

ブロック積み係船岸の耐震性検討 に関する基礎的研究

BASIC RESEARCH ABOUT EARTHQUAKE RESISTANCE OF MOORING WHARF PILING BLOCKS

前田聡¹・水田洋司²・野中哲也³・菅付紘一⁴・藤田浩一⁵
Satoshi MAEDA, Yoji MIZUTA, Tetsuya NONAKA,
Koichi SUGATSUKE, Koichi FUJITA

¹正会員 博(工) 株式会社五省コンサルタント (〒812-0029 福岡市博多区古門戸町1番1号)

²フェロー 工博 九州産業大学 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

³正会員 博(工) 株式会社地震工学研究開発センター (〒889-2155 宮崎市学園木花台西1-1)

⁴工修 株式会社地震工学研究開発センター (同上)

⁵正会員 株式会社五省コンサルタント (〒812-0029 福岡市博多区古門戸町1番1号)

In a high seismic resistance quay wall, displacements are usually calculated by two-dimensional FLIP¹⁾ analysis, and seismic performance for the quay is evaluated. In the case of a heaping block quay, displacements are calculated as one block which unified quay, but it is difficult to evaluate the relative displacement of each block. Therefore, vibration experiment and analyses have been carried out to examine basic vibrational properties of a heaping block structure, each block is modeled by fiber model, and calculation of relative displacement of each block is attempted. The fiber model is a model having the results in analysis of the steel structures such as bridges. As a result, the behaviors of each block are elucidated by the method of this study.

Key Words : Seismic analysis, vibration experiment, fiber, friction,

1. はじめに

港湾施設の設計体系が仕様規定型から性能規定型へ移行するのに伴い、港湾施設の性能照査方法として信頼性設計法が導入された。特に耐震強化施設では、レベル2地震動作用後の要求性能に応じて、岸壁の変形量の限界値を規定し、数値解析の結果が範囲内に留まるか否かの検討を行う。数値解析法としては、重力式係船岸などの港湾施設に対して適用が確認されているFLIPがある。

一方、FLIPを用いて図-1に示すような直立消波ブロックと方塊ブロックからなる重力式岸壁の変形量を算定する場合は、1つの一体化したブロックとして変形量を算定するのが現状である。そのため、各ブロックの相対的な変形量を評価するのは困難な状況であり、地震動によるブロック間の変位や、ブロックの乗り上げ、滑落などの限界状態を正確に評価できているとはいえない。

そこで、本研究では、ブロック積み係船岸の個々のブロックの挙動に着目した耐震性能の検討として、模型実験と模型解析、さらに、その結果を反映させた実構造解析を行った。まず、ブロック積み構造の基本的な振動特性を把握するために、15分の1ス

ケールの模型を用いた振動実験を行い、さらに、その模型実験を再現する同定化解析を行うことで、実構造の解析業務において必要なブロック間の接触特性等を決定した。

実構造解析には、橋梁等の鋼構造物の解析において実績のあるファイバーモデルを用いて、各ブロックの挙動を表現することを試みた。なお、各ブロックには、FLIP解析より得られた境界上(ブロック下端や背後)の応答加速度、応答変位を入力し、最終的な応答結果として、ブロック間の変形量を算出した。

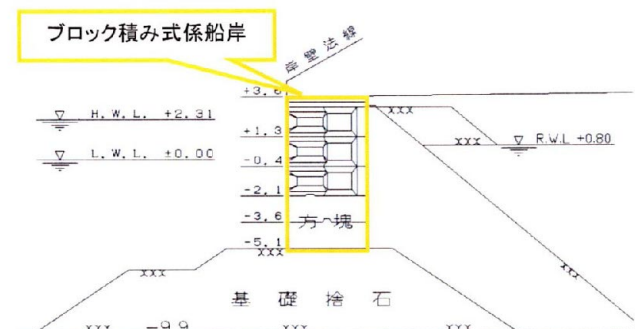


図-1 ブロック積み式係船岸

2. 耐震性検討方法の概要

本研究では図-2に示す流れで、耐震性の検討方法の提案を試みた。まず、対象岸壁の一部を単純な境界条件でモデル化し、振動台実験を行い、模型の振動特性を把握する。その特性を基に、模型実験を再現する解析（同定化）を行い、ブロック間接触部の特性値を算出する。次に、ブロックを一体化して得られたブロックの境界条件（応答加速度や応答変位）、ならびに実験から得られた特性値を提案モデルに適用させ、実構造物の数値解析を行った。

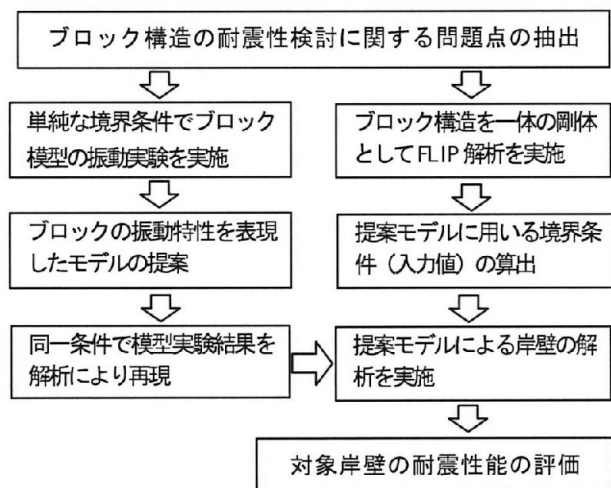


図-2 ブロック構造の耐震性検討方法のフロー

3. 解析モデルおよび解析法

現行のFLIP解析においては、ブロック積み岸壁は一体化した剛体構造物としてモデル化する。そのため、地盤の液状化現象や岸壁に作用する土圧などによる岸壁全体の変位量の算出はできるが、多段積みブロックの個々の挙動、つまり、ブロックのずれを防止するホゾのせん断耐力の評価、ならびに浮き上がりによるホゾを乗り越え、乗り越え、滑落などの現象などは、十分に評価できていないことになる。

そこで、本研究では、現行のFLIPに加えて、ファイバーモデルを併用することにより、ブロック積み岸壁の耐震性検討方法について一提案を試みた。

図-3に、本提案モデルを示す。まず、2次元FLIP解析において、ブロック積み岸壁を一体の剛体構造物と見なし、ブロック背後および下端の応答加速度および変位を算定する。その際、ブロック1体あたり少なくとも2点以上の応答点となるように分解能を設定し、これら応答値を、提案モデルの入力値とした。

提案する解析モデルは、ブロック間のコンクリート摩擦抵抗を考慮するモデルと、ホゾの乗り越えを表現できるモデル化とする。ブロックは、鋼部材の

はり要素でモデル化し、ブロック内に質量を分散させている。さらに、アニメーション化を考慮するため、構造軸線上にファイバー断面を施している。

図-4に接触面のモデル化を示す。まず、上下ブロック間の滑動作用力がコンクリート静摩擦力以上となり、ブロックがホゾ部にある余裕幅 15mm を移動して上下のホゾが接触する。続いて、傾斜幅 55mm で設定した乗り越え水平力を超えた場合にホゾへの乗り越えと判定する。

また、図-5にホゾ部詳細図を、図-6に乗り越え水平力の算出方法を示しており、ホゾのせん断耐力はコンクリートせん断耐力と乗り越え水平抵抗力の小さい方で設定する。ホゾ部コンクリートのブロック一体当りのせん断耐力は式(1)より算出する。 τ_c については設計基準強度 $\sigma_{ck} = 18\text{N/mm}^2$ の平均せん断応力度とする。

$$Su = \tau_c \times Ac \quad (1)$$

ここに、

τ_c : 平均せん断応力度 (N/mm²)

Ac : コンクリートせん断面積 (mm²)

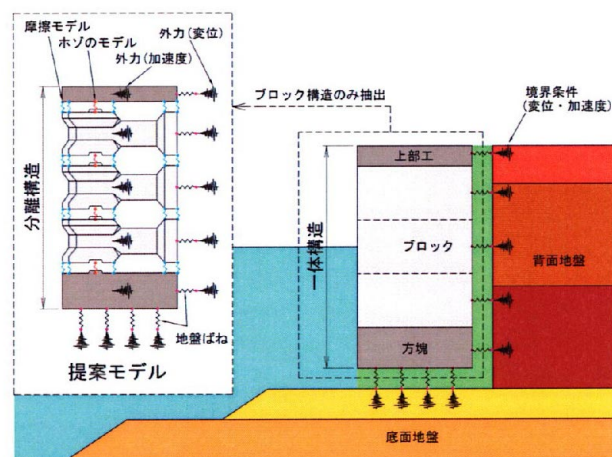


図-3 提案モデル

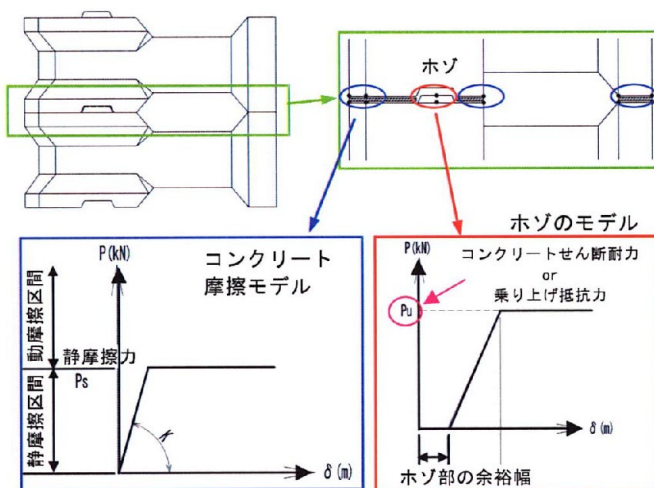


図-4 ブロック間のモデル化

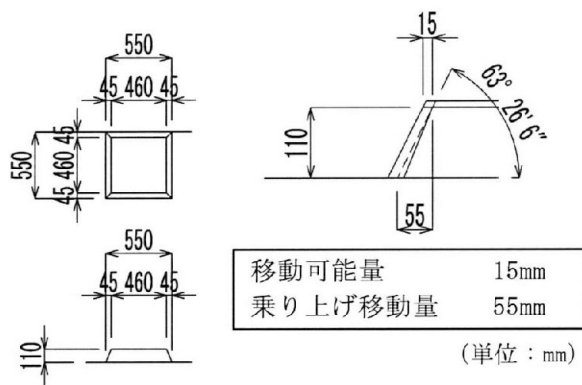


図-5 ホゾ部詳細図

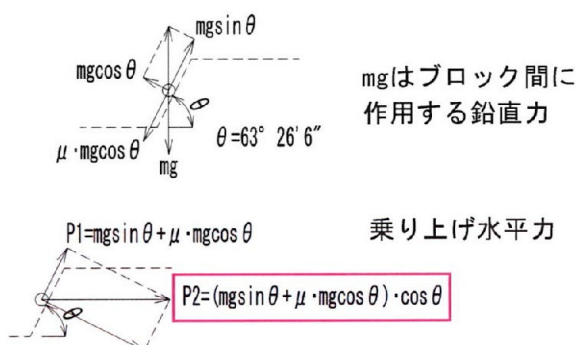


図-6 乗り上げ水平力の算出方法

4. 模型実験

(1) 実験方法²⁾

図-7 に今回対象とした直立消波ブロックの概要図を、表-1 に実構造物と模型の諸元を示す。模型実験には、振動台性能から積載可能最大の 1/15 縮尺の模型を使用し、高さ方向に 3 段積み、法線方向に 7 列の配置とした。設置方法としては、固定板により背面と側面から固定する構造とし、模型と固定板の間には緩衝材（ゴム製）を入れている。実験方法は、実験模型に振動台（IMV 社製：DS-2000-15L）による正弦波および模擬地震波による加振を行う方法である。振動台に入力する模擬地震波は、2 次元 FLIP 解析から得られた境界上（ブロック背後や下端）の応答加速度を使用した。計測方法は、模型の振動特性を把握するため、模型に加速度計

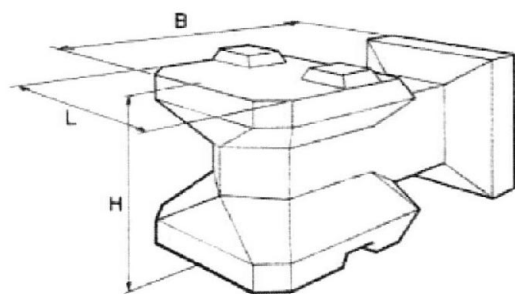


図-7 直立消波ブロック

表-1 模型寸法

スケール(辺比)			実構造物 (1/1)			模型 (1/15)		
備考			ブロック	上部工	底板方塊	ブロック	上部工	底板方塊
奥行き	B	m	4.500	4.500	4.500	0.300	0.300	0.300
幅	L	m	2.000	2.000	2.000	0.133	0.133	0.133
高さ	H	m	1.700	0.500	0.850	0.113	0.033	0.057
体積	V	m ³	8.862	4.500	7.650	0.003	0.001	0.002
重量	W	kN	204	104	176	0.060	0.031	0.052

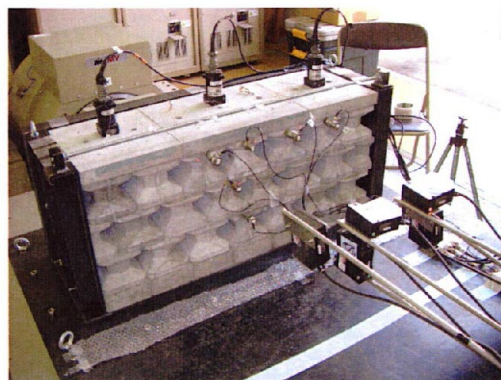


図-8 実験の模型および計測器

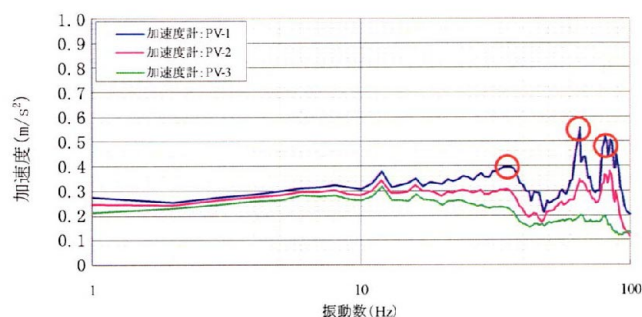


図-9 水平方向加速度共振曲線

(PV-85：RION 社製)を設置して計測する方法である。図-8 に実験の模型および計測器を示す。

(2) 模型の振動特性

模型の振動特性は、振動台による正弦波加振を行い、抽出した応答加速度から算出する。図-9 に水平方向加速度共振曲線を示す。入力加速度振幅は 0.2 m/s^2 とし、水平方向加振を 1~100Hz まで 1Hz 刻みで加振を行った。この結果から模型の固有振動数は 35, 65, 80Hz 付近で卓越することがわかった。

(3) 模擬地震波

実験に使用する模擬地震波は、2 次元 FLIP 解析より得られたブロック背後下端の応答加速度を模擬地震波として使用した。図-10 に FLIP 解析より抽出した模擬地震波形とそのパワースペクトルを示す。模擬地震波の最大加速度は 2.57 m/s^2 、卓越振動数は 6.5Hz と 7.5Hz 付近となっている。模擬地震波の時間軸は、振動実験の結果より模型の卓越振動数が

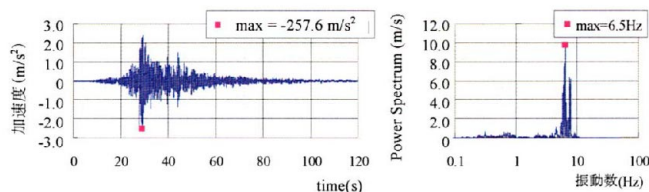


図-10 模擬地震波形とパワースペクトル

65Hz 付近を含んでいることから、模擬地震波の卓越振動数が 65Hz となるように時間軸を圧縮した。さらに、入力加速度振幅は最大が 0.5m/s^2 となるように振幅調整して加振した³⁾。

(4) 実験と解析の比較

図-11 に正弦波加振を行った時の実験と解析の共振曲線を示す。解析も実験と同様に 1~100Hz の正弦波加振を行った。応答の抽出位置は、模型の上部中央に設置した加速度計から抽出した。図-11 の比較結果から、模型の卓越振動数は 35, 65, 80Hz 付近となり、実験と提案するモデル化の結果が良く一致することがわかる。その一方で、従来モデル（ブロックを一体化）の共振曲線は応答加速度が入力加速度と同じく 0.2m/s^2 と一定の応答となっている。これは、多段積みの構造物を一体化してモデル化していることで、ブロック間の接触特性を考慮できず、自由度を持たない質量の大きな剛体構造物となり、卓越振動数が高くなったためと考えられる。

このように、ブロック積み構造には特有の振動特性があるものの、FLIP ではこれらの特徴を表現できているとはいい難く、場合によっては変形量を過大もしくは過小評価することもあると考えられる。

例えば、多段積みの構造物の地震動の応答現象には、構造物と地震波形の持つ卓越振動数が一致する場合に起こる共振現象があり、想定以上の応答を示すことがある。その一方、今回提案する方法によれば、構造物の振動特性を表現することができ、地震波形の特性の違いによる構造物に及ぼす影響も検討することができるものと考えられる。

次に、実験と解析との共振曲線が一致する時のモデル化の一例として、図-12 に、模型に模擬地震波による加振を行った時の実験値と提案モデルの解析値の応答加速度とそのパワースペクトル比較して示した。これより、実験と解析の加速度応答とそのパ

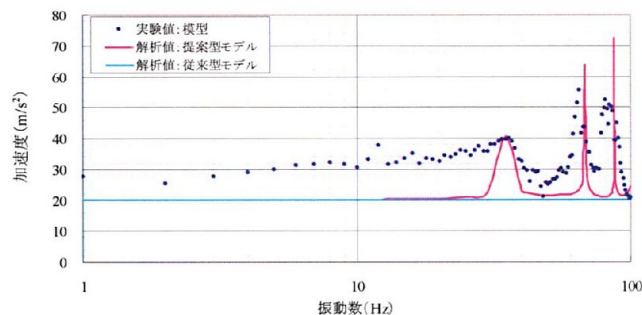
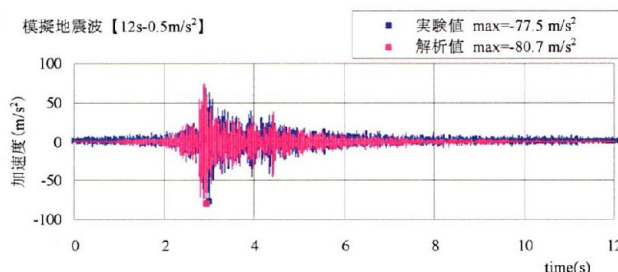
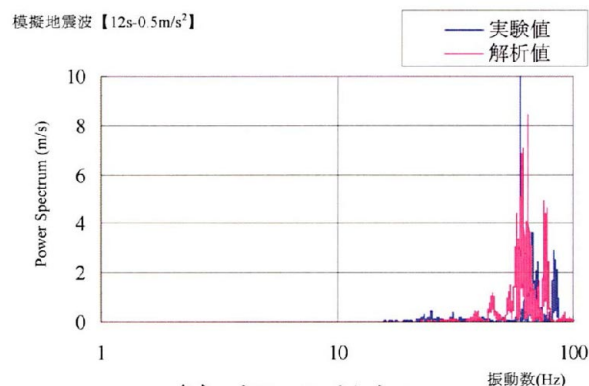


図-11 共振曲線の比較



(a) 加速度応答波形



(b) パワースペクトル

図-12 加速度応答波形とパワースペクトルの比較

ワースペクトルはよく一致することが分かる。なお、入力加速度 0.5m/s^2 に対してそれぞれ 0.8m/s^2 程度の応答となっており、約 1.6 倍の応答を示した。

5. 岸壁の耐震性評価事例

(1) 対象岸壁の事前解析（境界条件の設定）

対象岸壁のブロックの境界条件を求めるため、多段積みブロックを一体化した一つのブロックとして FLIP 解析を実施する。解析より得られるブロックと地盤の境界位置での応答加速度および応答変位の波形を本提案モデルに用いる。なお、ブロック 1 体あたり少なくとも 2 点以上の応答点となるように分解能を設定した。

(2) ブロック積み構造のモデル化

本研究で対象としたブロック積み岸壁は、方塊ブロック 2 段、直立消波ブロック 3 段、上部工 1 段からなり、岸壁法線方向にブロック 3 列分をモデル化した。（参照 図-1）

ブロック積み構造の境界条件および入力波形の位置と応答結果の抽出位置を、図-13 に示す。ブロック自体の振動および慣性力を考慮するため、境界での入力加速度を各ブロックに作用させる。また、液状化等による各ブロックの変位を考慮するため、ブロックと地盤との境界位置に変位波形を入力させる。これらの入力加速度および入力変位波形は、前述した FLIP 解析によって得られる波形である。

底面及び背面地盤のモデル化は、圧縮抵抗のみ

考慮し、引張抵抗には働かない弾性バネとしてモデル化する。図-14 に地盤バネのモデル化を示す。地盤の弾性係数については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾に記載の式(2)、(3)により算出する。弾性地盤バネ値 k は、動的変形係数 E_d より、 $k = E_d/0.3$ として算出し、底面のせん断バネ値については鉛直バネの $1/3$ とする。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$E_0 = 2(1+\nu)G_0 \quad (3)$$

ここに、

G_0 : せん断弾性係数 (kN/m²)

ρ : 密度 (t/m³)

V_s : 横波速度 (m/s)

ν : ポアソン比

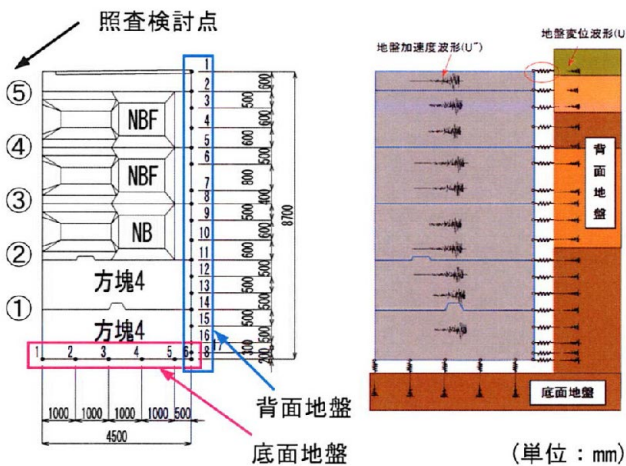


図-13 入力波形と照査検討位置

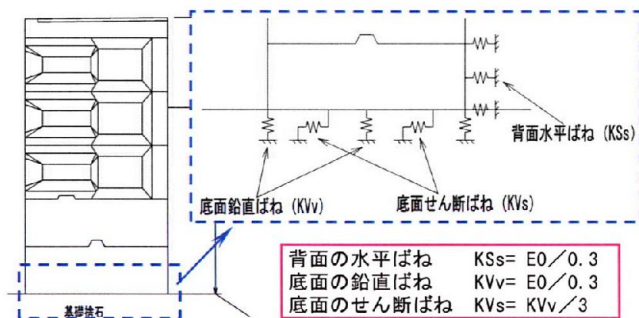


図-14 地盤バネのモデル化

(3) 実験値の適用

ブロック間のコンクリート摩擦履歴の初期剛性は、模型の実験と解析から得られた値に対して相似性を考慮して設定する。相似性は、模型と実構造物との固有振動数の関係から算出した。長さのスケールを S (p : 実構造物 / m : 模型) とすると、次元の関係から、実構造物の長さは模型の S 倍、質量は S^3 倍、剛性は S^2 倍となる。よって、式(4)より、固有振動

数は $1/\sqrt{15}$ となる。

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{S^2}{S^3}} = \sqrt{\frac{1}{S}} \quad (4)$$

ここに、

ω : 固有円振動数 (rad/sec)

この相似性については、模型と実構造サイズのモデルにそれぞれ適用し、固有値解析を行い検証した。その結果から、模型と実構造物の固有振動数は $f_p = 1/\sqrt{15} f_m$ の関係となったため、実構造解析に使用する摩擦剛性は、実験で求めた剛性を S^2 倍した値とした。これらの値を実構造モデルの各ブロック間の摩擦剛性に適用させる。

履歴モデルに使用する静摩擦係数は、模型実験を参考とした。静摩擦係数の算出方法は、重ね合わせたブロックを傾斜させて滑り出したときの傾斜角の $\tan \theta$ とする。この実験より $\mu = 0.617$ が得られたが、直立消波ブロックの設計計算⁴⁾にある $\mu = 0.5$ 以上を確保していることと設計思想及び安全側を考慮して $\mu = 0.5$ で設定した。動摩擦係数は、ホゾ部の余裕幅のみで動くことと、静摩擦に比べてかなり小さいため、動摩擦係数 $= 0$ としたバイリニア型の摩擦履歴とした。

(4) 解析結果および考察

ブロック最上部と最下部の水平変位を、図-15 に示す。これより、ブロック最上部と最下部の応答変位はそれぞれ 80mm 程度と大きく差がないことから、ブロックが一体となって水平移動しておりほとんど傾かないことが分かる。

また、波形が全体的にマイナス側へ変位しているが、これは、事前解析となる 2 次元 FLIP の応答変位の影響によるものである。

続いて、照査検討点④（上方から 1 番目と 2 番目のブロック間）に着目して、ブロック間の応答相対変位波形を算出した結果が図-16 である。これより、ブロック間の相対変位は、最大 20mm 程度となっていることが分かる。ここで、ホゾの余裕幅 15mm であったことから、作用力が静摩擦力以上となり、ブロックが移動し、ホゾに衝突していることが確認できる。ただし、ホゾの乗り上げ変位は 70mm 以上であるため、ブロックが乗り上げるまでには至らなかった。

さらに、図-17 には、同じく照査検討点④の接触面における摩擦力（水平力）と相対変位の履歴を示す。水平力がブロック間に設定した静摩擦力を超えると変位（ブロックが移動）することになり、その変位が 15mm を越えているため、ホゾに衝突していることがこの図からも分かる。

以上から、ブロック間の滑動作用力は、静摩擦力以上となり、ブロックが移動しているものの、ブロックの乗り上げるような変位（70mm 以上）は確認されていない。

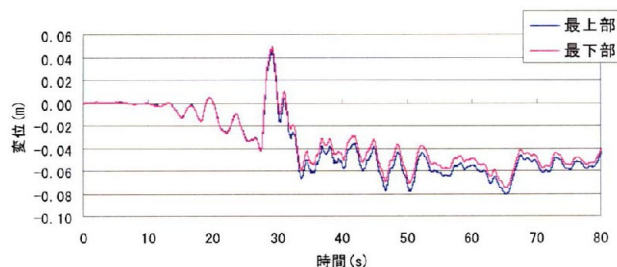


図-15 応答変位波形

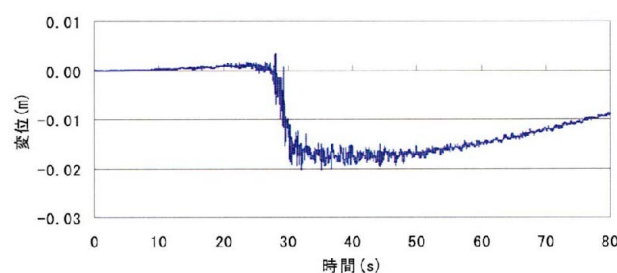


図-16 応答相対変位波形（検討点④）

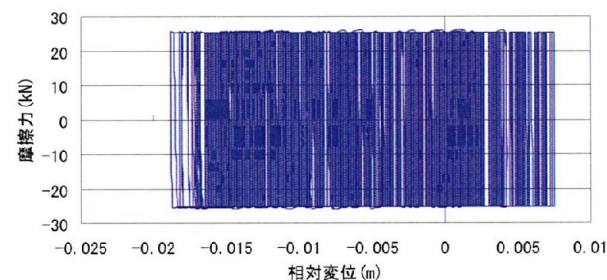


図-17 摩擦履歴（検討点④）

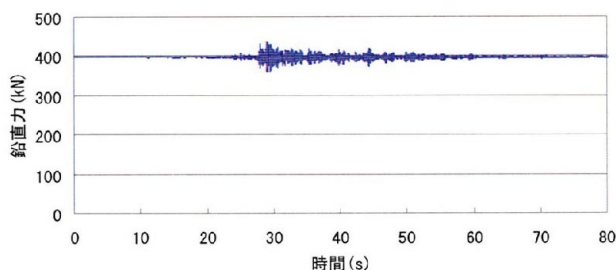


図-18 応答鉛直力（検討点⑤）

次に、ブロック自体の浮き上がりについて検討を行うために、全ブロックの鉛直方向の反力を算出した。一例として、最も浮上りやすいと考えられる最上段の検討点⑤における鉛直方向の反力を、図-18に示す。上下ブロック間の鉛直力は、ブロックの自重が考慮されているため、鉛直力がゼロとなった時に浮き上がることになる。この図から、鉛直方向の加速度の影響より多少変動しているが、鉛直力の最小値がゼロ以上（プラス側）であり、常に圧縮状態であることがわかる。このことから、ブロックの浮き上がりが生じていないことになる。

なお、ホゾが衝突して発生するせん断力については、各段で多少違いはあるが、ブロック1体当り最

大でも照査検討点④の15.6kNとなり、せん断耐力171.2kNより十分小さく、ホゾのせん断破壊は確認できない。

(5) 耐震性の評価

以上の解析結果から、対象岸壁のブロック積み係船岸に想定地震動が作用した場合、本提案モデルを適用することにより、以下のことが分かった。

- ・ ブロックの浮き上がり、ホゾ部への乗り上げ、滑落などは確認されていない。
- ・ ホゾのせん断破壊は生じていない。

6. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 模型実験により直立消波ブロックの振動特性を把握し、同一条件での解析モデルの同定化を行った。
- (2) ブロック積み岸壁の各ブロック間の相対変位およびホゾのせん断耐力を評価する解析モデルを提案し、ブロック間の変位に着目したブロック積み岸壁の耐震性能を評価できる可能性を示した。

なお、今回対象とした施設の場合、重力式岸壁に大きな変形を生じさせるような入力地震動でなかったこと、ホゾが健全で変形が制限されたことなどから、岸壁法線の残留変形量はいずれの解析も10cm以下であり、有意な差は確認できなかった（FLIP：4.8cm、提案モデル：8.0cmとホゾの余裕幅の分だけ提案モデルの残留変形量が大きくなった。）。今後、入力地震動を変えるなどし、異なる条件下において、ホゾへの乗り上げや、ホゾのせん断破壊をケースについても比較検討を進める予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、三省水工㈱からブロック模型の提供を、㈱計測リサーチコンサルタントから実験計測の協力をいただきました。また、宮崎大学原田隆典教授からはブロック間のモデル化についてのご指導をいただきました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 井合進，松永康男，亀岡知弘：Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, 港湾技術研究所報告，第29巻，第4号，pp.27～56，1990
- 2) 江守一郎：模型実験の理論と応用，技報堂出版，1994
- 3) 平井一男，水田洋司：耐震工学入門，森北出版，2002
- 4) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007