

コンクリートブロック多段積み構造の耐震性向上対策に関する基礎的研究

菅付 紘一¹・水田 洋司²・藤田 浩一³・伊井 洋和⁴・佐々木 公彦⁵・高橋 洋一⁶

¹正会員 株式会社地震工学研究開発センター (〒883-2155 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail:sugatuke@eerc.co.jp

²フェロー 工博 九州産業大学 工学部都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

E-mail:mizuta@ip.kyusan-u.ac.jp

³株式会社五省コンサルタント (〒812-0027 福岡市博多区下川端9番12号)

E-mail:fujita@c-gosei.com

⁴正会員 三省水工株式会社 九州支店 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東3丁目3番3号)

E-mail:h-ii@sanshosuiko.co.jp

⁵西武ポリマ化成株式会社 名古屋工場 (〒483-8145 愛知県江南市小郷町西ノ山55)

E-mail:kimihiko_sasaki@seibu-p.jp

⁶正会員 株式会社計測リサーチコンサルタント 九州支社 (〒812-0007 福岡市博多区東比恵2-2-25)

E-mail:takahasi@krcnet.co.jp

本論文では、直立消波ブロックのような多段積み構造体に対して、ブロック間にゴムマットを設置することでブロック構造体の耐震性を向上させる方法を提案した。提案法の検証のために模型実験と数値解析を実施し、提案法の有効性を確認した。まず、振動台加振実験よりゴムマット有無の場合の振動特性を把握した。次に、ゴムマット無しについて崩壊に至るような外力を選定し、同条件においてゴムマット設置有りの効果を確認した。さらに、対象とした実験について数値解析を行い、同定化を計ることで解析の妥当性を確認した。それらの結果から、ゴムマットを設置した場合の振動特性を明らかにし、耐震性向上に繋がる有効な効果を確認することができた。

Key Words : *vibration experiment, friction, resonance, build upright wave absorbing block*

1. はじめに

直立消波ブロックのような多段積み構造は、ブロック本体の自重による重力式構造であり、ブロック間にあるホゾがずれ止め防止の役割を担った支持構造となっている。現行の港湾施設の地震応答解析では、このような多段積み構造を一体と考えて耐震性の評価を行っている。しかし、構造全体が完全な剛結構造ではないことから、多段積み構造においては、ブロック単体での崩壊現象が考えられるため、各ブロックの相対的な挙動について評価をする必要がある。また、港湾施設は地震災害時に物資の海上輸送の拠点として重要な役割を担っており、地震によって被災することを避けなければならず、直立消波ブロックにおける耐震性向上についても考える必要がある。

そこで、本論文では、多段積み構造を利用し、各段に

ゴムマットを設置することにより構造全体の振動特性を制御し、地震波形の周波数成分とブロック多段積み構造体の共振点をずらす耐震性向上策と低周波振動によるブロック崩壊を防ぐ方法を提案した。一般的にゴムの特性には、摩擦抵抗が大きくなり、振動に対する減衰効果が高い上に衝撃力を吸収するなどの特徴がある。多段積みブロックの地震時の挙動を想定すると、ブロック間のずれによるホゾの損傷や浮上りと落下からの衝撃によるブロック本体の損傷が考えられる。それらの挙動に対してゴムの特性を適切に設定することができれば、構造全体の崩壊回避とブロック単体の損傷を軽微にできるものと考えられる。本論文で提案するゴムマット設置の効果を明らかにするために、振動特性を把握する模型実験および数値解析を行った。さらに、崩壊現象についても検討を加え、ゴムマットの設置効果についても再確認した。

2. 模型実験概要

(1) 実験ケース

実験は、コンクリートのみを積み上げた実構造を想定した場合と各段にゴムマットを設置した場合について実施した。さらに、ゴムマットの剛性を変えたケースも行うことで、剛性の違いによる影響も確認した。ゴムマット設置無しの場合をCASE1（従来設置想定）とし、ゴムマット設置有りでゴムマットの標準剛性をCASE2、それよりも小さい剛性をCASE3とした。また、ゴムマットを上から1段目と3段目のみに設置した場合をCASE4とした。CASE4でもゴムマットの設置効果を確認することができれば、全段に配置する必要がないと判断される。図-1に実験模型図とゴムマット設置位置を示す。

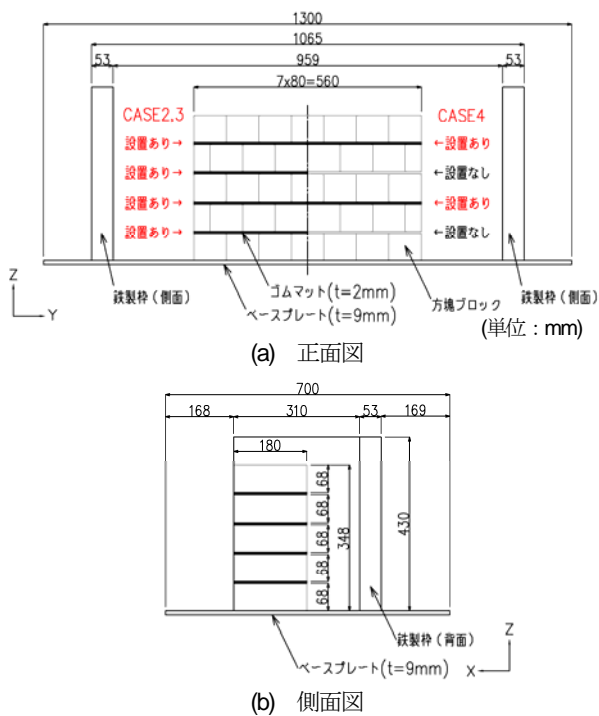


図-1 実験模型図とゴムマット設置位置

(2) 実験方法

実験には九州産業大学振動実験室に設置されている振動台（IMV社製：DS-2000-15L）を使用し、正弦波加振実験を行った。図-1の各ケースについて正弦波加振によるスイープ実験（以下、スイープ実験）を実施し、模型の振動特性を計測した。また、ある振動数に着目し、模型の崩壊に至るまで正弦波の加速度振幅を増大させる実験（以下、崩壊実験）も行った。なお、加振方向はいずれも面外水平方向（X方向）のみの加振とした。

3. 模型の諸元

(1) 方塊ブロック

本実験に使用した方塊ブロックの諸元を表-1に、実

表-1 方塊ブロック諸元

—		実構造	模型	
スケール		1/1	1/25	
模型 1 個 当 り	奥行き(B)	m	4.500	0.180
	幅(L)	m	2.000	0.080
	高さ(H)	m	1.700	0.068
	体積(V)	m ³	15.300	0.00098
	重量(W)	kN	352	0.023

※躯体の単位体積重量 $w=23\text{kN/m}^3$

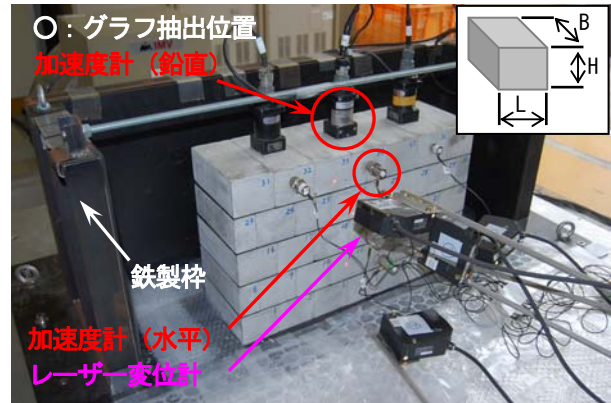


写真-1 実験模型

実験模型の状況を写真-1に示す。模型の縮尺は、振動台の載積重量制限以下となるように実構造物の1/25スケールとした。方塊ブロックの設置は高さ方向に5段積み、横方向に7列配置とした。ブロック最下段の底面については接着剤を使用して鉄製枠（振動台に定着）に完全固定とした。実構造物にはブロック間に水平方向に対してのずれ止めの役割を担うホゾがあるが、本検討では崩壊挙動を明確に確認することも目的の一つであることから、ホゾの無い平らな面の立方体模型とした。また、ホゾが無いことで崩壊しやすい可能性が高いことから、振動台へ直接落下しないように模型周辺には鉄製の枠を設置した。文献1)の実験では、1/15スケールのホゾを取り付けた模型を使用した。崩壊挙動まで確認するには至らなかった。模型の加速度とブロック前面の変位の計測には、それぞれに加速度計（PV-85：RION社製）とレーザー変位計（LK-G400：KEYENCE社製）を使用した。

(2) ゴムマット諸元

本検討に使用したゴムマットの諸元を表-2に示す。ゴムマットは天然ゴムとスチレンブタジエンゴムを配合させて作製しており、種類は標準的な硬さとそれよりも柔らかい2種類を使用した。ゴムマットの硬さはこの2つの材質に配合される軟化剤と補強剤分量を調節して設定している。この2種類からゴムマットの剛性の違いによる影響を確認した。また、耐海水性については今回使用したゴムマットの用途とは異なるが、海洋構造物や水処理施設においてすでに使用実績があることと、文献2)

表-2 ゴムマット諸元

ケース	ゴムマット		
	設置	硬さ	せん断弾性係数(G) N/mm ²
CASE1	—	—	—
CASE2	全段配置	A68	1.230
CASE3	全段配置	A49	0.808
CASE4	1,3段目配置	A68	1.230

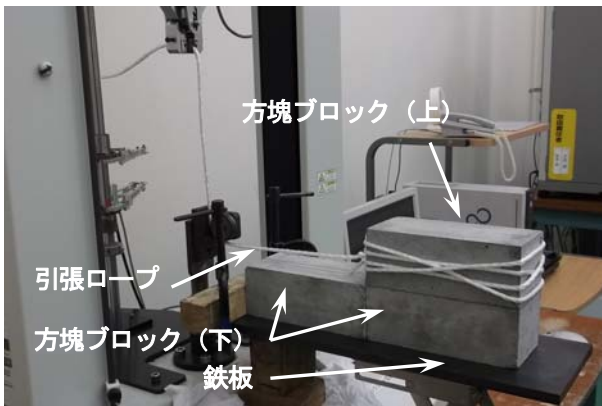
より海水との接触による物性値への影響はほとんど無いことが判っている。

(3) 摩擦係数

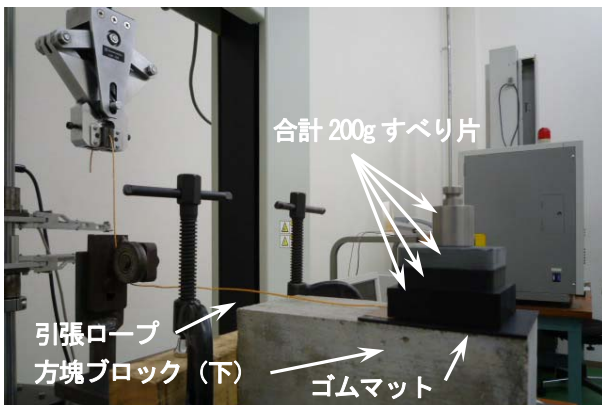
摩擦係数の測定には、方塊ブロックのコンクリート面同士を重ねた場合と方塊ブロックとゴムマットを重ねた場合について測定を行った。摩擦係数の測定方法は JIS 規格 K7125 を参考に定めた。すなわち、方塊ブロック同士では鉄板上に方塊ブロックを 2 体固定し、その上にもう 1 体の方塊ブロックを載せるとともに、上に載っている方塊ブロックを引く方法で測定した。また、方塊ブ

表-3 摩擦係数

ケース	静止摩擦係数A	動摩擦係数B	摩擦係数比 (F=B/A)
CASE1	0.542	0.297	0.55
CASE2	1.569	1.420	0.91
CASE3	1.827	1.653	0.90



(a) 方塊ブロック同士



(b) 方塊ブロックとゴムマット

写真-2 摩擦係数計測状況

ックとゴムマットでは鉄板上に方塊ブロックを 1 体固定し、その上にゴムマットを載せ、更にゴムマットの上に 200g のすべり片を載せてゴムマットを引く方法で測定した。測定した摩擦係数を表-3 に、実験状況を写真-2 に示す。測定結果より、方塊ブロック同士の場合とゴムマットを設置する場合の摩擦係数とは大きく異なる結果となった。ゴムマット無しの場合、静止摩擦係数に比べて動摩擦係数が小さいことから滑り出した後の摩擦力が小さく、方塊ブロックが動きやすくなる。一方、ゴムマット有りの場合は、ゴムマット無しの場合に比べて静摩擦係数と動摩擦係数の差が小さいため、すべり出しからの滑り摩擦力が大きく、方塊ブロックが動きにくいことが判る。また、使用した全てのブロックとゴムマットの接触面について摩擦係数を測定しており、ブロック毎に微小のバラつきがあることも判った。表-3 の値は各ケースとも 4 回測定した平均値を記している。

4. 模型振動実験

(1) 模型の振動特性

スイープ実験の加振条件は、加速度振幅を 50gal、加振振動数を 1Hz から 100Hz までの 1Hz 刻み、滞留時間を 20 秒とした。図-2 にスイープ実験の結果を、表-4 にスイープ実験から得られた共振振動数の一覧を示す。図-2 は横軸に振動数、縦軸には応答加速度を加振加速度で除した応答倍率で示している。グラフの値は、写真-1 のグラフ抽出位置の結果である。この結果から CASE1 で

【スイープ実験】<水平方向応答加速度>

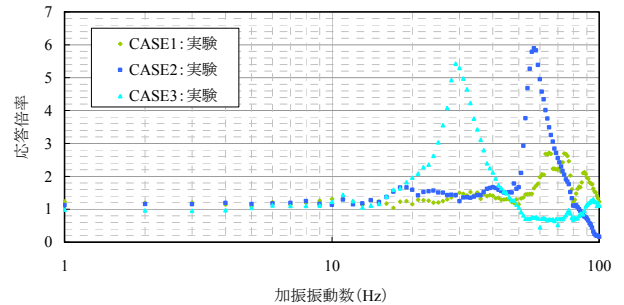


図-2 スイープ実験結果 (水平方向)

【スイープ実験】<鉛直方向応答加速度>

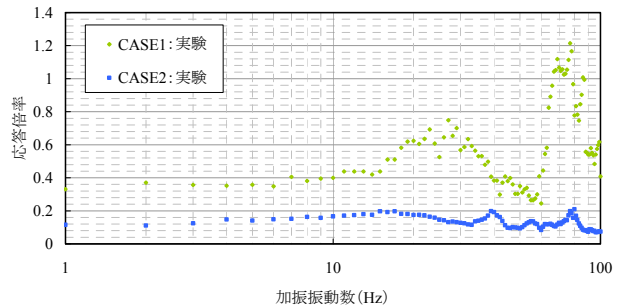


図-3 スイープ実験結果 (鉛直方向)

表-4 模型の共振振動数

ケース	共振振動数(Hz)	
	1	2
CASE1	60~80	85~90
CASE2	57	—
CASE3	29	—

は 60~90Hz の範囲で複数の共振点が存在して幅広く共振しているのに対し、CASE2 と CASE3 では共振点が集約されている。また、CASE2 と CASE3 はゴムマットの剛性が異なることにより 57Hz 付近から 29Hz 付近へと共振点に変化している。このグラフより、ゴムマットの剛性を小さくすることによって共振振動数が小さくなることが判る。さらに、水平方向加振に対して微小に鉛直応答加速度が発生するが、ゴムマットを設置した場合にはその鉛直応答加速度を低減できることが判った (図-3)。しかしながら、水平方向の応答加速度は、CASE1 では加速度の応答倍率が 3 倍程度であるのに対し、CASE2 と CASE3 では応答倍率が 5~6 倍程度と大きくなっている。これは、CASE1 の場合、ブロック接触面の摩擦係数が小さいために各ブロックが動き、エネルギーが吸収されたものと考えられる。一方で、CASE2 と CASE3 の場合には、ゴムマットを設置することで摩擦係数が大きくなり、ブロック構造体が一体となって挙動し応答加速度が大きくなったものと考えられる。これらの実験結果に基づけば、ゴムマットを設置することによって水平方向の応答加速度は大きくなるものの、共振範囲を集約でき、さらにゴムマットの剛性を変えることで共振点の位置も制御できるため、提案法は共振現象を回避する一方法として役立つものと考えられる。

(2) 模型の崩壊実験

ゴムマット設置有無の効果を確認するために、模型が崩壊する加振条件で実験を行った。加振条件は、スイープ実験の際にレーザー変位計より僅かに変位が確認できた振動数の中から低い振動数について加速度振幅を拡大させる方法で実施した。図-4 にレーザー変位計より抽出した 8Hz 加振時の応答変位を示す。図より加振が進むにつれて計測点が徐々に移動していることが判る。

【スイープ実験】8Hz加振

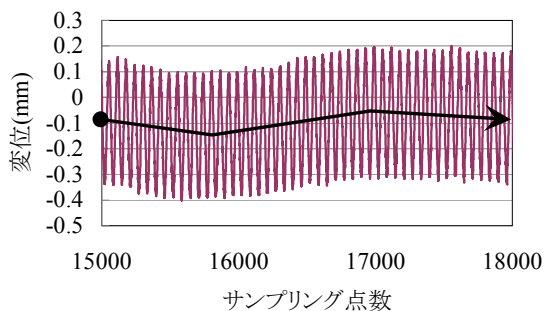
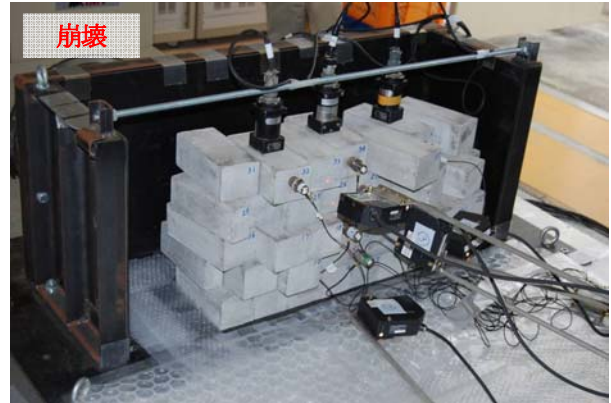


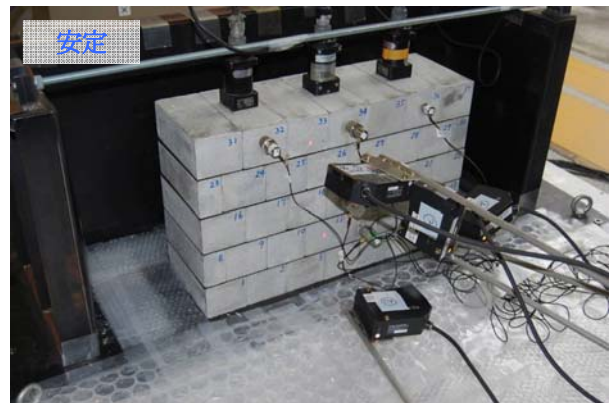
図-4 応答変位 (8Hz加振)

表-5 加振条件と実験結果

加振条件		結果		
加速度	振動数	実験ケース		
gal	Hz	CASE1	CASE2	CASE4
400	6	崩壊	安定	崩壊
	7	崩壊	安定	安定
	8	崩壊	安定	安定
	9	崩壊	安定	崩壊
	10	崩壊	安定	安定



(a) CASE1 8Hz-400gal 加振



(b) CASE2 8Hz-400gal 加振



(c) CASE4 8Hz-400gal 加振

写真-3 崩壊実験結果

加振振動数を低い振動数とした理由は、次節の数値解析で述べる解析手法を用いた応答計算において加振振動

数 8Hz 前後でブロックの移動が確認されたためである。表-5 に加振条件と実験結果を、写真-3 に崩壊実験結果を示す。

CASE1 と CASE2 について同条件の加振を行ったところ、CASE1 は全条件において崩壊する結果となったが、CASE2 では崩壊しない結果となった。この結果の違いは摩擦係数の影響が大きいものと考えられる。CASE1 と CASE2 では摩擦係数が 2 倍以上の差があると同時に、CASE1 は静摩擦係数と動摩擦係数の差が大きいため、一度動き始めると摩擦抵抗が非常に小さくなる。また、CASE4 は加振振動数 6Hz と 9Hz で崩壊する結果となったことから再度やり直したところ、次は崩壊しないという結果が得られた。このように全段配置の CASE2 に比べて CASE4 のようにゴムマットを間引いた設置方法は不安定な結果となることが判った。これらのことから、ゴムマットは全段配置が必要と考えられる。

5. 数値解析

数値解析のモデルはバネマスモデルとし、ブロックの重心位置に質量を、接触面のモデル化には模型の水平方向の挙動を考慮できる非線形バネ要素を設けた。非線形バネ要素は、ブロック 1 体につき 2 箇所採用しており、1 段で計 14 個を設定している。また、解析モデルには方塊ブロックをアニメーション表示するために構造軸線上にファイバー断面を施している。図-5 にモデル図と接触面の非線形モデルを示す。接触面の摩擦剛性には、スweep実験解析、崩壊解析ともに同じ剛性を用いた。模型が滑り出す際の降伏水平荷重(Q_y)は、ブロックの自重による鉛直荷重に動摩擦係数を乗じた値とした。この設定した履歴モデルによって降伏水平荷重(Q_y)に達した瞬間に無抵抗で滑り出すようになる。

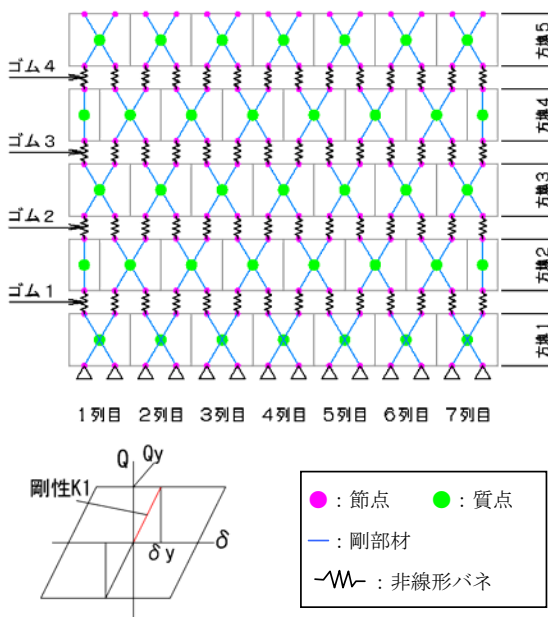


図-5 解析モデル

6. 実験と解析の比較

(1) スweep実験と数値解析の比較

図-6 にスweep実験と数値解析の比較を示す。図中の横軸に振動数、縦軸には応答加速度を加速度振幅で除した応答倍率で示している。この図から判るように、実験から得られた共振点の位置と数値解析の共振点の位置についてはよく一致している。しかしながら、現状のバネマスモデルでは、共振範囲の裾の幅までは正確に一致させることはできていない。特に CASE1 の 60Hz~90Hz の範囲では、60~80Hz と 85~90Hz 付近で 2 つ程度の共振点があるが、2 つの共振点を正確には一致させることができていないことから、応答加速度の大きい低次の振動数を一致させることにした。

【スweep実験再現】<水平方向応答加速度>

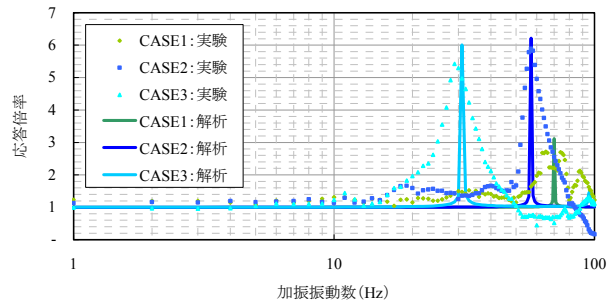


図-6 スweep実験と数値解析の比較

(2) 崩壊実験と数値解析の比較

崩壊の解析モデルは、前述のスweep実験と同じモデルを使用した。数値解析時の加振時間は実験と同じ 20 秒間とした。数値解析した加振条件と結果を表-6 に示す。CASE1 の実験と数値解析はそれぞれ同条件で崩壊

表-6 崩壊解析結果

ケース	加速度 (gal)	加振振動数 (Hz)		
		6	8	10
CASE1	400	崩壊	崩壊	崩壊
CASE2	400	安定	安定	安定

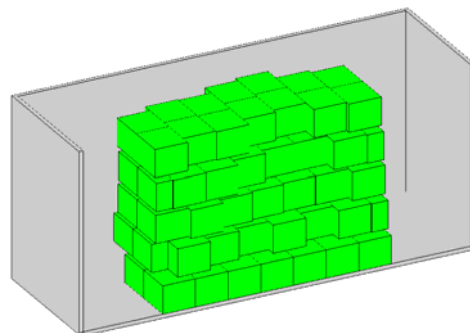


図-7 CASE1 8Hz-400gal 加振 (変形倍率 50)

し、CASE2 ではそれぞれで崩壊しない結果となり、よく一致していると言える。図-7に CASE1 の崩壊した解析結果を示す。解析結果からわかるようにブロック毎で実験結果と同じようなバラついた挙動となっている。これは前述したように各ブロックでの摩擦係数のバラつきが原因と考えられる。

7. 相似則

相似則は Buckingham の π 定理³⁾を使用して算出した。実構造物と模型の材料などは同じ条件であることから、次元による算出と同じ結果となった。表-7に相似則の一覧を示す。この相似則に基づけば、スweep実験のCASE1の振動数は60~90Hz付近で共振していることから、実構造の共振振動数は2.4Hz~3.6Hz、CASE2は2.3Hz、CASE3は1.2Hzとなる(表-8)。

表-7 相似則

物質量	記号	次元	相似則	相似率
長さ	l	L	$l_m/l_p = n$	1/25
弾性係数	E	$ML^{-1}T^{-2}$	$E_m/E_p = \alpha$	1
構造密度	ρ	ML^{-3}	$\rho_m/\rho_p = \beta$	1
振動数	f	T^{-1}	$f_m/f_p = (\alpha/\beta)^{1/2}/n$	25
加速度	a	LT^{-2}	$a_m/a_p = \alpha/(n\beta)$	25

※m：模型，p：実構造

表-8 模型と実構造の振動数

ケース	共振振動数(Hz)	
	模型	実構造
CASE1	60~80	2.4~3.2
CASE2	57	2.3
CASE3	29	1.2

8. 結論

本論文で得られた結論を以下に示す。

- 1) スweep実験より、ゴムマット有無についての振動特性を計測し、振動特性を把握することができた。その結果、ゴムマット設置により共振点を集約でき、さらにゴムマットの硬さを変えることで共振点を制御できることが判った。
- 2) 崩壊実験より、ゴムマットを設置することで崩壊現象が起きないことが判った。
- 3) ゴムマットの設置段数を間引くことで不安定な結果となることから、ゴムマットは全段設置が必要である。
- 4) 模型実験と数値解析との比較から、設定したモデルによって大方の方塊ブロックの挙動を表現できることが判った。

以上より、本論文で提案した方法は、耐震性向上策として有効な対策と考えられる。今後の検討課題は、ゴムマットの剛性(ゴムマットの種類)と共振振動数の関係を明確にすることである。また、その関係は数値解析でも明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 前田聡, 水田洋司, 野中哲也, 菅付絃一, 藤田浩一: ブロック積み係船岸の耐震性検討に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.921-926, 2009.
- 2) ポリマー辞典編集委員会: ポリマー辞典, 大成社出版, 2011年5月.
- 3) 江守一郎: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1988年9月.

FUNDAMENTAL STUDY ABOUT IMPROVEMENT METHOD ON EARTHQUAKE-RESISTANCE OF STRUCTURE STACKING UP CONCRETE BLOCKS

Koichi SUGATSUKE, Yoji MIZUTA, Koichi FUJITA, Hirokazu II, Kimihiko SASAKI, Yoichi TAKAHASHI

In this paper, in the case of stacking structure such as build upright wave absorbing block, we proposed a method for improving the earthquake resistance of the structure by installing a rubber mat between the concrete blocks. For the verification of the proposed method, we practiced the model experiment and the numerical analysis, and we confirmed effectiveness of the proposed method. First, we confirmed the vibration characteristics of the case with and without installation of the rubber mat from the experiment using the shaking table. Next, we determined the external force to collapse in the case of without installation rubber mat, and we confirmed effectiveness of the rubber mat placed in the same conditions. In addition, we carried out the numerical analysis for the experiments and confirmed the validity of the analysis measured the identification. As a result, we clarified the vibration characteristics in the case of with installation of the rubber mat and were able to confirm the beneficial effects of improving earthquake resistance.