

混成堤の地震時破壊特性に関する大型模型振動実験

栗本雅裕*・松田敦夫**・武田清治***

1. まえがき

近年、沿岸域の利用が進み防波堤も水深の大きい場所に建設されるようになってきた。これに伴い、現行の設計基準では対処しがたい次のような問題点があると言われている。1)従来の波圧式の適用。2)構造物の大型化による地盤およびマウンドの許容支持力。3)地震時の防波堤の安全性。筆者らは、このうち3)について検討を行ったので報告する。

通常、浅い水深域の防波堤では設計外力として波浪時の波圧力が地震時の慣性力と動水圧の合計よりも大きく、波浪時の安定性によって断面が決定される。しかし、大水深域に設置された場合、地震時動水圧は支配外力として無視できず、もし滑動を許さない設計をすれば堤体幅を著しく大きくしないと安定が保てない。そのため、経済性を考慮すれば滑動を許容する設計方法の開発も必要である。さらに、構造物の重要度に応じて動的な耐震設計も必要となる。

防波堤の動的解析を水一構造物の連成問題として取り扱うためには、異種材料の複合体である混成堤の動的特性を明らかにしなければならない。たとえば、マウンド材料の力学特性、それに基づくケーソンの沈下量やマウンドのすべりに対する安定性、マウンドの厚さや上部構造物によるケーソンの振動特性、ケーソンと消波ブロックの相互作用等が挙げられる。これらに関する研究は数多く行なわれているが、この種の振動実験では、水の影響を適切に評価できる手法で実施されていないのが現状である。そこで、水一構造物の連成を検討する上で現実の振動状態に近づけるため、水槽の側壁の影響を押える特殊な水槽を考案し、1)水および消波ブロックの存在によるケーソンの振動特性の把握。2)ケーソンの滑動量。3)消波ブロックの破壊特性。を目的として大型の模型振動実験を行った。

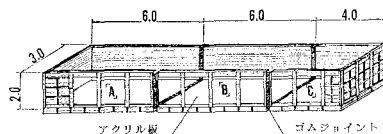


図-1 実験水槽

2. 実験概要

2.1 実験水槽と振動台

実験に使用した水槽を図-1に示す。この水槽は、フレキシブル・ゴム・ジョイントで連結した3連の水槽で構成され、中央部分「B」のみを振動台上に載せる。そのため、振動は両端の「A」「C」にはほとんど伝わらず、1)構造物のみに振動が伝わるため、実際の地震現象に近い。2)普通的水槽において側壁で発生する波がほとんどない。といった特徴がある。実際、水槽側面に生じる動水圧は、「B」に設置された模型壁面に生じる動水圧の1/10以下であることが確認されている。

また、加振に用いた振動台の主要諸元を表-1に示す。

2.2 防波堤の形状と模型

本研究で対象とした防波堤は消波ブロック被覆ケーソン式混成堤で、主な諸元は表-2に示したものを想定した。模型諸元を決定するために用いた相似比は表-3に示したもので、今回は水槽・振動台の能力を最大限に利用し、 $\lambda=25$ で模型を設定した。模型の諸元を図-2、表-2に示す。

2.3 実験ケースと計測

実験は大きく分けて混成堤の動特性を調べるための共振実験とケーソンの滑動量やマウンド、消波ブロックの

表-1 振動台主要諸元

振動台寸法	4 m×4 m
積載重量	最大 60 t 定格 20 t
加振方向	3軸方向および3軸回り回転
最大加速度	X, Y, Z=3G
加振周波数	DC~70 Hz

* 正会員 工修 (株)奥村組 筑波研究所

** 正会員 (株)奥村組 筑波研究所

*** (株)奥村組 東京支社

表-2 原形および模型諸元

		原形	相似比	使用模型
ケーソン	高さ	26 m	1:25	1.04 m
	幅	28 m	1:25	1.12 m
	単位重量	2.1	1:1	2.0
マウンド	高さ	5 m	1:25	0.20 m
	幅	41 m		1.64 m
	粒径	—		15~25 mm
消波ブロック	テトラポッド 100t型	92 t	1:25 ³	5.9 kg
水深		23 m	1:25	0.90 m

破壊パターンを把握するための正弦波を用いた破壊実験に分けられる。マウンドには実物の相似模型である碎石の他に、ケーソンの滑動量の評価を目的とした塩ビ板のみのもの(塩ビマウンドと記述)、ケーソンの振動モードと壁面の動水圧の関係を調べるために塩ビ板とケーソンの間にゴム片を挿入したもの(ゴムマウンドと記述)の3種類を用いた。破壊実験では、大船渡湾口防波堤(ケーソンの高さ20m, 幅12m, マウンド厚20m)の地震観測結果¹⁾より、ケーソンの固有振動数が1~2Hzにあることから、主に5Hzと10Hzの正弦波を用いた。加振条件を表-4、実験パターンを図-3に示す。模型の動的挙動の把握には、加速度計・水圧計・変位計を用いたが、今回は消波ブロックがケーソンに作用する力を塩ビ板を介して荷重計により計測した。計器の配置を図-4に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 水の有無による振動特性

碎石・ゴムマウンドのケーソン側面が、「水無」・「水有」でのケーソンの共振曲線を図-5に示す。ゴムマウンドの「水無」では8.5Hz, 14.5Hz, 「水有」では7.5Hz, 12.5Hz。また、碎石マウンドの「水無」では7.0Hz, 「水有」では6.5Hzにピークを示している。応答加速度は「水有」の場合には「水無」に比較してゴムマウンドでは80%。碎石マウンドでは75%程度の値を示している。ケーソン側面に水が存在することにより、応答加速度・共振振動数は低下し、減衰は大きくなる傾向がある。また共振振動数の低下は水の付加質量によると考えられる。ゴムおよび碎石マウンドのケーソン頂部における応答加速度を表-5に示す。上述の結果と同様、

表-4 加振条件

	加速度レベル	加振周波数
共振実験	50 gal, 100 gal	3~50 Hz
破壊実験 (正弦波)	200 gal, 400 gal 600 gal, 800 gal	5 Hz, 10 Hz

表-3 相似比

量	長さ	比重	剛性	周波数	加速度	変位	ひずみ
相似比	1/25	1	1/25	$\sqrt{25}$	1	1/25	1

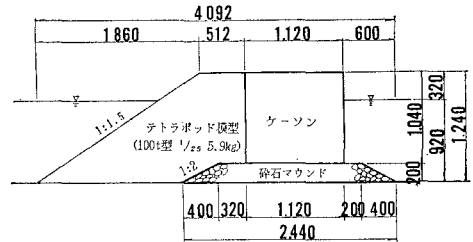


図-2 模型寸法

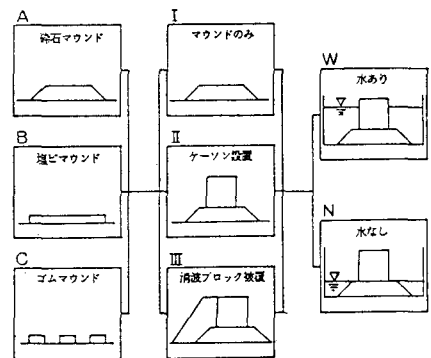


図-3 実験パターン

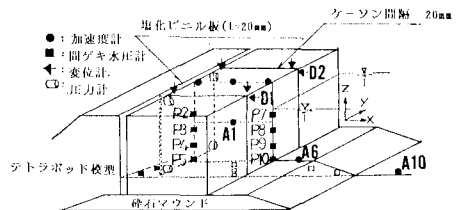


図-4 計測器の配置

異なる入力レベルにおいても水が有ることにより共振振動数・応答加速度は低下している。両マウンドとも、マウンド材の非線形性により入力が大きくなると共振振動数・応答加速度は減少している。

3.2 消波ブロックの有無による振動特性

碎石マウンドのケーソン側面に消波ブロックが「無」・「有」でのケーソン頂部の共振曲線を図-6に示す。共振振動数は水無の状態、「消波ブロック無」が7.5Hz, 「消波ブロック有」が9.0Hzであり、応答加速度は消波ブロックの有無によらず同程度の値を示している。これは、ケーソン側方の消波ブロックにより剛性が増していることを示している。しかし、水有の状態では、消波

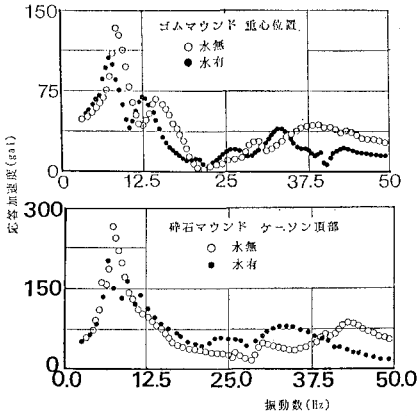


図-5 水の有無による共振曲線の違い

表-5 共振振動数と応答加速度倍率

マウンド種類		ゴムマウンド		砕石マウンド	
入力加速度		50 gal	100 gal	50 gal	100 gal
共振振動数 (Hz)	水 無	8.5	7.0	7.0	7.0
	水 有	7.5	6.0	6.5	6.5
応答加速度倍率	水 無	4.2	3.8	5.3	3.9
	水 有	3.2	2.8	4.0	2.8

ブロックの有無によらず共振振動数・応答加速度はほとんど同一の値を示している。以上のことから、消波ブロックには、加速度の応答を抑制する効果がありませんと考えられる。

3.3 ケーソンの滑动特性

ケーソンの重心位置の応答加速度 (A1-X), 変位 (D1), 入力加速度 (A10-X) の波形を図-7 に示す。入力加速度および加振振動数は 400 gal, 5 Hz である。重心位置の加速度波形にはケーソンの滑动現象を示す山の潰れた波形が現われている。ケーソンの側面に水がある場合は水の無い場合と比較して応答加速度は小さく、加速度が負の部分が正の部分より山潰れの幅が広い。これは、「水有」が「水無」より滑动しやすく、また残留変位が大きくなることを示している。重心の加速度波形の振動数特性を調べるため、加振方向成分と鉛直方向成分のフーリエ・スペクトルを図-7 に示す。加振方向のスペクトルには、5, 10, 15 Hz, 鉛直方向には 5, 15 Hz にピークが存在する。特に、鉛直方向の 15 Hz の応答値は入力加速度の約 25% の 100 gal の値を示し、この加速度が一方への変位の原因と考えられる²⁾。

ケーソンとマウンドとの相対変位量を把握するため、入力正弦波 1 波あたりの残留変位量を図-8 に示す。これより、次のことが言える。1) 消波ブロックが無い場合、「水有」が「水無」より残留変位量大きい。2) 水の有無にかかわらず、「消波ブロック有」が「消波ブロック無」より残留変位量大きい。

3.4 動水圧

ケーソンに作用する動水圧の特性を把握するため、ゴムマウンド、加振振動数 5 Hz、で入力加速度を 30 gal から 300 gal に段階的に変化させる実験を行った。その結果を図-9 に示す。図中の破線は Westergaard の近似式の K (震度) に、重心の応答加速度を代入して求めた水圧計 P3 の位置の値である。これより、ケーソン側面

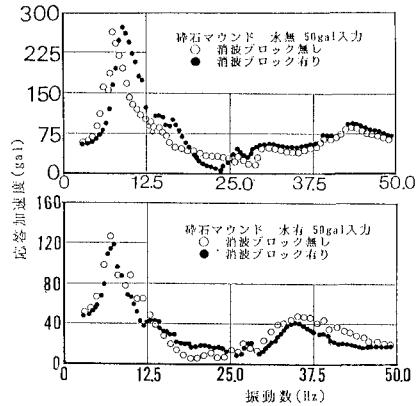


図-6 消波ブロックの有無による共振曲線の違い

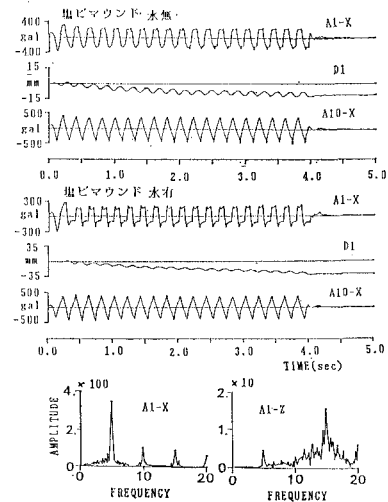


図-7 応答加速度・変位時刻歴と応答スペクトル

に発生する動水圧はケーソンの応答加速度に比例していることがわかるが、実験値は計算値の 4 割程度となっている。次に、共振実験の共振点と破壊実験における滑动時の動水圧分布を図-10 に示す。破線は図-9 と同様、Westergaard の近似式より求めた計算式である。共振点の分布ではやはり実験値が計算値の 3 割程度であるが、滑动時の分布はほぼ同じ値となっている。

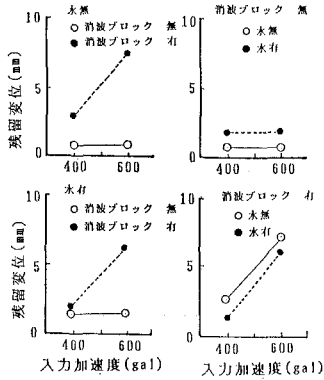


図-8 正弦波1波あたりの残留変位量

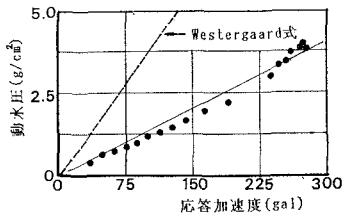


図-9 加速度レベルによる動水圧 (水圧計 P3)

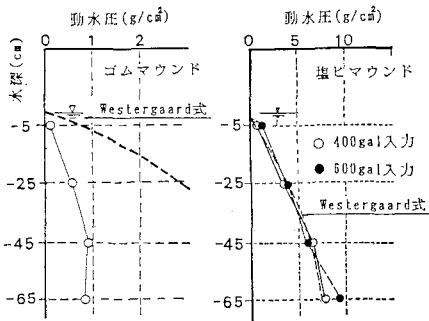


図-10 共振時と滑動時の動水圧分布

図-11に、消波ブロックで被覆したケーソンの前・背面の動水圧の波形を示す。正の最大値は「消波ブロックの有る面」が約半分になっている。

3.5 消波ブロック圧

消波ブロックがケーソンに作用する力(消波ブロック圧)を計測するため、図-4に示したように塩ピ板を介して荷重計により消波ブロック圧を計測した。図-12はケーソン重心位置での応答加速度と消波ブロック圧の共振曲線を併記したもので、図-13は応答加速度と消波ブロック圧の相関を示したものである。これより、消波ブロック圧はケーソンの応答加速度にほぼ比例していることがわかる。

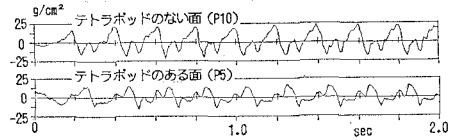


図-11 消波ブロック被覆ケーソンの前背面の動水圧

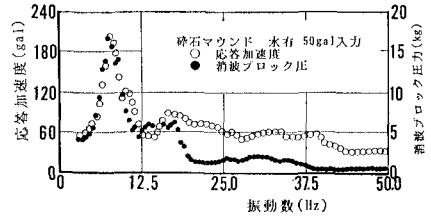


図-12 重心加速度と消波ブロック圧の共振曲線

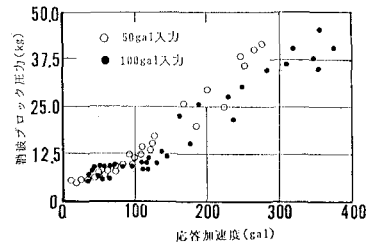


図-13 重心加速度と消波ブロック圧の相関

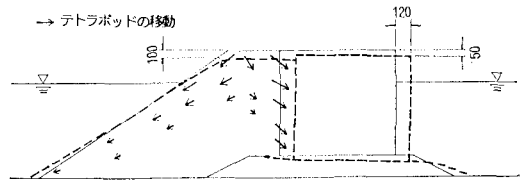


図-14 破壊パターン (正弦波 800 gal, 5 Hz, 10 波入力)

3.6 模型の破壊形状

図-14に正弦波 5 Hz, 800 gal, 10 波加振後の模型の変形図を示す。主な変形は、ケーソンの水平変位が 12 cm, 鉛直変位(沈下)が 5 cm, また消波ブロック天の沈下が約 10 cm で、消波ブロックの滑落やすべりは見られなかった。消波ブロックは、振動に対して致命的な変形を起こしにくい構造体であると思われる。

4. 結論

本研究では、混成堤の地震時挙動および破壊パターンを把握するため大型振動実験を実施し、以下の結論が得られた。

- i) ケーソン側面に水有の場合、水無の場合と比較

して共振振動数，応答加速度は小さくなる。

- ii) ケーソンの応答加速度は消波ブロックの有無によって変化せず，消波ブロックには加速度応答を抑制する効果はない。また，消波ブロック圧はケーソンの応答加速度に依存している。
- iii) ケーソンの滑動による変位量は，水および消波ブロックが有る場合，それらが無い場合と比較して増加する。
- iv) ケーソン壁面に発生する動水圧はケーソンの応答加速度に比例する。ケーソンが滑動していない状態での動水圧は，Westergaard 式による計算値より小さい値を示す。また，消波ブロックで被覆してある面はない面に比べて発生する動水圧は約半

分である。

- v) 消波ブロックは 800 gal の正弦波加振でも滑落はほとんど見られず，高さの 1 割程度の沈下が見られるだけである。

今後は，各材料の特性に基づいてケーソンに働く外力を把握し，ケーソンの挙動について検討していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 上部達生・土田 肇・倉田栄一：大型混成式防波堤の強震記録に基づく水-構造物連成系の地震応答解析，港湾技研報告，第 22 卷，第 2 号，pp. 289~326, 1983. 6.
- 2) 栗本雅裕・松田敦夫：模型振動実験による剛体の滑動量評価について，第 7 回日本地震工学ソソポジウム講演集，pp. 871~876, 1986.