

(153) 上下動を考慮した石積みの動的挙動

金沢大学工学部 正会員 池本敏和
 金沢大学工学部 正会員 北浦 勝
 金沢大学大学院 西田陽一
 積水ハウス北陸(株) 吉田竜大

1. はじめに

石積みは美観、耐久性に優れ、環境にやさしいという利点を持つが、昔に作られたものについては老朽化によって崩壊の危険性が高くなっている。一般に石積みの構造は複雑であり、石同士力の伝播を力学的に解明することは難しいと言われてきた。そこで科学的にその特性を解明し、既存の石積みの強度診断や補強方法について検討することが緊急な課題として挙げられる。本研究では、現在までに伝えられている石積みの経験的技術の有効性などを検証するために、水平・上下2軸振動試験機を用い、石積みの動的応答に関する基礎的な実験を行う。

2. 実験概要

本実験における石積みモデルとしてコンクリートモデルを用いた。コンクリートモデルを用いるに当たっては、予備実験から種々の石やモデルの摩擦係数を調べ、自然石の表面がある程度滑面の場合には、コンクリートモデルで置き換えられることを確認した。モデル形式として図1に

示す標準モデルと図2に示す胴下げモデルの2パターンを考えた。特に、後者のモデルは経験的な技法として数百年ものあいだ、石工らによって伝承されてきたものである。

石積みを用いたモデルの概要を図3、4に示す。実験は、振動台の上に層厚約10cmの地盤を作成し、その上に石積みモデルを3段4列に積み重ねた。水平と上下方向に別々に加振する場合と、同時に加振する場合の実験を行い、それぞれの石積みの共振振動数を求めた。加速度計は図3に示すように石積みの1列の上段、中段、下段に設置した。裏込めと地盤に用いた砂は、一般にコンクリート施工に用いられるものであり、礫の平均粒径は約1.5cm、裏込めには

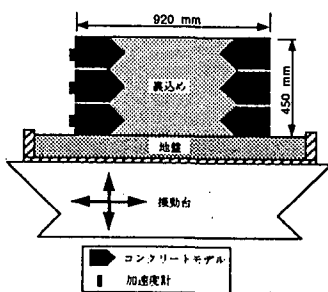


図1 石積みの標準モデル

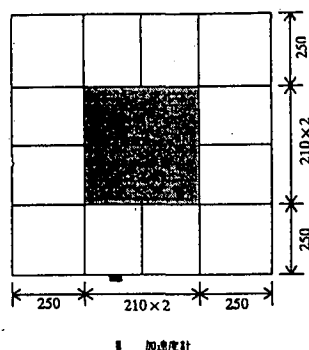


図3 石積みのモデルの平面(単位mm)

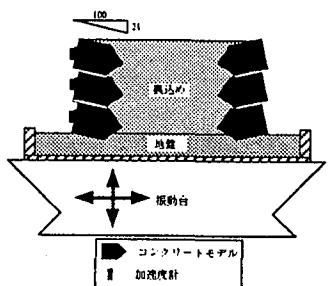


図2 石積みの胴下げモデル

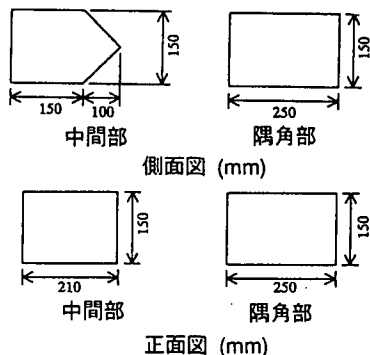


図4 石モデル

砂と礫の体積比が2：1に、地盤には1：1になるように混ぜて用いた。石モデルの重量の平均は、中間部モデルで11.5kgfであり、隅角部モデルで17.8kgfである。実験での石モデルの積み方は、実験が一様に行われるよう、モデルには全て番号を付け、実験毎に同じ配置に積む。また、裏込め土の締め固めは、石積みと1段積む毎に2回行う。ここでは、20cm×40cmのブロックの上

に約70kgfのおもりを載せ、土圧が約900kgf/cm³となるような方法を用いた。実験に使用した装置を図5、表1に示す。

3. 一方向加振による共振振動実験

ここでは、水平方向と上下方向を別々に加振した実験を行った。実験ケースを表2に示す。

事前の検討から、石積みー地盤系の状態が崩れない入力加速度は80gal程度であることを求め、その値を入力加速度とした。実験中は、入力加速度波形と石積み上段の応答加速度の波形を目視していたが、加振時間とともに石積みの応答加速度が変化することはなかった。

振動数を徐々に増加させて求めたcase 3とcase 5の共振曲線を図6、7に示す。また、全てのケースにおける共振振動数を表3にまとめる。裏込めが有る状態での共振振動数は水平動加振のときには16Hz (case 3)であり、上下動加振のときには39Hz (case 4)である。このときの石積み上段の応答倍率は、水平動では5.4倍であるが、上下動では2.6倍であり、上下動の応答は水平動のときの約半分である。裏込めがある胴下げモデルにおいて、水平動加振のときの共振振動数は19Hz (case 5)であり、その時の石積み上段の応答倍率は3.9

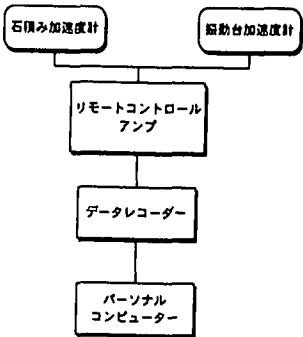


図5 実験装置概要

表1 実験装置一覧

振動台	Saginomiya Seisakusho Co., Ltd. VTVH-6
加速度計	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. AM-10
RCアンプ	NEC Co., Ltd. AH1100-1
データレコーダー	TEAC Co., Ltd. DR-M2a
パソコン	EPSON Co., Ltd. PC-386GE

表2 実験ケース

case	加振方向	モデル	裏込め
1	水平	標準	無
2	上下		
3	水平		有
4	上下		
5	水平	胴下げ	

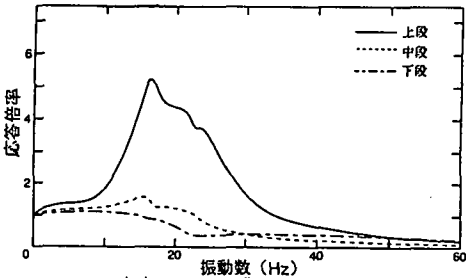


図6 水平加振時の石積みの共振 (case 3)

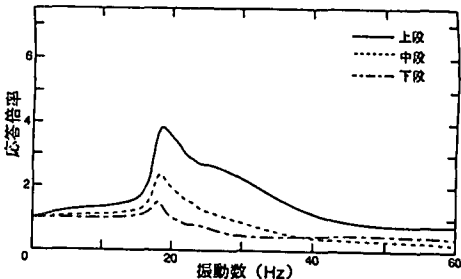


図7 水平加振時の石積みの共振 (case 5)

倍であった。これらのことより、1) 石積みの上下動に対する共振応答は水平動のそれよりも大きくなること、2) 胴を水平にして積む標準モデルよりも胴を下げて積むモデルの方が応答が小さくなること、と言える。

4. 水平・上下同時加振による共振振動実験

上下・水平同時に数秒間加振し、位相差及び加速度をパラメータとして実験を行った。実験ケースを表4に、標準モデル（case 6）に対する水平方向加速度の共振曲線を図8に示す。また、石積みモデルの共振振動数と入力加速度に対する石積み上段の応答倍率の結果を表5にまとめる。

case 6とcase 9を比べると両者の共振振動数は一致しているが、石積み上段の応答倍率はcase 1の方が1割程大きくなっている。このことから、胴下げモデルの方が標準モデルよりやや耐震的であると言える。またcase 6からcase 8、すなわち水平動と上下動の位相差を変化させた実験に注目すると、共振振動数はほぼ同じであり、位相差90°、45°、0°の順に応答倍率は小さくなる。このことから、僅少ではあるが水平・上下動の位相差は石積みの応答に影響を与えていると言える。このことは、90°位相差では振動台が鉛直面で円を描くことから、石積み全体が大きく揺り動かされていることと対応しているものと考えられる。また、図8から上段になるにつれて応答値が大きくなることがわかる。

このような実験によって求めた共振振動数を用い、石積みモデルの加振実験を行った。各実験ケースは表4と同様である。一例として、case 10の水平加速度応答を図9に示した。ここには掲載していないが、case 6からcase 9の時刻歴応答波形は調和波に近い波形である。しかしcase 10

表 3 上段の応答倍率

case	共振振動数	石積み上段の 応答倍率
1	7Hz	6.8
2	29Hz	3.5
3	16Hz	5.4
4	39Hz	2.6
5	19Hz	3.9

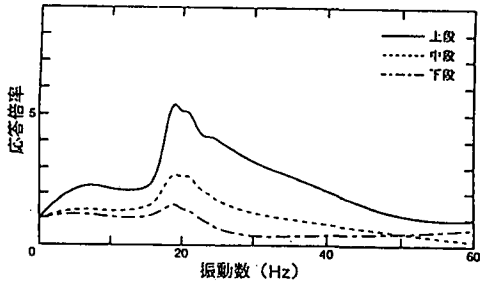


図 8 共振曲線（case 6）

表 4 実験ケース

case	入力加速度		モデル	位相差
	上下	水平		
6	40gal	40gal	標準	0°
7				45°
8				90°
9			胴下げ	0°
10		80gal	標準	0°

表 5 実験結果

case	共振振動数	石積み上段の 応答倍率
6	19 Hz	5.6
7	21 Hz	6.4
8	19 Hz	6.9
9	19 Hz	5.1
10	16 Hz	5.4

は若干様相が異なる。図9では、入力加速度と石積みの応答加速度に位相のずれが見られる。また、他のケースには現われない波形の乱れを確認できる。これは、case 6の入力水平加速度が40galに対し、case 10では2倍の80galになったため、石モデル間のすべりが顕著に現われたためだと考えられる。

最大水平応答加速度の各段における応答倍率を図10に示す。case 6~8を比較すると、振動の位相差が大きいほど各段の応答が大きくなる傾向にある。また case 6、10 から、わずかではあるが入力水平加速度の大きな case 10の方が case 6に比べ、応答値が大きくなることがわかる。これは前述した石モデル同士のすべりが現われたためであり、入力に応じた非線形性が強く現われているものだと考えられる。case 6、9を比較すると、中段における応答値は case 4の方が大きいものの、上段では小さくなっている。case 9の石積みでは各段の石モデル同士の密着性が高まったため、このような挙動を示したと考えられる。

5. 結論

水平・上下2軸振動試験機を用い、石積みの動的挙動について基礎的な考察を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 石積みの上下動応答は水平動のそれよりも小さくなること。2) 石積みの最大水平加速度は振動の位相差に影響されることがわかった。3) 経験的技法である胴を下げた石積みは耐震安全性に関して有利である。

参考文献

- 1) 大久保森造：石垣の秘法とその解説、理工図書、pp.105-109、1987。

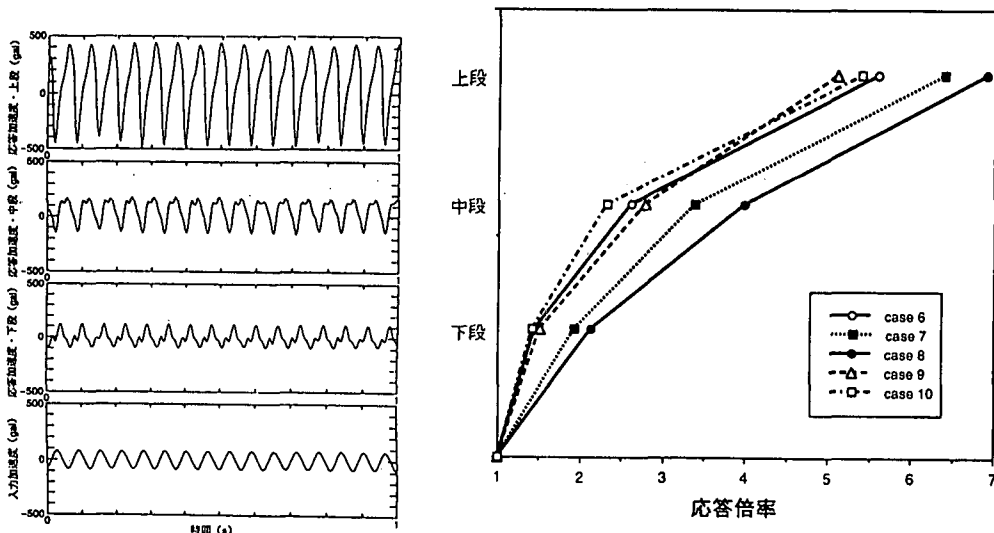


図9 case 5における加速度応答（水平）

図10 各段の最大加速度応答倍率（水平）