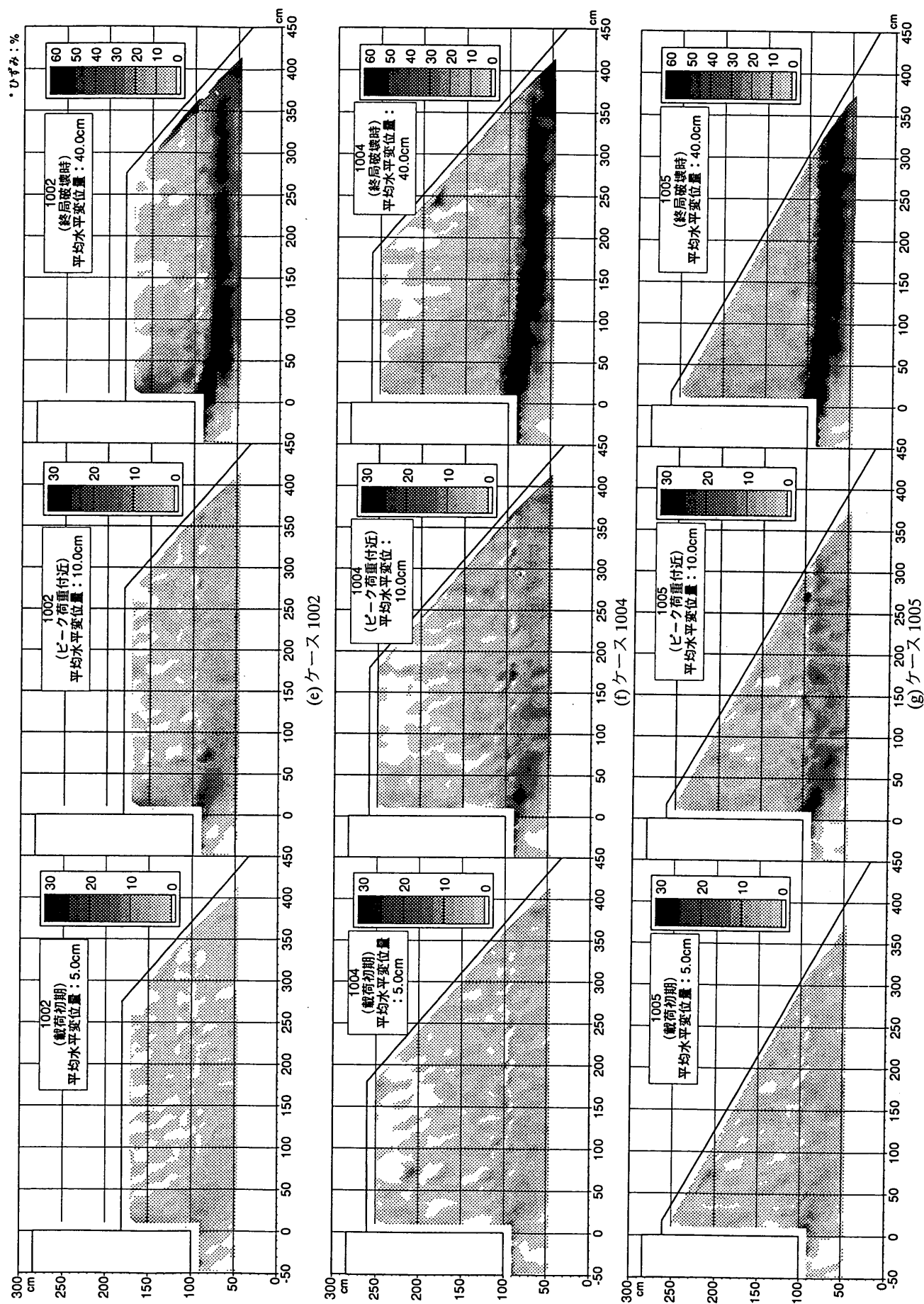


(c) ケース 1003



(d) ケース 1006

図-23 せん断ひずみ分布



図一 23 せん断ひずみ分布

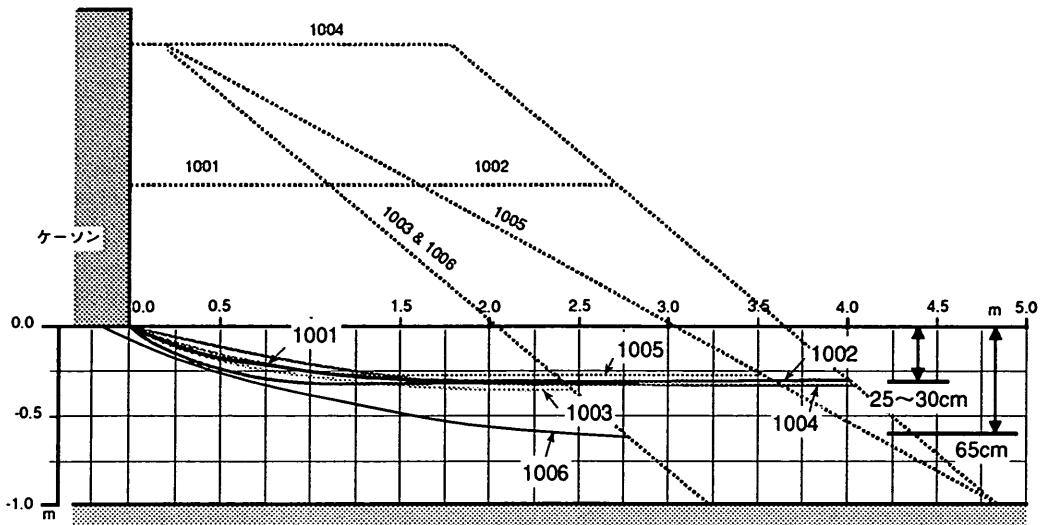


図-24 捨石マウンド内に発生したすべり面

布を算定すると、捨石マウンドおよび裏込め内部の進行性破壊の様子が把握できるとともに、すべり面の推定が可能である。図-23に示した、ひずみの卓越した領域にすべり面が存在しているものと考え、すべり面として示したのが、図-24である。偏心量の大きなケース1006を除くと、各実験でのすべり面は発生位置、形状とも類似していることがわかる。すなわち、すべり面はケーソン背面下端から捨石マウンド内部に生じ、ケーソン下端から水平方向に1.5m以上離れると、マウンド上面から約30cmの深さで、ほぼ水平方向に発達している。一方、ケース1006ではすべり面はより下方に生じ、ケーソンから離れるに従ってすべり面の勾配は緩やかになり、法面に達している。

5. 考察

通常、ケーソンなどの重力式構造物を設計する際には、構造物の転倒と滑動と地盤の支持力の安定性の3項目について別々に検討される。このうち、転倒と滑動の安定性は、構造物が固い地盤の上であって地盤の変形を考慮しなくてよいとした条件で検討される。支持力に対する安定性は基礎地盤が変形するものとして検討され、基礎地盤に作用する偏心傾斜荷重作用時の支持力の問題となる。小林、寺師、高橋ら³⁾は、遠心場(60g)でマウンド上の載荷板に水平力を作用させて、傾斜荷重を受けるマウンド内部の破壊状況を調べている。実験は標準砂で作成したマウンド(裏込めなし)の中央に設置した載荷板に、ロードセルで鉛直荷重を載荷し、ワイヤーによる水平荷重を加えて荷重を傾斜させ、マウンド斜面を破壊している。鉛直荷重が大きいケースと小さいケース、すなわち荷重傾斜率が小さい場合と大きい場合の代表例について

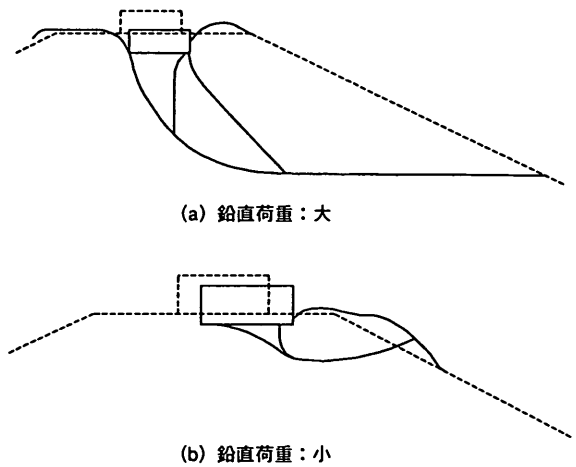


図-25 マウンドの破壊モード

X線写真ですべり面を求めた結果を図-25に示す。荷重傾斜率が小さい場合の破壊モードは、主働くさびから対数らせんと直線を組み合わせて近似できるような形状のすべり面で表現され、荷重傾斜率が大きい場合には、すべり面は浅い位置に表れている。

一方、今回の実験ではどのように破壊が生じたのであろうか。図-20にシリーズ2のケースのケーソンの変位モードを示しているが、ケーソンは単純に滑動したのではなく、後趾を多少マウンドにめり込ませながら回転を伴って変位していることがわかる。とくに、ケース1002や1006の場合には他の場合に比べて回転(支持力不足)のモードも無視できないものとなっている。また、シリーズ2の実験の結果得られたすべり面の位置をもとに、裏込めがある場合の破壊モードを概念的に書くと図-26に示すようなものとなっていると考えてよい。ここで、図-26と図-25を比べてみると、今回の破壊モードは偏心傾斜荷重による支持力不足よりは、滑動安全率の不足

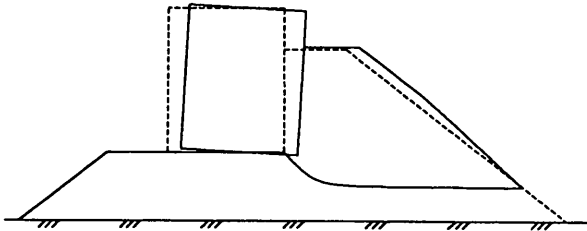


図-26 マウンドの破壊モード(裏込めを有するケーソン式防波堤)

が要因として大きいことがわかる。これらのことから、今回の破壊では滑動のモードが卓越したものとなっている。しかし、一般的に、現地の条件を考えると、裏込めの形状やマウンドより下の地盤条件によってはケーソンの安定において滑動モードで破壊する場合と支持力不足で破壊する場合の二つが考えられ、しかも支持力が不足しながら滑動破壊するケースも考えられるというように、両者の安全性の考え方が不可分の関係になると考えられる。

5.1 ケーソンとマウンドの間の摩擦係数

今回の実験で、摩擦係数を求めるための実験を二回実施している。既に4.で述べたように、ケーソン下部に載荷したほぼ偏心が無いと考えられるケース300では、摩擦係数は、0.75であり、波圧合力作用高さに載荷したケース1000では0.61であった。この二つのケースの相違点としては、載荷条件のほかに、マウンド厚の違いとマウンドの変形を拘束する条件の違いがあげられる。これらの実験条件の違いをまとめると次のようである。ケース300の場合、載荷高さ d がほとんど0とみなせるように実験をしているので、載荷高さ d の堤体幅 B に対する比 $d/B=0$ 、偏心率 $e/B=0$ 、マウンド厚 h の堤体幅 B に対する比 $h/B=0.19$ となっていたのに対し、ケース1000では、それぞれ $d/B=0.58$ 、 $e/B=0.35$ 、 $h/B=0.63$ となっている。

いずれのケースも組み合わせ荷重下の支持力の問題になっている。このような問題に対して柴田ら⁹⁾は、鉛直力と水平力とモーメントからなる $V \sim H \sim M/B$ 空間(ただし、 B は基礎幅)での破壊面を考えに入れることによって摩擦係数に及ぼす水平力の着点の高さの関係として図-27に示すような関係を示した。今回の実験のケースの場合、どちらのケースであっても鉛直力に対する極限支持力は極めて大きいので V/V_m はおおよそ0に等しいと考えてよい。ケース300の場合には、 $d=0$ なので $D=0$ である。また、ケース1000の場合には、 $d/B=0.58$ であるが、一般に μ/ψ は1~2の範囲にあるので $D=0.58 \sim 1.2$ の間にあることになる。図-27によれば、これら二つのケースの間で見かけの摩擦係数が1.5割から3.5割程度異なることになるが、今回の実験結果もそれとほぼ同じ傾

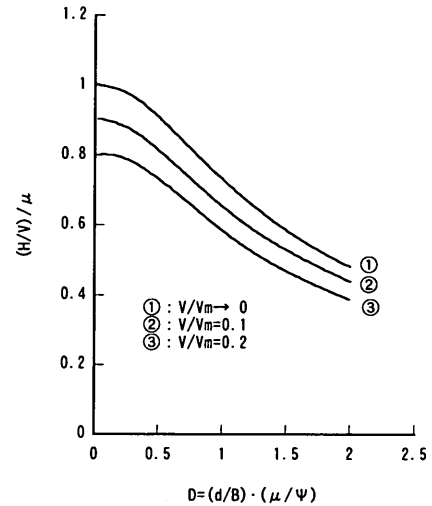


図-27 重力式構造物の滑動抵抗 (H/V) に及ぼす水平力の着点高さ (d/B) と鉛直荷重レベルの影響

向にある。

以上のことから考えて、ケース300では、ケーソンとマウンドの間の摩擦係数が適切に測れているが、ケース1000ではマウンドの支持力の影響を受けて見かけ上の摩擦係数が小さく測定されたものと考えられる。

以上のように、ケース300ではマウンドの層厚が比較的薄く、ケーソンの破壊モードが滑動に支配されていたのに対し、ケース1000では傾斜荷重に対するマウンドの支持力不足もケーソンの破壊に関係していたものと考えられる。このように、裏込めの無い、一般的なケーソンであってもケーソンの挙動にはマウンドの変形の問題が深く関与している事を示す一例となっている。

5.2 裏込めを有するケーソン式防波堤の水平荷重に対する抵抗特性

裏込めによる水平抵抗力の増加を考えるために、裏込めによる受働抵抗を考えてみよう。このような考え方は基本的には赤塚らの論文²⁾でも触れられている(2.参照)ものであるが、ここではさらにケーソン背面との間の壁面摩擦も考慮に入れて検討をしてみる。

ここでの検討では、裏込めがなく基礎の支持力不足の影響を受けないものとした滑動抵抗力を基本とし、裏込めがあることによって抵抗力がどれだけ増加したかを評価することにする。すなわち、ケース300の実験の結果得られた、最大水平荷重 4.5tf/m を基本抵抗力とし、各実験で得られた最大水平荷重からこの値を引いたものと、以下に示す裏込めによる受働抵抗力との関係について検討する。

裏込めによる抵抗が受働抵抗的なものであるとした場合に、壁面の摩擦も考慮に入れると裏込めによる水平抵抗力は、次式で表わされる水平力の最小値である。

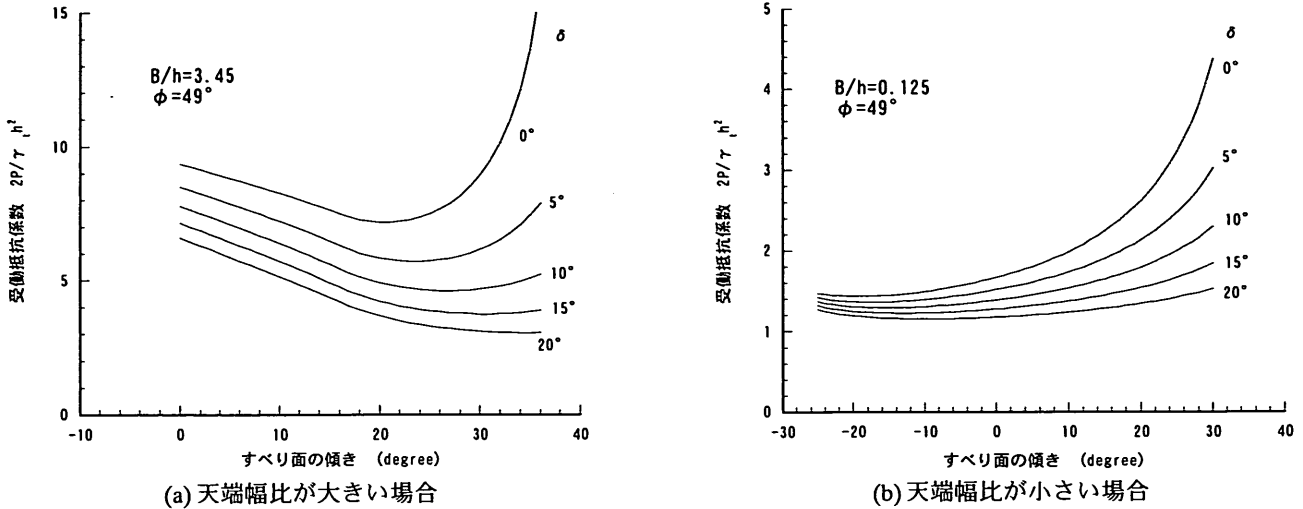


図-28 受働抵抗係数の変化

$$P = \frac{W_s \cdot \tan(\theta + \phi)}{1 + \tan \delta \cdot \tan(\theta + \phi)} \quad (3)$$

ここに、

P : 裏込めによる受働抵抗力

W_s : すべり面より上方の裏込め重量

θ : すべり面の水平方向とのなす角

ϕ : 裏込め材料の摩擦角

δ : 壁面摩擦角

$\delta = 0$ とすれば、この式は(1)式と等しくなる。しかし、これまでの実験結果を見ると $\delta = 0$ とする仮定は実験の条件と異なると考えられる。

δ が裏込めの受働抵抗としての挙動にどのように影響するかについて計算した例を以下に示す。ここでは裏込めの天端幅 b が裏込め高さ h に対して長い場合と短い場合とでどのように受働抵抗係数 $2P/\gamma_d h^2$ が変化するかを示す。図-28(a)は天端幅比 $\beta (=b/h)$ が大きい場合 ($\beta = 3.45$) の式(3)の計算結果である。言うまでもなく、図中に示している線の受働抵抗係数が極小値となる点にのみ意味がある。この図から、 δ が大きくなるにつれて受働抵抗係数が小さくなり、また、すべり面の傾きも大きくなる傾向にあることが分かる。さらに δ が大きくなると θ の変化による受働抵抗係数の変化が小さくなることも特徴の一つである。図-28(b)は天端幅比 $\beta (=b/h)$ が小さい場合 ($\beta = 0.125$) の式(3)の計算結果である。 δ によらずすべり面の傾きが小さくなるにつれて(3)式の計算結果が小さくなり、0からマイナスになるあたりで極小値となる傾向にある。 δ の変動による受働抵抗係数の変化が小さいのも特徴である。

以上のような傾向があるので、天端幅が長い場合には δ の違いが計算結果に大きく影響を及ぼす恐れがあるが、

ここでは δ として通常の設計で良く用いられる $\delta = 15^\circ$ として検討を進めていくことにする。

表-9に、実験の結果得られた裏込めの存在による抵抗力の増分 P_{ex} と受働抵抗の計算結果 P_{cal} の関係を示す。なお、シリーズ1ではマウンド内にH鋼を入れて変形を拘束してあり、この影響が実験結果に大きく影響している恐れがあるので、計算結果は表-9に参考として示すにとどめる。

今回の実験ケースは想定される裏込め形状としての範囲を概ね網羅していると考えられる。今回の計算結果では、ケース1002を除いてすべり面が水平となす角は 12° 以下となっており、表-9からも分かるようにすべり面が水平となす角がこの程度以下であれば、受働抵抗 P_{cal} と裏込めの重量 W_b の比 P_{cal}/W_b は $0.84 \sim 0.88$ とほぼ一定になっている。ケース1002については P_{cal}/W_b は 0.46 と小さいがすべり面の角度が 31° にもなっており、このような場合には、摩擦角の違いによる計算結果の相違の程度は大きいものと考えられ、壁面摩擦角を小さく仮定すると計算される受働抵抗力が大きくなり P_{cal}/W_b は大きくなる。

計算の結果によるすべり面の水平となす角度は実験の観察結果と異なるが、式(3)の計算手法では、ケース1002を除き、すべり面の角度の違いによる受働抵抗の違いはあまり顕著ではないため、この違いが受働抵抗の計算結果に与える影響は少ないものと考えられる。そこで、実験結果との対比ではケース1002を除いて考えることにする。

実験から得られた受働抵抗力 P_{ex} と計算結果 P_{cal} の比 P_{ex}/P_{cal} を見ると、 $0.77 \sim 1.34$ の範囲にある。この結果は受働抵抗の範囲のばらつきとしては小さい方であると考えられるが、 P_{ex}/P_{cal} が1より小さいものがあることに注

表-9 裏込めの受働抵抗の評価

実験 ケース	最大水平荷重 P_{max}	裏込による 抵抗力の増分 $P_{ex}=P_{max} \cdot \mu \cdot W$	裏込重量 W_b	裏込の受働抵抗 (計算値) P_{cal}	すべり面 のなす角	P_{ex}/P_{cal}	P_{cal}/W_b	P_{ex}/W_b
	(tf/m)	(tf/m)	(tf/m)	(tf/m)	(deg.)			
301	6.27	1.77	0.79	0.70	0	2.53	0.88	2.23
303A	9.10	4.60	2.77	2.43	0	1.89	0.88	1.66
303B	9.25	4.75	2.77	2.43	0	1.95	0.88	1.71
304A	10.23	5.73	6.71	5.90	1	0.97	0.88	0.85
304B	11.57	7.07	6.73	5.92	1	1.19	0.88	1.05
1001	5.88	1.38	1.99	1.72	12	0.80	0.86	0.69
1002	9.55	5.05	3.96	1.83	31	2.76	0.46	1.28
1003	6.33	1.83	2.82	2.38	-12	0.77	0.84	0.65
1004	12.10	7.60	6.80	5.97	1	1.27	0.88	1.12
1005	9.20	4.70	4.04	3.50	6	1.34	0.87	1.16
1006	7.03	2.53	2.84	2.40	-12	1.05	0.84	0.89

意すべきである。これら二つのケースについては裏込めによる水平抵抗力の増加が少ないケースであり、今回の検討の基本としたケーソン自体の水平抵抗力の推定にやや問題があったことを意味しているものと考えられる。すなわち、ケース1000に見られるように偏心傾斜荷重が作用している場合の摩擦係数が想定よりも小さい可能性と、ケーソンと裏込めとの間の壁面摩擦力によってケーソンの自重の一部を支えているにもかかわらず、ケーソンの全自重によって底面の摩擦力が発揮されたと考えたところに問題がある。

また、今回用いた計算方法では、ケース1003と1006のように荷重作用位置が違う場合の挙動の変化を計算結果に反映させることができないのも問題点の一つである。

以上述べたように問題点はいくつかあるが、水平抵抗力の増分を簡易に推定する方法としては、以上の考え方に十分な実用性があると考えられる。

5.3 支持力安定性の検討

本実験において支持力に対する安定性はどうかであったのだろうか。ケース1000について、滑動したときの偏心傾斜荷重に対する支持力安全率をもとめたところ、安全率は1.2であった。このことから支持力の安全率は十分であったと考えてよい。

ケース1000以外のケースについては以下の問題点があるため、簡単には支持力安全率を計算できない。すなわち、実際には裏込めの存在によって水平力に対する抵抗性が高まっているわけだが、その効果を考慮せずに裏込めがただ背面側の上載荷重としてだけ寄与していると考えると転倒に対する安全率が1.0を下回ってしまう。この場合には、偏心傾斜荷重の計算も成立しないことになるため、支持力の検討ができない。

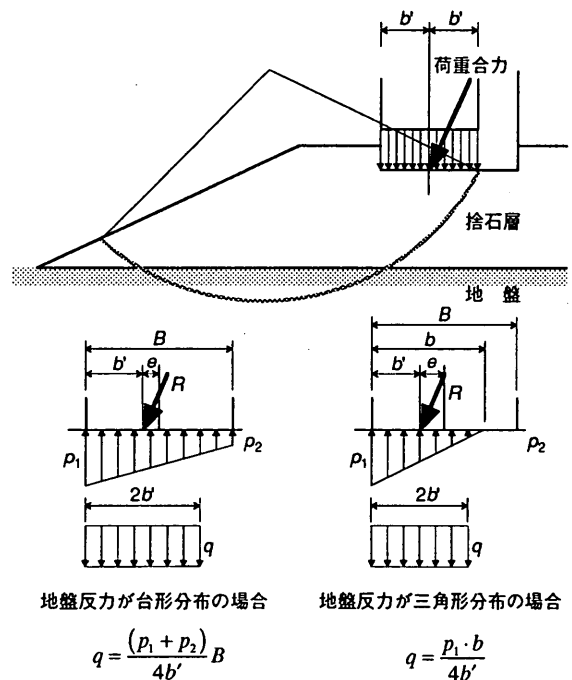


図-29 ピシヨップ法の荷重条件

実際には、裏込めからケーソンに外力が作用しているため転倒はしない。裏込めからケーソンに作用している外力を検討するためには、裏込めからの水平力と壁面と裏込めとの間の摩擦力、水平力の合力の作用位置を知ることが必要となる。今回の実験ではそのような項目についての計測をしておらず、直接裏込めからの力を求めることができない。

そこで、実測データを用いて検討することを考えた。まず、最大水平荷重がケーソンに作用した時の載荷面側のケーソンの浮き上がりの実測結果を用いて、図-29に示す $2b'$ である有効基礎幅を推定することにした。すな

表-10 従来の円弧すべり計算による検討結果

case	計算条件 (実測値)		円弧すべり計算の安全率 F_s
	最大滑動抵抗力 P (tf/m)	ケーソン底面接地長さ L_w (cm)	
1001	5.35	110	1.19
1002	8.68	140	1.21
1003	5.75	130	1.26
1004	11.00	150	1.17
1005	8.36	140	1.22
1006	6.39	65	0.94

(tf/m = 9.8 kN/m)

わち、実際にケーソンがマウンドに設置している幅を持って有効基礎幅とした。ただし、裏込めからは何の外力も受けていないものとし、裏込めは上載荷重としてのみ機能しているものと考え、ケーソンに作用させた水平力はそのままケーソン底面部分に作用させている。このような考え方は、実際には力の釣合いを無視しているため、あまり適切な方法とはいえないが、便宜的にこの方法をとることにした。このようにして検討した偏心傾斜荷重に対する支持力安全率の検討結果を表-10に示す。表-10に示しているように、円弧すべり面法での安全率は $F_s=1.17\sim 1.26$ となり、ケース1006を除くと $F_s=1$ を大きく上回った。実際には、ケーソンは、裏込めから滑動抵抗を増大させるような水平力とケーソンと裏込め間の摩擦による上向きの力を受けているはずなので、マウンドに作用している水平力も鉛直力も想定よりは小さかったと考えられ、実験条件に即した外力を用いれば、支持力に対する安全率はもっと大きかったものと考えら

れる。

5.4 円弧すべり面法による裏込め式ケーソン防波堤の安定計算方法

ここでは、支持力に対する安定性と滑動に対する安定性を同時に考慮できる円弧すべり面法を用いた新しい安定計算方法(以下、新方法と呼ぶ)について検討する。

図-30に、新方法での荷重条件を示す。ここではケーソンに作用する外力とモーメントの釣り合いを考慮している。外力のうち既知のものは、ケーソンの自重、水平載荷力である。このほか、既知のものとしては、底面摩擦係数、水平荷重の作用位置、自重の作用位置である。一方未知のものは、裏込めからの反力とその作用位置、底面の地盤反力およびその作用位置である。ただし、裏込めからの反力と底面の地盤反力は力の釣り合いから簡単に求めることができる。表-11に示すように、実験結果では、極限破壊時の底面の接地幅が堤体の底面幅の半分より大きめであったことから、地盤反力は堤体幅の3/4のところに等分布に作用しているものとした。この時の地盤反力の作用位置は後趾から堤体幅の3/8のところにあるものと仮定した。また、このようにして、堤体の後趾から0.75Bまでの区間のどこかを通る円弧すべりを考え、その最小値をもってケーソンの安全率とする。このような計算方法を取ると、もしケーソンの重量が大きく支持力の不足が主原因で破壊する場合には、最小安全率を与える円弧の始点はケーソンの下端のどこかにあることになろうが、滑動抵抗力の不足が主原因となる場合には、ケーソンの後趾を通る円弧滑りとなるであろう。

図-31に、このような仮定で計算したシリーズ2の場合の円弧すべり面の位置を示し、また表-11に、計算条件と結果の一覧表を示す。円弧すべり計算で求めた安全

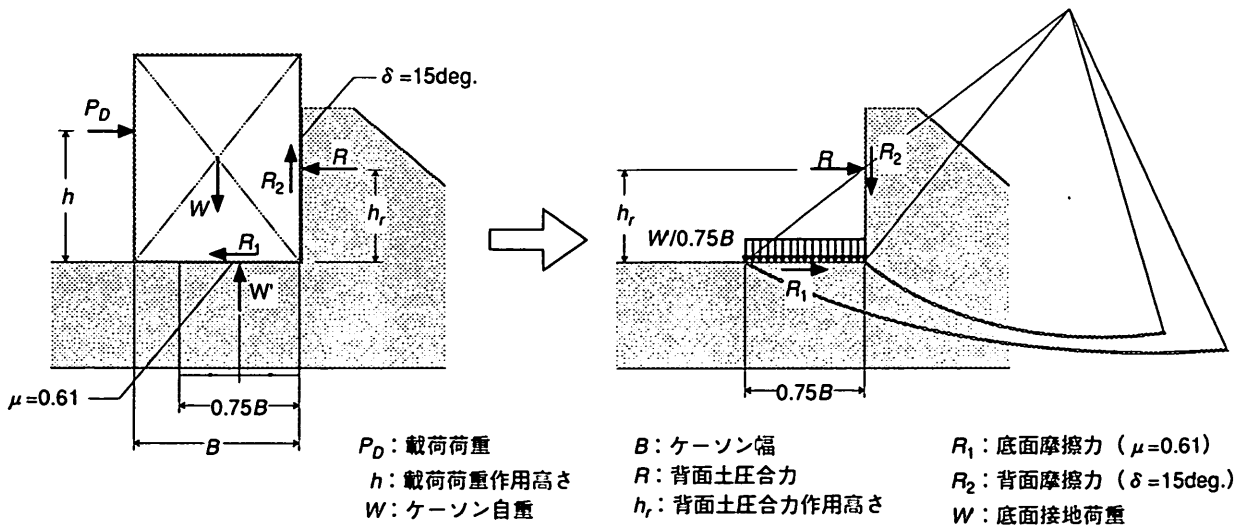


図-30 新方法の荷重条件

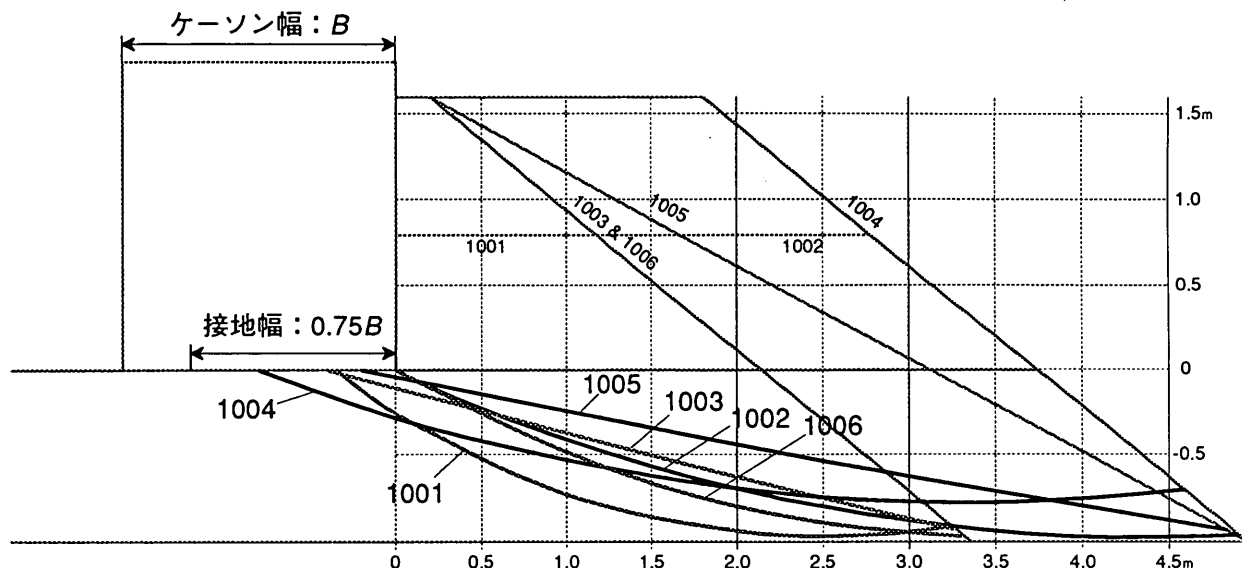


図-31 新方法によるすべり面

表-11 新方法の検討結果

case	計算条件					計算結果	
	背面土圧合力 R (tf/m)	合力作用高さ h_r (m)	底面接地荷重強度 $W/0.75B$ (tf/m ²)	底面摩擦力 R_1 (tf/m)	背面摩擦力 R_2 (tf/m)	すべり面始点～ ケソン下端距離 (m)	円弧すべりの 安全率 F_s
1001	1.99	0.49	4.60	3.36	0.53	0.39	1.07
1002	5.97	0.57	3.71	2.71	1.60	0	1.03
1003	2.46	0.51	4.49	3.29	0.66	0.40	1.10
1004	8.74	0.58	3.09	2.26	2.34	0.83	1.05
1005	5.58	0.57	3.79	2.78	1.50	0.26	1.01
1006	3.23	0.93	4.32	3.16	0.87	0	1.01

(tf/m = 9.8 kN/m)

率は、 $F_s=1.01 \sim 1.10$ の範囲となったが、表-10に示した通常の方法よりも、安全率が1により近づいていることがわかる。また安全率が最小となるすべり面は、全ケースとも、ケーソンの背面下端付近から法尻を通る円弧となった。この結果は、実験での推定すべり面にかなり近づいていることがわかる。一方、円弧すべりの計算結果によると、今回のケースでは、ケーソンの自重は円弧の外側に位置することから、安定計算結果にほとんど寄与していないことがわかる。

以上のように今回の実験条件では、滑動を主とした破壊が生じていた。しかし、地盤条件が悪くなれば、支持力不足によって破壊が生じることがある。

6. 結論

本研究では裏込めを有するケーソン式混成堤を対象として、捨石マウンドの拘束条件、載荷方法、裏込め形状

の各条件を変化させた大型の模型水平載荷実験を行い、捨石マウンドと裏込め内部の変位挙動からすべり面を推定し、実験での裏込めの滑動抵抗力と設計計算値との比較を行った。またいくつかの手法により安定計算を行い、既存の方法では十分に現象を表現できないことが明らかとなったので、実験結果を考慮できる円形すべり面法に基づく新しい安定計算方法を提案し、その妥当性についても評価した。

それらの結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 裏込めを有するケーソン式混成堤は裏込めの存在により安定性が高められる。この時の水平抵抗力の増加量やケーソンの変形挙動は裏込めの形状の影響を強く受ける。
- 2) 裏込めを有するケーソン式混成堤では滑動、転倒、支持力の安全率が独立な関係には無く、これらを融合させた形での安定性の検討が必要である。

- 3)裏込めの受働抵抗を考慮することにより水平抵抗力の増加量の概略を検討することができるが、裏込め形状の違いを十分に説明することができない。
- 4)新しく提案した円弧すべり面法を適用することにより、滑動と支持力の安定性を同時に検討することが可能である。

7. おわりに

本研究は、ケーソン式混成堤における裏込めの効果について大規模模型実験により検討したものである。本研究では、基礎的検討として静的載荷実験を行ったが、このような検討だけでは実際の耐波構造物の設計の検討としては不十分であり、今後波浪水路を用いた大規模な実験も必要であると考えている。また、今回の静的載荷実験の中では、裏込めとケーソン間の力のやり取りの解明が急務として残されている。

本研究を進めていくにあたり、大型三軸圧縮試験の実施に際して水産庁水産工学研究所漁港施設研究室の大楨正紀室長には多くの助言、ご指導をいただいた。さらに、裏込めを有するケーソン式混成堤の設計の考え方についても貴重なご意見をいただいた。また、模型実験については動土質研究室の高橋邦夫室長に助言をいただいた。記して感謝の意を表します。

なお、本研究は港湾技術研究所土質部基礎工研究室と五洋建設(株)の共同研究の成果の一部である。

(1998年3月30日受付)

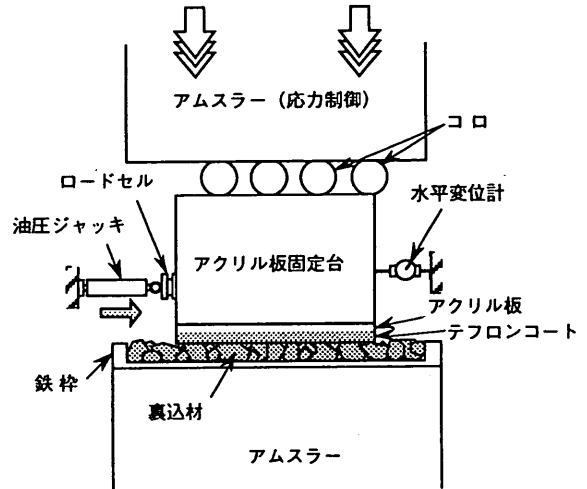
参考文献

- 1) 伊藤喜行・藤島 陸・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻，第14号，pp.117-121.，1966年9月。
- 2) 赤塚雄三・竹田英章・蓮見 隆：混成堤の堤体背後に設置したコンクリート方塊あるいは割石の滑動抵抗，第22回海岸工学講演会論文集，Vol.2，pp.421-425.，1975年11月。
- 3) 新舎 博・江口信也・菊池喜昭他：ケーソンの滑動抵抗に及ぼす裏込め石の効果，第32回地盤工学研究発表会，Vol.2，pp.1407-1414.，1997年7月。
- 4) 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎・小谷 拓：捨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，第26巻第2号，pp.371-411.，1987年6月。
- 5) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，上巻，日本港湾協会，pp.119 - 121，1989年2月。
- 6) 柴田 徹・関口秀雄：地盤の支持力，鹿島出版会，pp.175 - 180，1995年3月

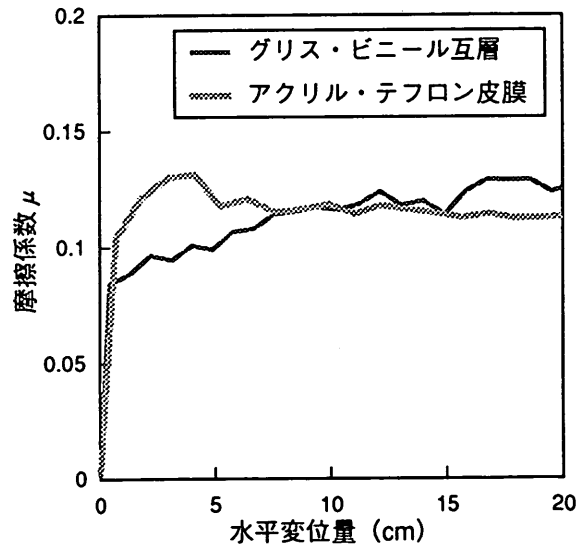
付録 A. 側壁面摩擦の補正

1. 側壁面摩擦実験

裏込めと両側壁面での摩擦がどの程度であるのかを調べるために、使用碎石と側壁面との摩擦係数を測定した。付図A-1に実験装置を、付図A-2に測定結果を示す。図より碎石と観測壁、または碎石と反力壁の摩擦係数は0.10～0.15程度であることがわかる。



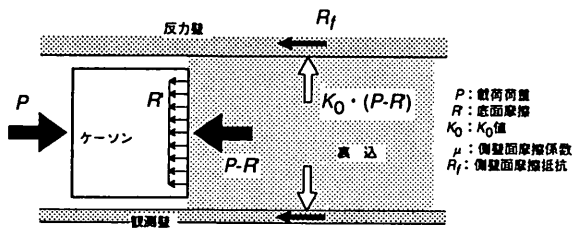
付図A-1 側壁面摩擦実験装置



付図A-2 碎石と側壁との摩擦係数

2. 側壁面摩擦の補正

裏込めによる水平荷重に対する抵抗力の増加の評価にあたっては、実測の載荷荷重を両側壁面摩擦抵抗で補正した値を用いた。付図A-3に補正方法を示す。側壁面摩擦抵抗 R_f は、裏込めの K_0 状態を仮定し、次式で算定し



付図 A - 3 側壁面摩擦の補正

た。ここで R_f は片方の側壁の分の側壁面摩擦抵抗である。

$$R_f = (P - R) \cdot K_0 \cdot \mu \quad (\text{付 A1})$$

ここに、

P : 実測の最大載荷荷重

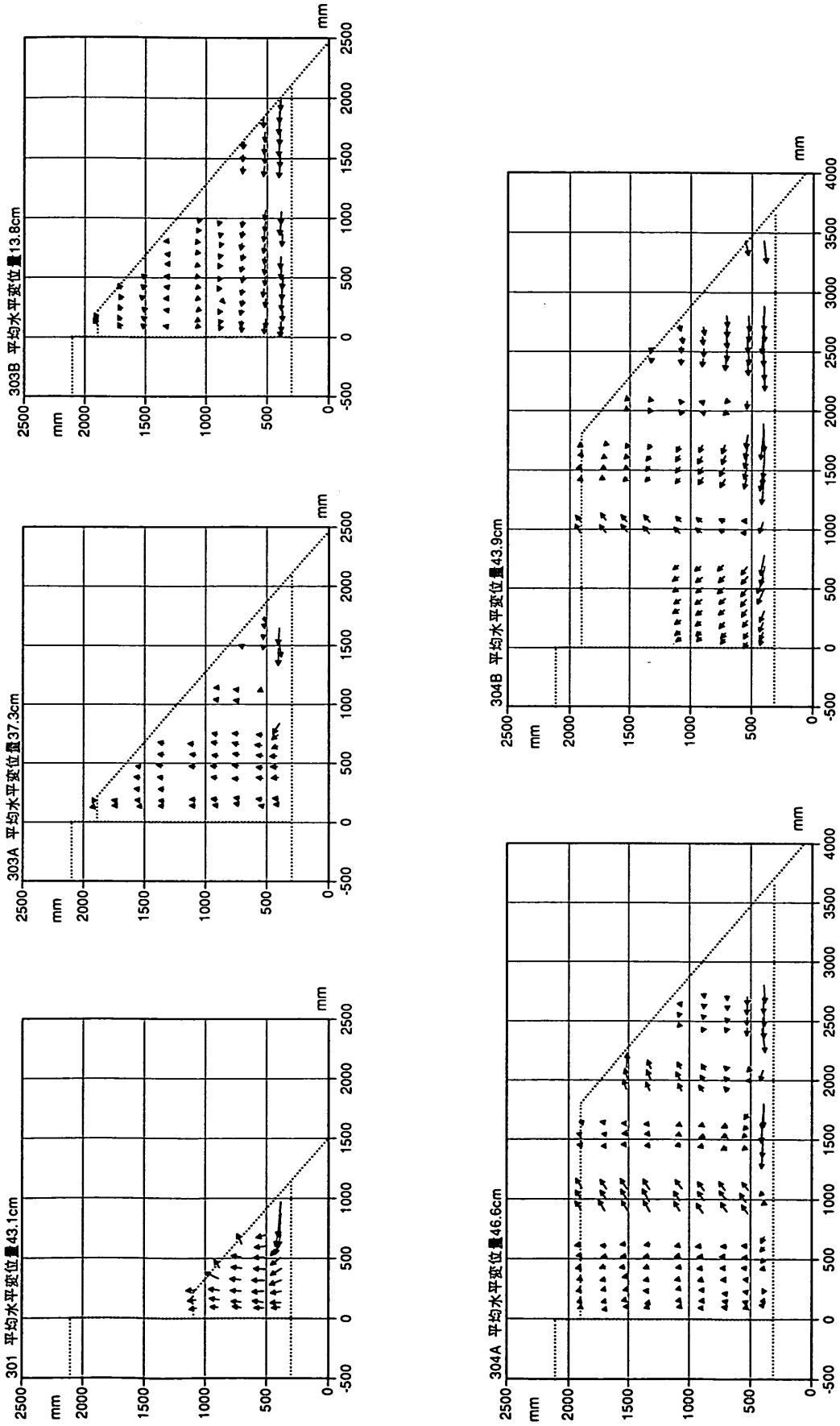
R : ケーソンの底面摩擦力 (ケース 300 での実測値)

K_0 : K_0 値 (=0.5)

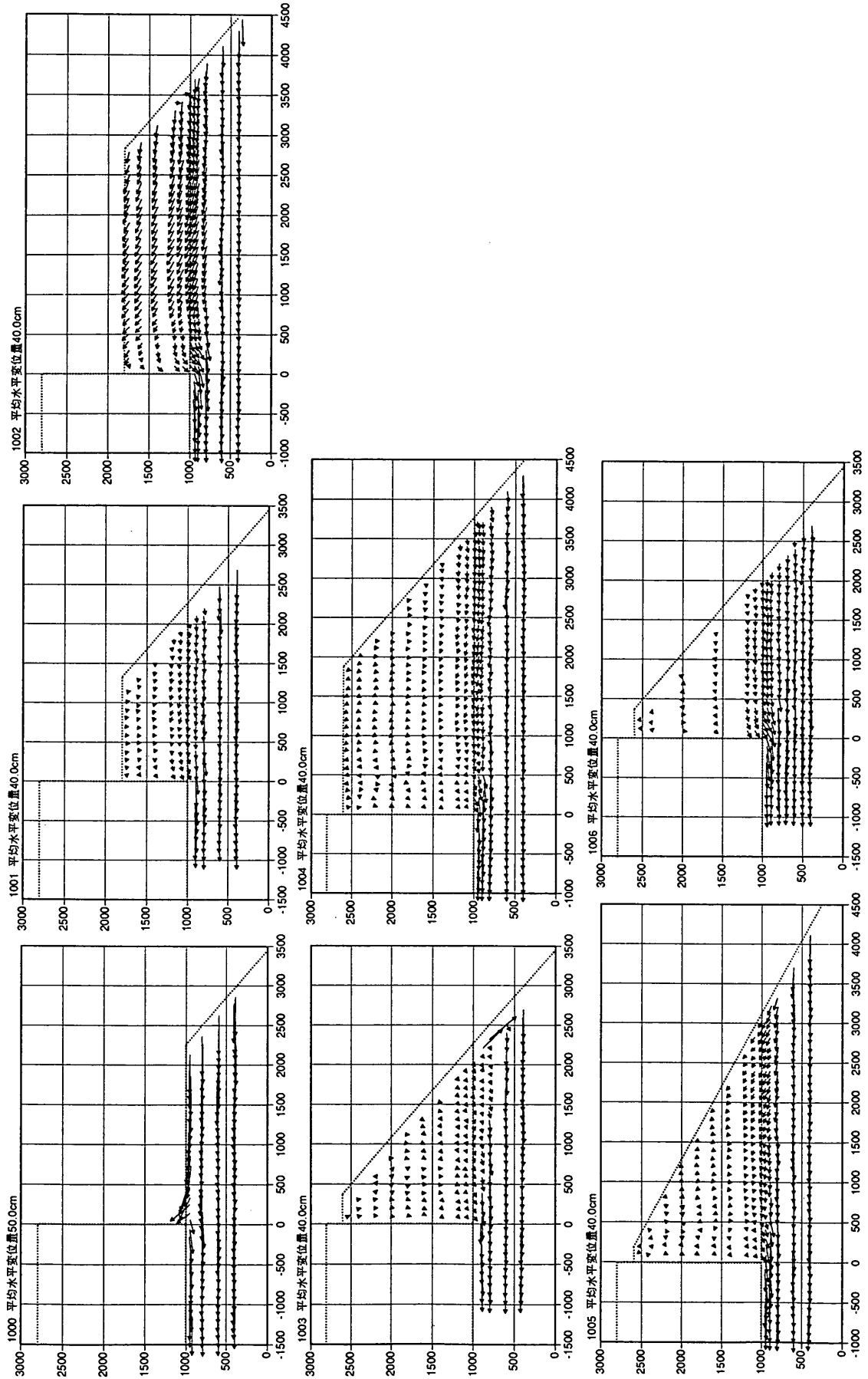
μ : 実測の側壁面摩擦係数 (=0.1)

なお、本文中、表 - 8 と表 - 9 に示した最大載荷荷重は、この補正を行った後の値である。

付録B. 終局破壊時の相対変位ベクトル



付図B-1 終局破壊時の相対変位ベクトル図(捨石マウンド厚30cm)



付図B-2 終局破壊時の相対変位ベクトル図(捨石マウンド厚100cm)