

石積擁壁の耐震診断・補強に関する研究 小委員会報告

委員長 橋本 隆雄
副委員長 宮島 昌克
幹事長 池本 敏和

1. はじめに

日本は、これまで幾度となく地震災害に遭遇し、その度に人的被害や家屋の被害が記録されている。特に、擁壁被害は過去に発生したほとんどの被害地震において発生している(写真 1)。日本では、伝統的に間知石(けんちいし)が石積擁壁の材料として利用されてきた。この間知石を用いて作られる石積擁壁は古くから国民に親しまれ、今もなお鉄道沿線や道路・宅地など、我々の身近なところに数多く存在している。



写真1 擁壁被害

2. 研究の背景

鉄道・道路沿線や宅地にあるような一般的に見られる間知石や間知ブロックを使用した石積擁壁を対象として、地震時の安定性を検討した事例は極めて少ない。1995 年の兵庫県南部地震以降、様々な構造物の耐震補強が進む中、石積擁壁については、地震時における不安定化のメカニズムが不明であるため、耐震補強などの対策が未着手な状態にある。したがって、石積擁壁の地震時における不安定化のメカニズムを解明し、適正な耐震補強対策を適切に施す基準を作ることが急務とされている。

3. 研究の目的

材料の入手が容易であったために、鉄道・道路沿線の切土のり面の防護や宅地の盛土に設けられることが多い石積擁壁は、伝統的に作られ、今も共用されている。その構築方法は、専門職の技能と経験によって発達してきているため、特に耐震性能については未解明な部分が多い。

一方、兵庫県南部地震において、石積擁壁を含む約 5000 箇所の宅地擁壁が倒壊、沈下、滑動、はらみ出しなどの被害を受けており、大規模地震時における石積擁壁の崩壊、それに伴う交通網の遮断や宅地への被害などが懸念されている。このため、石積擁壁の地震時における安定性の評価方法や耐震補強・補修整備が急務となっている。

本研究では、間知石・間知ブロック積み擁壁の調査から始め、石積擁壁の地震時における変形から崩壊に至るまでの挙動、すなわち不安定化のメカニズムについて検討するため、石積擁壁の模型による振動実験を実施する。

4. 実験模型の作成について

振動台実験を行うために、1/6 スケールの間知ブロックを用いて石積擁壁の模型を作成する。本研究の石積擁壁の模型には、宅地造成等規制法を参考にして作成した。実験では、奥行き 1200mm、幅 800mm、高さ 1000mm の土槽内に盛土地盤を作成するとともに、コンクリート製の間知ブロックを積み上げていき、擁壁に正弦波による 1 方向の水平加振を与える。

4.1 実験に使用する間知ブロック

実験に使用する間知ブロックを図 1 に示す。左が正面図(点線は奥行き方向)で、右が側面図である(単位は mm)。

4.2 実験材料

(1) 裏グリ石

地山ののり面と間知石の間に詰め込まれる石を裏グリ石という。裏グリ石は、地下水を斜面外へ排出するため

の排水層として重要な役割を有している。1/6 スケールを考慮して実験では2.5～5mmの碎石を用いる。

(2) 裏込めコンクリート

裏込めコンクリートとは、練積において間知石同士を一体化するために用いるコンクリートである。

(3) 背面土

背面土には石川県の森本産の山土を用いる。含水比は24.7%，土粒子密度 2.69g/cm^3 ，礫分 0.0%，砂分 70.8%，細粒分 29.2%の粘性土質砂である。

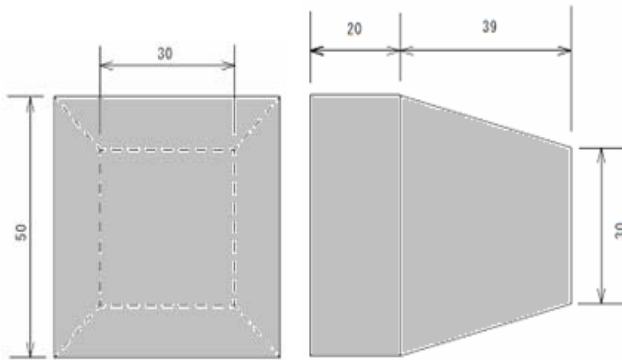


図1 模型間知ブロック

4.3 練石積擁壁の実験模型

擁壁の実験は、練積擁壁と空積擁壁の2種類行った。練積擁壁とは、ブロックをコンクリートで固めた擁壁である。図2は、宅地造成等規制法を参考にして、実物の1/6スケールで作成した練石積擁壁の模型図である(単位はmm)。勾配は1:0.4(66.4度)である。また、実験に際しては、擁壁を支持する地盤は十分に堅く、地震時においても破壊しないものとして、擁壁の基礎部分が前面方向に移動しないこととする。そこで、擁壁基礎と土槽との間に固定コンクリートを設置する。図3に計測機器の位置を示す。加速度計は振動台、擁壁表面に4点及び盛土地盤中に4点の計9点、変位計は擁壁面の応答の計測用に4点、土圧計を盛土地盤中に3点にそれぞれ設置する。

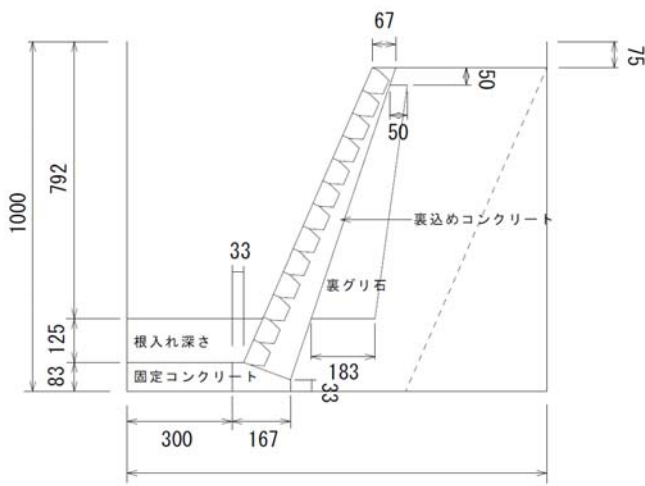


図2 擁壁の模型図

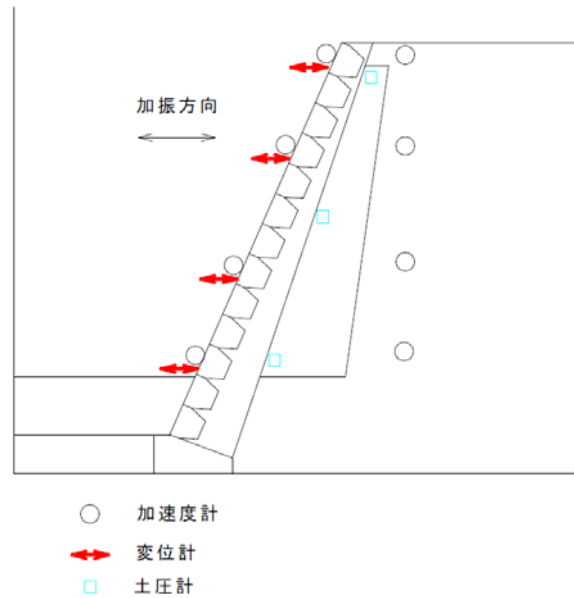


図3 計測機器の配置

4.4 空石積擁壁の実験模型

紙面の都合上、空積擁壁について詳しく述べる。

図4は、宅地造成等規制法を参考にして、実物の1/6スケールで作成した間知ブロック積み擁壁の空積擁壁の模型図である。空積擁壁は間知ブロックを裏込めコンクリートで固定しない以外は、練積擁壁と同じ構造である。加速度計は振動台、擁壁表面に3点及び盛土地盤中に3点の計7点、変位計は擁壁面の応答の計測用に3点、土圧計を盛土地盤中に3点設置する。

実験に際しては、擁壁を支持する地盤は十分に堅く、地震時において擁壁全体が円弧滑りのような破壊せず、擁壁の基礎部分が前面方向に移動しないこととする。このため、擁壁基礎と土槽との間に固定コンクリートを設置する。

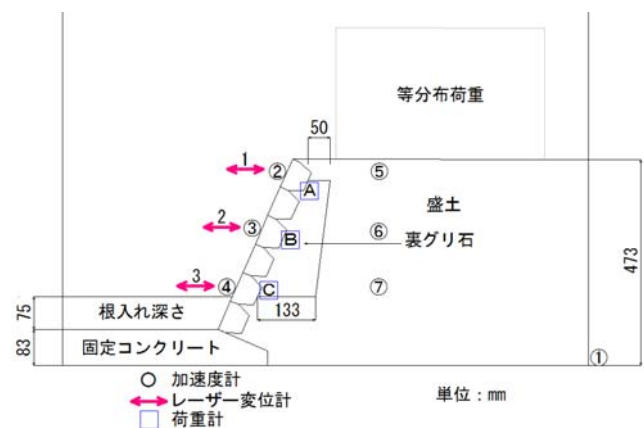


図-4 空積擁壁の模型図

4.5 実験時の練積擁壁の考慮

練積擁壁の実験に関しては、裏込めコンクリートの厚さや強度を変化させて実験を行った。練積擁壁の実験の詳細を表-1に示す。宅地造成規制法に沿って作成した場合、固定コンクリートと裏込めコンクリートの接地面は70mmになる、これを標準として作成している。

表-1 練積擁壁の詳細

練積擁壁	裏込めコンクリート	
	厚さ	強度(N/mm ²)
A	標準(70mm)	29.2
B	5mm	29.2
C	半分(3.5mm)	3.22
D	標準(70mm)	3.22

(1) 裏込コンクリートの強度

練積擁壁A, Bの裏込めコンクリートの設計基準強度は、国土交通省制定土木構造物標準設計から、18N/mm²以上と規定されているため、18N/mm²以上となる配合により作成した。しかし、強度が1/6の場合も考慮するべきと判断し、練積擁壁C, Dについては、裏込めコンクリートの設計基準強度が18N/mm²の1/6になる、3N/mm²の配合で作成した。この時の相似則としては、模型は実物の土を使用でき、かつ、その重力の加速度=1となる香川の相似則⁹⁾に基づいた。

表-2 各練積擁壁の入力加速度の条件

練積擁壁	A	B	B'	C	C'
入力加速度の振動数(Hz)	11.3 (固有振動数)	20 (固有振動数)	13	22 (固有振動数)	13
1回目(gal)	100 (390)	100 (297)	100 (546)	100 (15)	500 (201)
2回目(gal)	200 (198)	200 (935)	200 (1379)	100 (20)	500 (388)
3回目(gal)	400 (371)	50 (81)	200 (1385)	200 (70)	600 (512)
4回目(gal)	600 (598)	100 (335)	220 (1536)	300 (128)	700 (658)
5回目(gal)	800 (784)	200 (934)		400 (226)	800 (792)
6回目(gal)	1000 (979)			500 (377)	900 (929)
7回目(gal)	1000 (993) (5Hz)			600 (515)	1000 (1081)
8回目(gal)				700 (643)	
9回目(gal)				800 (732)	
10回目(gal)				900 (832)	
11回目(gal)				1000 (941)	

(2) 入力加速度の加速度と振動数

表-2の条件により実験を行った。振動台を利用して、固有振動数をスイープ試験によって算出した。擁壁の固有振動数と一致する入力加速度を作成し、順次入力加速度を増加させた。なお、練積擁壁が固有振動数で擁壁が破壊しない場合、振動数を低下することによって、振動エネルギーを大きくした正弦波を適用した。

4.6 実験のケース

実験は擁壁に正弦波による面外方向の水平加振を与える。予備実験としてスイープ試験を（1～30Hz まで20gal 程度で）行い、擁壁上部の固有振動数を調べ、本実験では擁壁の固有振動数と一致する正弦波を入力する。なお、実験ケースを表1に示す。

実験では、表1のようなA（盛土のみ）、B（空石積擁壁）、C（練石積擁壁）の3パターンについて模型実験を行う。一連の実験結果より、擁壁が地震を受けたときに示す挙動を把握し、耐震性能について検討する。

表-3 実験ケース

Case	工法	積み方	入力加速度(gal)
A	盛土のみ		100→200→400→600
B	空積	谷積	100→200→400→600→818
C	練積	谷積	100→200→400→600→818

本研究では、間知ブロック積み擁壁の模型による振動実験を実施し、地震時における変形から崩壊に至るまでの挙動を検討する。また、不連続変形法を利用した間知ブロック積み擁壁の2次元解析を行った。紙面の関係上ここでは、実験について述べる。

5. 実験結果

5.1 練積擁壁Aの実験結果

図-3は練積擁壁Aの擁壁において、入力加速度100(390), 200(198), 400(371)galを入力した時の、加速度計②～⑤の応答倍率を示した図である。入力加速度にかかわらず、応答倍率は擁壁上部にかけて上昇している。これは、擁壁にひび割れなどの損傷が発生しないために、このような結果になったと考えられる。また、入力加速度が500gal以下の場合、捌避の最上部に位置する加速度計②は、応答倍率が最大で35倍になり、大きな倍率を示した。これは裏グリ石や盛土が大きく沈下せず、擁壁に対する影響が小さかったため、擁壁の振動特性が大きく表れたと考えられる。

図-6は練積擁壁Aの擁壁において、入力加速度600(598), 800(784), 1000(979), 1000(993)gal-5Hzを入力した時の、加速度計②～⑤の応答倍率を示した図である。入力加速度600galを入力した時に擁壁中部で擁壁の横方向にせん断

破壊によるひび割れが発生した。

そのため、加速度計の応答倍率に変化が生じた。加速度計⑤の応答倍率は、擁壁破壊前後で大きな差はなかったが、加速度計④の加速度は上昇し、加速度計②、③は減少した。これは、擁壁にせん断破壊が起こり擁壁の重心が低くなったことによって、加速度計④の倍率が上昇し、せん断破壊部より上に位置する加速度計②、③には入力加速度がうまく伝播しなかったためだと考えられる。

図-7は練積擁壁Aの、入力加速度1000(979)gal時に測定した擁壁の変位である。擁壁の中部において擁壁がせん断破壊を起こし、はらみだしが発生したため、裏グリ石や盛土が現れた。そのため、変位計3が上昇していることがわかる。

図-8は練積擁壁Aの、入力加速度800(784)gal時に測定した擁壁の土圧である。擁壁中部においてはらみだしが発生したため擁壁中部付近の土圧計Bの土圧が大きく上昇していることがわかる。これは、擁壁が崩壊した部分から裏グリ石や盛土が現れたために、大きな値を示したと考えられる。実験の結果、擁壁中部に土圧が集中していたことがわかる。

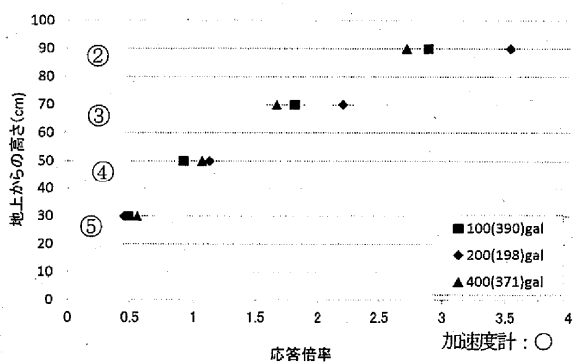


図-5 練積擁壁Aの応答倍率(100gal~400gal)

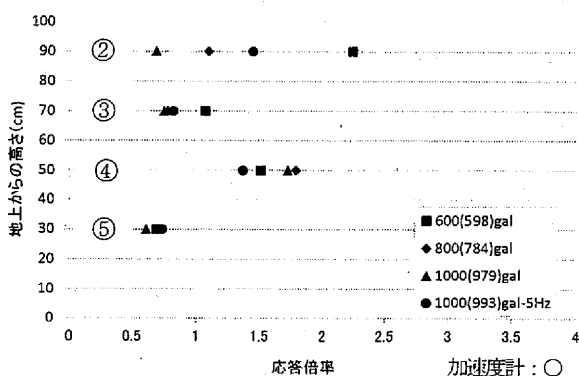


図-6 練積擁壁Aの応答倍率(600gal~1000gal-5Hz)

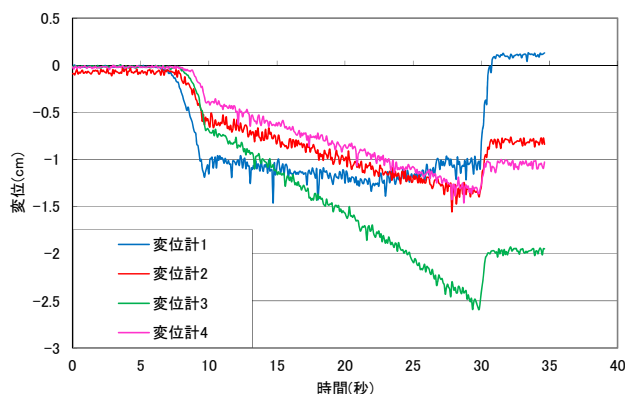


図-7 練積擁壁Aの1000gal時の変位

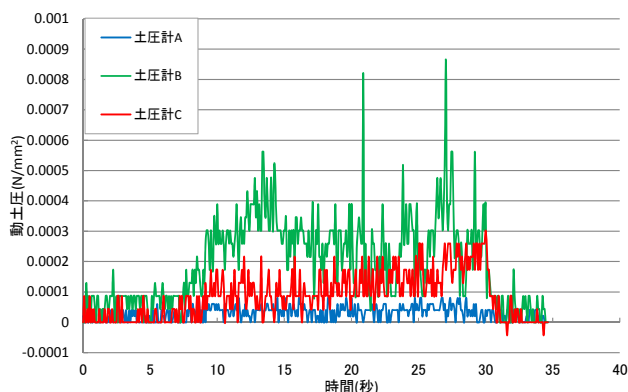


図-8 練積擁壁Aの800gal時の土圧

5.2 練積擁壁Bの実験結果

図-9は入力加速度が20Hzでの50(81), 100(335), 200(934)gal時の擁壁の応答倍率である。結果を見ると、加速度計④の応答が一番小さいという結果となった。これは、振動台での加速度と擁壁上部での加速度が、ちょうど逆位相となっていたからである。そのため、加速度計④付近を中心に擁壁は回転運動をしていると考えられる。このことから、擁壁は非線形的な挙動を示していると考えられる。この原因は、裏込めコンクリートの強度に原因があると考えられる。強度が実際に施工されるコンクリートの1/6の強度で配合されているため、擁壁が非線形的に振動したと考えられる。

図-10は入力加速度1500gal-13Hzを入力した時の変位計の各応答を示したものである。変位計2の上付近で擁壁がせん断破壊を起こし、変位計2~4は、擁壁が膨らむように動いたため、はらみだしの変位の挙動を示した。変位計1付近の擁壁は、せん断破壊により擁壁上部が前方に倒れたために、変位計1は大きく上昇した。また、変位は擁壁の下部から上部にかけて変位が上昇していることがわかる。

図-11は入力加速度1300gal-13Hzを入力した時の土圧計の各応答を示したものである。練積擁壁Cでは擁壁上部でせん断破壊を起こしたため、振動によって沈下した裏

グリ石や盛土は、せん断破壊部からは現れなかった。また、擁壁上部が盛土側に倒れたことによって盛土にさらなる重量がかかり、土圧計Cの応答が大きく上昇した。

5.3 練積擁壁Cの実験結果

図-12は練積擁壁Cの、振動数22Hz、入力加速度100～1000galまで100galずつ増加させたものを入力した時の、加速度計②～⑤の応答倍率を示した図である。練積擁壁Cの応答倍率は、他の練積擁壁の応答倍率と異なる挙動を示した。これは、裏込めコンクリートの強度が低く、かつ、裏込めコンクリートの容積が大きく、擁壁全体の重量が大きいため、擁壁が非線形的に振動し、裏込めコンクリート内部に細かなひび割れが発生したため、複雑な挙動を示したのではないかと考えられる。

図-13は練積擁壁Cの、振動数13Hz、入力加速度500～1000galまで100galずつ増加させた時の、加速度計②～⑤の応答倍率を示した。結果的には振動数を変化させて、振動台の変位を増加させた場合でも、加速度の応答に大きな変化はなかった。また、実験終了後に擁壁を点検しても、大きなひび割れや、せん断破壊などのような破壊は確認できなかった。そのため、擁壁がせん断破壊のような挙動を示さない限り、応答倍率に変化が起きないことがわかった。

変位の実験結果は全ての実験において、各変位は振動により一定の応答を示すが、はらみだしや、大きな残留変位は発生しなかった。

土圧の結果は全ての実験において、擁壁がせん断破壊を起こさなかった。そのため、裏グリ石や盛土が現れず、沈下したため、擁壁下部と中部に設置している土圧計A、Bの応答が上昇した。

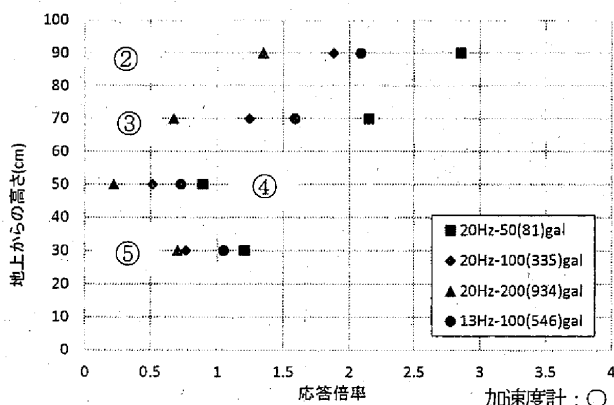


図-9 練積擁壁Bの加速度による応答倍率(1～4回目)

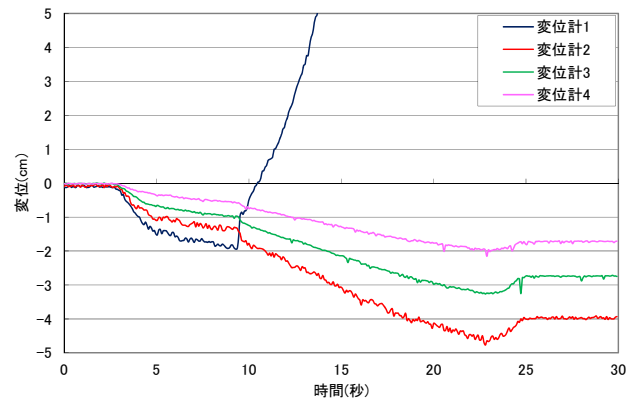


図-10 練積擁壁Bの1500gal-13Hz時の変位

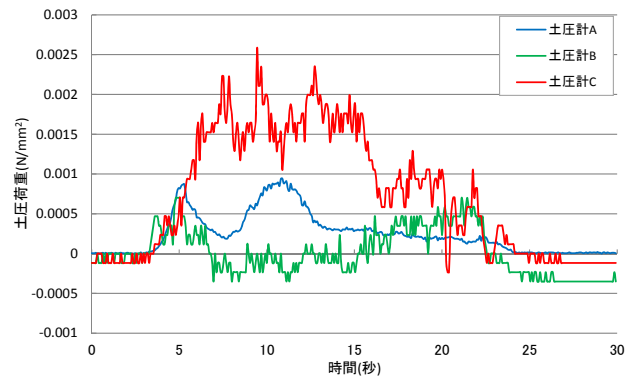


図-11 練積擁壁Bの1300gal-13Hz時の土圧

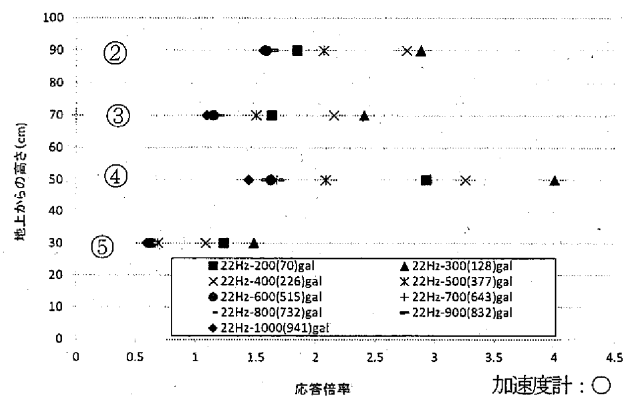


図-12 練積擁壁Cの加速度による応答倍率(22Hz)

5.4 空積擁壁の実験結果

図-14は入力加速度が20Hzでの200(70)～400(257)gal再時の擁壁の応答倍率である。応答倍率は、ほとんどの実験において擁壁上部にかけて上昇している。そのため、擁壁は線形的に振動していると考えられる。しかし、応答倍率の値は練積擁壁より低下する傾向にあった。これは、ブロックを裏込めコンクリートで固定しておらず、擁壁が一体化していないからだと考えられる。また、最後の入力加速度を適用した時に擁壁中部より上が大きく変形した。そのため、振動台からの正弦波が円滑に伝わらなくなり、加速度計の角度も変化したため、擁壁中部以降に設置した加速度計②、③の応答倍率が低下したと考えられる。

図-15は入力加速度400(280)gal時の変位の結果である。結果を見ると、擁壁中部に位置する変位計2の変位がはらみだす方向に大きくなる。これは、裏グリ石や盛土が沈下することによって擁壁中部の変位が増大すると考えられる。擁壁下部に位置する変位計3の変位があまり出ない理由は、固定コンクリートの影響が大きいからだと考えられる。擁壁上部に位置する変位計1の応答がはらみだしとは逆のプラス方向になる理由は、裏グリ石や盛土の上部分が沈下することにより、擁壁側の盛土の高さが低くなる。そのため、ブロックは盛土が沈下した分、盛土側へ倒れるようになるために、変位がプラス方向の応答を示す。

図-16は入力加速度が400(257)gal時の土圧の結果である。振動によって裏グリ石や盛土の沈下が生じ、はらみだしが起こるために、擁壁中部、下部の応答が大きくなる傾向となった。

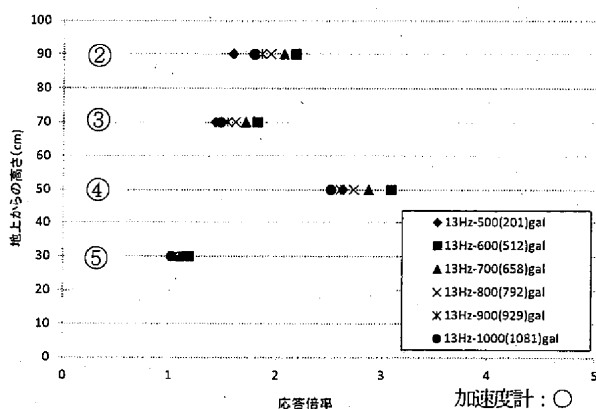


図-13 練積擁壁Cの加速度による応答倍率(13Hz)

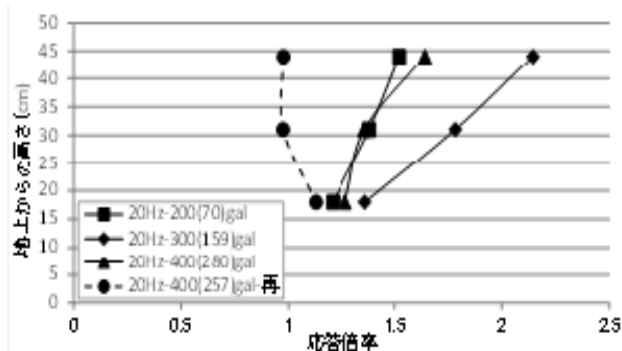


図-14 空積擁壁の加速度による応答倍率

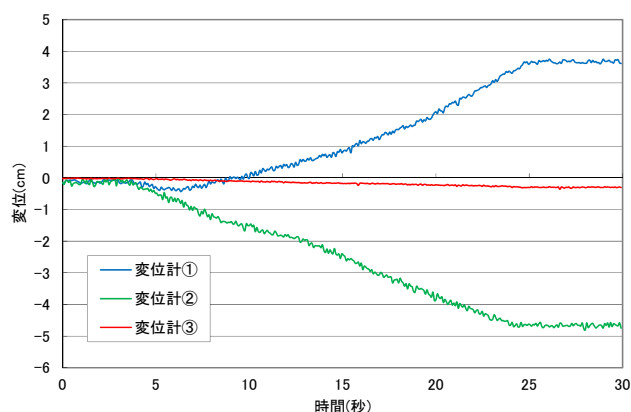


図-15 空積擁壁の400(280)gal時の変位

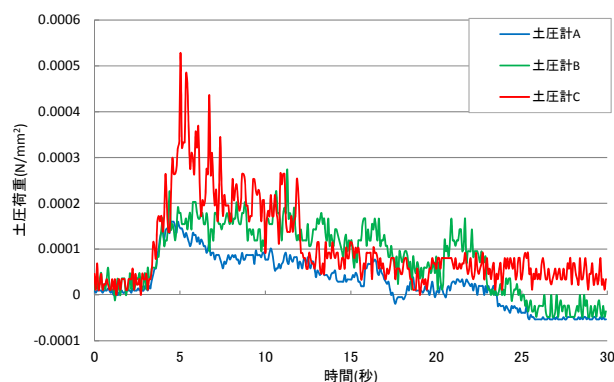


図-16 空積擁壁の400(257)gal時の土圧

6. まとめ

本研究において行った、空積擁壁と練積擁壁について以下に示す。

練積擁壁A～Cのまとめを以下に示す。

- (1) 練積擁壁Aは、裏込めコンクリートの厚さが5mmと薄いため、はらみだしを起こし、擁壁中部よりせん断破壊が生じた。
- (2) 練積擁壁Bは、裏込めコンクリートの強度が低く、また、厚さも半分のため、擁壁がせん断破壊を起こし、破壊に至った。
- (3) 練積擁壁Cは、裏込めコンクリートの強度が低いが、

厚さが標準で作成された。擁壁の応答倍率が非線形な応答を示したが、大きな破壊は起こらなかった。

練積擁壁は、然るべき裏込めコンクリートの強度や厚さの元に作成されている場合は、崩壊などの大きな被害が発生する可能性は低いと考えられる。しかし、実際の練積擁壁は、設計書通りに作成されていない、または裏込めコンクリートの劣化などによって崩壊しているため、補強案の作成が急務である。

空積擁壁の結論を以下に示す。

- (1) 空積擁壁は、ほとんどの実験において、入力加速度を上げていくにつれて、擁壁中部からはらみだしが起こり、約250gal時に擁壁が崩壊した。
- (2) 加速度の応答倍率は、擁壁の上部にかけて増加した。擁壁の上部になればなるほど、大きな力が発生していると考えられる。
- (3) 変位は、全ての実験において、はらみだしにより擁壁中部の変位が上昇し、擁壁が崩れた。
- (4) 土圧は、盛土が擁壁中部よりはらみだしが起こるため、擁壁中部、下部の土圧が大きく上昇した。

空積擁壁は、実際に多くの崩壊の報告がされており、実験においても比較的弱い入力加速度で擁壁が崩壊したため、補強案の作成が急務である。

実験での擁壁の破壊機構は、実際の擁壁の破壊機構と同じような結果となったので、擁壁の振動特1生が解明されていると考えられる。

今後は、実験の妥当性を確かめるために、空積擁壁及び練積擁壁の2次元解析を検討中である。

謝辞：本研究では、石積擁壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会の方々のご意見を参考にさせていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 沖村孝，二木幹夫，岡本敦，南部光広：兵庫県南部地震による宅地擁壁被害の特徴と原因，土木学会論文集，No.637/VI-45，63-77，1999.
- 2) 宅地造成等規制法 施工例別表第4，1961.
- 3) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集 pp.69-76，第275号，1978.

石積擁壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会 メンバー表

氏 名	勤務先名称	勤務先所属部署
橋本 隆雄	㈱千代田コンサルタント	東京支店 地域整備部 次長
宮島 昌克	金沢大学	大学院自然科学研究科 教授
池本 敏和	金沢大学	大学院自然科学研究科 講師
アイゲン オル	東海大学	海洋学部海洋土木工学科 教授
尹 元彪	㈱新紀元総合コンサルタンツ	
小椋 伸司	ジェイアール東海コンサルタンツ	土木事業部 計画設計部 計画設計第4課
清野 純史	京都大学大学院	工学研究科都市社会工学専攻 教授
酒井 久和	広島工業大学	工学部建築・建設工学科 准教授
竹川 正登	(社)全国宅地擁壁技術協会	技術委員長
長岡 康之	㈱アミック	代表取締役
橋本 光男	職業能力開発総合大学校	電気システム工学科 教授
平出 務	(独)建築研究所	建築生産研究グループ 主任研究員
松原 伸之	平和コンクリート工業㈱	営業部
山中 稔	香川大学	工学部安全システム建設工学科
吉田 雅穂	福井工業高等専門学校	環境都市工学科 准教授
若井 明彦	群馬大学大学院	工学研究科社会環境デザイン工学専攻 准教授