

横浜市山手地区ブラフ擁壁の変状調査及び 振動台模型実験

橋本 隆雄¹・恩田 敦史²・小山 悠³・池本 敏和⁴・石作 克也⁵・前田 和徳⁶

¹正会員 国士舘大学理工学部まちづくり学系教授 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)
E-mail: thashimo@kokushikan.ac.jp (Corresponding Author)

²非会員 練馬区土木部計画課地中化推進係 (〒176-8501 練馬区豊玉北6丁目12番1号)
E-mail: ONDA-A2A@city.nerima.tokyo.jp

³非会員 新座市インフラ整備部下水道課工務係 (〒352-8623 埼玉県新座市野火止1-1-1)
E-mail: gesuidou@city.niiza.lg.jp

⁴正会員 金沢大学講師 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵非会員 株式会社日測取締役 (〒102-0083 東京都千代田区麴町4-3)
E-mail: kishizukuri@nissoku.co.jp

⁶正会員 岡部株式会社技術開発部土木・仮設グループ部長 (〒131-8505 東京都墨田区押上2-8-2)
E-mail: k-maeda@okabe.co.jp

横浜市山手地区では慶応3(1867)年に外国人居留置として開放されて以来、道路の開削や宅地造成に伴って各所に大小の崖地が生じ、石材の長手と小口が交互に配置されるブラフ擁壁が整備されるようになった。このブラフ擁壁は、今もお山手地区に数多く現存し主要な景観要素になっている。しかし、横浜市山手地区の近隣である中区打越の住宅地では、石材の老朽化が進行し豪雨によりブラフ擁壁の崩壊が生じた。そこで本研究では、今後の首都圏直下地震や南海トラフ巨大地震、ゲリラ豪雨等に備え、山手地区のブラフ擁壁の現状を把握するために変状調査及び模型振動台実験を行った。その結果、勾配が急な擁壁が非常に危険であり、その対策工法としてアンカーによる補強対策が有効であることが明らかとなった。

Key Words: Bluff retaining wall, stone wall, deformation, cultural property, shaking table experiment

1. はじめに

横浜市山手地区では慶応3(1867)年に外国人居留置として開放されて以来、道路の開削や宅地造成に伴って各所に大小の崖地が生じ、木柵による土留から順次水平方向に石材の長手と小口が交互に配置される図-1及び図-2に示すようなブラフ擁壁が整備されるようになっていった^{注1)~注4)}。このブラフ擁壁は、今もお山手地区に数多く現存し主要な景観要素^{注1)~注4)}になっている。しかし、横浜市山手地区の近隣である中区打越の住宅地では、石材の老朽化が進行し、図-3に示すように2022年5月の豪雨でブラフ擁壁が崩壊した。

そこで本研究では、今後の首都圏直下地震や南海トラフ巨大地震、ゲリラ豪雨等に備え、山手地区のブラフ擁壁の現状を把握するために変状調査及び模型振動台実験を行い、景観を維持しながらの補強対策を検討した。



図-1 ブラフ擁壁の構造模式図



図-2 ブラフ擁壁のモデル



図-3 横浜市中区打越の住宅地の崩壊

2. ブラフ擁壁の現地変状調査及び試掘調査

横浜市山手地区は、丘陵地に当たるため図-4のように高低差を解消するためにブラフ擁壁が数多く存在^{注5)}し、石材の老朽化による変状が進行している。そこで、このブラフ擁壁の現状を把握するために横浜市の協力により表-1の調査票を用いて変状調査を行った。図-5は、調査した箇所的位置図である。

また、ブラフ擁壁の背後地盤は横浜市のモデルで図-2に示すように擁壁背後に砕石があることになっているが、これまでの崩壊において砕石が発見されていない。そこで、振動実験モデルのため、横浜市と一緒に現地ブラフ擁壁の背後地盤の試掘調査を5箇所について行った。

表-1 ブラフ擁壁調査票記入例

名称	29	
方角	東面・西面・南面・北面・その他()	
擁壁延長	3912 cm 曲り点 1 点	
擁壁高さ	左 163 cm・中央 522 cm・右 47 cm	
勾配	左 5 度・中央 15 度・右 5 度	
石材大きさ	縦 27 cm・横 21 cm・控え81 cm	
段数	左 5 段・中央 15 段・右 1 段	
石材材質	房州石・大谷石・その他()	
目地の仕上げ	全体的モルタル	
水抜穴	無 (有) (5cm)	
湧水	擁壁表面が 乾燥・湿潤・流出	
クラック	無 (有) (2箇所みられた)	
表面風化	無 (有) (全体的に)	
修復跡	無 (有) (左側からづみ)	
その他	逆ざりしているところあり	

3. ブラフ擁壁の調査結果

(1) 擁壁の構造

ブラフ擁壁の積み方は、図-6のように長手面と小口面を交互に組み合わせた(a)フランス積を基本としている。しかし、実際の現地では長手面が2つまたは3つ連続しているW型やトリプル型もある。横浜市中区打越の住宅地の崩壊した箇所では、(c)長手積が用いられていた。石材は図-7のように大谷石と房州石があり、房州石がほとんどであった。大谷石は小口面の隙間からの漏水により風化が進み非常に危険であるものが多い。ブラフ擁壁の裏込め材は、図-2のようにこれまで栗石または砕石と考えられていたが、5箇所の試掘調査により石類ではなく全てローム土であることが明らかとなった。

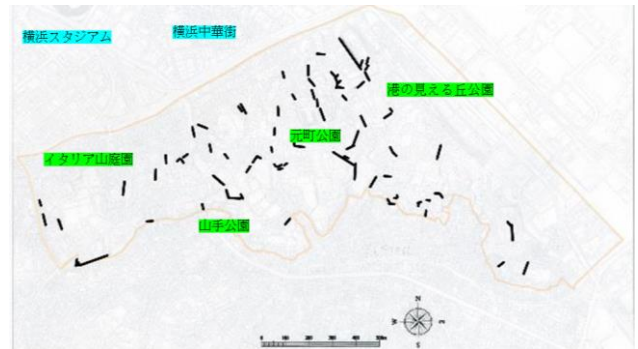
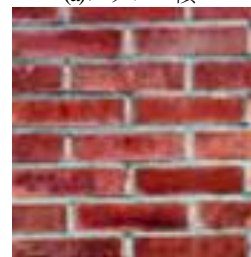


図-5 横浜市山手地区のブラフ擁壁



(a)フランス積

(b)イギリス積

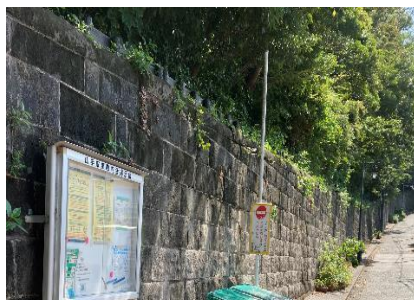


(c)長手積



(d)小口積 (ドイツ積)

図-6 ブロックの積み方^{注6)}



(a) 港の見える丘公園



(b)山手 133 番館

図-4 山手地区のブラフ擁壁



— 大谷石 — 房州石

図-7 ブラフ擁壁の石材 (房州石・大谷石) 位置図

(2) 擁壁の変状

図-8は豪雨による変状後の修復状況である。ブラフ擁壁の変状は図-9のように山手地区の広範囲に存在している。また、変状の種類は図-10のように風化やクラックを生じているものが多い。

(3) 擁壁の傾斜

図-11はブラフ擁壁についての勾配別位置図、図-12は擁壁の勾配に対する変状数の割合、図-13は高さ2.5m以上の擁壁の勾配に対する変状の割合である。この図から、擁壁高が高いものほど勾配が急で変状を生じていることが分かる。

(4) 擁壁の水抜き穴

図-14は水抜き穴の有無別位置図、図-15是水抜き穴と変状の関係分析で、水抜き穴無しの擁壁が大きな変状を生じていることが分かる。水抜き穴が無い擁壁では小口面から水の漏水により石材の風化を促進していることが明らかになった。



図-8 変状後の修復の様子

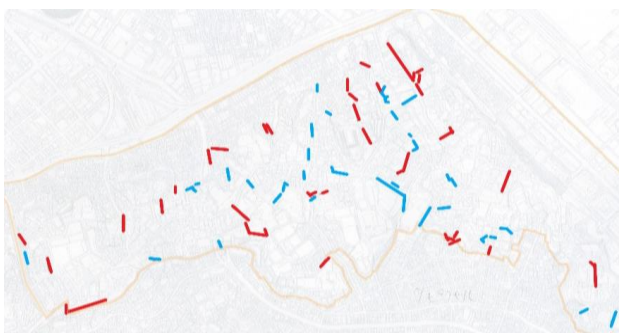


図-9 ブラフ擁壁の変状位置

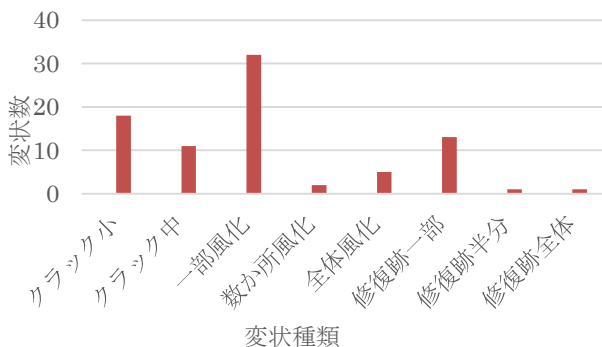


図-10 ブラフ擁壁の変状分析



0~3° 3~6° 6~9° 9~12° 12° ~

図-11 ブラフ擁壁の勾配別位置図

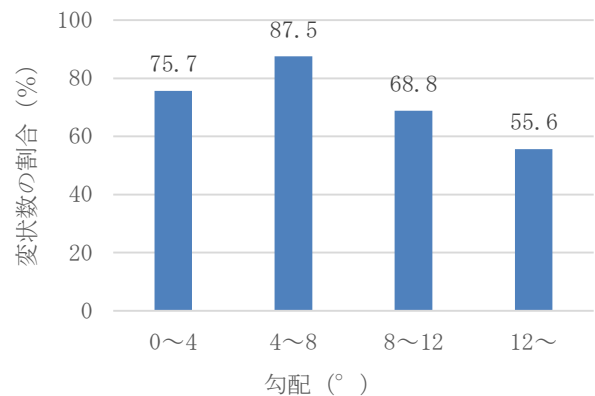


図-12 擁壁の勾配に対する変状数の割合

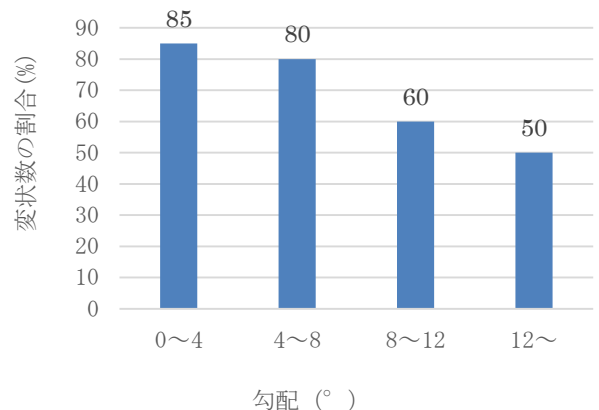


図-13 高さ2.5m以上の擁壁と勾配による変状数の割合

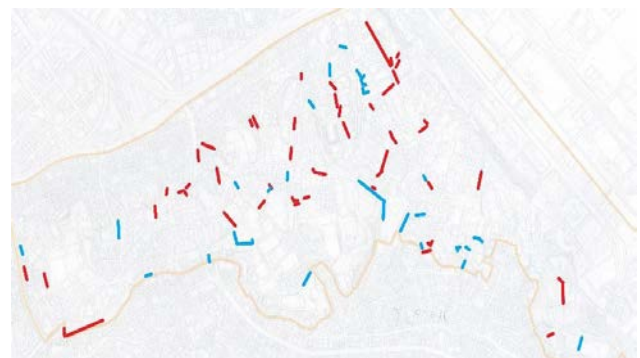


図-14 水抜き穴の有無別位置図

(5) 分析結果

ブラフ擁壁の変状は、**図-16**の要因別変状数の割合から石材の種類と擁壁の勾配の割合が高く、変状要因が2つ以上重なると変状がより発生し易いことが分かった。ただし、対策工法は**図-17**に示すように場所によって擁壁の勾配が平均的に約 0° 、 4° 、 12° と異なるため、勾配に応じた更なる検討が必要である。

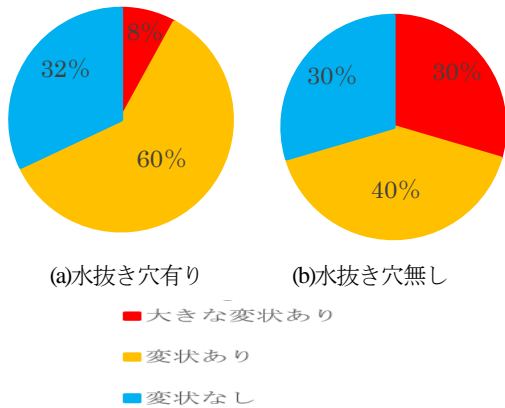


図-15 水抜き穴と変状の関係分析

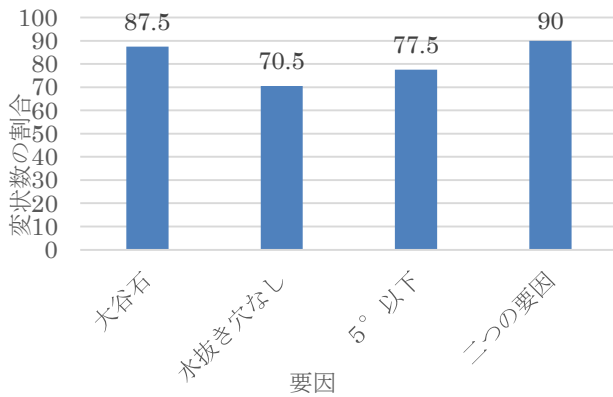


図-16 要因別変状数の割合

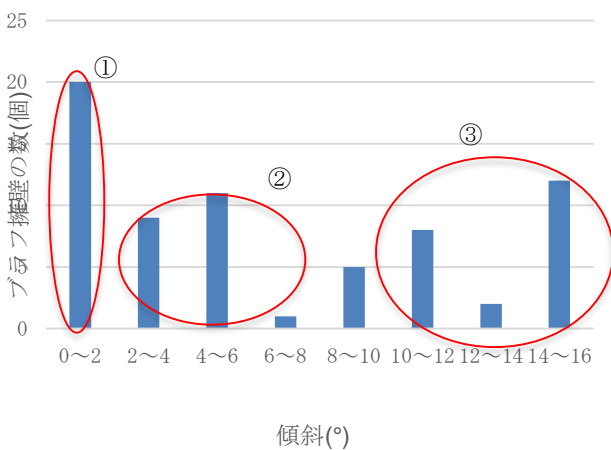


図-17 擁壁の数と傾斜割合

3. 振動台実験の条件

(1) ブラフ擁壁の実験模型

ブラフ擁壁実験模型は、**図-18**のように石材の1/6サイズの型枠を3Dプリンターを用いて作成し、コンクリート材を組み立てて作成した。

- ① 調査した石材の1/6サイズの模型を作成
- ② 石材(3.4×3.4×13.3 cm)を144個作成
- ③ 石材(3.4×3.4×4.5 cm)を16個作成
- ④ 擁壁高さは調査した平均高さ3.3m相当の54cm
- ⑤ 背面地盤はロームの締固管理が難しいため砂を使用

(2) 加振条件

地震動波形は地震等の観測波形ではなく、各石垣の孕み変状や背後地盤の沈下挙動を明確にするために**図-19**に示すように前後にテーパーを付けた加振振動数5Hzの正弦波を作成し、10s間に50波の波を入力して段階的に振幅を増加させた。

(3) ブラフ擁壁の実験内容

振動台実験は、**表-2**に示すように2021年12月22~24日と2022年1月6~8日の6日間に金沢大学の振動台を用いて、1/6サイズの模型を作成して計8回の実験を行った。石材模型は、3.4×3.4×13.3 cmを144個、3.4×3.4×4.5 cmを16個作成した。擁壁高さは現地調査した平均高さ3.3m相当の54cmとした。背面地盤はロームの締固管理が難しいため砂を使用した。擁壁の傾斜は調査結果から代表的な 0° 、 4° 、 12° の3タイプを用いた。



図-18 ブラフ擁壁石材の模型

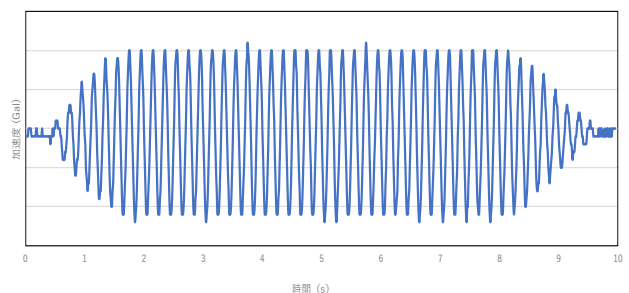


図-19 入力地震動

4. 実験の結果

(1) ブラフ擁壁の傾斜を変えた実験

擁壁の傾斜を変えた実験は、図-20(a)～(c)に示すように 0° 、 4° 、 12° の順に行い、それぞれ250Gal、300Gal、500Galで擁壁が崩壊し、擁壁の傾斜と崩壊の相関性があることが分かった。また、崩壊パターンは、図-21(a)～(c)に示すように傾斜 0° の擁壁は倒壊し、 4° 、 12° と緩くなるにつれて孕みが徐々に進行し崩壊までに時間があることが分かった。山手地区では擁壁の傾斜が小さい方擁壁が多いことから非常に危険であるため補強対策が必要である。

(2) ダブル(W)ブラフ擁壁

ダブルブラフ擁壁は、図-22のように二本毎に控えをとる積み方で山手地区でもいくつかみられ、一本毎に控えをとるブラフ擁壁に比べ拘束力が弱いと考えた。しかし、擁壁の傾斜 4° の実験では、図-20(d)に示すように350Galで崩壊し、図-25(a)に示すようにブラフ擁壁の300Galより強い結果となった。これは、擁壁の小口が縦方向に連続しているため拘束力が働いていると考えられる。今後も実験を行い、データを取っていく必要がある。

また、ダブルブラフ擁壁の補強について図-23のように二本を連結して拘束力を高めてみたが、図-20(e)に示すように350Galで崩壊し、補強する前と同じ実験結果となり、水平方向の拘束力では変わらないことが分かった。

(3) 長手積

ブラフ擁壁は一本毎の控えが、背面と一体化して強度を出していると考えられる。その効果を確認するため長手積の擁壁を実験し、ブラフ擁壁との強度の違いを比較した。その結果は、ブラフ擁壁が300Galで崩壊したのに対して図-20(f)に示すように200Galで崩壊し、小口での控えの長い石材が補強効果を果たしていることが分かった。また、長手積はすぐに倒壊し、ブラフ擁壁が孕み出しを生じながら崩れる際の粘りがなかった。

(4) ブラフ擁壁のアンカー補強対策

ブラフ擁壁のアンカー補強対策は、図-24のように① 4° の擁壁で長さ30cmのアンカーを入れた場合と②擁壁のすべり面に合わせてアンカーを60、50、40、25cm入れた場合で、1箇所/ m^2 間隔で千鳥に配置した。実験の結果は、図-20(g)(h)に示すように①が600Gal、②が700Galで崩壊した。このことからアンカーの長さを擁壁のすべり面に合わせて入れることでより補強効果がみられると考える。アンカー補強対策をした場合は、図-25(b)(c)に示すように補強対策無しの場合と異なり、孕みは起きるが完全に崩壊はしなかった。

表-2 ブラフ擁壁の実験パターン

種類	角度(°)	高さ(cm)	背面土	補強対策	崩壊Gal	含水比(%)
ブラフ擁壁	0	60	砂		250	3.60
	4	60	砂		300	
	12	60	砂		500	
ブラフ擁壁 アンカー補強	4	60	砂	アンカー	600	2.60
	4	60	砂	アンカー	700	
Wブラフ擁壁	4	60	砂		350	
Wブラフ擁壁 壁連結補強	4	60	砂	W連結補強	350	
長手積擁壁	4	60	砂		200	



図-22 ダブルブラフ擁壁



図-23 ダブルブラフ擁壁の補強



図-24 アンカー補強



(a)ブラフ擁壁（傾斜角度 0° ）：250Gal崩壊



(e)Wブラフ連結補強(傾斜角度 4°)：350Gal崩壊



(b)ブラフ擁壁（傾斜角度 4° ）：300Gal崩壊



(f)長手積擁壁（傾斜角度 4° ）：200Gal崩壊



(c)ブラフ擁壁（傾斜角度 12° ）500Gal崩壊



(g)アンカー補強（ $l=30\text{cm}$ ）600Gal崩壊



(d)Wブラフ擁壁（傾斜角度 4° ）：350Gal崩壊



(h)アンカー補強（ $l=25\sim 60\text{cm}$ ）700Gal崩壊

図-20 振動台実験によるブラフ擁壁の崩壊

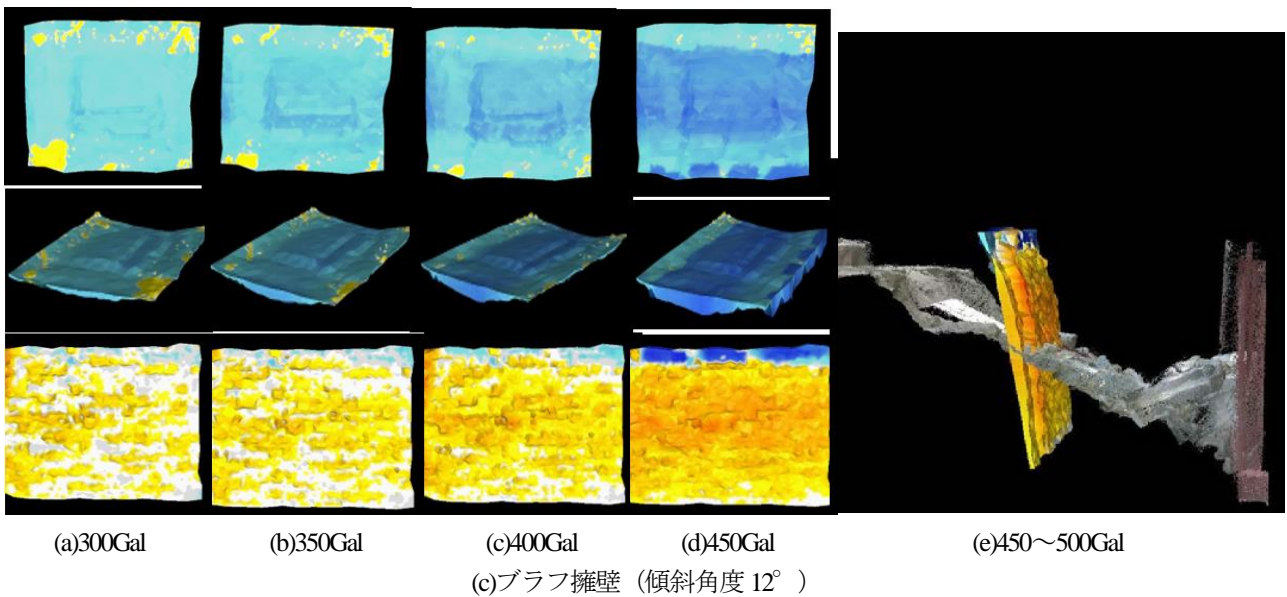
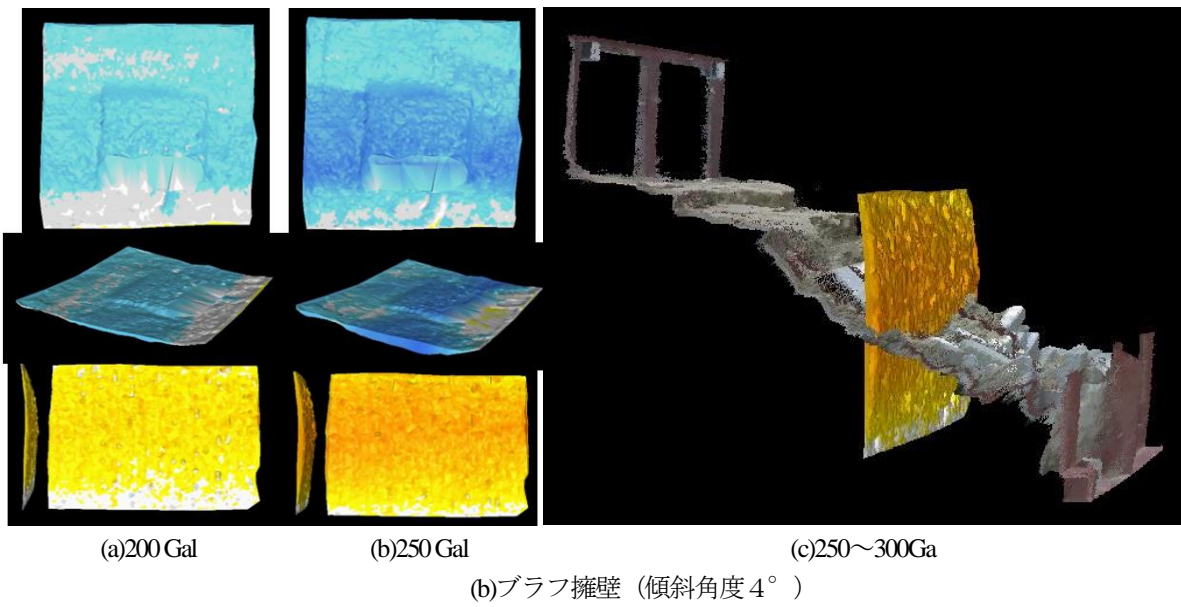
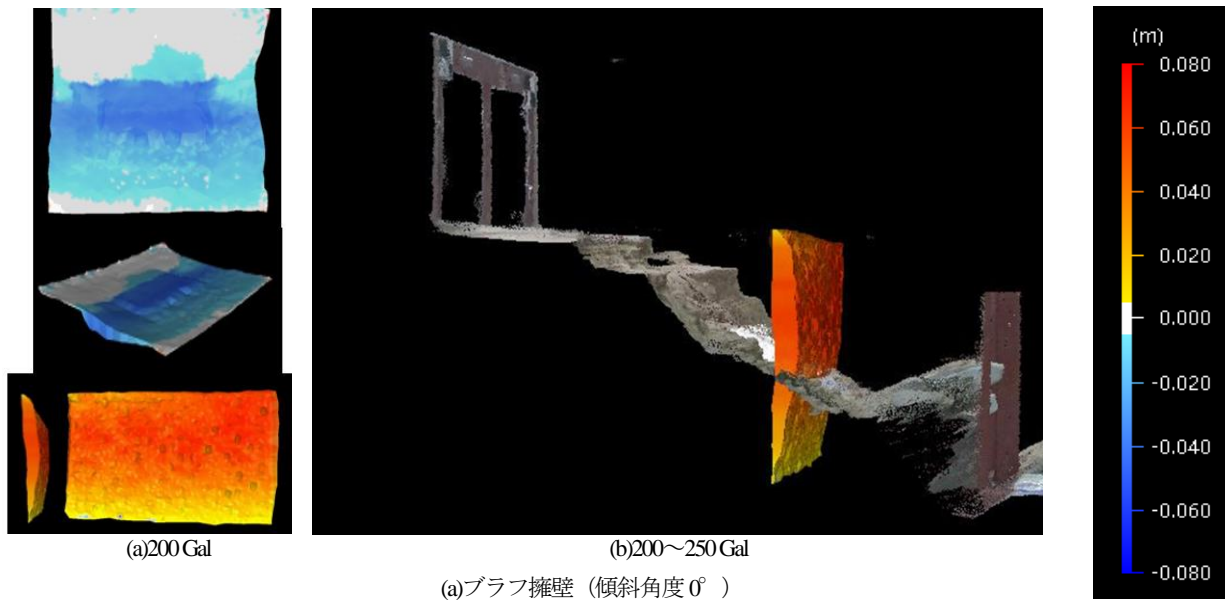


図-21 各加振毎の変状図(1)

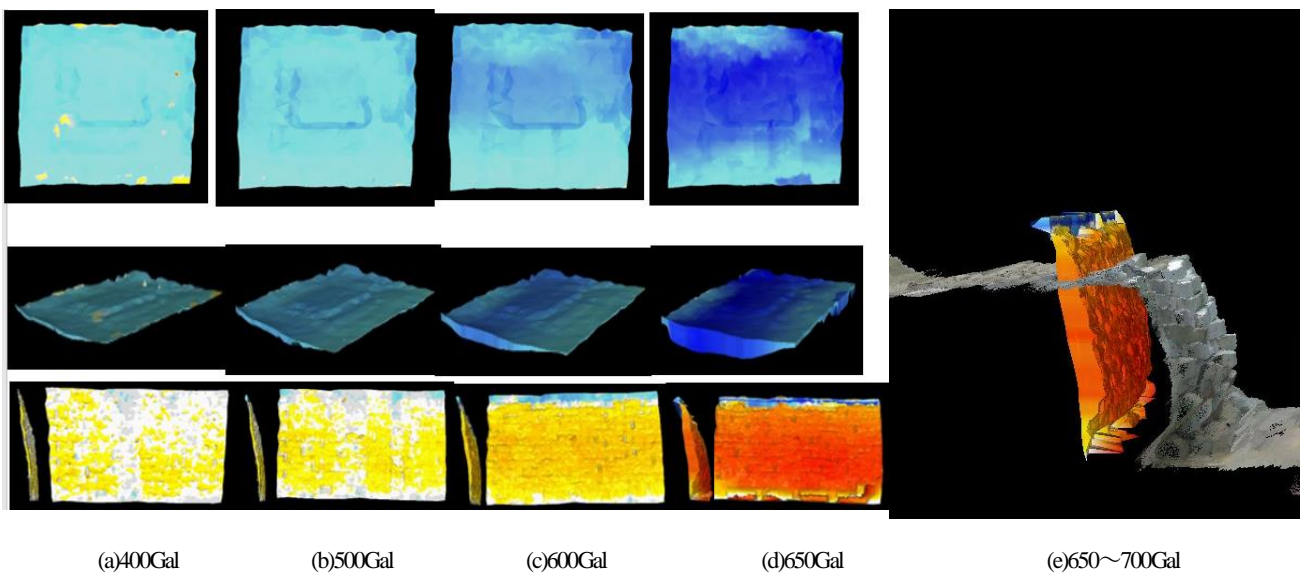
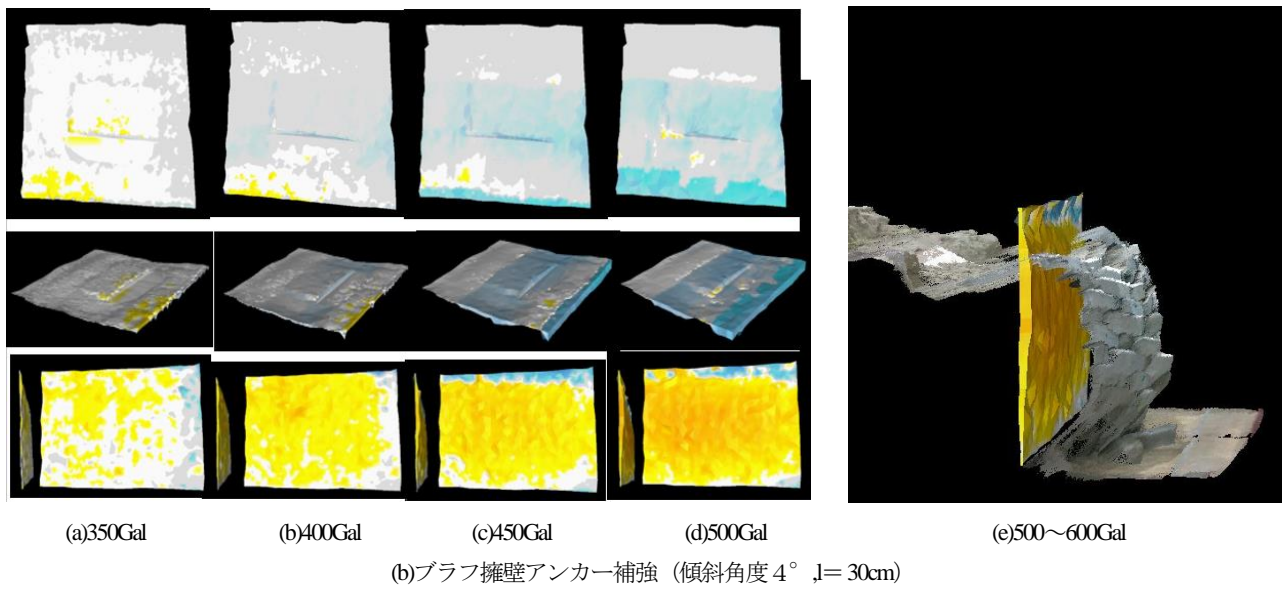
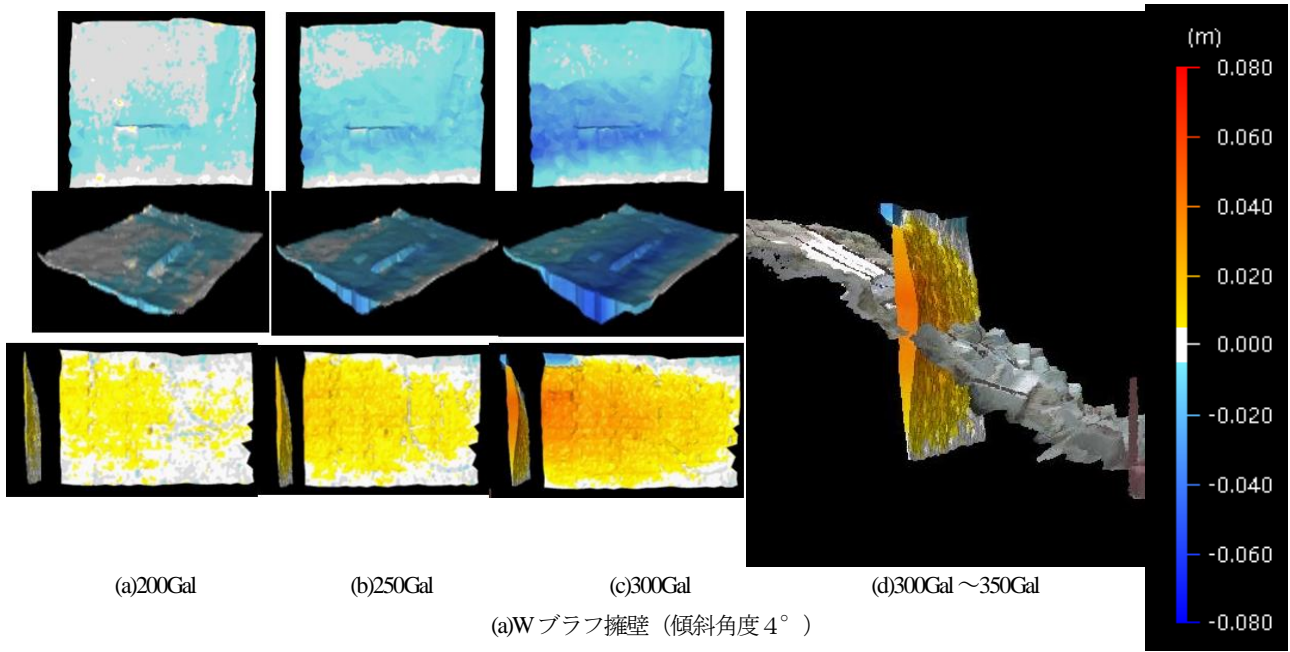


図-25 各加振毎の変状図(2)

(5) 振動台実験結果まとめ

振動台実験結果から図-26 で示すように擁壁の角度と崩壊 Gal 数に相関関係があり、以下のことが明らかとなった。

a) ブラフ擁壁の耐震性

ブラフ擁壁は一本毎の控えがアンカーの役割を担い、背面と一体化していることから長手積に比べると耐震性がある。

b) ダブルブラフ擁壁の耐震性

ダブルブラフ擁壁は控えの本数が少ないにも関わらず、むしろブラフ擁壁よりも崩壊 Gal 数が大きくなった。ただし、補強する場合長手に積んでいる二本を連結しても補強効果が現れなかった。

c) 長手積ブラフ擁壁の耐震性

長手積ブラフ擁壁は控えがないために耐震性が無く危険である。

d) 擁壁傾斜の影響

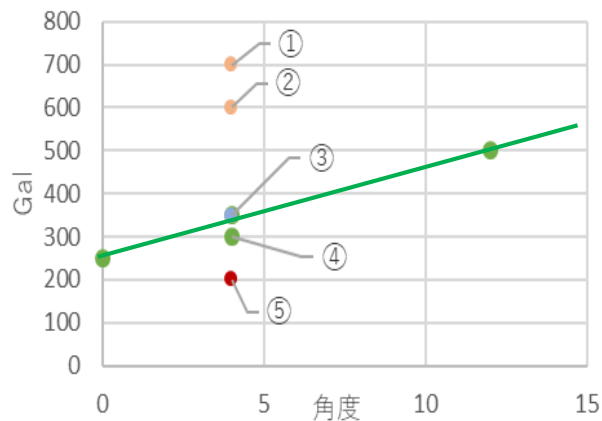
擁壁傾斜が急なもの常時でも変状が多く、地震時には傾斜角度と崩壊 Gal 数に相関関係がみられた。

e) アンカーを用いた補強対策

アンカーを用いた補強対策は、擁壁の耐久性が上がり効果的である。また、アンカーの長さを擁壁の高さに対して長くすると、さらに補強効果がある。

f) ブラフ擁壁の崩壊・解析

ブラフ擁壁の崩壊は、上部に沈下が生じ、擁壁の側面が全体的に孕み、崩壊していることが明らかになった。



①すべり面アンカー ②30 cmアンカー ③ダブルブラフ擁壁・ダブル補強 ④ブラフ擁壁 ⑤長手積

図-26 ブラフ擁壁の傾斜角度と崩壊 Gal 数

5. まとめ

(1) ブラフ擁壁の変状調査及び試掘調査

ブラフ擁壁の変状調査及び試掘調査を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 大谷石は小口面の隙間からの漏水により風化が進み非常に危険である。
- ② ブラフ擁壁の変状は風化やクラックを生じているものが多い。
- ③ 擁壁高が高いものほど勾配が急で変状を生じている。
- ④ 水抜き穴無し擁壁が大きな変状を生じている。
- ⑤ 擁壁の背後は砕石でなく全てローム土である。

(2) ブラフ擁壁の振動台実験

ブラフ擁壁の振動台実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 傾斜が大きいブラフ擁壁は崩壊しやすい。
- ② 長手積ブラフ擁壁は控えがないため崩壊しやすい。
- ③ アンカーを用いた補強対策は、擁壁の耐久性が上がり効果的である。
- ④ アンカーの長さを擁壁の高さに対して長くすると、さらに補強効果がある。

謝辞：本研究は横浜市横浜都市デザイン室の協力を受けて行ったものである。ここに感謝の意を表します。

NOTES

- 注1) 横浜市歴史的資産調査会,1988:都市の記憶—横浜の土木遺産,
- 注2) 2020年11月24日 2020年11月24日 横浜案内板集め, ブラフ積み 横浜らしさあふれる石積み, <https://yokohamasuki.com/descriptionboard/bluff/>
- 注3) 柏葉のブラフ積みと巨大擁壁, https://furukabe.com/FK_Kashiwaba.html
- 注4) 横浜市歴史的資産調査会,2013:山手の西洋館 外国人居留地の歴史的景観
- 注5) 横浜市都市整備局都心再生課,2015: 山手地区のブラフ積み擁壁 別図
- 注6) 「ブラフ積み」とは <https://www.furukabe.com/bluffmsnry.html>

REFERENCES

- 1) 横浜市教育委員会,1987:横浜山手—横浜山手洋館群保存対策調査報告書,pp7-9,pp81-823)
- 2) 横浜市都市整備局,2019: 山手地区都市景観形成ガイドライン,p32,p44
- 3) 横浜市,2020: 横浜市景観計画 (変更にかかる部分) 山手地区
- 4) 吉田 秀樹: 横須賀における「ブラフ積み擁壁」に関する研究-「海と船が見える坂道」と連携したルートミュージアムの地域資源としての可能性令和3年5月

(Received July 1, 2022)

(Accepted November 1, 2022)

INVESTIGATION OF DEFORMATION OF BLUFF RETAINING WALL IN YAMATE DISTRICT, YOKOHAMA CITY AND SHAKING TABLE MODEL TEST

Takao HASHIMOTO, Atsushi ONDA Yu KOYAMA, Toshikazu IKEMOTO, Katsuya
ISHIZUKURI, and Kazunori MAEDA

Since 1867 when the Yamate district of Yokohama City was opened to the public as a detention facility for foreigners, bluff retaining walls have been used as a countermeasure against cliffs. However, in the residential areas of Yokohama City, the deterioration of stone materials has progressed, and heavy rains have caused the collapse of bluff retaining walls. In this study, we investigated the deformation of the bluff retaining wall in the Yamate area and conducted a model shaking table test in preparation for future mega-earthquakes and heavy rains. As a result, it was clarified that steep retaining walls are very dangerous and that reinforcement measures using anchors are effective.