

防波護岸の地震時変形予測に関する検討

—その1 微小ひずみ時における消波ブロック集合体の変形特性—

金谷 守¹・河井 正²・茂呂吉司³

馬場崎亮一⁴・鈴木俊一⁵・立石章⁶

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

²正会員 工修 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

³正会員 (財)原子力発電技術機構 耐震技術センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 4-3-13)

⁴正会員 (株)竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1)

⁵正会員 大成建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

⁶正会員 工修 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

前面に消波工を有するケーソンタイプの防波護岸が地震力を受けたときの変形量を予測するためには、消波工の動的物性が重要となる。本報告では、消波ブロック集合体の微小ひずみ時における変形特性について検討した。試験には、繰返し三軸試験装置ならびに遠心载荷装置が用いられ、それぞれの試験によって求められた微小ひずみ時の変形係数の拘束圧依存性などについて整理した。消波ブロックという材料形状の特徴を反映して試験結果にはばらつきが認められたものの、消波ブロック集合体も、砂、粘土といった土質材料と同様に、変形係数の拘束圧依存性があることが判明し、試験結果に基づいて変形係数と拘束圧の関係式を提案した。

Key Words : seawall, earthquake, armor unit, small strain, deformation characteristics

1. はじめに

波浪条件の厳しい外洋に面した海域に、発電施設などの重要構造物を有する沖合人工島を建設する場合、高潮や波浪等から敷地を防護する防波護岸の耐波・耐震性は、背後に設けられる諸施設の健全性に重要な影響を及ぼすものと考えられる。

この場合、防波護岸に要求される機能のうち最も重要なものは越波防止機能であり、波浪および地震によりその機能が損なわれることがないことを確認しなければならない。特に、地震を受けて変形を生じた防波護岸が、引き続き大きな波浪に対して、所定の越波防止機能を維持できるかを検討するためには、地震による防波護岸の変形量を可能な限り高精度で予測する必要がある¹⁾。

本研究で対象とする防波護岸の構造上の最大の特徴は、ケーソン全面が消波工で覆われている点であり、このような構造を有する防波護岸の地震時変形を予測するためには、適切な消波工のモデル化、物性評価が重要となる。本研究では、ケーソン前面に消波工を有する防波護岸の地震時変形を有限要素法(FEM)によって解析することを目的として、解析に必要な消波工の基本物性のうち、微小ひずみ時の変形係数について数種類の実験が行われた結果をまとめている。

2. 繰返し三軸試験装置による実験

金谷ら^{2) 3)}は、消波ブロックのような複雑な形状をした材料の集合体の動的変形特性を調べる目的で、大きさの異なる2種類の消波ブロック模型を用いた繰返し三軸試験を行った。

(1) 実験方法

実験には、図-1 および表-1 に示す基本寸法、物性を持つ2種類のモルタル製消波ブロック模型(MODEL-1:LARGE,MODEL-2:SMALL)を使用した。

MODEL-1の実験では、図-2 に示す直径30cm、高さ40cmの円筒供試体を有する大型三軸試験装置を用い、29.4kPa,49.0kPa,88.2kPaの3通りの拘束圧をサクションによって与えた。供試体は、乾燥状態のブロック模型を可能な限りかみ合わせがよくなるように詰め込んだ密な状態(DENSE)と、それよりかみ合わせが悪い緩い状態(LOOSE)の2通りとした。表-2 にそれぞれの供試体の密度条件を示している。なお、供試体上端3-4cmの部分には、剛板载荷となる鉛直荷重が供試体にできるだけ均等に载荷されるよう、粒径2-4.76mmの礫を目合いの細かいシートを介して敷き詰めた。軸変位の計測には非接触型変位計を用いたが、計測値に対する bedding error を極力回避するため、供試体側面の上下2カ所に速硬性エポキシ樹脂系充填剤を貼り、側面の凹凸をならし

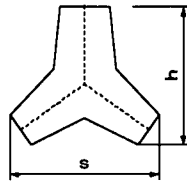


図-1 消波ブロック模型の概念図

表-1 繰返し三軸試験に用いた消波ブロック 模型の基本物性と寸法

MODEL	WEIGHT	SP. GRAVITY	DIMENSION	
	W (N)	Gs	S (mm)	h (mm)
MODEL-1 (LARGE)	0.44	2.053	50	42
MODEL-2 (SMALL)	0.08	2.048	29	25

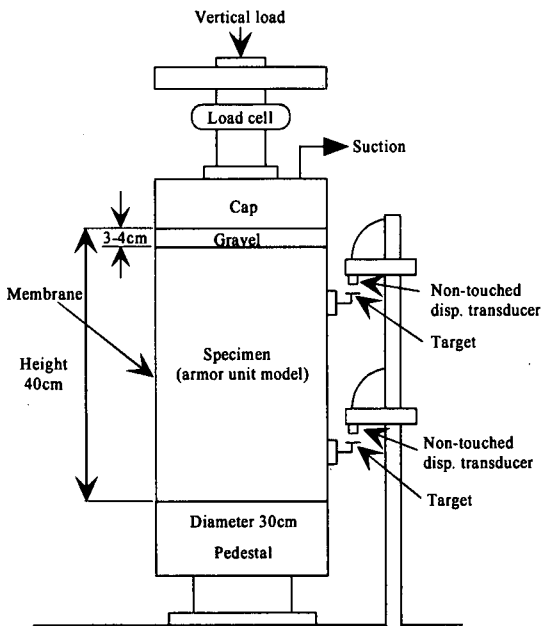


図-2 大型三軸試験の概要

た後、その上にターゲットを貼りつけることによって2点間の相対変位を測定し、軸ひずみを求めた。軸変位は左右2カ所で測定し、平均値を代表値とした。鉛直荷重はロードセルにより測定した。繰返し振動数は $f=0.1\text{Hz}$ とし、所定の繰返し荷重を10波載荷し、10波目の値を代表値とした。一方、

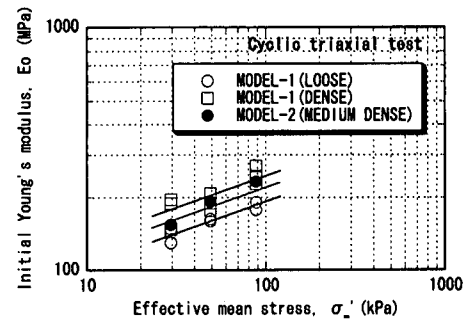


図-3 繰返し三軸試験による E_o と拘束圧の関係

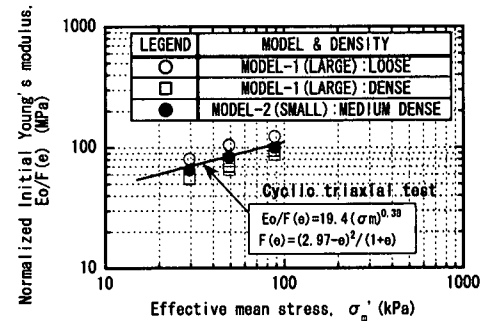


図-4 繰返し三軸試験による $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係

MODEL-2 の試験では、直径 10cm、高さ 20cm の中型繰返し三軸試験装置を用いた。密度条件は、表-2 に示すように MODEL-1 の中間的な値(MEDIUM DENSE)とした。実験方法は、大型三軸試験と同様である。

(2) 実験結果

図-3 に、微小ひずみでの初期変形係数 E_o と拘束圧 σ'_m の関係を示している。拘束圧の増加に伴って E_o は増加し、密度が大きいほど同じ拘束圧での E_o が大きくなる傾向が認められる。これらの傾向は、砂や粘性土など通常の土質材料と同様である。図-4 には、 E_o を $F(e)=(2.97-e)^2/(1+e)$ で正規化した値 $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係を示した。ばらつきは大きいものの、概ね下記の関係で表現できるようである。なお、式(1)中の平均有効応力の単位は、kPa である。

$$E_o = 19.4 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma'_m)^{0.38} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

表-2 繰返し三軸試験での基本的な実験条件

MODEL	TEST DEVICE	DENSITY	DRY DENSITY	VOID RATIO	POROSITY
			$\rho_d \text{ (kN/m}^3\text{)}$	e	n
MODEL-1 (LARGE)	Large triaxial $\phi=30\text{cm}$ $H=40\text{cm}$	LOOSE	9.34-10.70	0.880-1.154	0.47-0.54
		DENSE	11.15-11.66	0.725-0.804	0.42-0.45
MODEL-2 (SMALL)	Middle triaxial $\phi=10\text{cm}$ $H=20\text{cm}$	MEDIUM DENSE	10.67-10.75	0.867-0.882	0.46-0.47

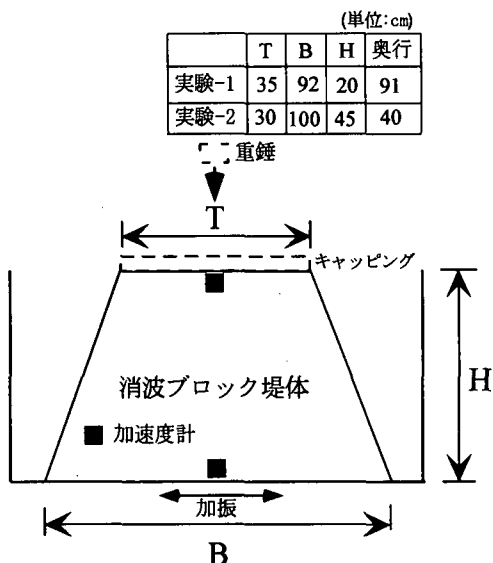


図-5 遠心载荷実験の概要と堤体寸法

3. 遠心载荷装置による実験

遠心载荷装置による実験は、2 種類の実験 (TEST-1, TEST-2) が行われた。

(1) 実験方法

TEST-1: 河井ら⁴⁾ は、の遠心载荷装置 (有効半径 約 9m) を用い、土槽内に図-5 に示す寸法の消波ブロック模型の堤体を作成し、10G, 30G, 45G の遠心加速度場で水平方向の微小 step 波加振による自由振動試験を行った。応答の計測では、所定のブロック模型に加速度計を埋め込む方法を採用した。自由振動試験から得られる堤体の固有振動数から、 $G = \rho (4\pi H)^2$ (G : せん断剛性、 ρ : 堤体密度、 f : 固有振動数、 H : 堤体高さ) より微小ひずみでのせん断剛性を求めた。

TEST-2: (財)原子力発電技術機構 (NUPEC)⁵⁾ では、竹中技術研究所の遠心载荷装置 (有効半径 6.5m) を用い、図-5 に示すような消波ブロック堤体に、57G, 77G, 100G の遠心加速度場で土槽底面から微小の水平加振を与え、堤体上下端の加速度波形の立ち上がり時間差と加速度計間の距離から V_s を求め、 $G = \rho V_s^2$ から微小ひずみでのせん断剛性を求めた。

表-3 及び表-4 に、それぞれの実験に用いた消波ブロックの基本的物性、寸法ならびに実験条件を示している。

(2) 実験結果

図-6 に、それぞれの実験から求められた初期せん断剛性 G_o と上載圧 (σ_v) の関係を示す。なお、ここでは上載圧として、堤体中心線上中央部において 1 次元場として求めた値を代表値としている。遠心载荷試験によっても、繰返し三軸試験結果と同様に、①上載圧の増加に伴ってせん断剛性が増加する、②密度が高いほど同じ上載圧でのせん断

表-3 遠心载荷実験に用いた消波ブロック模型の基本物性と寸法

	WEIGHT	SP. GRAVITY	DIMENSION	
	W (N)	Gs	S (mm)	h (mm)
TEST-1	0.44	2.053	50	42
TEST-2	0.56	2.300	60	50

表-4 遠心载荷実験での基本的な実験条件

TEST- No.	CENTRIFUGAL ACC.	DRY DENSITY	VOID RATIO	POROSITY
	(G)	ρ_d (kN/m^3)	e	n
TEST-1	10	11.65	0.711	0.42
	30			
	45			
TEST-2	57	11.270	0.948	0.49
	77			
	100			

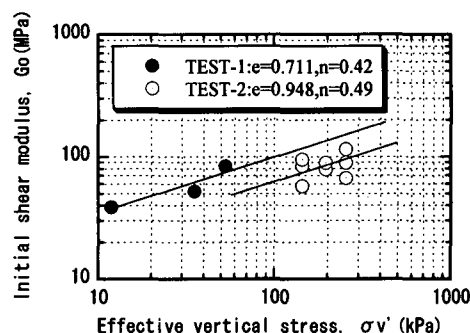


図-6 遠心载荷試験による G_o と上載圧の関係
剛性が大きくなる、傾向が見て取れる。

4. 変形係数に関する統一的定式化の試み

これまでの結果より、繰返し三軸試験、遠心载荷試験による消波ブロック集合体の微小ひずみ時における変形係数と拘束圧の関係には類似した傾向があることがわかった。以下では、これらの実験結果から、微小ひずみ時における変形係数と拘束圧の関係に関する統一的な定式化を試みる。

弾性論に従えば、ヤング係数 E とせん断剛性 G の関係は、ポアソン比 ν を介して、 $E = 2(1 + \nu)G$ となる。また、静止土圧係数 K_o は、 $K_o = \nu / (1 - \nu)$ で表される。そこで、遠心载荷試験による G_o および上載圧に対して、 ν を 0.15-0.43 の範囲でいくつか変化させて E_o ならびに拘束圧 (σ_m) を計算で求め、 $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係について、繰返し三軸試験の結果と同一図面上にプロットしてみたのが図-7 である。両対数上にプロットしていることを考慮すると、データのばらつきは大きい、ポアソン比の違いによるばらつきの程度は、繰返し三軸試験結果のばらつきの程度と同程度であるといえる。

一方、遠心载荷試験の内 TEST-2 では、図-5 に模

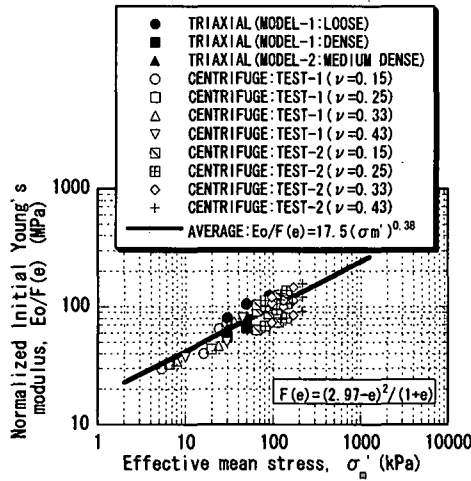


図-7 繰返し三軸試験と遠心載荷試験による $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係の比較

式的に示すように、ポアソン比を調べる目的で、 V_s の測定に加えて V_p の測定も行われている。実験では、消波ブロック堤体の上面に硬質アルミ製の載荷版と石膏によるキャッピングを施し、重錘を上空から落下させることにより堤体内に粗密波を発生させる方法が採られた。ポアソン比は、得られた V_p と V_s から、 $\nu = \{(V_p/V_s)^2 - 2\} / 2 \{(V_p/V_s)^2 - 1\}$ より求めている。実験による ν を遠心加速度に対してプロットしたものを図-8 に示す。これによると、平均的なポアソン比は、 $\nu = 0.41$ となる。松本ら⁶⁾は、粗粒材料(粒径 0.42-63.5mm)の繰返しせん断試験から、微小ひずみ時のポアソン比が 0.4 程度であることを報告しているが、今回の結果はそれと類似した値になっている。そこで、ポアソン比を $\nu = 0.41$ として、繰返し三軸試験と遠心載荷試験による $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係をプロットしたのが図-9 である。また、これらのデータの回帰によって得られる関係式に対して、さらに、実際に乱積みされた消波工の空隙率 n が概ね $n=0.5$ 程度になる実績を考慮して $e=1.0$ として $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係式を求めたのが図-9 の実線であり、次式で表現される。

$$E_0 = 36.8(\sigma'_m)^{0.37} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

さらに式(2)を、初期せん断剛性 G_0 で表すと次式になる。

$$G_0 = 13.1(\sigma'_m)^{0.37} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

平均有効応力の単位は、kPa である。

5. まとめ

本研究では、ケーソン前面に消波工を有する防波護岸の地震時変形を、有限要素法により解析的に予測することを目的として、解析に必要な消波工の動的物性のうち、微小ひずみ時の変形係数に着目し、

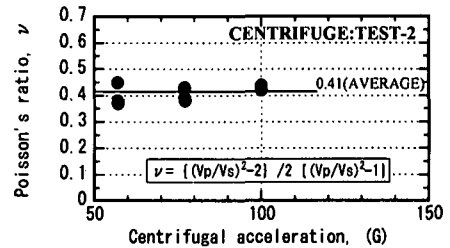


図-8 遠心載荷試験によるポアソン比

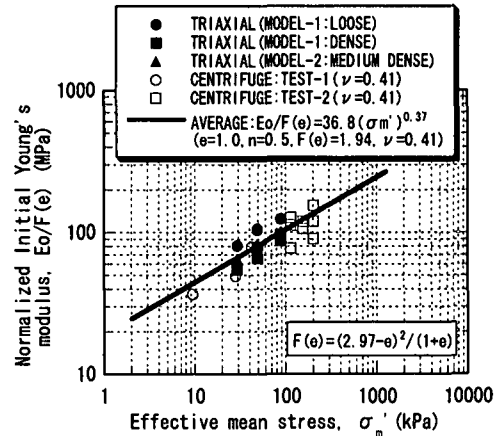


図-9 消波ブロック集合体の $E_o/F(e)$ と拘束圧の関係 (ポアソン比 0.41)

繰返し三軸試験装置による実験や、遠心載荷装置による消波ブロック堤体の振動実験を行い、変形係数と拘束圧の関数に関する統一的な定式化を試みた。関連論文・その2⁷⁾では、この関係式を用いて、遠心載荷装置による防波護岸の振動実験の数値シミュレーションを行った結果について示す。

参考文献

- 1) (社)土木学会:原子力発電所の立地多様化技術,土木学会原子力土木委員会,1996.
- 2) 金谷守,河井正,栃木均,石川博之,武田智吉:繰返し三軸試験装置による消波ブロック模型の動的変形特性の検討,第34回地盤工学研究発表会,pp.133-134,1999.
- 3) 金谷守,河井正,栃木均,石川博之,武田智吉:消波ブロックの非線形性を考慮した防波護岸の地震時変形解析,第54回土木学会年次学術講演会,第III部門,pp.330-331,1999.
- 4) 河井正,金谷守,田中幸久,石川博之,武田智吉:防波護岸の地震時挙動に関する研究・その1-遠心力載荷模型実験による防波護岸の地震時挙動の検討-,第24回地震工学研究発表会論文集,pp.705-708,1997.
- 5) (財)原子力発電技術機構:平成10年度高耐震構造立地技術確証試験報告書,1999.
- 6) 松本徳久,安田成夫,大久保雅彦:粗粒材料の動的剛性率,減衰比及びポアソン比,土木技術資料,28-7,pp.382-387,1986.
- 7) 鈴木俊一,金谷守,立石章,馬場崎亮一,茂呂吉司,蟹江俊仁:防波護岸の地震時変形に関する検討・その2-消波ブロックの動的変形特性を考慮した遠心載荷模型振動実験のシミュレーション解析-,第26回地震工学研究発表会論文集,投稿中.