

# ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響

## Effects of Installation Methods of GCLs on Seismic Performance of Small Earth Dams



防災科学技術研究所研究資料 第四二五号

ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響

防災科学技術研究所

## 防災科学技術研究所研究資料

- 第 357 号 浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 DVD) 32pp. 2011 年 2 月発行
- 第 358 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 29(平成 22 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
- 第 359 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 30(平成 22 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
- 第 360 号 K-NET・KiK-net 強震データ(1996 - 2010) (DVD 版 6 枚組). 2011 年 3 月発行
- 第 361 号 統合化地下構造データベースの構築 <地下構造データベース構築ワーキンググループ報告書> 平成 23 年 3 月 238pp. 2011 年 3 月発行
- 第 362 号 地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」16 葉(5 万分の 1). 2011 年 11 月発行
- 第 363 号 長岡における積雪観測資料(33) (2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
- 第 364 号 新庄における気象と降積雪の観測(2010/11 年冬期) 45pp. 2012 年 2 月発行
- 第 365 号 地すべり地形分布図 第 50 集「名寄」16 葉(5 万分の 1). 2012 年 3 月発行
- 第 366 号 浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年 2 月発行
- 第 367 号 防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井検層データ 29pp. 2012 年 3 月発行
- 第 368 号 台風災害被害データの比較について(1951 年～2008 年, 都道府県別資料) (付録 CD-ROM)19pp. 2012 年 5 月発行
- 第 369 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書 - 実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験及びその解析 - (付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行
- 第 370 号 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討(付録 CD-ROM) 410pp. 2013 年 3 月発行
- 第 371 号 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(平林・岩屋・甲山) (付録 CD-ROM) 27pp. 2012 年 12 月発行
- 第 372 号 長岡における積雪観測資料(34) (2011/12 冬期) 31pp. 2012 年 11 月発行
- 第 373 号 阿蘇山一の宮および白水火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 48pp. 2013 年 2 月発行
- 第 374 号 霧島山万膳および夷守台火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 50pp. 2013 年 3 月発行
- 第 375 号 新庄における気象と降積雪の観測(2011/12 年冬期) 49pp. 2013 年 2 月発行
- 第 376 号 地すべり地形分布図 第 51 集「天塩・枝幸・稚内」20 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 377 号 地すべり地形分布図 第 52 集「北見・紋別」25 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 378 号 地すべり地形分布図 第 53 集「帯広」16 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 379 号 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討 349pp. 2012 年 12 月発行
- 第 380 号 日本の火山ハザードマップ集 第 2 版(付録 DVD) 186pp. 2013 年 7 月発行
- 第 381 号 長岡における積雪観測資料(35) (2012/13 冬期) 30pp. 2013 年 11 月発行
- 第 382 号 地すべり地形分布図 第 54 集「浦河・広尾」18 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 383 号 地すべり地形分布図 第 55 集「斜里・知床岬」23 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 384 号 地すべり地形分布図 第 56 集「釧路・根室」16 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 385 号 東京都市圏における水害統計データの整備(付録 DVD) 6pp. 2014 年 2 月発行
- 第 386 号 The AITCC User Guide -An Automatic Algorithm for the Identification and Tracking of Convective Cells- 33pp. 2014 年 3 月発行
- 第 387 号 新庄における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期) 47pp. 2014 年 2 月発行
- 第 388 号 地すべり地形分布図 第 57 集「沖縄県域諸島」25 葉(5 万分の 1). 2014 年 3 月発行
- 第 389 号 長岡における積雪観測資料(36) (2013/14 冬期) 22pp. 2014 年 12 月発行
- 第 390 号 新庄における気象と降積雪の観測(2013/14 年冬期) 47pp. 2015 年 2 月発行
- 第 391 号 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書 -大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験- 193pp. 2015 年 2 月発行
- 第 392 号 地すべり地形分布図 第 58 集「鹿児島県域諸島」27 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 393 号 地すべり地形分布図 第 59 集「伊豆諸島および小笠原諸島」10 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 394 号 地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部」15 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 395 号 水害統計全国版データベースの整備. 発行予定
- 第 396 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015 年 7 月発行
- 第 397 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015 年 9 月発行
- 第 398 号 長岡における積雪観測資料(37) (2014/15 冬期) 29pp. 2015 年 11 月発行
- 第 399 号 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行
- 第 400 号 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年 12 月発行

■ 表紙写真・・・ 遮水シート工法施工現場の様子

## 防災科学技術研究所研究資料

- 第 401 号 全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 2015 年 12 月発行
- 第 402 号 新庄における気象と降積雪の観測(2014/15 年冬期) 47pp. 2016 年 2 月発行
- 第 403 号 地上写真による鳥島山南東斜面の雪渓の長期変動観測(1979～2015 年) 52pp. 2016 年 2 月発行
- 第 404 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 2016 年 3 月発行
- 第 405 号 土砂災害予測に関する研究集会-現状の課題と新技術-プロシーディング 220pp. 2016 年 3 月発行
- 第 406 号 津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年 8 月発行
- 第 407 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震) における災害情報の利活用に関するインタビュー調査 -改訂版- 120pp. 2016 年 10 月発行
- 第 408 号 新庄における気象と降積雪の観測(2015/16 年冬期) 39pp. 2017 年 2 月発行
- 第 409 号 長岡における積雪観測資料(38) (2015/16 冬期) 28pp. 2017 年 2 月発行
- 第 410 号 ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究 -改修されたため池堤体の耐震性能検証- 87pp. 2017 年 2 月発行
- 第 411 号 土砂災害予測に関する研究集会-熊本地震とその周辺-プロシーディング 231pp. 2017 年 3 月発行
- 第 412 号 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 -多時期ベアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出- 107pp. 2017 年 9 月発行
- 第 413 号 熊本地震被災地域における地形・地盤情報の整備 -航空レーザ計測と地上観測調査に基づいた防災情報データベースの構築- 154pp. 2017 年 9 月発行
- 第 414 号 2017 年度全国市区町村への防災アンケート結果概要 69pp. 2017 年 12 月発行
- 第 415 号 全国を対象とした地震リスク評価手法の検討 450pp. 2018 年 3 月発行予定
- 第 416 号 メキシコ中部地震調査速報 28pp. 2018 年 1 月発行
- 第 417 号 長岡における積雪観測資料(39) (2016/17 冬期) 29pp. 2018 年 2 月発行
- 第 418 号 土砂災害予測に関する研究集会 2017 年度プロシーディング 149pp. 2018 年 3 月発行
- 第 419 号 九州北部豪雨における情報支援活動に関するインタビュー調査 90pp. 2018 年 7 月発行
- 第 420 号 液状化地盤における飽和度確認手法に関する実験的研究 -不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実験- 62pp. 2018 年 8 月発行
- 第 421 号 新庄における気象と降積雪の観測(2016/17 年冬期) 45pp. 2018 年 11 月発行
- 第 422 号 2017 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用 56pp. 2018 年 12 月発行
- 第 423 号 耐震性貯水槽の液状化対策効果に関する実験研究 -液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認- 48pp. 2018 年 12 月発行
- 第 424 号 バイプロを用いた起振時過剰間隙水圧計測による原位置液状化強度の評価手法の検討-原位置液状化強度の評価に向けた土槽実験の試み- 52pp. 2019 年 1 月発行

- 編集委員会 -		<b>防災科学技術研究所研究資料 第 425 号</b>
(委員長)	浅野 陽一	
(委員)		編集兼 国立研究開発法人
三輪 学央	下瀬 健一	発行者 <b>防災科学技術研究所</b>
河合 伸一	平島 寛行	〒 305-0006
中村 いずみ	市橋 歩	茨城県つくば市天王台 3-1
(事務局)		電話 (029)863-7635
白田 裕一郎	前田 佐知子	<a href="http://www.bosai.go.jp/">http://www.bosai.go.jp/</a>
池田 千春		印刷所 前田印刷株式会社
(編集・校正)	樋山 信子	茨城県つくば市山中 152-4

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2019

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/>) をご覧下さい。

## ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響

中澤博志\*・澤田 豊\*\*・重元凜太郎\*\*・古林智宏\*\*\*・谷本幹夫\*\*\*・澁谷 啓\*\*  
河端俊典\*\*・森田明平\*\*\*・小田哲也\*\*\*・梶原浩一\*・井上貴仁\*

### Effects of Installation Methods of GCLs on Seismic Performance of Small Earth Dams

Hiroshi NAKAZAWA\*, Yutaka SAWADA\*\*, Rintaro SHIGEMOTO\*\*, Tomohiro KOBAYASHI\*\*\*,  
Mikio TANIMOTO\*\*\*, Satoru SHIBUYA\*\*, Toshinori KAWABATA\*\*,  
Koichi KAJIWARA\*, and Takahito INOUE\*

*\*Department of Disaster Mitigation Research,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan  
nakazawa@bosai.go.jp, kaji@bosai.go.jp, dinoue@bosai.go.jp*

*\*\*Kobe University, Japan  
sawa@harbor.kobe-u.ac.jp, 174a006a@stu.kobe-u.ac.jp,  
sshibuya@kobe-u.ac.jp, kawabata@kobe-u.ac.jp*

*\*\*\*Hyogo Prefecture, Japan  
Tomohiro\_Kobayashi@pref.hyogo.lg.jp, Mikio\_Tanimoto@pref.hyogo.lg.jp,  
Akihira\_Morita@pref.hyogo.lg.jp, Tetsuya\_Oda@pref.hyogo.lg.jp*

#### Abstract

Recent years, Geosynthetic Clay Liners (GCLs) have been used to repair deteriorated small earth dams as impermeable materials. In a past study, the seismic performance of the embankment, in which a continuous GCL was installed in a stairs shape was verified. When retrofitting a embankment with GCL, GCL panel overlap can be introduced. In addition to a stairs shape, GCLs are used in a straight shape. However, the effects of GCL panel overlap and difference of installation methods on the seismic performance of the embankments remain unclear. In this study, full-scale shaking table tests were performed for 3 m embankment models with GCLs installed in a stairs shape and a straight shape, which were compared with the embankment with a continuous GCL in the past study. As a result, it was indicated that no change in GCL overlap length occurred due to shear displacement associated with Level2 shaking. Moreover, comparing the damage survey of embankments, it was revealed that the seismic performance of the straight shape is lower than that of the stairs shape.

**Key words:** Small earth dam, Full-scale shaking table test, Geosynthetic clay liner, Seismic performance, Residual deformation

---

\* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門

\*\* 神戸大学

\*\*\* 兵庫県

## 1. はじめに

農林水産省は、2013 年から 3 年間で、受益面積 0.5 ha 以上の約 9 万 6 千箇所のため池を対象に、ため池一斉点検を実施した。その結果、決壊時に下流の住宅等に被害を与える恐れのある「防災重点ため池」であると判断された約 1 万 1 千箇所については、さらに詳細調査を行う必要があるとされた。平成 29 年 3 月時点では、4,444 箇所耐震性に関する調査が行われており、うち 2,434 箇所耐震不足が確認された。また、豪雨に対する調査も行われ、3,634 箇所のうち 1,399 箇所対策が必要であることが明らかになった。それらのため池については、ため池堤体の改修により安全性を向上させる対策が推進されている(農林水産省, 2018)。

ため池堤体の地震被害に関して、2011 年の東北地方太平洋沖地震で、藤沼貯水池などの 3 つのため池が決壊したことは記憶に新しい(堀ら, 2012)。被災状況については、谷ら(1987)は、斜面すべり、はらみ出しは、上流側の被害が下流側に比べて倍程度の発生を示していること、基礎地盤や堤体土が砂質土である場合に被害率が高いこと、貯水率が高い場合に被害が起りやすいことが示している。したがって、堤体の飽和部は不飽和部より強度が小さく、ため池堤体内の浸潤線を低くするような対策が必要であると判断される。

一般的にため池改修の際には、透水性の低い粘性土を堤体上流側に用いられるが、ダンプトラック等の大型車両での土の搬入が困難な場合があり、さらに近年、改修ため池近隣での良質な粘性土の入手が困難になりつつある。そのため、廃棄物最終処分場で用いられるベントナイト系遮水シート(以降 GCL と称す)が堤体改修に用いられる場合がある(青山ら, 2011)。この 20 年間で施工事例は増えつつあるものの、設計手法は確立されていない現状にある。

図 1 に、GCL による改修施工例を示す。GCL は工場で作られる規格品であるため、現場で継ぎ目を設けることを余儀なくされる。継ぎ目部分の GCL は互いに接着されず、規定の幅で重ね合わされる。遮水性能を確保するために、重ね合わせ部分には、粒状のベントナイトが敷き均される。しかしながら、重ね合わせ部ベントナイトのせん断強度が小さいことが明らかであり、地震時に重ね合わせ部が弱部となる可能性は否めない(例えば、佐々木ら, 2015 ;

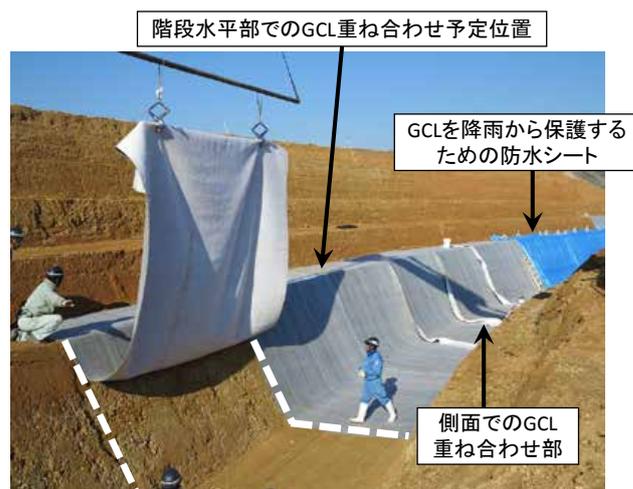


図 1 ため池改修施工での GCL 設置状況  
Fig. 1 Retrofitting of upstream face of small earth dam with GCL.

眞木ら, 2017)。

GCL を用いた改修堤体の耐震性に関して、1 枚の連続した GCL を階段状に設置した堤高 3.0 m の堤体を対象に、震動実験が実施された(小田ら, 2016 ; 澤田ら, 2016 ; 中澤ら, 2016 ; Sawada *et al.*, 2018)。土地改良設計指針「耐震設計」でレベル 2 地震動と定義される地震を想定した最大 470 gal の加振により、堤体の天端で大きな縦断クラックが発生した。実験後の損傷状況調査では、堤体は上流側に大きく変形し、沈下が生じたことも確認された。しかしながら、GCL 自体に損傷は確認されず、堤体からの漏水も認められなかった。さらに、同時に加振した前刃金工法の堤体と比較しても変形量は変わらず、同程度の耐震性であることが明らかになった。重ね合わせ部を設けずに階段状に GCL を設置した堤体に関しては耐震性が検証されたが、重ね合わせ部を設けた堤体の耐震性は未解明である。

GCL の設置方法に関しては、階段状での設置に加えて、最終処分場のように直線状に設置される場合がある。GCL が直線状に設置された堤体の耐震性を検討するため、GCL を用いた模型堤体の小型振動台実験が実施されている。神山ら(2014)は、浸潤 GCL を直線状に設置した堤高 200 mm の模型堤体を対象に、振動実験を実施した。その結果、GCL を傾斜角 45° と 50° で設置した堤体では、400 gal 加振で損傷は確認されず、60° で GCL と覆土の境界面で小さなクラックが発生するに留まった。Jeong *et al.* (2016) は、乾燥 GCL を 1 : 1.5 の勾配で直線状に設

置した堤体を対象に、振動実験を実施した。その結果、1,000 gal 加振で堤体に損傷は確認されず、1,200 gal 加振で覆土にすべり破壊が生じた。しかしながら、模型寸法が小さいため、これらの結果によって GCL を直線状に設置した堤体の耐震性が検証されたとは言い難い。

本研究では、GCL を階段状に設置して重ね合わせ部を設けた堤体および GCL を直線状に設置した堤体を対象に、実大規模震動実験を実施し、既往の連続かつ階段状の GCL を有する堤体との比較から、GCL 重ね合わせ部および GCL の設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実大規模震動実験

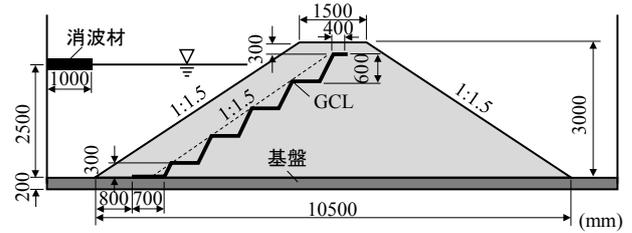
既往の研究 (Sawada *et al.*, 2018) でも用いられた実大三次元震動台施設で行われた。震動台の寸法は  $15 \times 20$  m であり、鋼製土槽の内寸は、長さ 12.59 m、高さ 3.55 m、奥行き 2.50 m であり、質量は 105 t である。

図 2 (a) に、Sawada *et al.* (2018) の研究での堤体 (Model-A) の断面を示す。堤高 3.0 m、天端幅 1.5 m であり、法面勾配は土地改良設計指針「ため池整備」に基づいて 1 : 1.5 とした。堤体の作製方法に関しては、既往の研究を参照されたい。

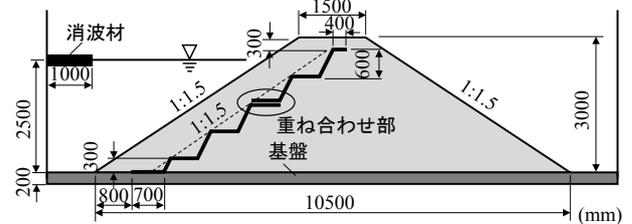
図 2 (b) に、GCL を階段状に設置し、重ね合わせ部を設けた堤体 (Model-B) の断面を示す。重ね合わせ部を設けたことを除いては、Model-A と同一である。重ね合わせ部では、下部 GCL を設置後、その上に上部 GCL を設置した。重ね合わせ長 350 mm の中心 250 mm の幅に、遮水性能を確保するために、粒状ベントナイトを散布した。その単位面積あたりの乾燥質量は、実施工を考慮して  $8.9 \text{ kg/m}^2$  とした。

図 2 (c) に、GCL を直線状に設置した堤体 (Model-C) の断面を示す。GCL は法面に平行となるように 1 : 1.5 の勾配で設置した。

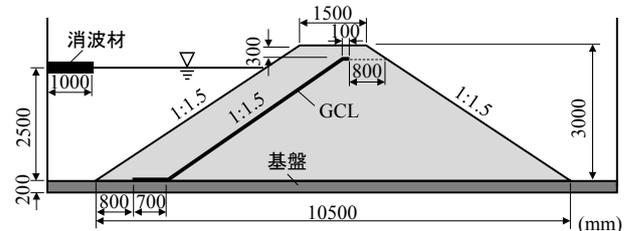
堤体の作製方法に関して、堤体材料は大型土囊に入れられ、クレーンで土槽の中へ運ばれた。材料はバックホウおよびレーキを用いて敷き均された。転圧に関しては、予め行われた試験盛土により、仕上がり層厚を 0.20 m にするために、巻出し厚を 0.23 m にした。さらに、現行の設計基準で定められている締固め度 95% を満たすために、振動ローラの通



(a) 1枚のGCLを階段状に設置した堤体 (Model-A)



(b) GCL を階段状に設置し重ね合わせ部を設けた堤体 (Model-B)



(c) GCL を直線状に設置した堤体 (Model-C)

図 2 実験堤体断面図

Fig. 2 Cross section of models.

過回数を 6 回とした。RI 計器と砂置換による密度試験を実施したところ、堤体の平均締固め度は 97% であった。

GCL 下流部の盛土後、上流側斜面を階段状または直線状に切土整形して、切土断面に GCL を設置した。両堤体で GCL 境界部および壁面からの漏水を防ぐために、幅 0.7 m の GCL と基盤の境界面に粒状ベントナイトを散布し、両壁面から 10 cm の部分に、堤体材料の代わりに粘性土を用いた。GCL 設置後の覆土の転圧の際には、GCL 上流側は狭く、ハンドローラーによる転圧が困難であったため、タンピングランマーを用いた。法面成形の際には、バックホウが用いられた。貯水位は 2.5 m としたため、水面から天端までの高さは 0.5 m である。水の飛散による外部への流出を防止するために、土槽壁面から 1 m の水面に消波材を設置した。

### 2.2 土質材料

堤体材料については、本研究では Model-A で用い

表1 堤体材料の物理諸元  
Table 1 Physical properties of the random materials.

堤体の種類	Model-A	Model-B・C
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.644	2.655
平均粒径 $D_{50}$ (mm)	0.367	0.35
均等係数 $U_c$	184.8	195.0
曲率係数 $U_c'$	64.1	100.5
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	12.6	13.2
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.890	1.906
液性限界 $w_L$ (%)	NP	NP
塑性限界 $w_p$ (%)	NP	NP

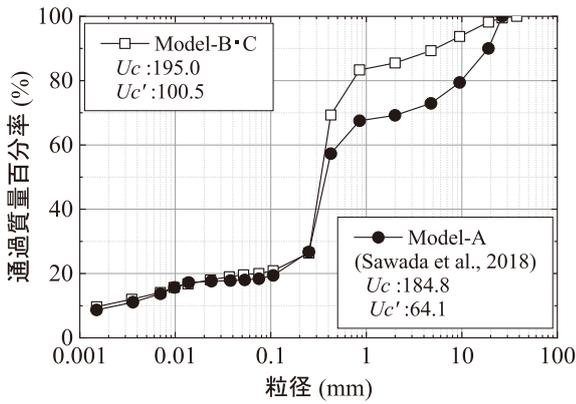


図3 粒径加積曲線  
Fig. 3 Grain size accumulation curves.

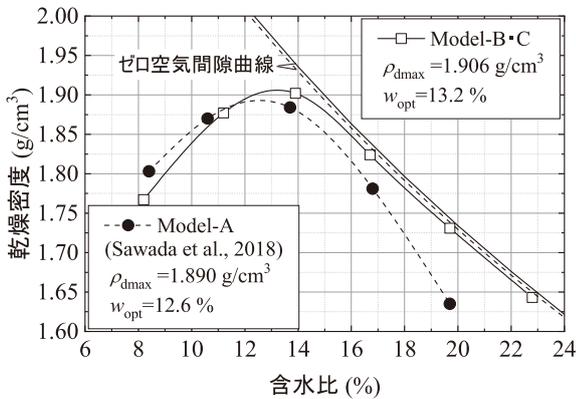


図4 締固め曲線  
Fig. 4 Compaction curves.

られた材料を再現するために、兵庫県で採取された粘性土と京都府の珪砂を一定の比率で混合した非塑性粘性土が用いられた。表1に、堤体材料の物性値を示し、図3、図4および図5に、粒径加積曲線、締固め特性、動的せん断特性をそれぞれ示す。

2.3 GCL

図6に、本研究で用いられたGCLの断面図を示す。GCLは、ポリプロピレン製の織布と不織布の間に粒

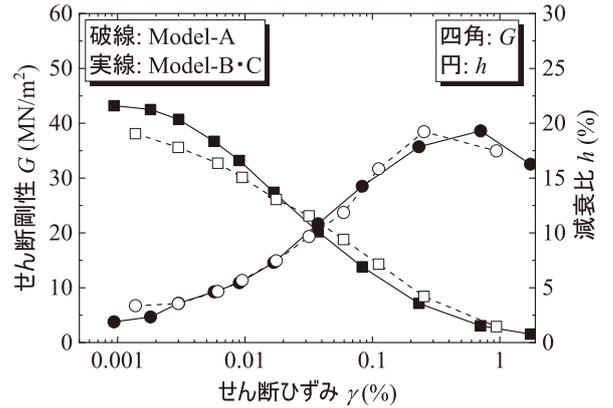


図5 せん断剛性と減衰比固め曲線  
Fig. 5 Non-linear stiffness and damping ratio.

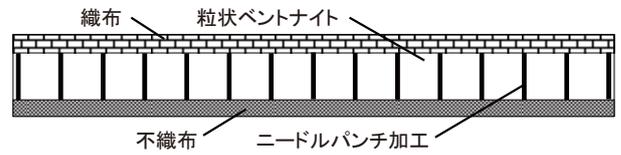


図6 GCL  
Fig. 6 Geosynthetic clay liner.

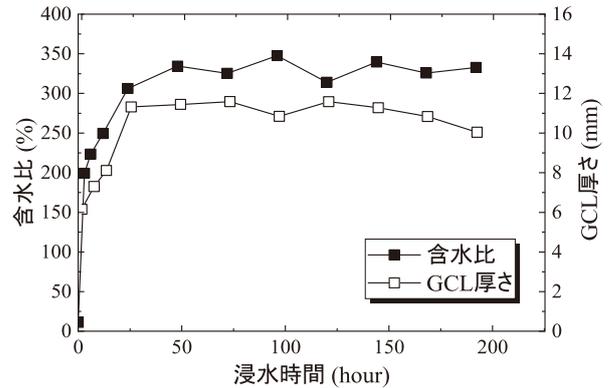
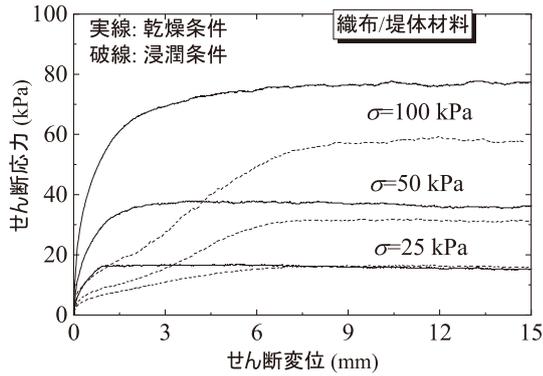


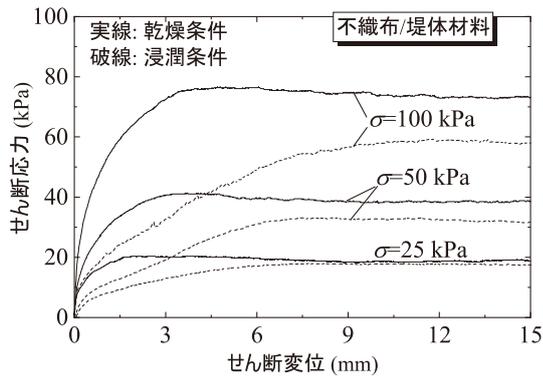
図7 浸水試験結果  
Fig. 7 Results of submergence tests.

状ベントナイトが挟み込まれている構造であり、織布と不織布はニードルパンチ加工により接合されている。製品仕様書によると、乾燥状態のGCL厚さはロールされていない状態で6mmを超える。透水係数は  $5.0 \times 10^{-11}$  m/s より小さく、単位面積あたりの質量は  $4 \text{ kg/m}^2$  を超える。非拘束条件下で浸潤した場合、含水比は300%を超える(図7)。

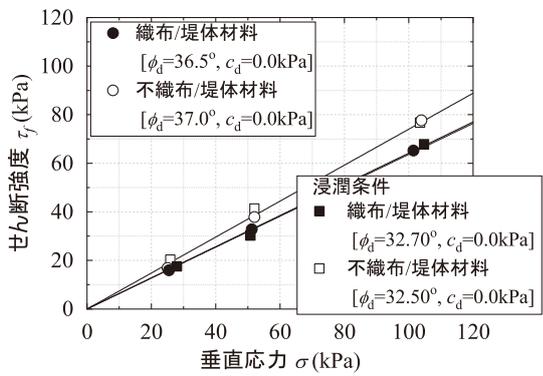
GCL内部のせん断強度や、GCLとジオメンブレンの境界面でのせん断強度特性は、多くの研究者によって検討されている(例えば、Stark and Eid, 1996; Bargado et al., 2006; Vukelic et al., 2008)。



(a) 織布面と堤体土の境界面での変位 - 応力曲線



(b) 不織布面と堤体土の境界面での変位 - 応力曲線



(c) クーロンの破壊線

図 8 一面せん断試験結果

Fig. 8 Results of direct shear tests.

しかしながら、GCL と堤体材料の境界面でのせん断強度に関しては、そのデータは比較的少ない(例えば、佐々木ら, 2015 ; 重元ら, 2017 ; Suzuki *et al.*, 2017)。ため池堤体の耐震性評価に境界面でのせん断強度特性を用いるために、堤体材料と織布面および不織布面の境界面を対象に、一面せん断試験を実施した。試験は、製造時の初期乾燥条件および、非拘束状態で 48 時間浸水された GCL を対象に、有効拘束圧を 25, 50, 100 kPa として実施された。図 8 に、

一面せん断試験結果を示す。浸潤された供試体の大変位でのせん断強度は、乾燥条件での初期強度より幾分小さい結果を示した。また、織布面および不織布面と堤体材料の境界面でのせん断抵抗角は、両者とも乾燥条件で  $37^\circ$ 、浸潤条件で  $32.5^\circ$  とほとんど一致し、両境界面でのせん断強度は実質的に同じであると言える。

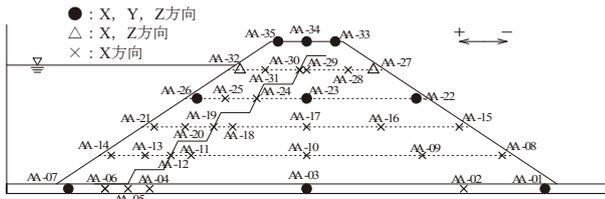
## 2.4 計測条件

図 9 に、計測機器の配置図を示す。図 9 で、加速度計(共和電業製 ASW-5AM36)、間隙水圧計(共和電業製 BPR-A-200KPS)、およびレーザー変位計(KEYENCE 製 LK-500 ならびに IL-2000)はそれぞれ「A」、「P」、「D」で表される。「A」、「P」、「D」に続く英字は、計測機器が設置された堤体がどのモデルであるかを示す。後に続く数字は、計測機器の番号である、さらに、レーザー変位計では、上流側法面、天端、下流側法面をそれぞれ「J」、「T」、「K」で表す。本研究では、上流側への加速度を正とし、上流側および沈下方向への変位を正とした。

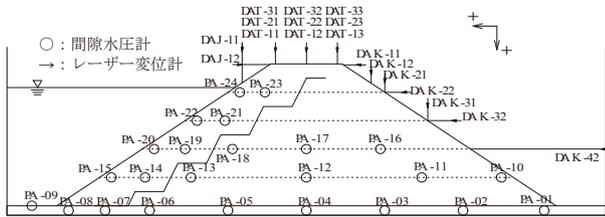
加速度計および間隙水圧計については、仕上がり層厚 60 cm ごとに設置した。GCL 重ね合わせ部には、位相差を検査するために AB-23 および AB-24 を接着した。また、上流側の水位を計測するために、各堤体で上流側貯水部の基盤に間隙水圧計(PA-09, PB-09, PC-09)を設置した。図 9 に示される浸潤線については、間隙水圧計 PA-01 から PA-08, PB-01 から PB-08, ならびに PC-01 から PC-08 を、0.2 m 厚さの基盤中央に設置し、測定した静水圧の結果をもとに描いた。計測間隔は施工中ならびに注水中は 5 分間隔とし、加振中は 0.005 秒間隔とした。さらに、実験前後で光波測量を実施し、加振による堤体変位を測定した。

## 2.5 入力波

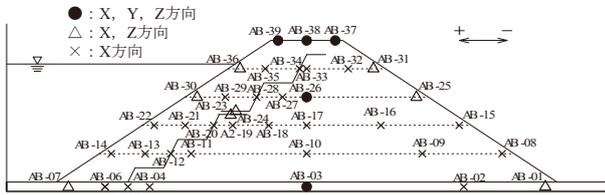
加振時の入力波として、横断方向に 5 Hz の正弦波を与えた。正弦波を与えた理由は、本研究の目的が固有のため池に対する地震被害を再現することではなく、解析結果と比較するためのベンチマークを得ることであるためである。加振は、前後テーパ部 4 秒を含む 12 秒間で行われた。加振回数は、Model-A では 2 回であり、Model-B および Model-C では 4 回である。図 10 に、Model-A での各加振における震動台加速度を示し、図 11 に、Model-B および Model-C での各加振における震動台加速度を示



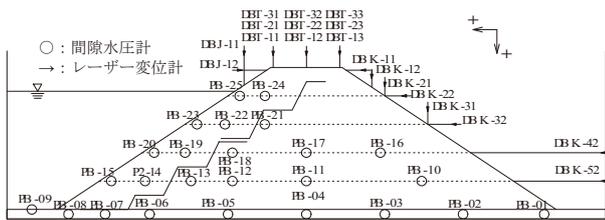
(a) 加速度計 (Model-A)



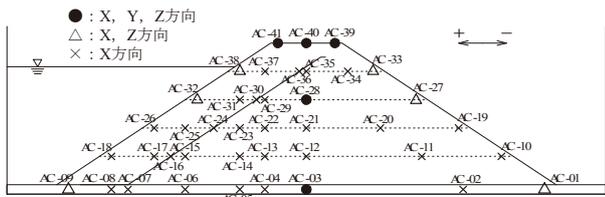
(b) 間隙水圧計およびレーザー変位計 (Model-A)



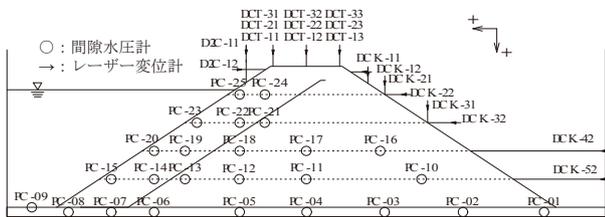
(c) 加速度計 (Model-B)



(d) 間隙水圧計およびレーザー変位計 (Model-B)



(e) 加速度計 (Model-C)



(f) 間隙水圧計およびレーザー変位計 (Model-C)

図9 計測機器配置図

Fig. 9 Transducers location in models.

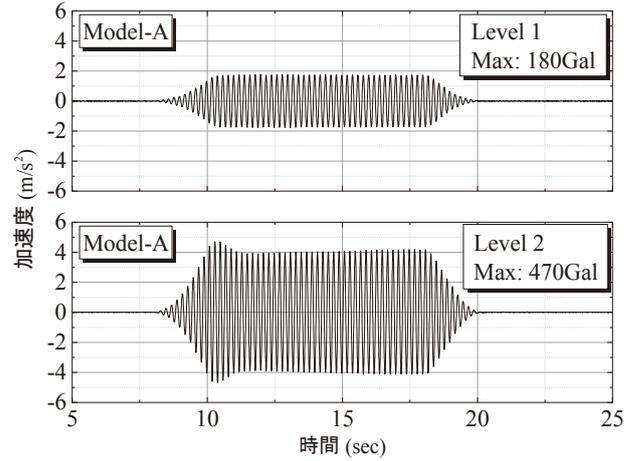


図10 震動台での加速度 (Model-A)

Fig. 10 Acceleration of shaking table in Model-A.

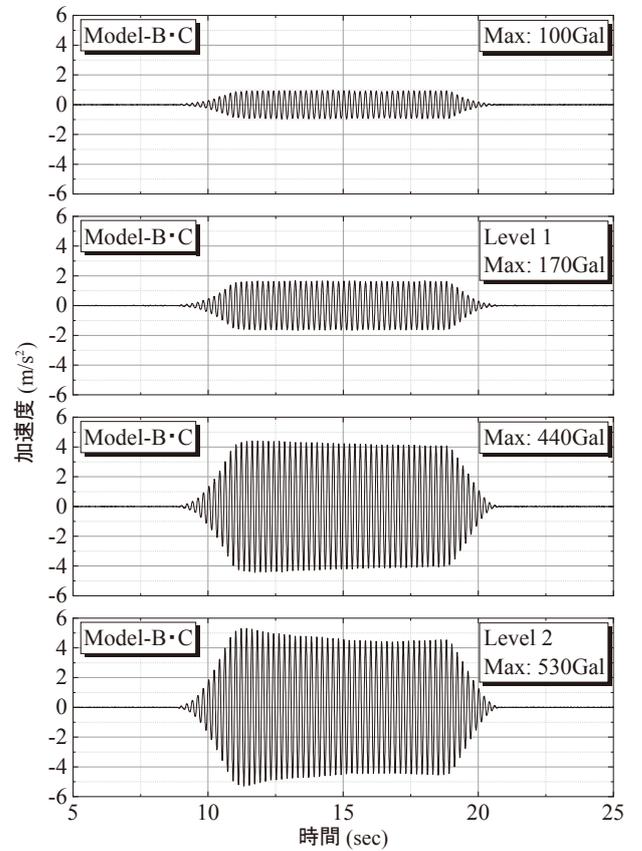


図11 震動台での加速度 (Model-B, Model-C)

Fig. 11 Acceleration of shaking table in Model-B and Model-C.

す。Model-B および Model-C の各加振での最大加速度はそれぞれ 100 gal, 170 gal, 440 gal, 530 gal であった。現行の設計基準では、ため池は設計水平震度 0.15 を用いた円弧すべり解析により安定計算が行われる。設計水平震度 0.15 は、ため池の供用中に 1 度か 2 度発生するとされているレベル 1 地震動に相当す

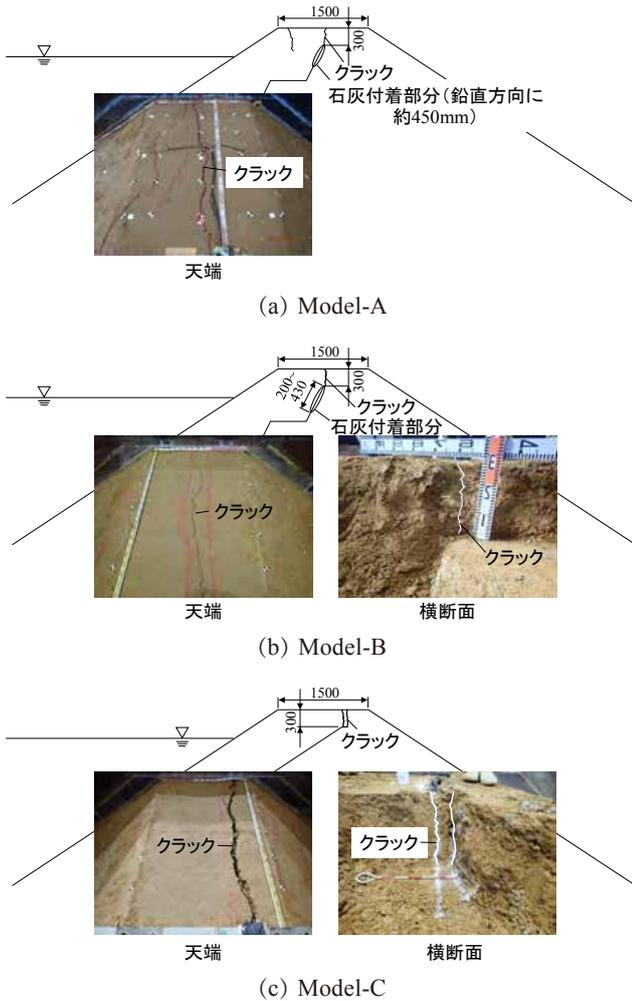


図 12 天端クラック発生状況  
Fig. 12 Cracks occurred during Level 2 shaking.

る。また、許容貯水量  $10,000 \text{ m}^3$  または堤高  $10 \text{ m}$  を超えるため池については、レベル 2 地震動を想定した安定解析で耐震性が確認される。レベル 2 地震動は、発生頻度は低いものの非常に強い地震動であり、例として 1995 年の兵庫県南部地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震が挙げられる。実際は安全性を考慮して、GCL は堤高が  $10 \text{ m}$  より低いため池にのみ用いられる。したがって、レベル 1 地震動に対する耐震性のみが確認されれば問題はない。ただし、破壊形態を検討し、設計手法を提案するには、より大きい地震動による加振が必要とされる。本研究では、 $170 \text{ gal}$  加振がレベル 1 地震動に相当し、Model-A での  $470 \text{ gal}$  加振と Model-B ならびに Model-C での  $530 \text{ gal}$  加振がレベル 2 地震動に相当する。



(a) Model-A



(b) Model-B

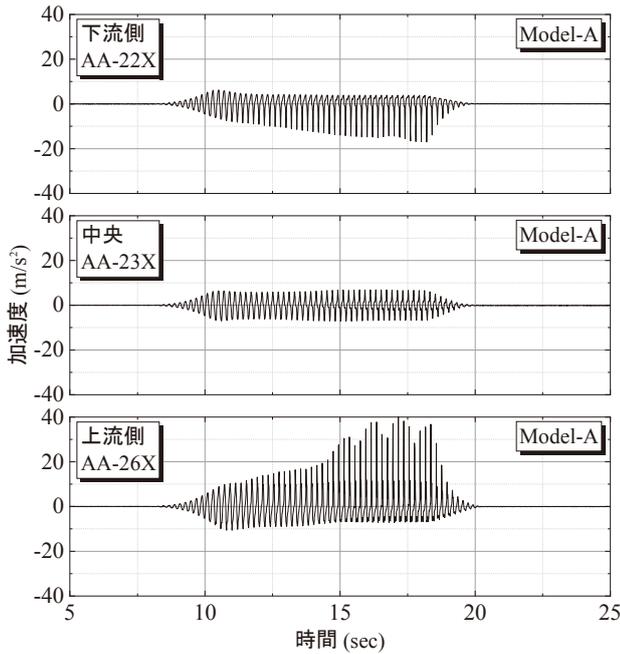
図 13 実験後の石灰付着状況  
Fig. 13 Isometric view photographs of the top benches after experiments.

### 3. 実験結果と考察

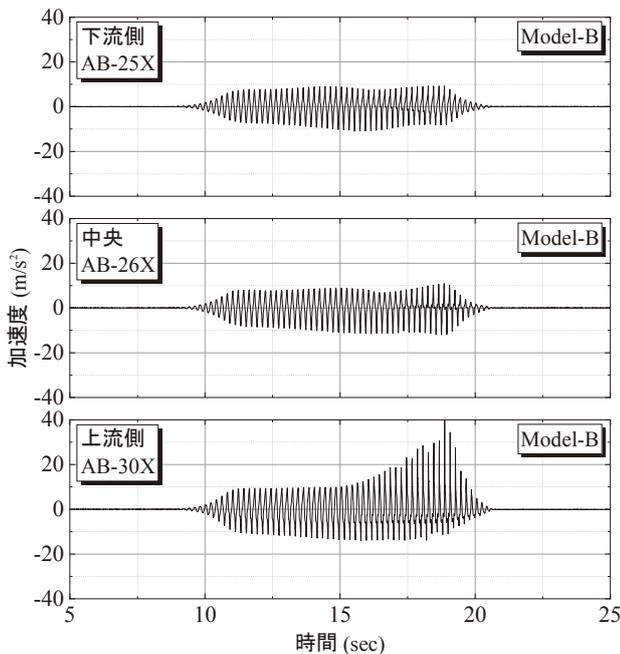
#### 3.1 GCL 重ね合わせ部が堤体の耐震性に与える影響

本研究の第 1 の目的は、GCL 重ね合わせ部がため池堤体の耐震性に与える影響を検討することである。そのため、本節では主に重ね合わせ部を設けない Model-A および重ね合わせ部が設けられた Model-B に関し、実験結果の比較を行う。レベル 1 地震動を想定した加振 (以後レベル 1 加振) 後に、両堤体にクラックや大きな変形等の目に見える損傷は観察されなかった。以後、レベル 2 加振による結果を示す。

レベル 2 加振により、両堤体の天端に大きな縦断クラックが発生した。図 12 に、レベル 2 加振によるクラック発生状況を示す。両堤体でクラックの位置が同様であることがわかる。クラックの深さを調査するために、水で溶かした石灰をクラックに流し



(a) Model-A



(b) Model-B

図14 レベル2加振時の堤高2.4mでの加速度応答  
 Fig. 14 Accelerations measured during Level2 shaking at 2.4 m height.

込んだ。図13に、両堤体での石灰付着状況を示す。両堤体ともに、クラックはGCL最上段の屈曲部に到達しており、屈曲部から約200～400mmの範囲に石灰が付着していた。したがって、Model-AおよびModel-Bの損傷状況は同様であることがわかる。

図14に、両堤体の2.4m高さで計測された加速度

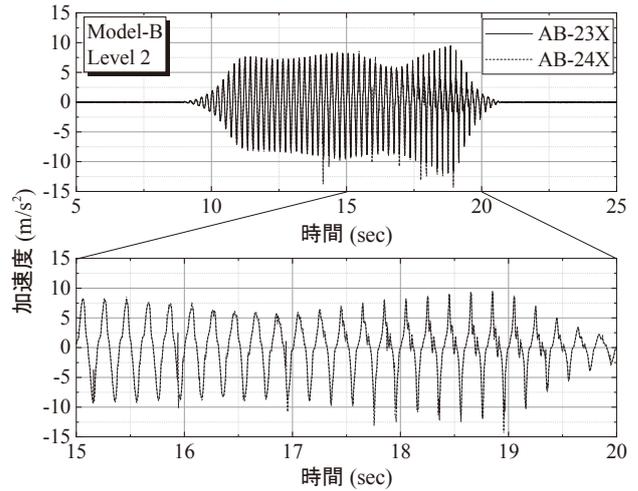


図15 重ね合わせ部での加速度応答  
 Fig. 15 Accelerations measured on the overlapped joint in Model-B.

を示す。2.4m地点での加速度は、入力波より増幅しており、上下流方向で非対称を示すことがわかる。すなわち、両堤体の上流側で上流方向への加速度が卓越しており、下流側では下流方向への加速度が大きい傾向を示している。これは、飽和度が高い上流部分に対して、飽和度の小さい下流部分は強度や剛性が大きいことが原因であると考えられる(Sawada et al., 2018)。上記の傾向はModel-AおよびModel-Bで同様であることから、損傷状況同様に、重ね合わせ部の加速度応答におよぼす影響はほとんどないと考えられる。両堤体で、加振時の加速度の挙動が同様であることが確認された。

次にGCL重ね合わせ部での両GCLの相対変位に関して検討する。図15に、重ね合わせ部の加速度時刻暦を示す。上下のGCLに位相差は生じておらず、相対変位が生じていないことがわかる。さらに、実験後に堤体を掘削し、重ね合わせ部のずれを実測し、重ね合わせ部のGCL間に相対変位が生じないことを確認した。図13(b)に示される2本のポールで指された黒のマーク線は、レベル1加振およびレベル2加振により、重ね合わせ長が変化しなかったことを表している。重ね合わせの位置は現場条件によって決まるため、全ての条件での安全性を検証したとは言えないが、少なくとも本研究の条件では、重ね合わせ部のすべりによる破壊は考慮する必要が無いことが明らかになった。

さらに、GCL重ね合わせ部で漏水が生じなかったことを確認する。図16に、重ね合わせ部より上流

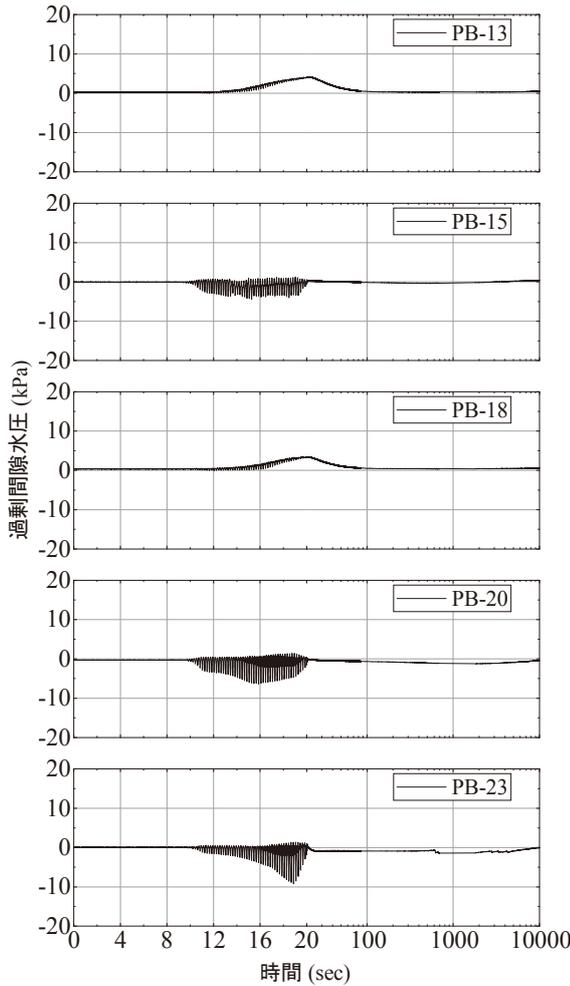
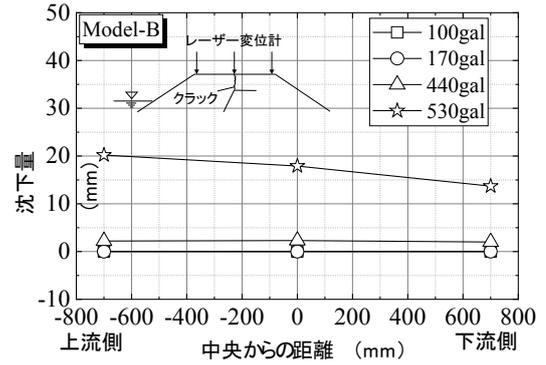
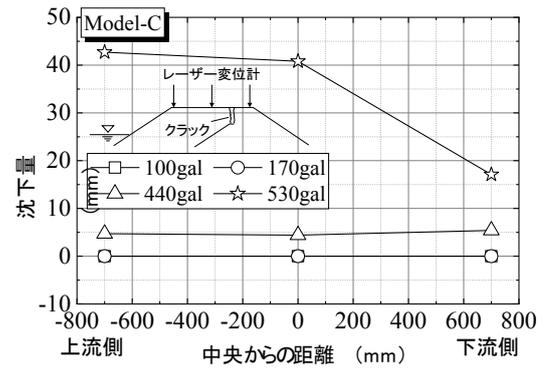


図 16 GCL より上流および下流側での過剰間隙水圧  
Fig. 16 Excess pore water pressure measured in Model-B.

側および下流側に設置された間隙水圧計でのレベル 2 加振時における過剰間隙水圧の時刻歴変化を示す。なお、図 16 の x 軸の 20 秒以降を対数目盛で表している。加振後にはどの位置でも、過剰間隙水圧の値は 0 になっており、水位の変化がなく、漏水が生じていないことがわかる。また、加振中、GCL 上流側の飽和部で負の過剰間隙水圧が発生したのに対して、下流側の不飽和部ではわずかに正の過剰間隙水圧が発生した。この挙動は、Model-A でも確認され、上流側飽和部が加振時に非排水でせん断されたためだと考えられる (Sawada *et al.*, 2018)。加振後、間隙水圧計 PB-09 を長期間計測したが、貯水部の水位は変わらなかったことから大きな漏水被害は発生していないことが確認された。以上により、GCL 重ね合わせ部はため池堤体の耐震性に影響を与えないことが明らかになった。



(a) Model-B



(b) Model-C

図 17 各加振後の天端での沈下量  
Fig. 17 Settlements at crest after each shaking in Model-B and Model-C.

### 3.2 GCL の設置方法が堤体の耐震性に与える影響

本研究の第 2 の目的は、GCL の設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響を検討することである。本節では、主に Model-B と Model-C について比較検討を行う。440 gal 加振までは、両堤体にクラックは確認されなかった。Model-C の損傷状況に関しては、図 12 (c) に示されるように、Model-B と同様に 530 gal 加振で縦断クラックが発生し、そのクラックは GCL 屈曲部にまで達していた。ただし、Model-C では Model-B より下流側でクラックが発生した。実験後に、天端中央付近のクラック幅を実測したところ、Model-B および Model-C でそれぞれ 13 mm、42 mm であった。損傷状況から、GCL を階段状に設置した堤体は、直線状に設置した堤体より被害が小さかったことが明らかになった。

図 17 に、堤体天端での沈下量を示す。440 gal 加振までは、沈下はほとんど見られなかった。したがって、現行設計基準に記載されているレベル 1 地震動に対して、両堤体は十分な耐震性を有していること

表 2 結果のとりまとめ  
Table 2 Summary of experimental results.

Model	工法	目的	加振条件	模式図	最終加振後の概要
O	前刃金工法	標準的な断面・工法による加振時挙動の確認	1)5Hz正弦波177gal 2)5Hz正弦波471gal	<p>平成28年3月17-18日</p>	<p>一般的な改修方法であり、法面に小さなクラックと天端に若干の沈下が発生したが、漏水はなかった。</p> <p>⇒ 現行の施工基準に対する信頼向上</p> <p>⇒ 施工管理の重要性を確認</p>
A	遮水シート工法 (階段状敷設) ※一枚物のシートを敷設	標準的な敷設方法による遮水シートを用いた堤体の耐震性の確認および遮水シートの性能評価	1)5Hz正弦波168gal 2)5Hz正弦波440gal 3)5Hz正弦波531gal	<p>平成28年3月17-18日</p>	<p>天端に大きなクラックと天端に若干の沈下が発生したが、漏水はなかった。</p> <p>⇒ 堤体への損傷は認められ、前刃金工法同等ではないが、堤体から漏水は生じていなかったことから遮水性能を満足。</p>
B	遮水シート工法 (階段状敷設) ※継ぎ目・ラップ部あり	遮水シートにラップ部を伴う継ぎ目を有する現場の施工を念頭においたCase2に対する比較ケース	1)5Hz正弦波168gal 2)5Hz正弦波440gal 3)5Hz正弦波531gal	<p>平成30年1月11-12日</p>	<p>天端沈下量は、上流側にかけて大きくなる傾向が顕著であり、法肩付近がかなり上流側に水平移動（目視確認）。天端のクラックはCase2と同様、シート最上段部端直上に発生。</p> <p>⇒ 堤体への損傷は認められたが、漏水はなく、遮水性能を満足。</p>
C	遮水シート工法 (直線状敷設)	件数は少ないが、施工実績有りのケースで、敷設方法の違いの確認	1)5Hz正弦波168gal 2)5Hz正弦波440gal 3)5Hz正弦波531gal	<p>平成30年1月11-12日</p>	<p>天端沈下量はCase3に比べかなり大きく、シートを境に上流側法肩付近が水平移動しているため、シート上流側土壁が大きく動いた可能性あり。シート端直上付近で大きなクラックを確認。</p> <p>⇒ 堤体への損傷は比較的大きいものであったが、漏水はなかった。</p>

が考えられる。440 gal 加振後の沈下量は Model-B および Model-C で、それぞれ約 2 mm から 2.5 mm と約 5 mm から 5.5 mm であった。530 gal 加振により、沈下量は顕著に増大した。Model-B では約 14 mm から 20 mm 沈下し、Model-C では 17 mm から 42 mm 沈下するに至った。440 gal 加振では、天端のどの位置でも沈下量に差異はなかったが、530 gal 加振で下流側に対して上流側の沈下が大きかった。両堤体を比較すると、Model-B での変形は、Model-C での変形より非常に小さいことがわかる。したがって、このことから、GCL を階段状に設置した堤体は GCL を直線状に設置した堤体より、耐震性に優れていることが明らかである。ただし、両設置方法が現行の設計基準で必要とされる安全性を満たしていることを留めておきたい。

### 3.3 加振前後のサウンディングおよび堤体の残留変形計測結果

3.2 節をもって、GCL の性能についての説明が済んでいるが、最後に、堤体の損傷調査結果を説明する。表 2 に既往の実験<sup>7), 11), 13)-15)</sup>を含め、2 回渡り実施した全 4 ケースの概要をとりまとめ示し、これ

に基づき、各ケースの概要を述べる。

Model-O および A は、H28 年 3 月に実施した前刃金工法および一枚の遮水シートを階段状に敷設したモデルである。一方、本資料で示す H30 年 1 月に実施した Model-B および C については、階段状に敷設し途中で継ぎ目を設けたモデルおよび堤体法面に平行してシートを直線上に敷設したモデルであり、すべてのケースを対象とした各調査結果の比較を以下に述べる。

#### 3.3.1 加振前後におけるサウンディング試験結果

加振前後である注水前と加振実験終了後の排水後、天端から簡易軽量動的コーン貫入試験 (PANDA)<sup>20)</sup>を行い、堤体の損傷程度を確認を実施した。簡易軽量動的コーン貫入試験は、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込み、そのときの 1 打撃ごとにコーン先端抵抗  $q_d$  を得ることが出来る。特徴として、a) 狭い場所において、一人で試験が可能、b) 打撃力が任意であり試験に時間をそれほど要さない、および c) 試験後直ちにデータのチェックが可能なが挙げられる。

図 18 に加振前後で実施した PANDA の結果を示

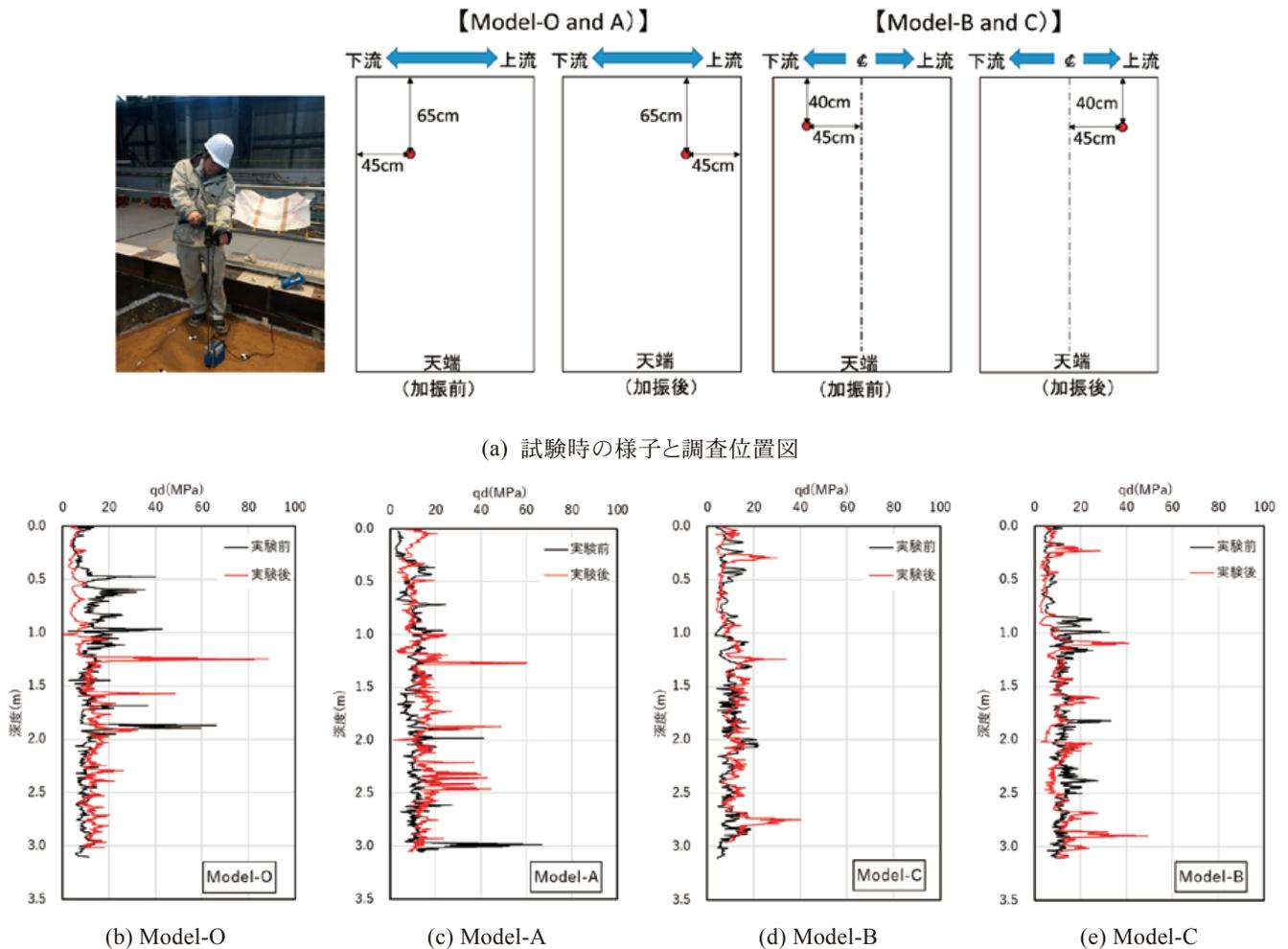


図 18 PANDA の結果  
Fig. 18 Results of PANDA.

す。Model-O における結果を見ると、堤体高さ 200 ～ 300 cm 区間である天端から概ね 1 m の深度区間において、加振後の  $q_d$  の低下が見られるが、それ以深では特に大きな変化は見られなかった。階段状敷設による遮水シート工法である Model-A は、堤体高さ 250 ～ 300 cm 間である天端から概ね 0.5 m の深度区間において、加振前後の  $q_d$  の傾向が異なること、また、堤体高さ 100 ～ 150 cm 区間である盛土内部において、加振後の  $q_d$  が増加している。一方、途中で継ぎ目を設けた Model-B については、加振前後における変化がほぼ見られていないことから、継ぎ目の有無が堤体そのものに与えた影響はなさそうである。堤体法面に平行してシートを直線上に敷設した Model-C については、堤体高さ 200 cm である天端から概ね 1.0 m 付近の深度において、加振後の  $q_d$  の低下がやや目立つ結果を示している。

### 3.3.2 加振前後における 3D レーザー計測結果

堤体全体の残留変形について、3D レーザー計測を実施し、前刃金工法および遮水シート工法の損傷状況の傾向を把握した。併せて実施した光波測量により、3D レーザー計測との比較と検証を実施した。3D レーザー計測方法については参考文献<sup>7)</sup>を参照されたい。

表 2 に示す各ケースすべてに対し、ため池堤体造成後の湛水部への注水前と最終的な加震後における排水後、3D レーザー計測を実施した。なお、排水後の計測であるが、排水に伴う堤体の変形自体は殆どなかったことから、この影響については、検討外としている。

加振前後の変状の様子を視覚的にわかるようにするため、加振前の堤体表面を青色、また、加振後は赤色に着色した加振前後の堤体の重ね図を図 19 に示す。どのケースにおいても加振により沈下したこ

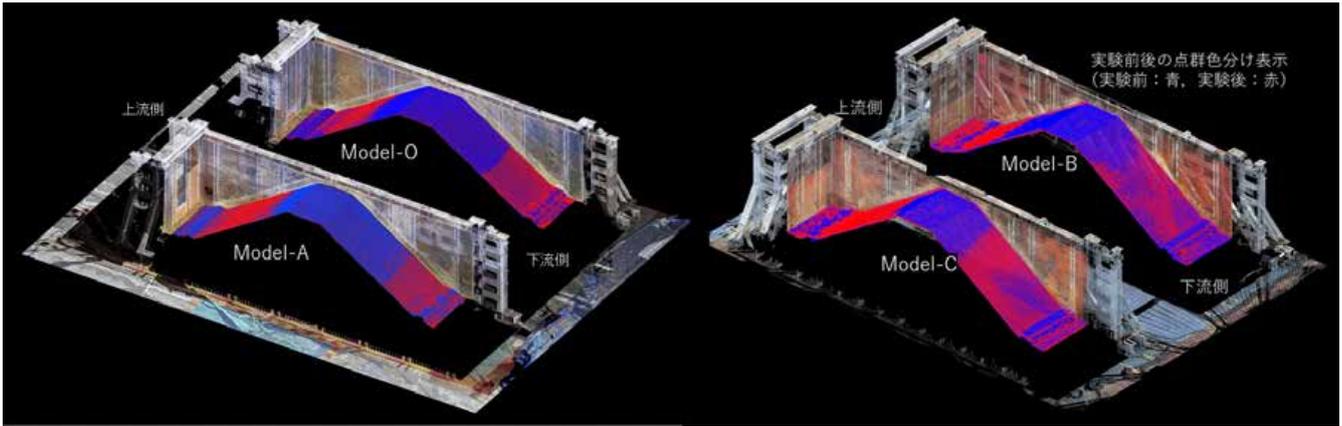


図 19 加振前後における堤体形状の比較  
 Fig. 19 Comparison of the embankment figures before and after shaking tests.

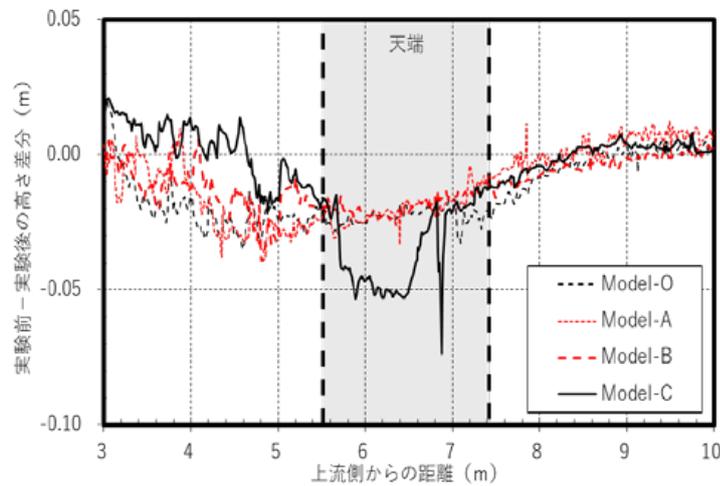


図 20 加振前後における堤体高さの差分  
 Fig. 20 Difference of the embankment height before and after shake tests.

とから、天端部において、加振前の青色着色部が見えている。一方、法面では、下部で加振後の赤色着色部が確認でき、上流側で堤体高さの下部約 1/3 付近から孕み出している。下流側と比較すると、堤体が全体的に上流側に変形していることがわかるが、Model-C の変形傾向が他に比べ、顕著である様子がわかる。

図 19 の計測結果に基づき、図 20 にモデル中心線における加振前後の天端高さの差分について、加振後の変形量を 10 倍に調整し示す。前刃金工法である Model-O、遮水シート工法におけるシートの階段状敷設である Model-A および B は、クラックの程度の有無はあるものの、残留変形傾向が同様である。一方、Model-C の変形傾向は明らかに異なり、シートを境界に段差が生じている。この傾向の違いは、

Model-B に比べ上流側法面の隆起範囲が広く、シートの敷設方法の違いにより堤体の破壊性状が異なることによるものであり、シートを直線に敷設するよりも階段状に敷設する方が堤体の安定性は高いことが、3D レーザー結果から十分解釈可能であることが確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、GCL 重ね合わせ部および GCL の設置方法がため池堤体の耐震性におよぼす影響を検討すること目的として、重ね合わせ部の有無および階段状・直線状配置の GCL を有する堤体の実大規模震動実験を実施した。以下に、実験によって得られた知見を示す。

(a) 重ね合わせ部の有無および GCL の設置方法に

関わらず、レベル1加振による損傷は確認されず、現行の設計基準に対して十分な耐震性を有していることが確認された。

(b) GCL 重ね合わせ部の有無で比較したところ、レベル2加振により、天端に両者同様の大きな縦断クラックが発生した。堤体内の加速度に関しても、両者同様の挙動が確認され、重ね合わせ部の影響は見られなかった。GCL 重ね合わせ部に固定された加速度結果により、上下 GCL に加速度の位相差は認められず、実験後の掘削調査により重ね合わせ部のずれが生じないことが明らかになった。さらに、加振後に貯水位は低下せず、重ね合わせ部からの漏水についても認められなかった。以上により、本実験での重ね合わせ条件では、GCL 重ね合わせ部は堤体の耐震性に影響を与えないことが判明した。

(c) GCL を直線状に設置した堤体に関しても、階段状同様、レベル2加振により、天端に大きな縦断クラックが発生した。そのクラック幅は、GCL を階段状に設置した堤体より、直線状に設置した堤体の方が大きかった。また、加振による沈下量は、直線状に設置した堤体が階段状の倍であった。以上により、GCL を階段状に設置した堤体の方が、GCL を直線状に設置した堤体より耐震性に優れていることが明らかになった。

## 5. おわりに

平成30年は自然災害が頻発した年になった。特に、関西以西のため池にとって、特に、6月18日の大阪北部で発災した震度6弱の地震や7月豪雨は非常にシビアな外力であり、(豪雨に起因する)幾つかのため池の決壊が相次いで報道された。

7月20日には、兵庫県川西市にある石打谷池等の豪雨による被災状況視察の機会を得た(写真1)。石打谷池では、洪水吐周辺の堤体が幅6~7mほど被災したが、現象としては、池に背後の山から土石流による土砂が流入し、池の水位が急上昇後、池の水が全て流出したようである。しかし、砂防の役割を果たし、下流の民家および国道には影響が無かった事例でもあり、ため池が減災施設になり得るポテンシャルを有していること、あるいはその役割を既に十分に果たしている証拠であると思われる。



写真1 石打谷池への土石流の流入

Photo 1 Inflow of debris flow into Ishiuchi-taniike dam.



写真2 下蓮池の被災状況

Photo 2 Damage situation of Shimo-hasuie dam.

9月13日には、大阪府八尾市にある下蓮池等の被災状況の視察の機会を得た(写真2)。大阪府内は北部での地震後、豪雨に見舞われたことにより、地震と雨の複合作用による被害拡大の影響も考えられた。実際の被災現場における目視観察からは、上記2つの事象・外力の影響や因果関係は明確にはならなかったが、今後を考えると複合災害についての研究は避けられないと感じた。これについては、今後の大きな課題である。

## 謝辞

本資料は、防災科学技術研究所と兵庫県の共同研究および兵庫県・神戸大学の協力型共同研究の下に実施された「遮水シートを用いたため池の耐震性に関する研究」をとりまとめたものである。研究計画策定や実験実施にあたり、E-ディフェンスを活用した減災対策推進委員会(岡田恒男委員長)の助言をいただいた。また、実験後に防災科学技術研究所を退職し、立命館大学へ移動された豊吉巧也氏には、土槽の確認業務から実験実施に至るまで、本研究を

下から支えていただいた。

実験後、ため池の被災状況の視察にあたり、兵庫県阪神北県民局阪神農林振興事務所農村整備課上田健史所長補佐兼課長、大阪府農政室整備課の吉田総括主査並びに中部農と緑の総合事務所の石森耕地課長および栗栖地域政策室長には、被災後の忙しい時期にもかかわらず、現場視察をご快諾・ご案内いただいた。大阪北部の地震後や豪雨災害が繰り返し生じる中、現場の最前線で大変なご苦勞をされたとお伺いした。今後の自然災害の甚大化に対し、単なる研究にとどまらず、行政の施策、技術の進歩、あるいはこれらが一体となり減災に資する成果をまとめる必要があると改めて感じる次第である。

最後に、関係者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 青山正義(2011)：ベントナイトシートを用いたため池改修工事。水土の知, **79**(8), 44-45.
- 2) Bergado, D. T., Ramana, G. V., Sia, H. I., and Varun. (2006): Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand. *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(6), 371-393.
- 3) 堀 俊和・上野和広・松下健一(2013)：平成23年度(2011年)東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策。農村工学研究所技報, **213**, 175-199.
- 4) Jeong, K., Shibuya, S., Kataoka, S., Baek, J., Kawabata, T., and Sawada, Y. (2016)：Seismic Behavior and Numerical Simulation of a Small-Sized Earth-Fill with Bentonite Sheet Observed in Shaking Table Test. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, **4**(2), 27-30.
- 5) 神山 惇・鈴木素之・河内義文・浦部朋子(2014)：振動台実験による加振を受けたため池堤体の遮水シート敷設部の変形挙動。地盤と建設, **32**, 137-141.
- 6) 眞木 陸・重元凜太郎・澤田 豊・河端俊典(2017)：低拘束圧下におけるベントナイト系遮水シートのせん断強度特性その2—シート継目の重ね合わせ部での一面せん断試験—。農業農村工学会京都支部第74回研究発表会要旨集, 66-67.
- 7) 中澤博志・澤田 豊・小田哲也・小林成太・河端俊典・澁谷 啓・片岡沙都紀・山下拓三(2017)：実大規模震動実験におけるため池堤体の残留変形調査。土木学会論文集 A1(構造・地震工学), **73**(4), 815-826.
- 8) 農林水産省(2015a)：土地改良事業設計指針「耐震設計」。
- 9) 農林水産省(2015b)：土地改良事業設計指針「ため池整備」。
- 10) 農林水産省：ため池一斉点検を踏まえた詳細調査等の実施状況(平成29年3月末時点), <http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/bousai/170922.html> (確認日：2018/11/24)。
- 11) 小田哲也・澤田 豊・中澤博志・小林成太・澁谷 啓・河端俊典(2016)：階段状に設置したベントナイト系遮水シートがため池堤体の地震時挙動におよぼす影響。ジオシンセティックス論文集, **31**, 175-182.
- 12) 佐々木貴・川口貴之・川尻俊三・澁谷 啓(2015)：ベントナイト系遮水シートと土の摩擦抵抗に関する実験的検討。ジオシンセティックス論文集, **30**, 133-140.
- 13) Sawada, Y., Nakazawa, H., Oda, T., Kobayashi, S., Shibuya, S., and Kawabata, T. (2018)：Seismic Performances of Small Earth Dams with Sloping Core Zones and Geosynthetic Clay Liners Using Full-Scale Shaking Table Tests. *Soils and Foundations*, **31**, 167-174.
- 14) 澤田 豊・中澤博志・片岡沙都紀・小林成太・小田哲也・古林智宏・澁谷 啓・山下拓三・谷 和夫・梶原浩一・河端俊典(2016)：前刃金工法および遮水シート工法により改修されたため池堤体の実大規模振動実験。ジオシンセティックス論文集, **31**, 167-174.
- 15) 重元凜太郎・澤田 豊・眞木 陸・河端俊典(2017)：ベントナイト系遮水シートとため池堤体土のせん断強度特性。ジオシンセティックス論文集, **32**, 73-80.
- 16) Stark, T. D. and Eid, H. T. (2006): Shear behavior of reinforced geosynthetic clay liners. *Geosynthetic International*, **3**(6), 771-786.
- 17) Suzuki, M., Koyama, A., Kochi, Y., and Urabe, T. (2017): Interface shear strength between geosynthetic clay liner and covering soil on the embankment of

- an irrigation pond and stability evaluation of its widened sections. *Soils and Foundations*, **57**(2), 301-314.
- 18) 谷 茂・長谷川高士(1987)：日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害. *水土の知*, **55**(10), 17-25.
- 19) Vukelic, A., Szavits-Nossan, A., and Kvasnicka, P. (2008): The influence of bentonite extrusion on shear strength of GCL/geomembrane interface. *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(1), 82-90.
- 20) Langton, D.D. (1999): The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Ground Engineering* September, 33-34.
- (2018年12月4日原稿受付,  
2018年12月5日原稿受理)

## 要 旨

近年のため池改修では、ベントナイト系遮水シート (GCL) を用いて改修する事例が増えている。既往の研究で GCL および従来の前刃金工法を用いた堤体を対象とした実大規模震動実験で、両者の耐震性が検証された。実際の施工では、GCL を継ぎ足す場合に重ね合わせ部が設けられる。また、階段状のみならず直線状に設置される例も見られる。しかしながら、GCL 重ね合わせ部や設置方法の違いが堤体の安定性におよぼす影響は明らかでない。そこで本研究では、重ね合わせ部および直線状に設置された GCL を有する堤高 3 m の堤体を対象に震動実験を行い、既往研究の連続かつ階段状に設置された GCL を有する堤体との比較検討を行った。実験結果から、レベル 2 地震動により、重ね合わせ部の相対変位は発生しないことが明らかになった。さらに、クラック発生状況および堤体の変形状況から、直線状よりも階段状に設置した堤体の方が耐震性が高いことが明らかになった。

**キーワード：**ため池，実大震動台実験，遮水シート，耐震性，残留変形

巻末付録. データ集

Model-B および Model-C での 170 gal, 440 gal, 530 gal 加振時の, 加速度, 間隙水圧計およびレーザー変位計の時刻歴データを示す. なお, Model-A の結果については, 防災科学技術研究所研究資料第 410 号を参照されたい.

表 A1 時刻歴データ一覧  
Table A1 Lists of time history data.

図表番号	時刻歴データ
図 A1	震動台の変位および加速度 (170gal 加振時)
図 A2	Model-B における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (170gal 加振時)
図 A3	Model-B における 60cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A4	Model-B における 120cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A5	Model-B における重ね合わせ部での加速度応答 (170gal 加振時)
図 A6	Model-B における 180cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A7	Model-B における 240cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A8	Model-B における天端での加速度応答 (170gal 加振時)
図 A9	Model-C における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (170gal 加振時)
図 A10	Model-C における 60cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A11	Model-C における 120cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A12	Model-C における 180cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A13	Model-C における 240cm 高さでの加速度応答 (170gal 加振時)
図 A14	Model-C における天端での加速度応答 (170gal 加振時)
図 A15	Model-B における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A16	Model-B における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A17	Model-B における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A18	Model-B における 180cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A19	Model-B における 240cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A20	Model-C における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A21	Model-C における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A22	Model-C のケースにおける 120cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A23	Model-C のケースにおける 180cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A24	Model-C のケースにおける 240cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A25	Model-B のケースにおける天端の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A26	Model-B のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A27	Model-B のケースにおける下流斜面の水平変位 (170gal 加振時)
図 A28	Model-B のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A29	Model-C のケースにおける天端の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A30	Model-C のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A31	Model-C のケースにおける下流斜面の水平変位 (170gal 加振時)
図 A32	Model-C のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A33	震動台の変位および加速度 (440gal 加振時)
図 A34	Model-B における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (440gal 加振時)
図 A35	Model-B における 60cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A36	Model-B における 120cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A37	Model-B における重ね合わせ部での加速度応答 (440gal 加振時)
図 A38	Model-B における 180cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A39	Model-B における 240cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A40	Model-B における天端での加速度応答 (440gal 加振時)
図 A41	Model-C における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (440gal 加振時)
図 A42	Model-C における 60cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A43	Model-C における 120cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A44	Model-C における 180cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A45	Model-C における 240cm 高さでの加速度応答 (440gal 加振時)
図 A46	Model-C における天端での加速度応答 (440gal 加振時)
図 A47	Model-B における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (440gal 加振時)
図 A48	Model-B における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (440gal 加振時)
図 A49	Model-B における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (440gal 加振時)

表 A2 時刻歴データ一覧  
Table A2 Lists of time history data.

図表番号	時刻歴データ
図 A50	Model-B における 180cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A51	Model-B における 240cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A52	Model-C における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A53	Model-C における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A54	Model-C のケースにおける 120cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A55	Model-C のケースにおける 180cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A56	Model-C のケースにおける 240cm 高さでの間隙水圧応答 (170gal 加振時)
図 A57	Model-B のケースにおける天端の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A58	Model-B のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A59	Model-B のケースにおける下流斜面の水平変位 (170gal 加振時)
図 A60	Model-B のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A61	Model-C のケースにおける天端の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A62	Model-C のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A63	Model-C のケースにおける下流斜面の水平変位 (170gal 加振時)
図 A64	Model-C のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (170gal 加振時)
図 A65	震動台の変位および加速度 (530gal 加振時)
図 A66	Model-B における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (530gal 加振時)
図 A67	Model-B における 60cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A68	Model-B における 120cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A69	Model-B における重ね合わせ部での加速度応答 (530gal 加振時)
図 A70	Model-B における 180cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A71	Model-B における 240cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A72	Model-B における天端での加速度応答 (530gal 加振時)
図 A73	Model-C における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (530gal 加振時)
図 A74	Model-C における 60cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A75	Model-C における 120cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A76	Model-C における 180cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A77	Model-C における 240cm 高さでの加速度応答 (530gal 加振時)
図 A78	Model-C における天端での加速度応答 (530gal 加振時)
図 A79	Model-B における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A80	Model-B における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A81	Model-B における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A82	Model-B における 180cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A83	Model-B における 240cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A84	Model-C における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A85	Model-C における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A86	Model-C のケースにおける 120cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A87	Model-C のケースにおける 180cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A88	Model-C のケースにおける 240cm 高さでの間隙水圧応答 (530gal 加振時)
図 A89	Model-B のケースにおける天端の鉛直変位 (530gal 加振時)
図 A90	Model-B のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (530gal 加振時)
図 A91	Model-B のケースにおける下流斜面の水平変位 (530gal 加振時)
図 A92	Model-B のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (530gal 加振時)
図 A93	Model-C のケースにおける天端の鉛直変位 (530gal 加振時)
図 A94	Model-C のケースにおける上流斜面の水平・鉛直変位 (530gal 加振時)
図 A95	Model-C のケースにおける下流斜面の水平変位 (530gal 加振時)
図 A96	Model-C のケースにおける下流斜面の鉛直変位 (530gal 加振時)

### A.1 170 gal 加振結果

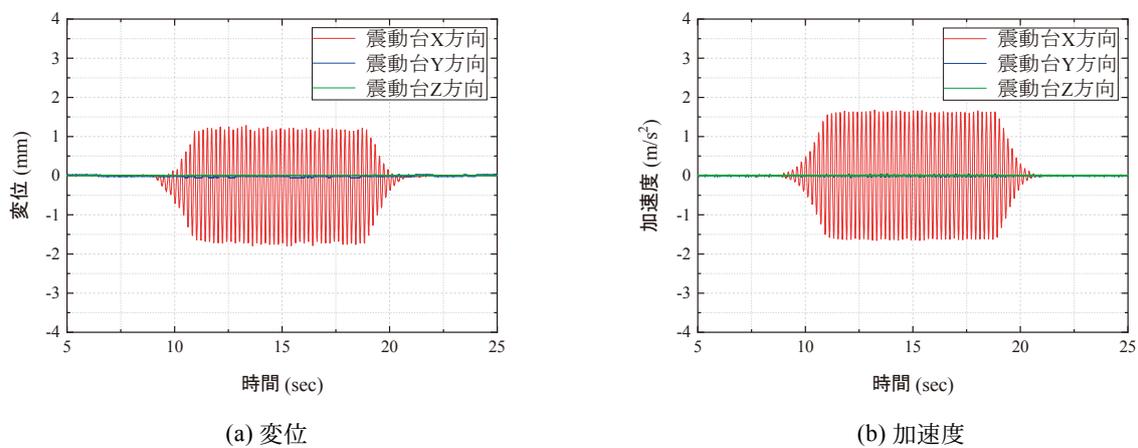


図 A1 震動台の変位および加速度(170 gal 加振時)

Fig. A1 Base displacement and acceleration time histories (170 gal).

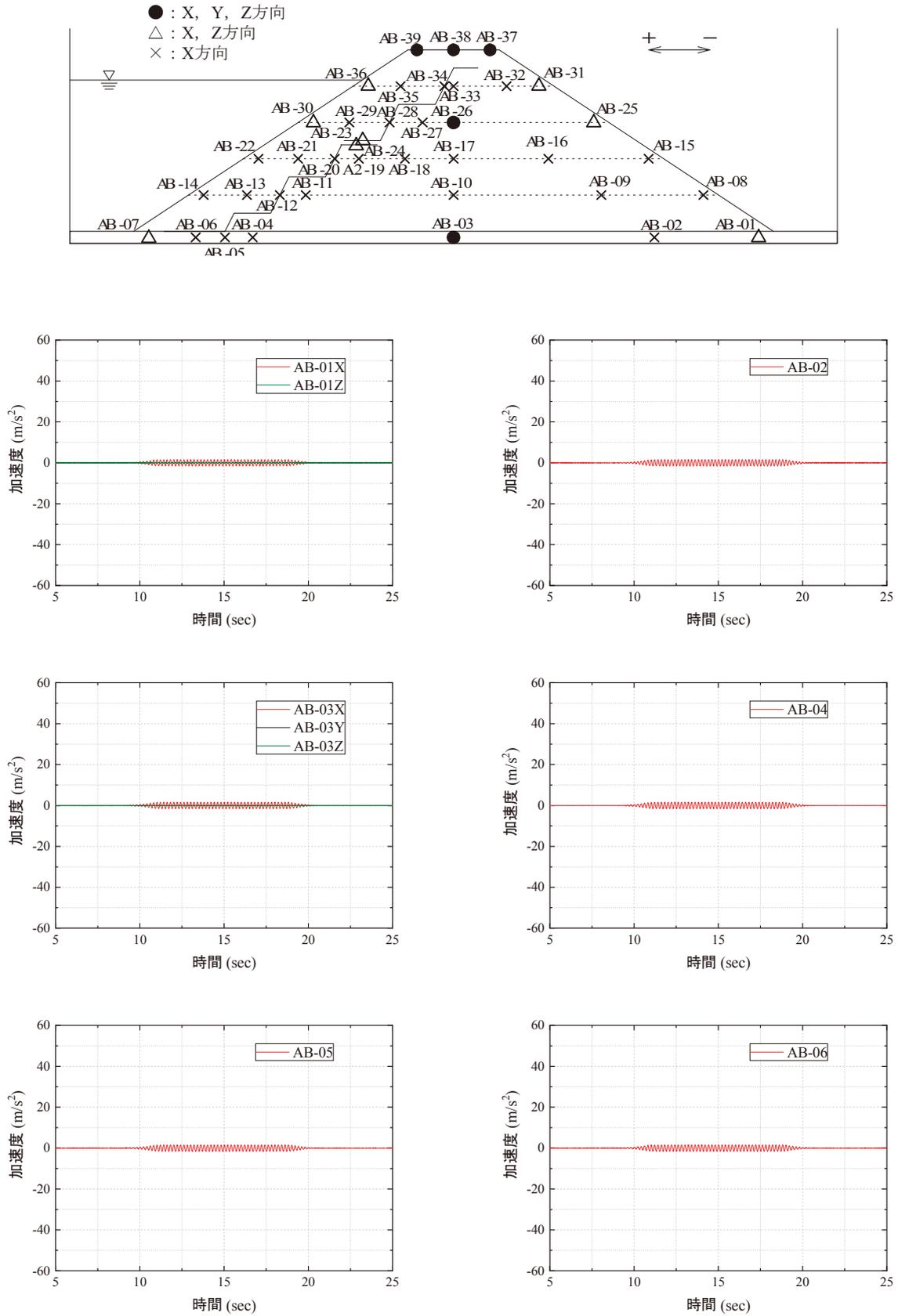


図 A2(1) Model-B における基盤内(-10 cm)の加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A2(1) Acceleration responses of the base in Model-B (170 gal).

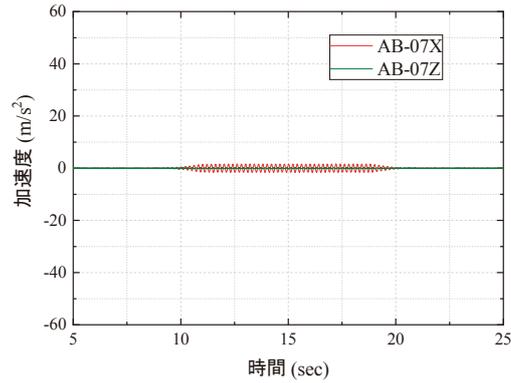


図 A2(2) Model-B における基盤内(-10 cm)の加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A2(2) Acceleration responses of the base in Model-B (170 gal).

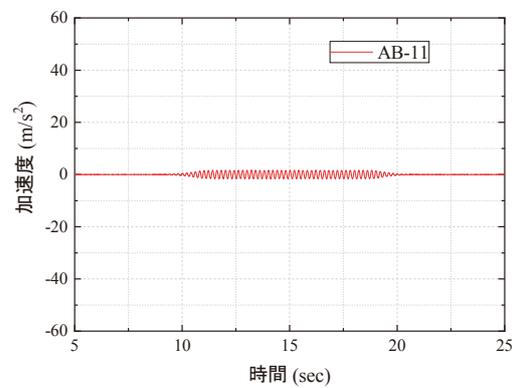
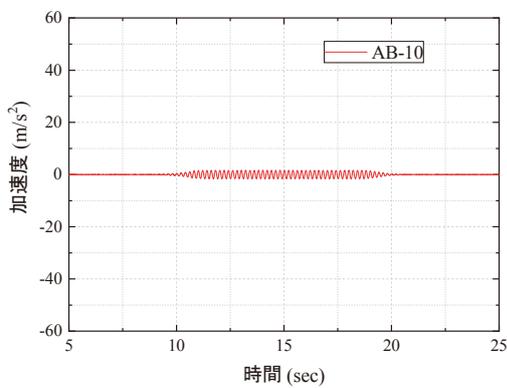
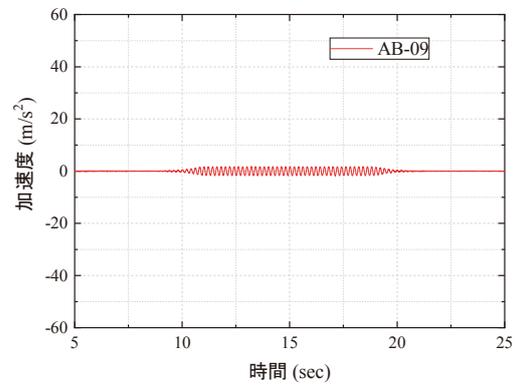
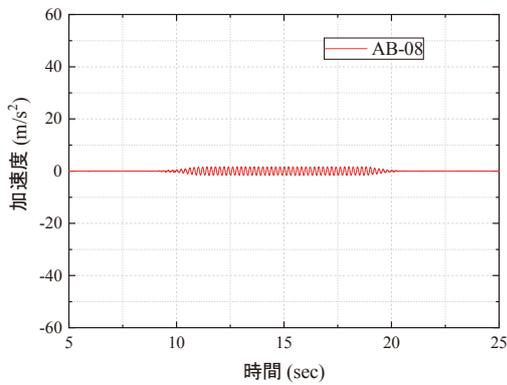
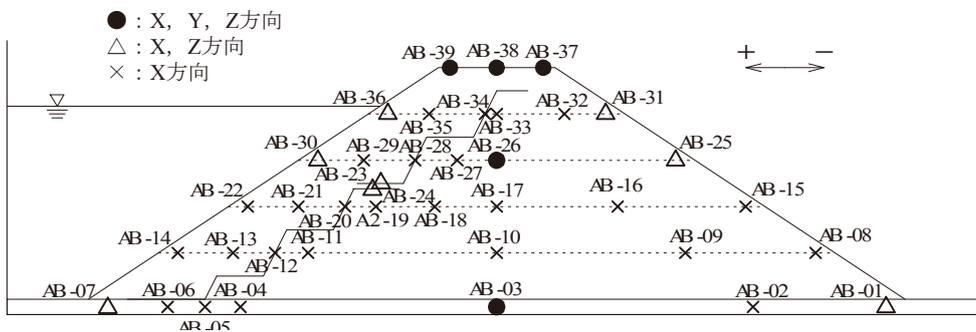


図 A3(1) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A3(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (170 gal).

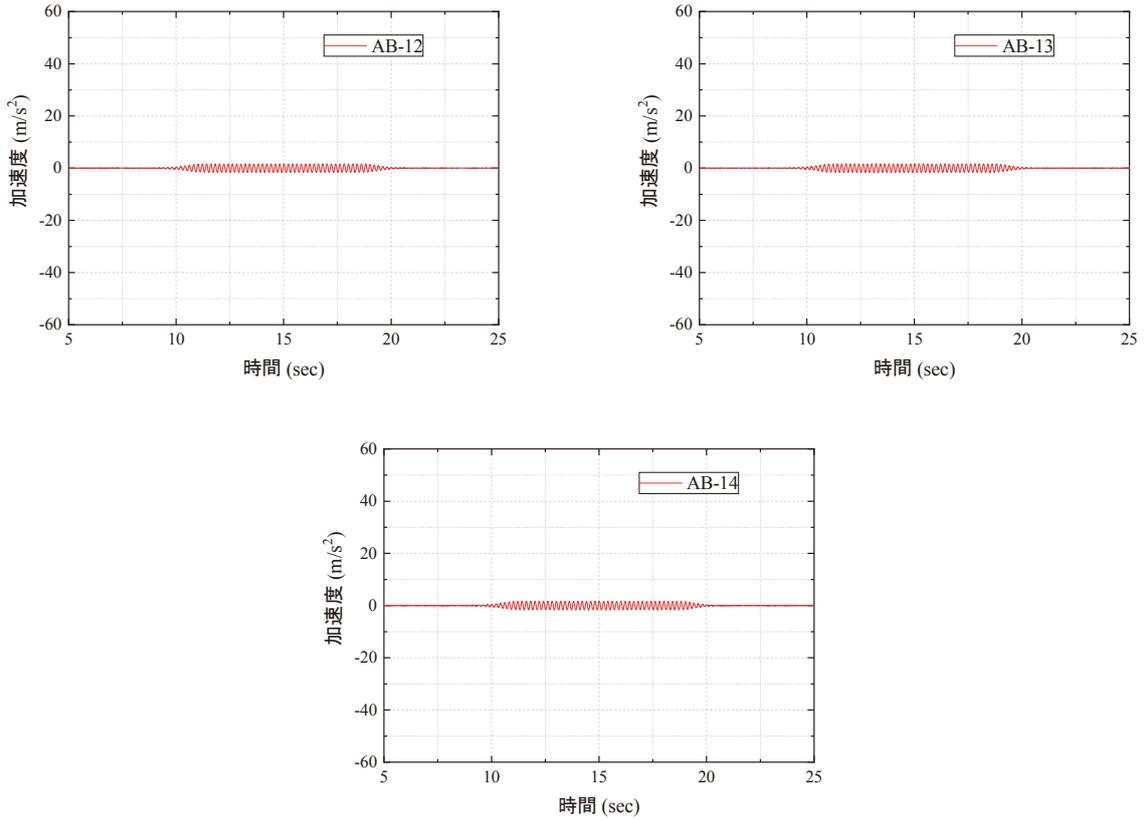


図 A3(2) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A3(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (170 gal).

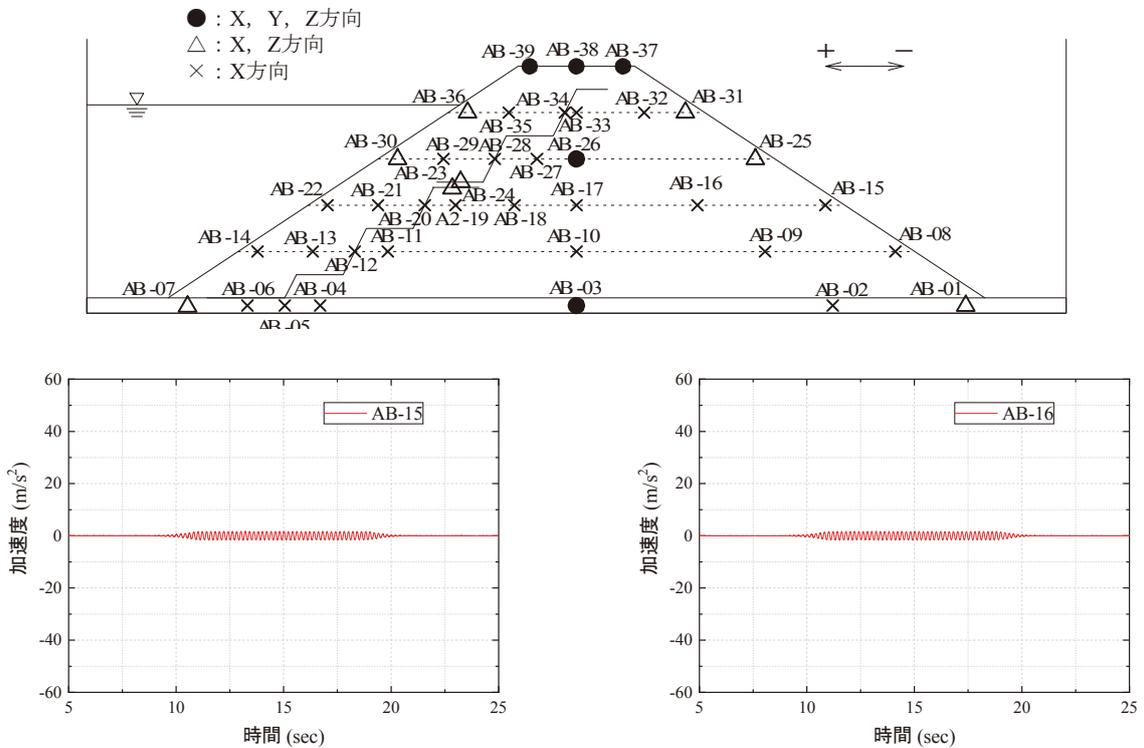


図 A4(1) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A4(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (170 gal).

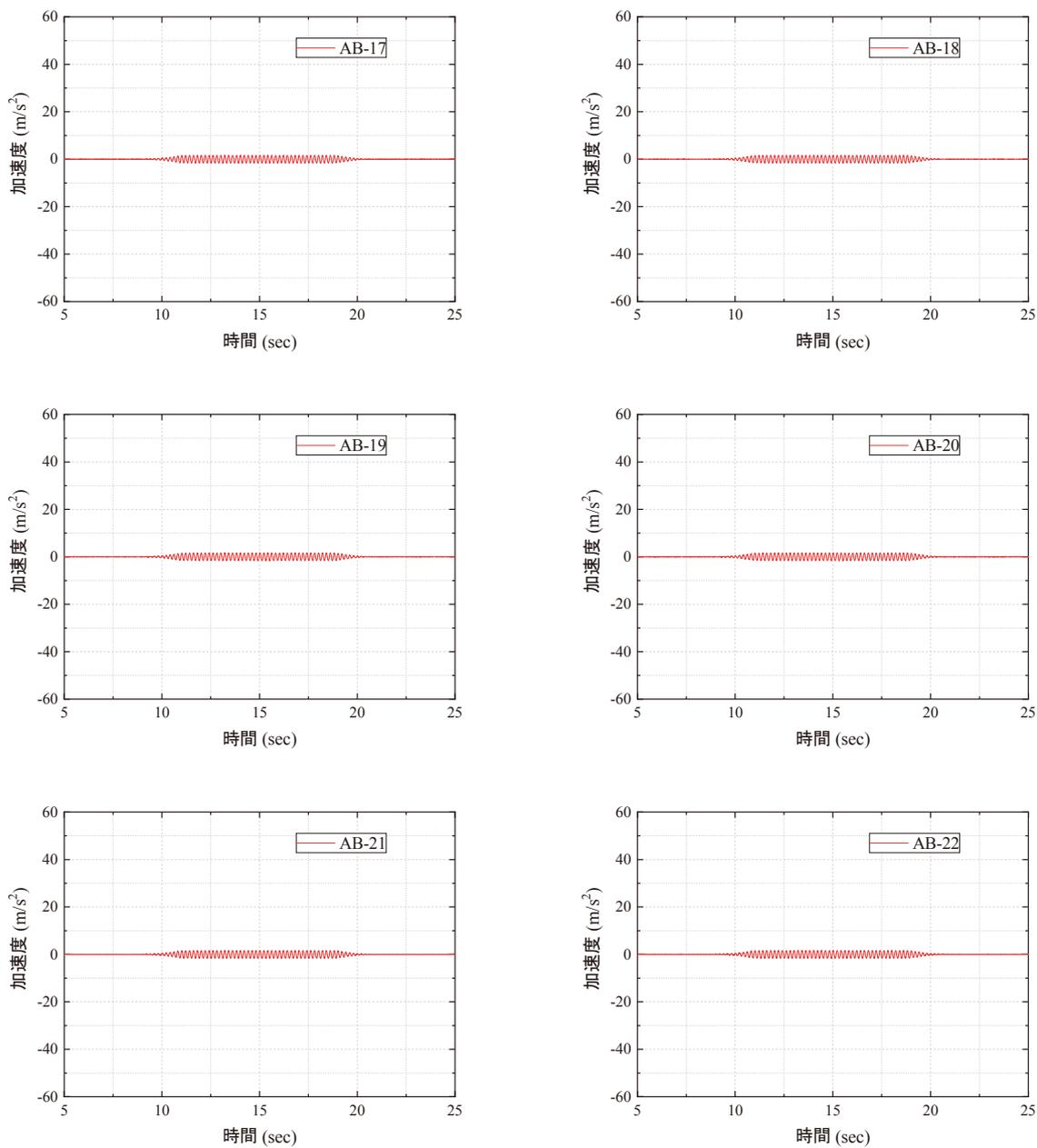


図 A4(2) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
Fig. A4(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (170 gal).

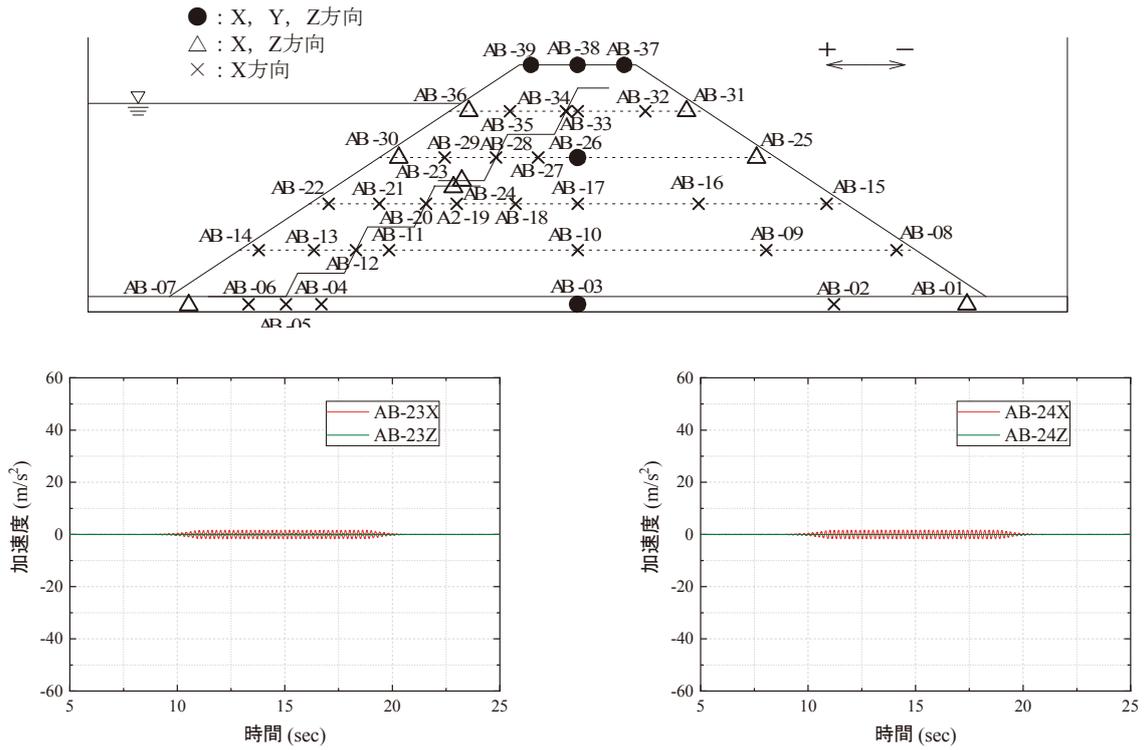


図 A5 Model-B における GCL 重ね合わせ部での加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A5 Acceleration responses at overlapped GCL in Model-B (170 gal).

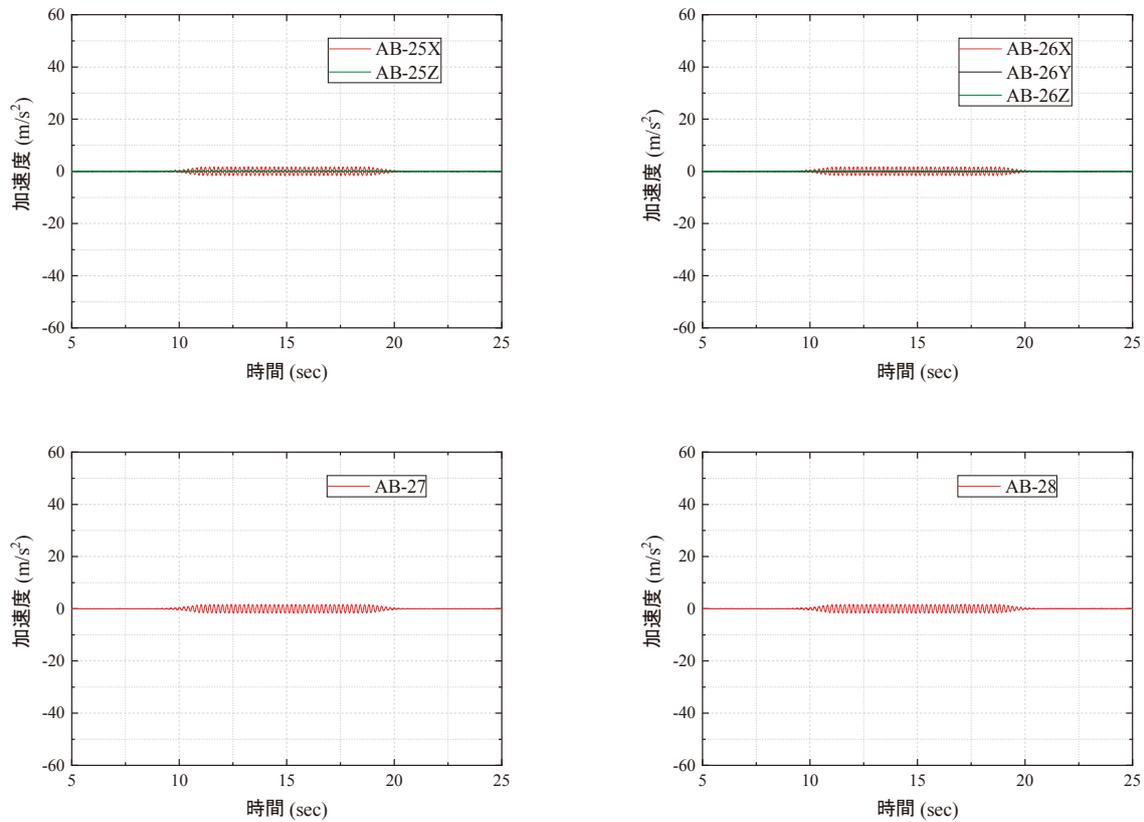


図 A6(1) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A6(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (170 gal).

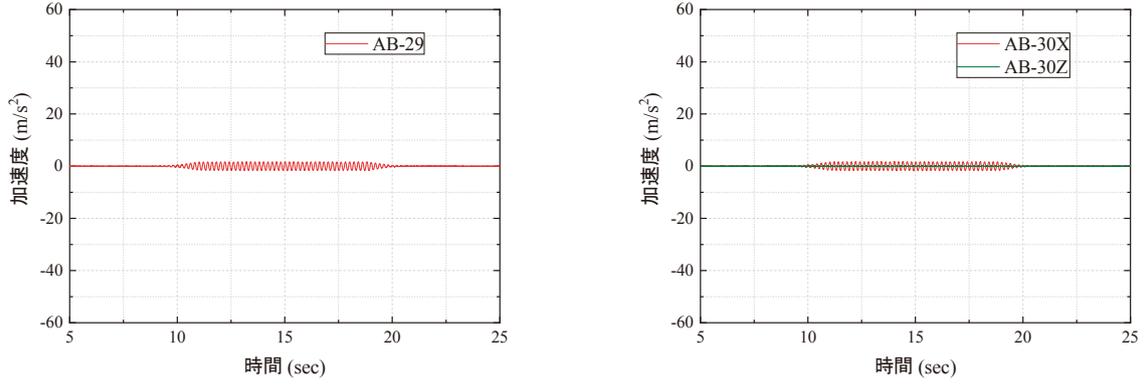


図 A6(2) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A6(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (170 gal).

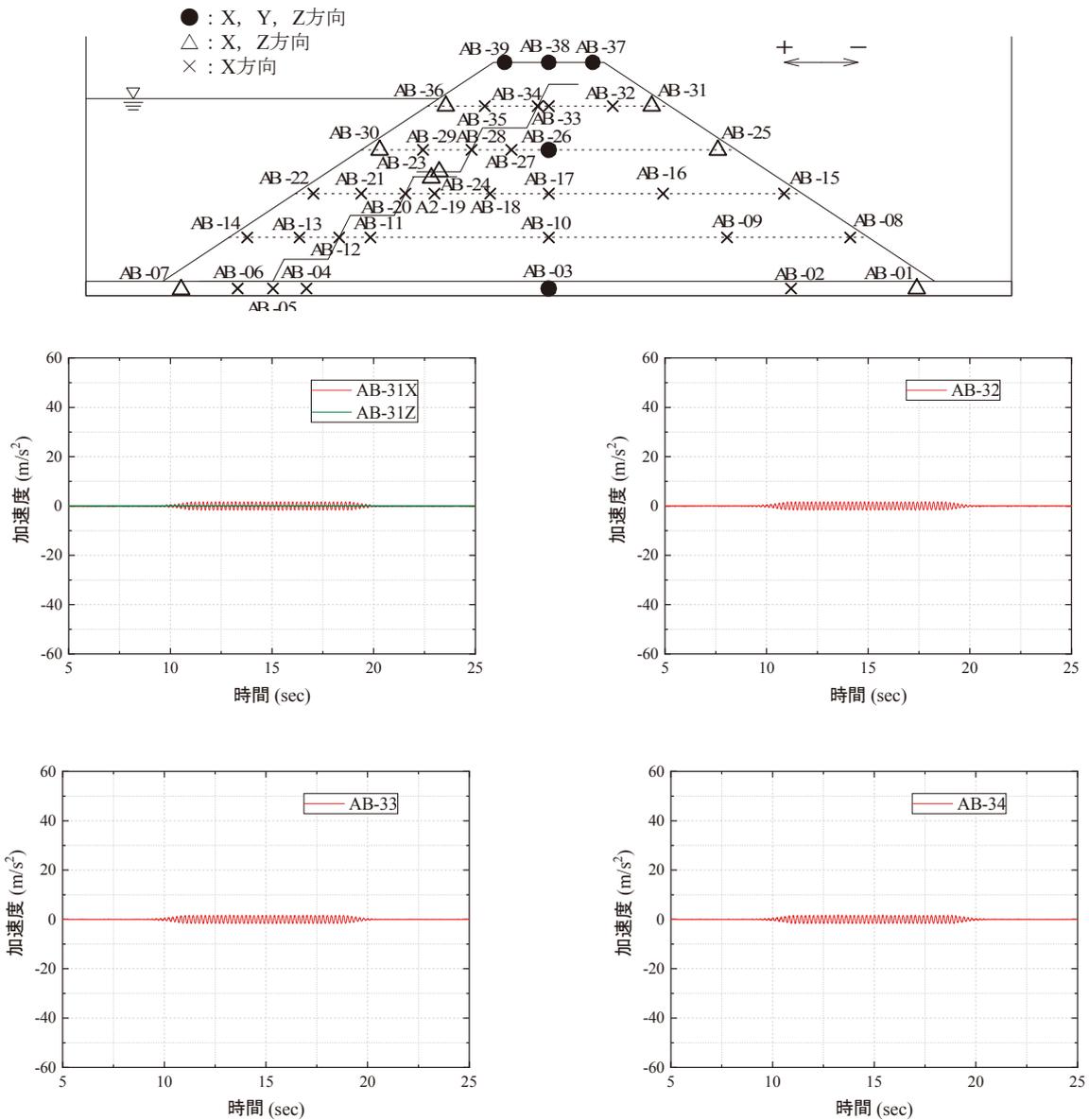


図 A7(I) Model-B における 240 cm から天端高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A7(I) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (170 gal)

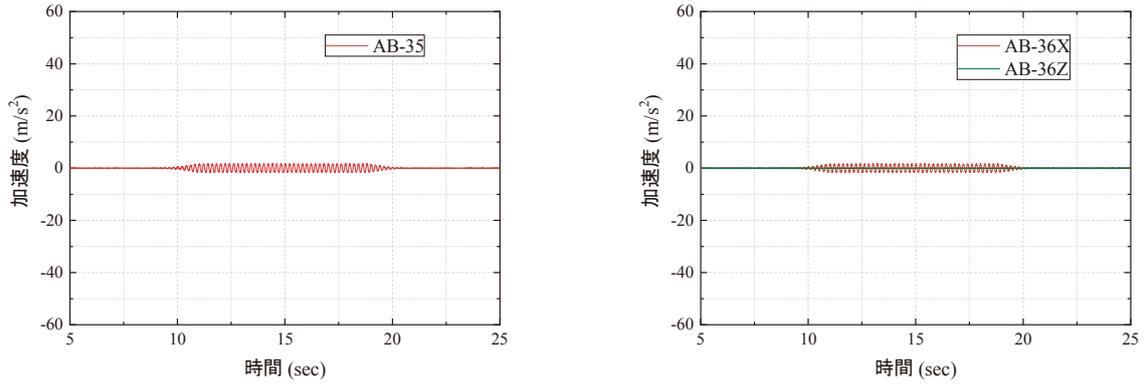


図 A7(2) Model-B における 240 cm での加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A7(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (170 gal).

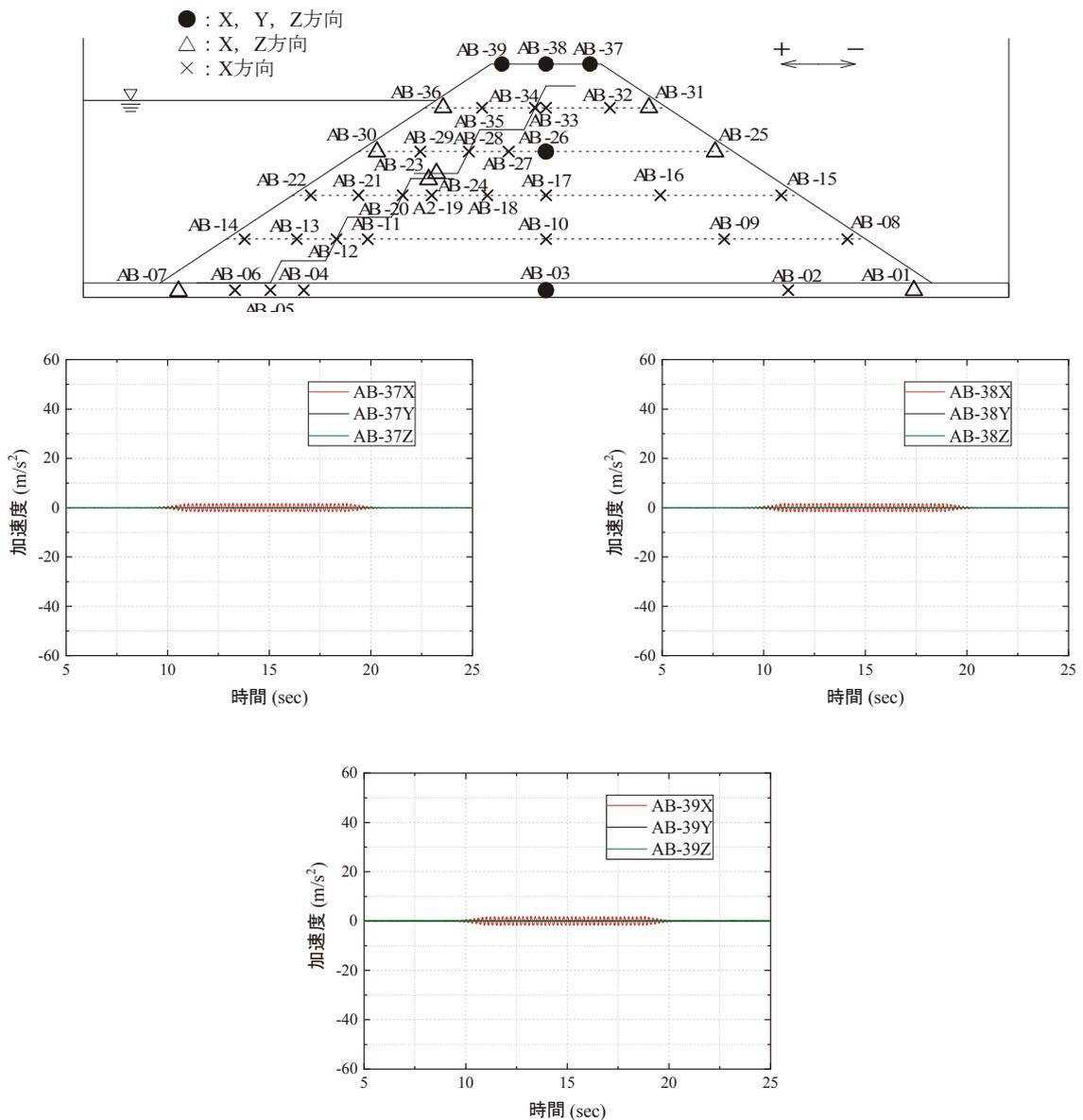


図 A8 Model-B における天端での加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A8 Acceleration responses at the embankment crests in Model-B (170 gal).

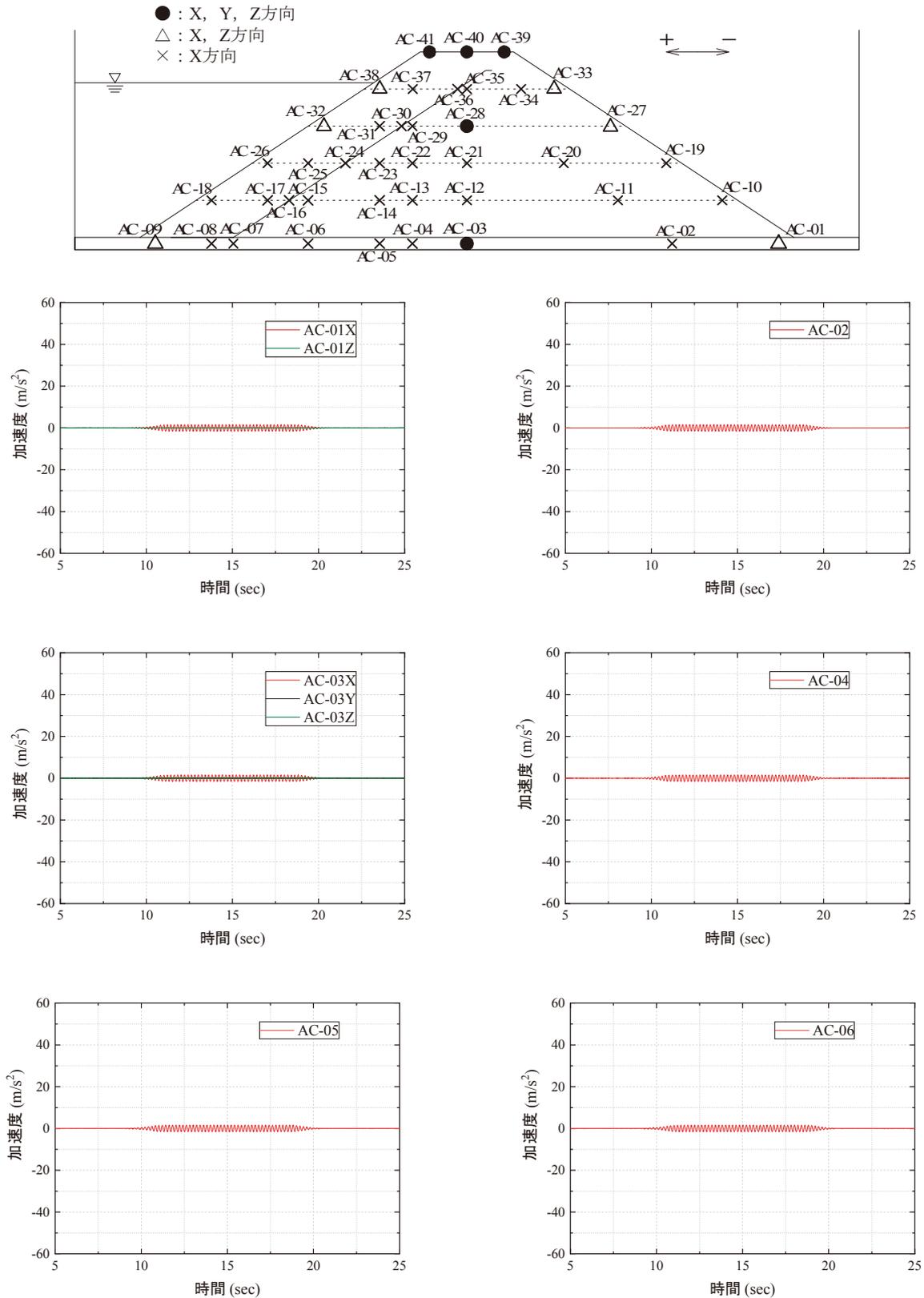


図 A9(1) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A9(1) Acceleration responses of the base in Model-C (170 gal).

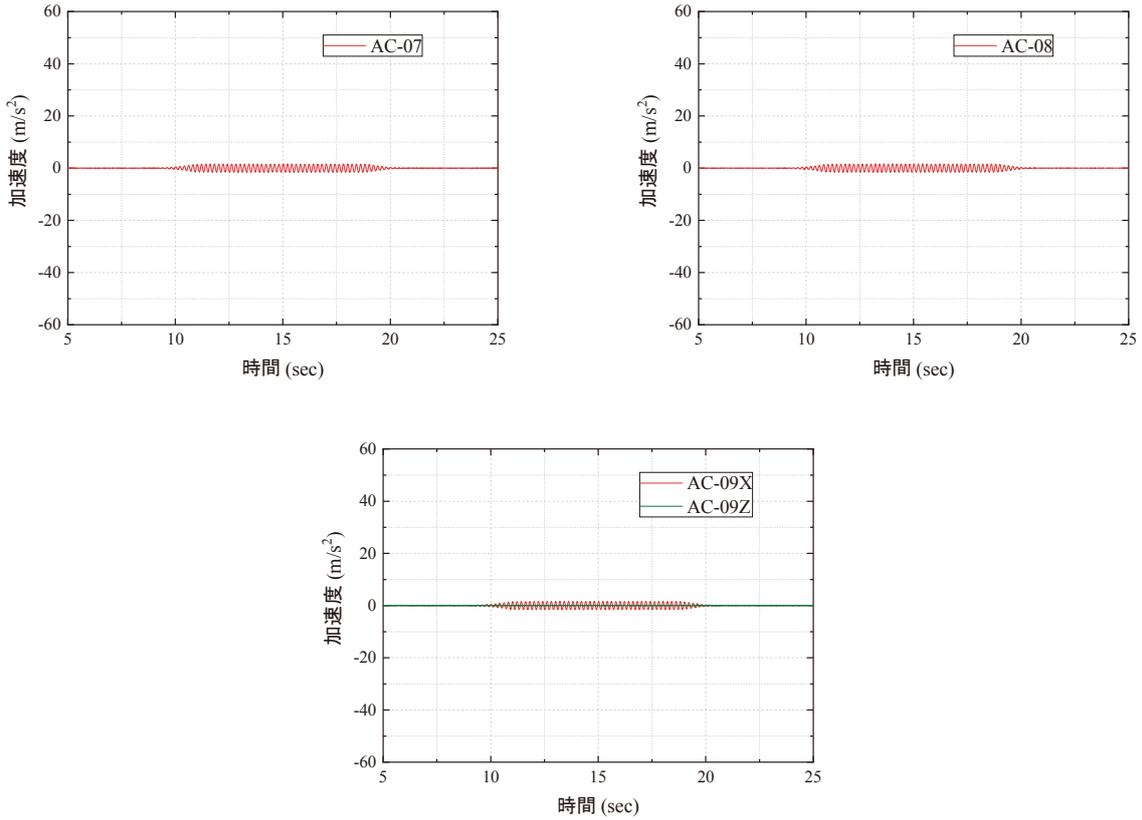


図 A9(2) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A9(2) Acceleration responses of the base in Model-C (170 gal).

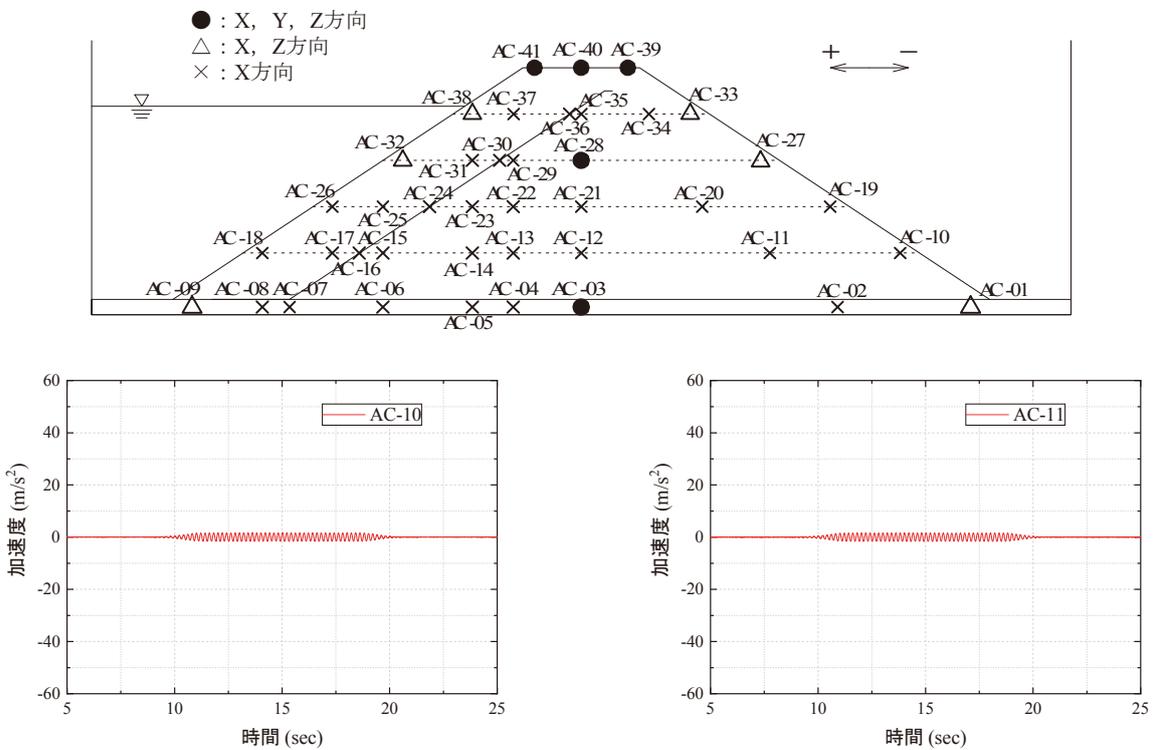


図 A10 (1) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A10(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (170 gal).

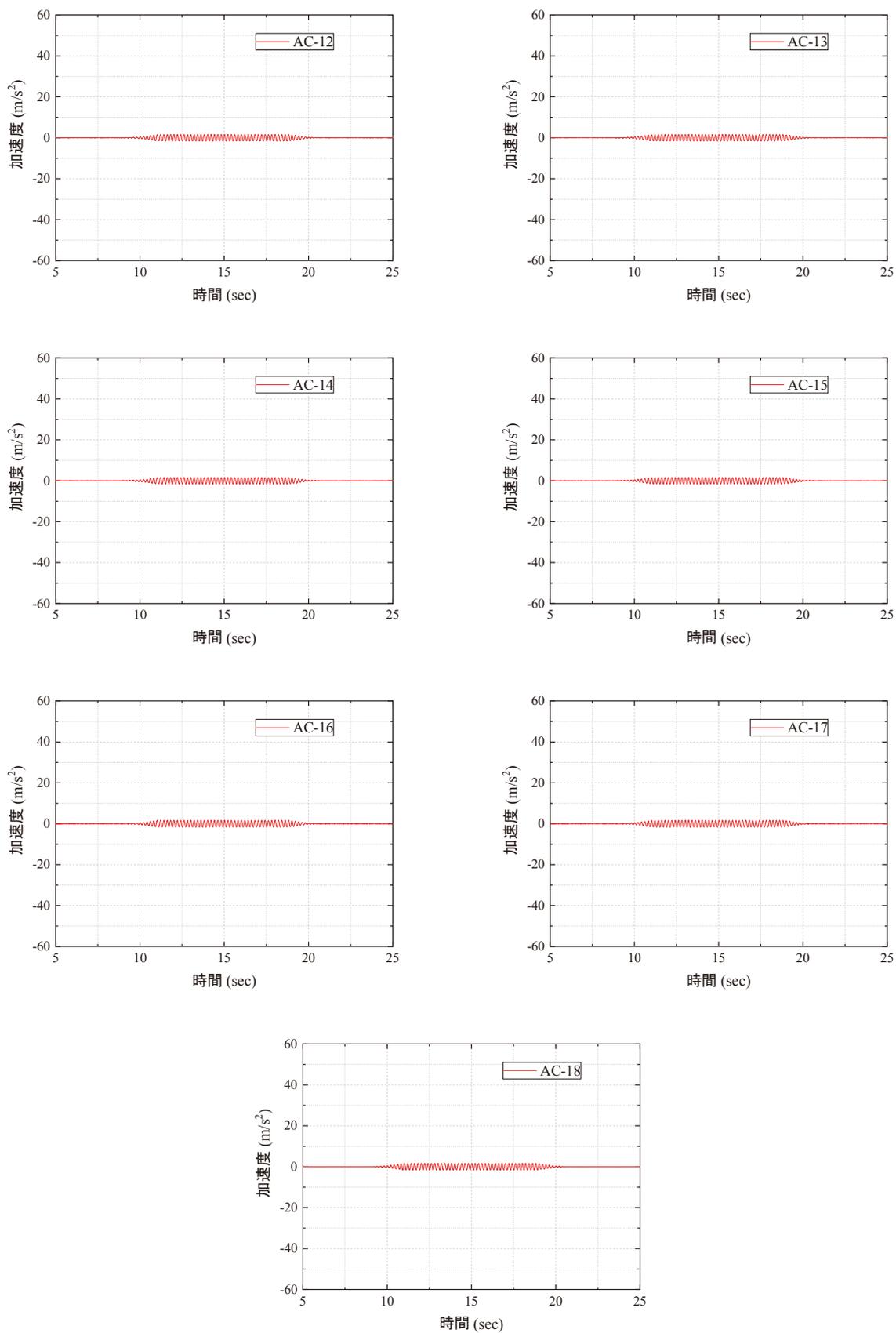


図 A10 (2) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A10(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (170 gal).

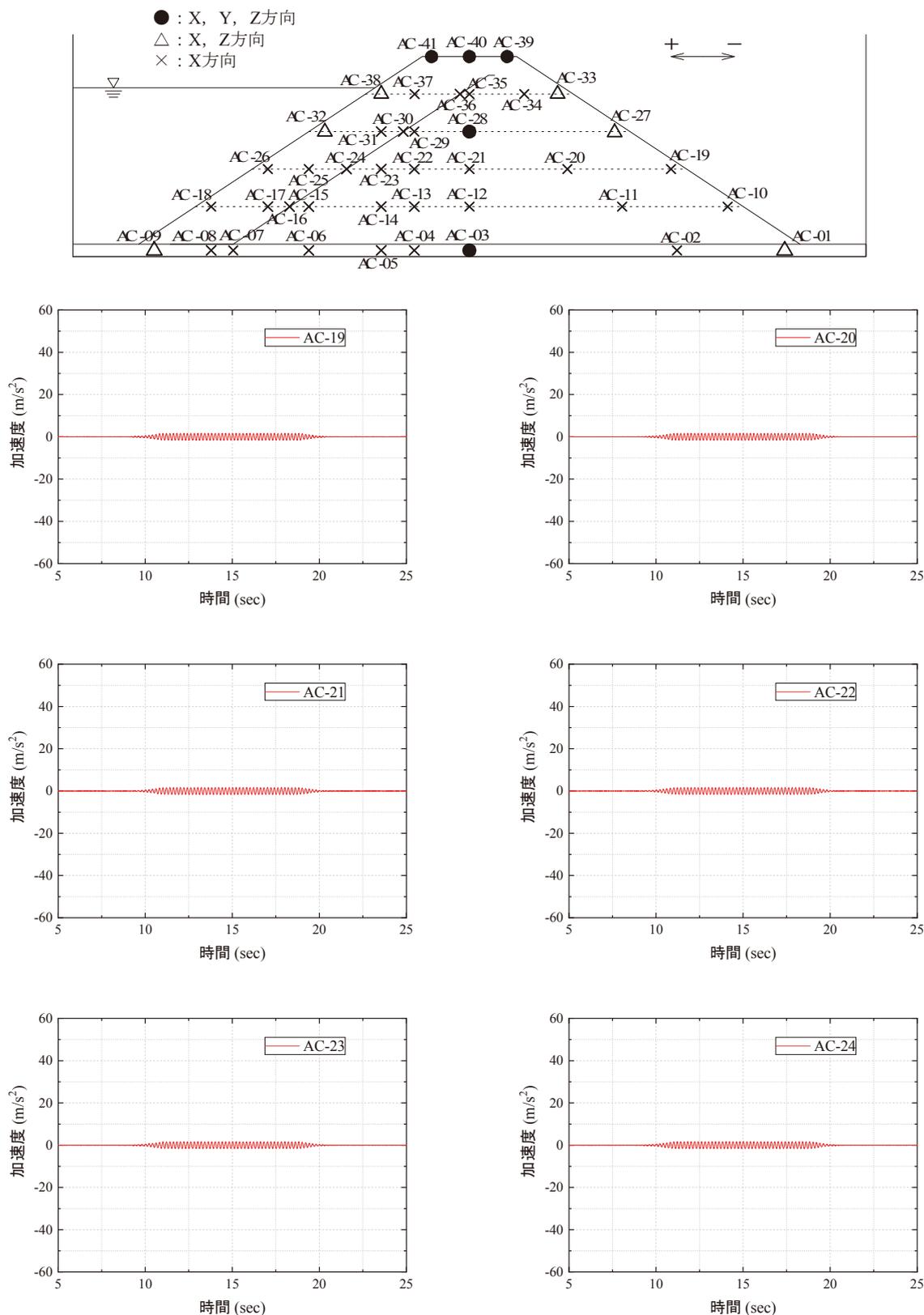


図 A11(1) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A11(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (170 gal).

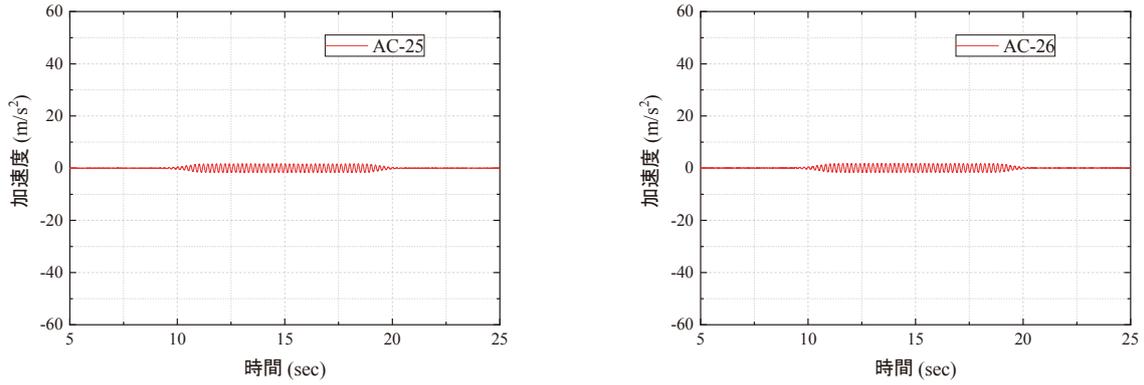


図 A11(2) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A11(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (170 gal).

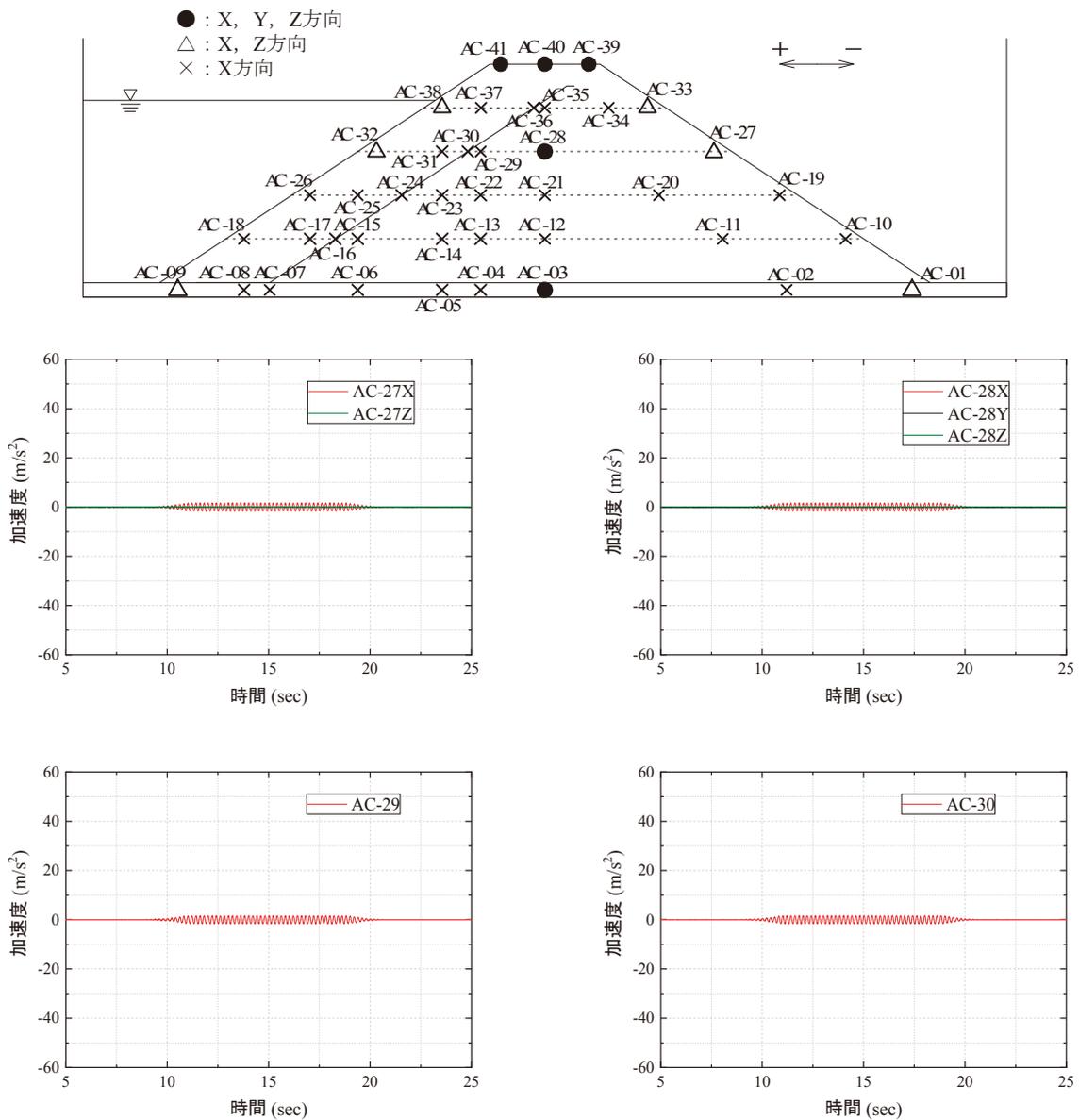


図 A12(1) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A12(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (170 gal).

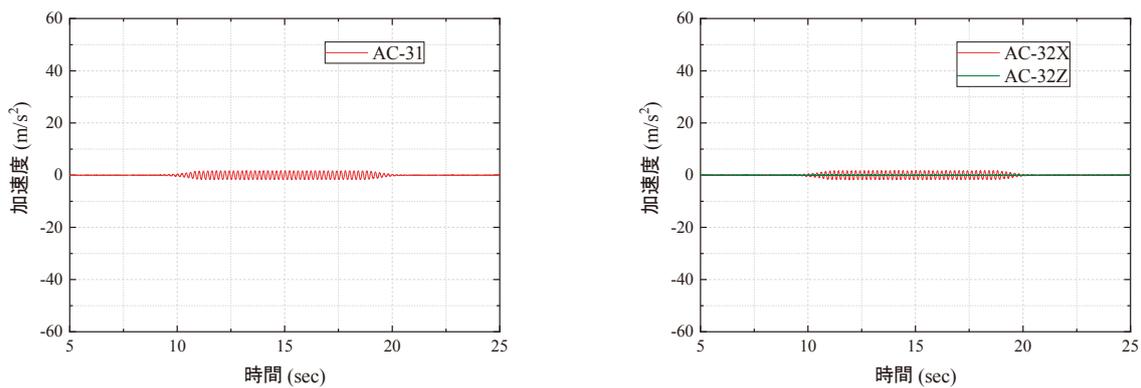


図 A12(2) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A12(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (170 gal).

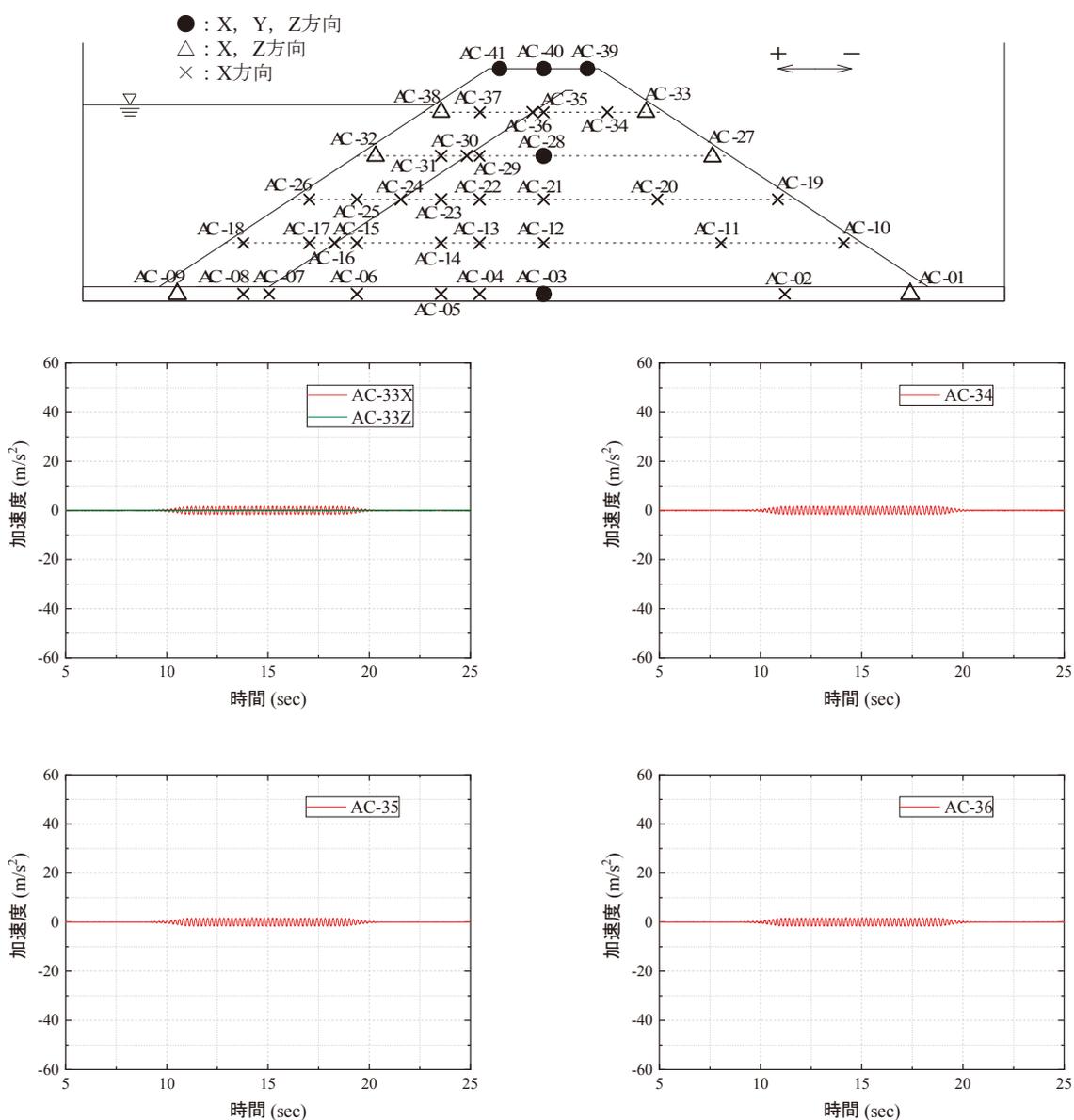


図 A13(1) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A13(1) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (170 gal).

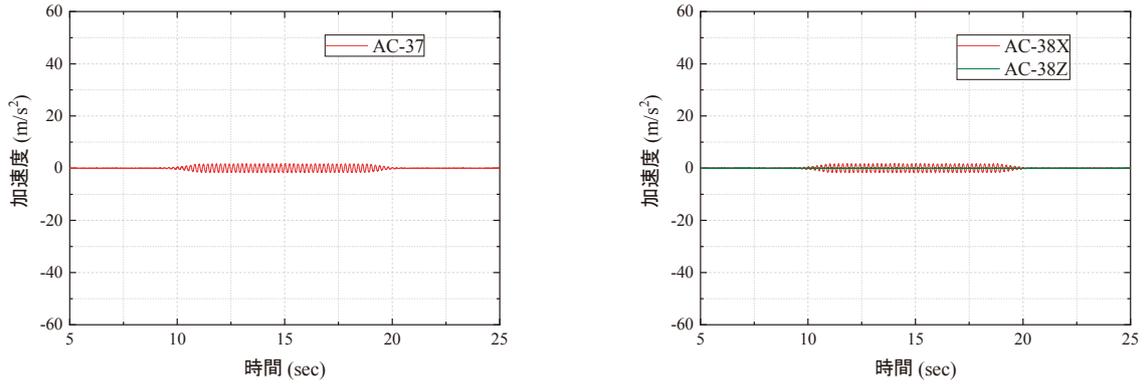


図 A13(2) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A13(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (170 gal).

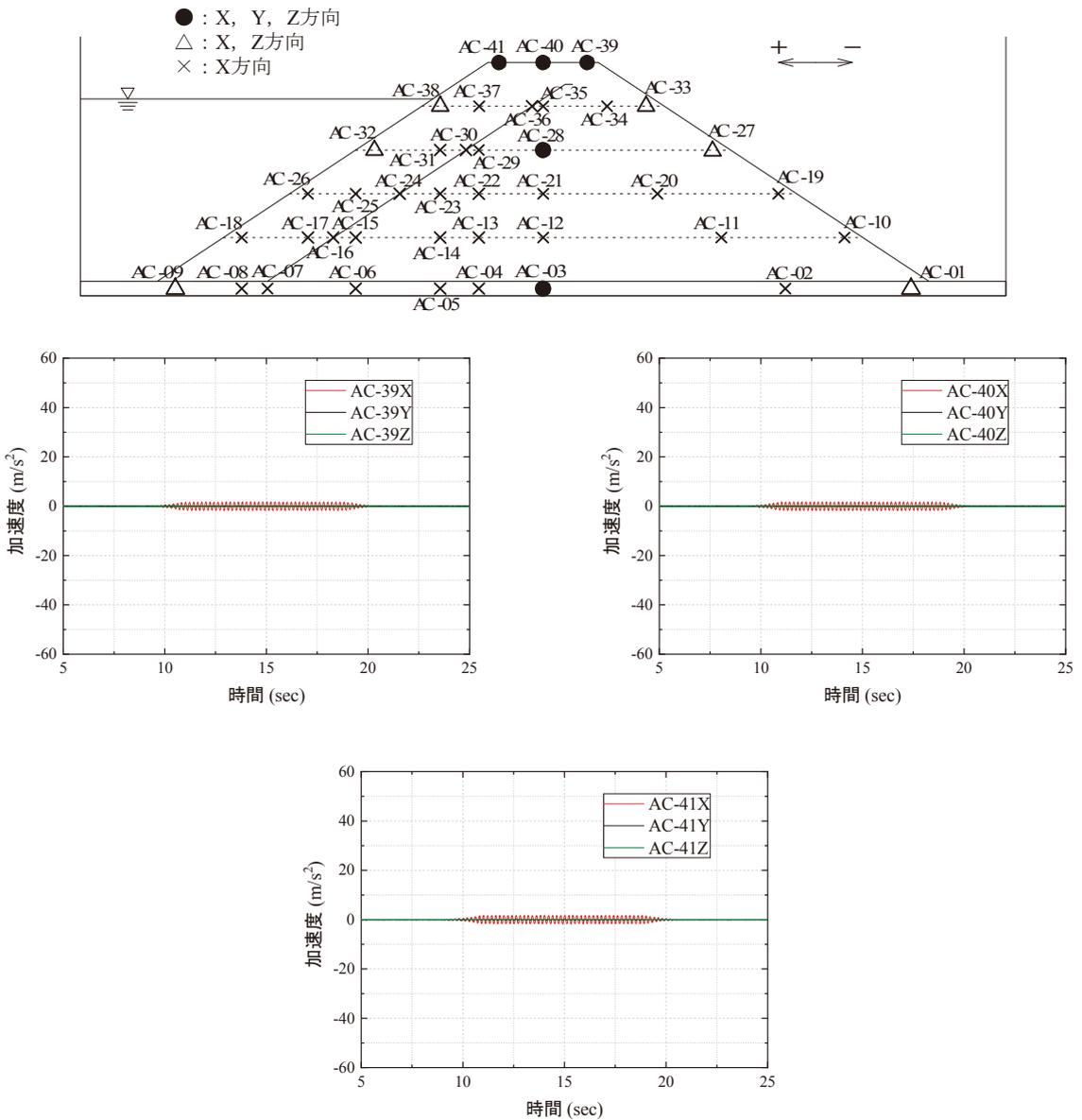


図 A14 Model-C における天端での加速度応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A14 Acceleration responses at the embankment crests in Model-C.

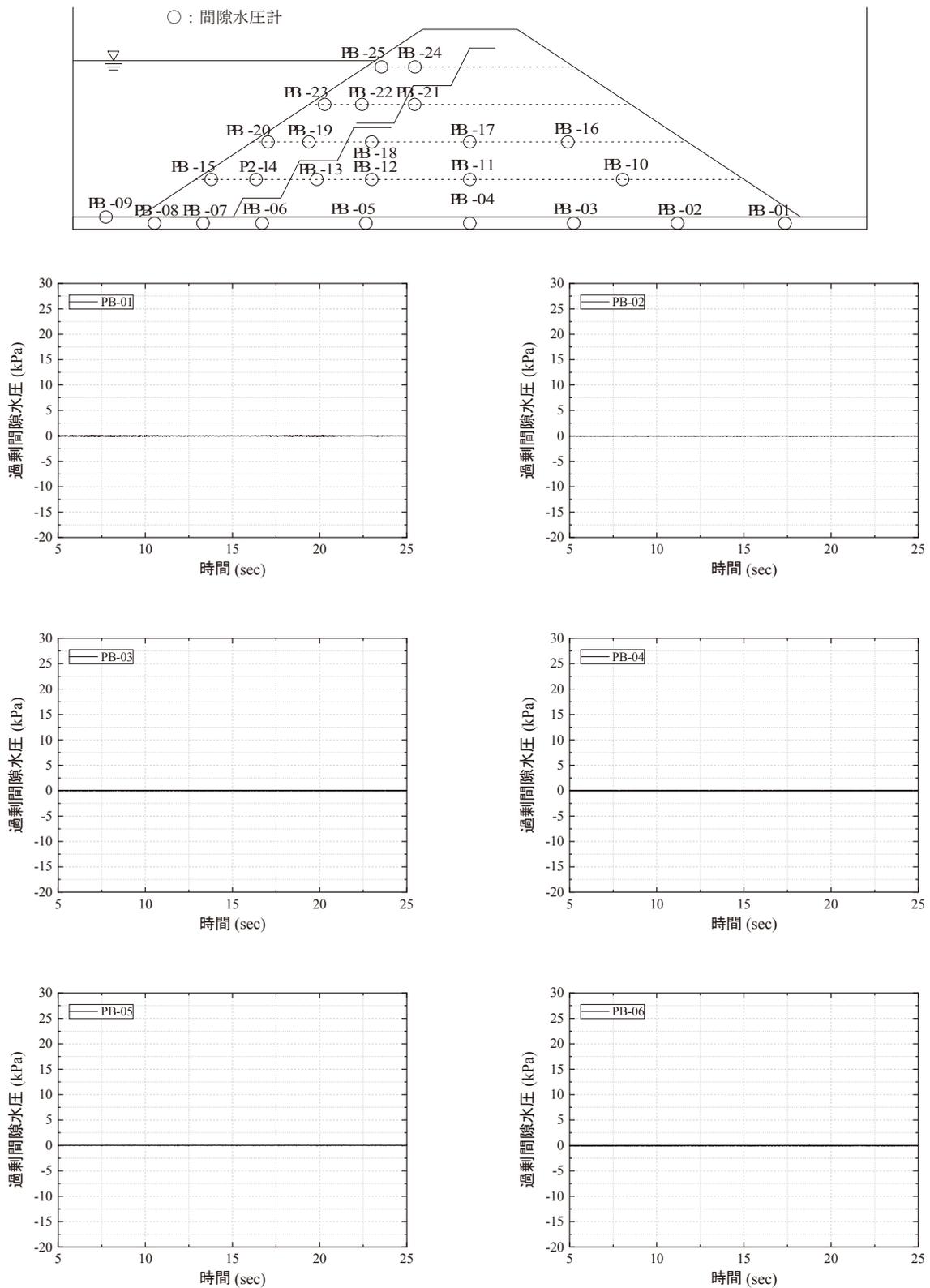


図 A15(1) Model-B における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A15(1) Pore water pressure responses of the base in Model-B (170 gal).

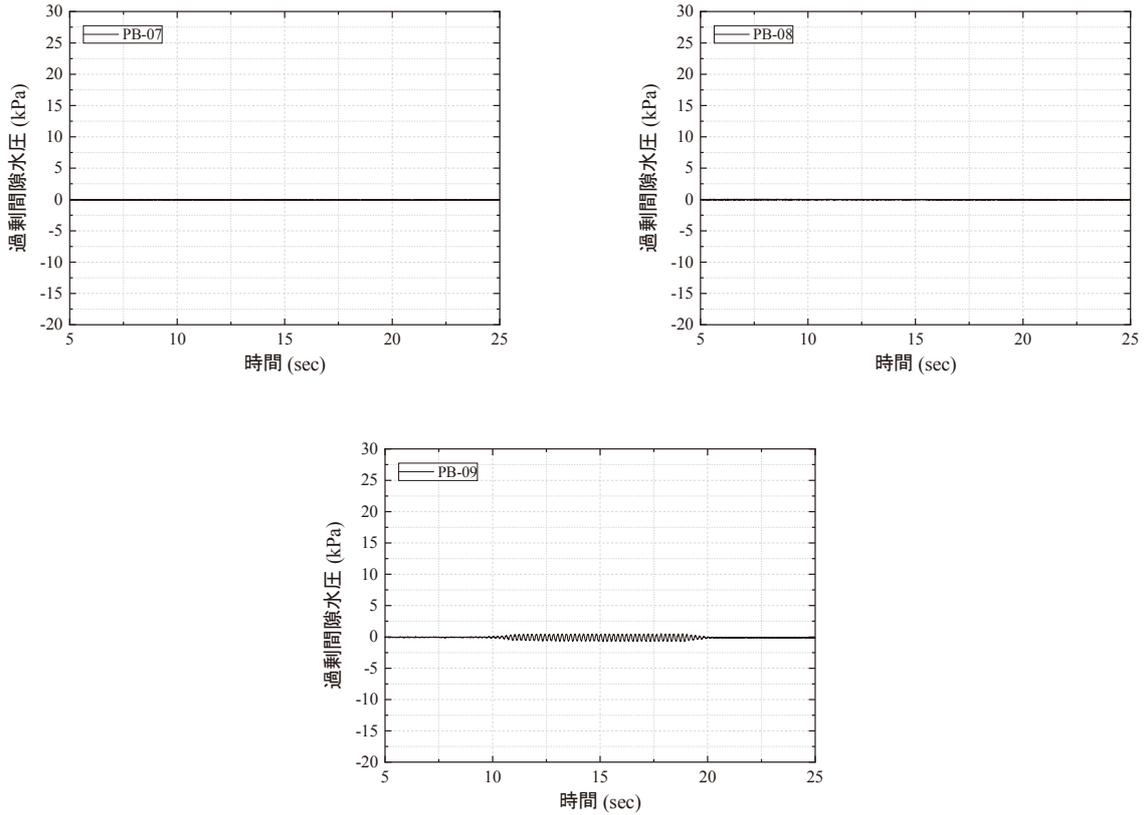


図 A15(2) Model-B における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A15(2) Pore water pressure responses of the base in Model-B (170 gal).

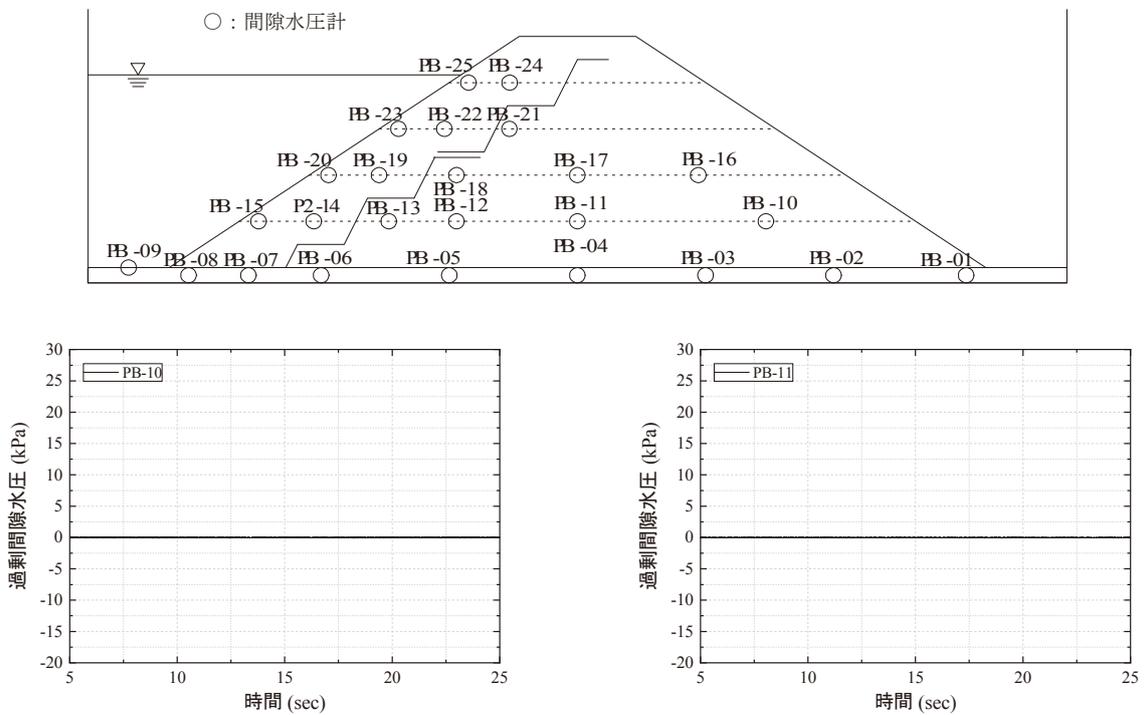


図 A16(1) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A16(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (170 gal).

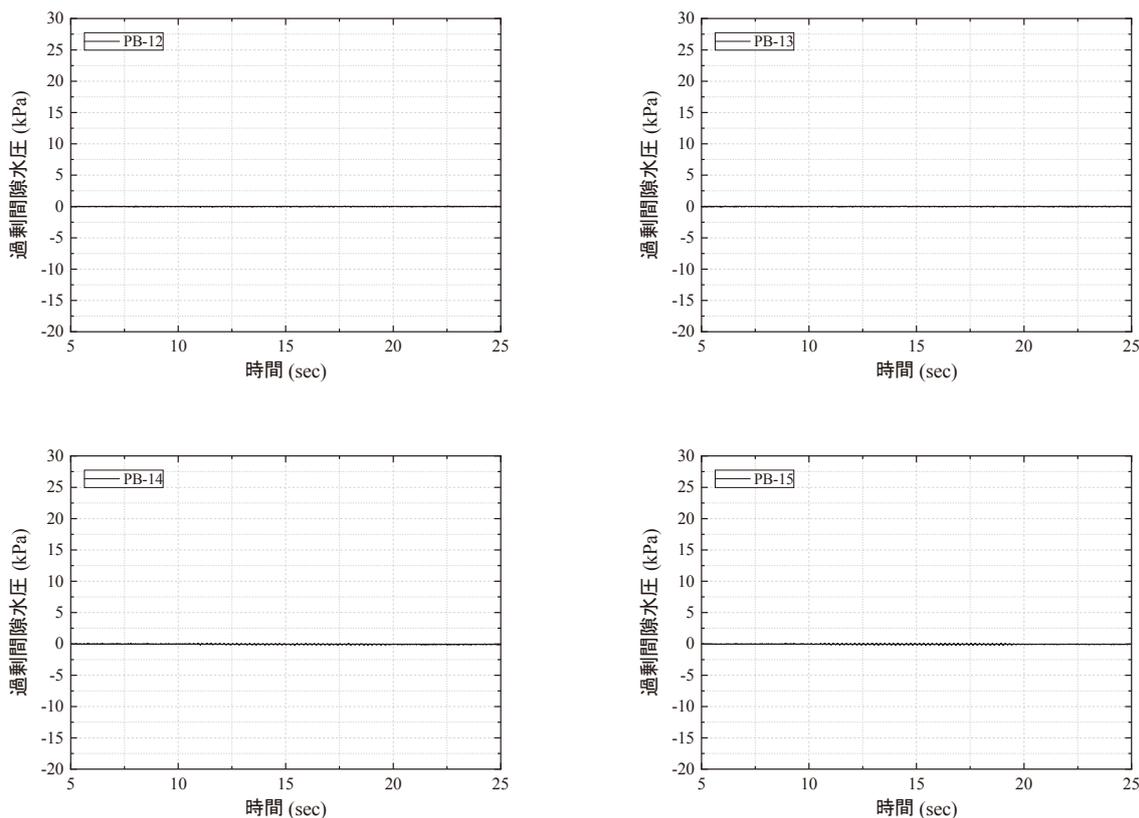


図 A16(2) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A16(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (170 gal).

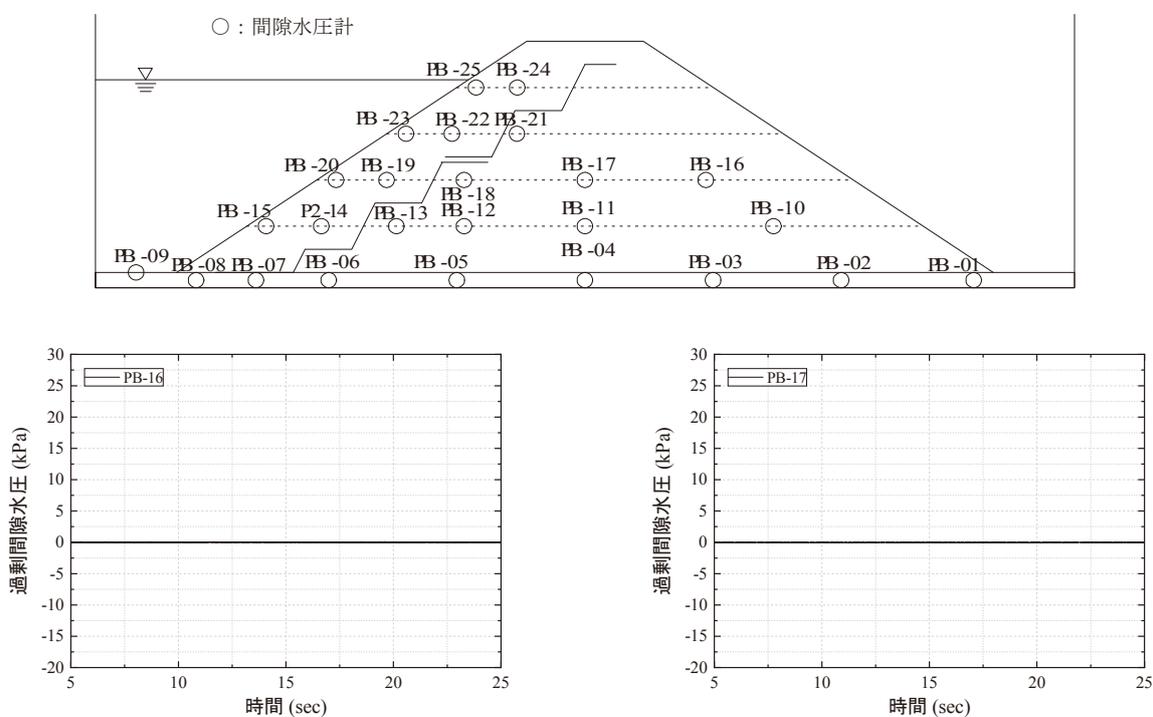


図 A17(1) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A17(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (170 gal).

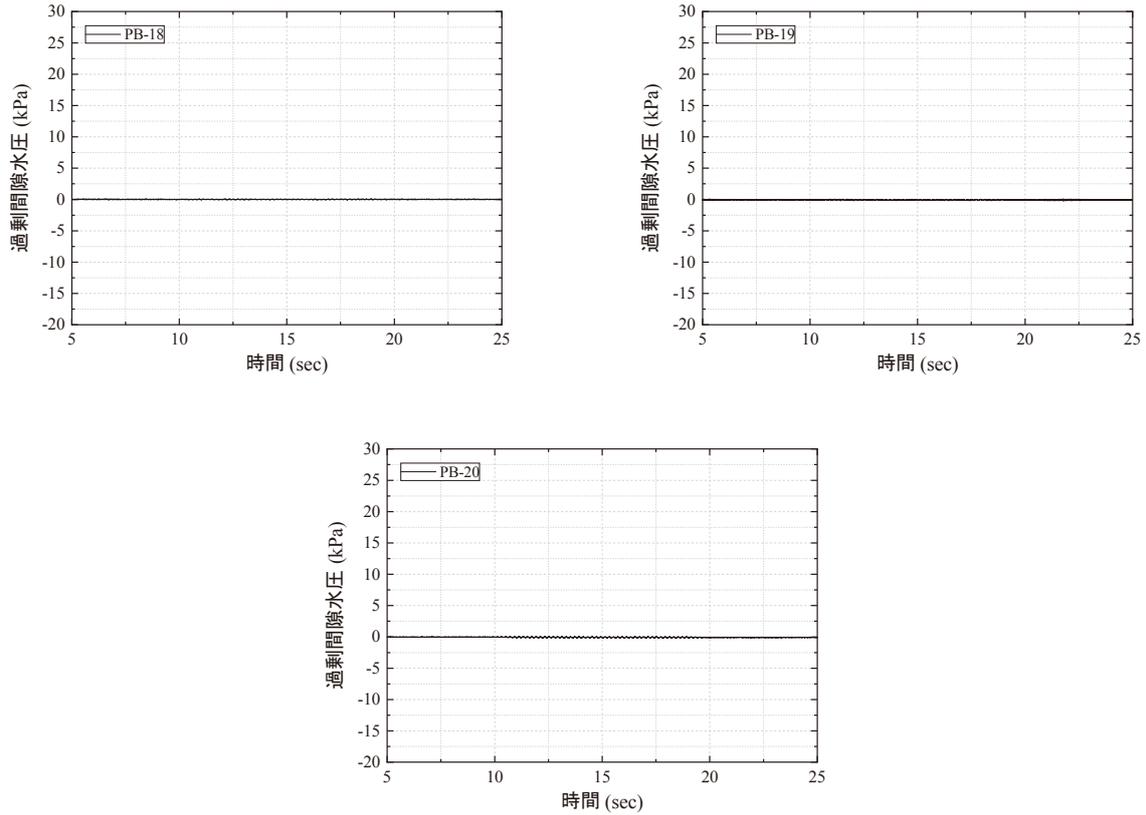


図 A17(2) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A17(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (170 gal).

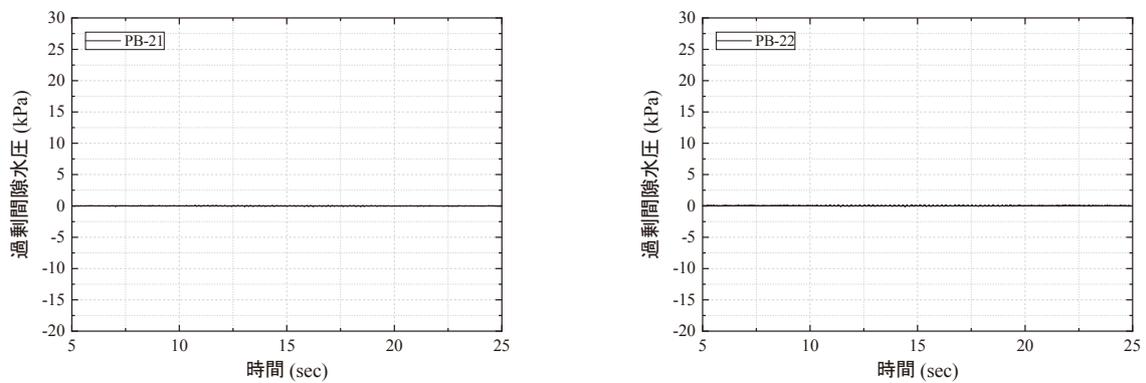
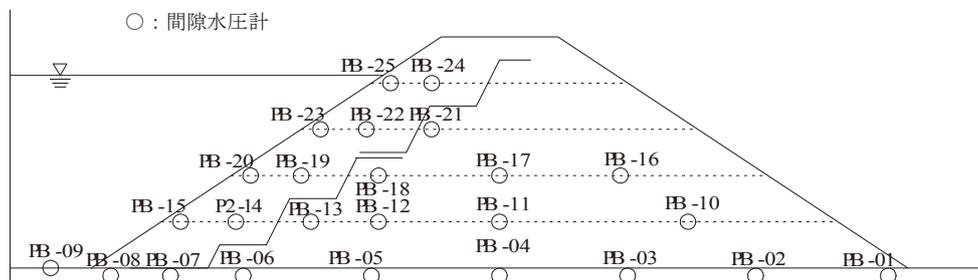


図 A18(1) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A18(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (170 gal).

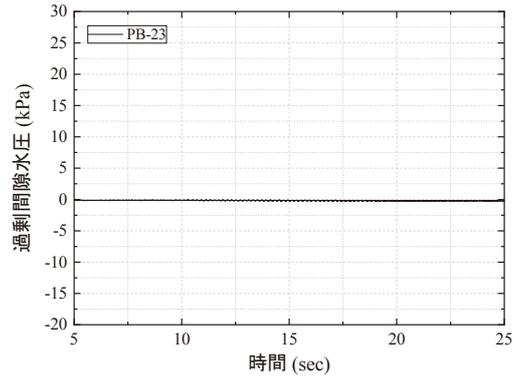


図 A18(2) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A18(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (170 gal).

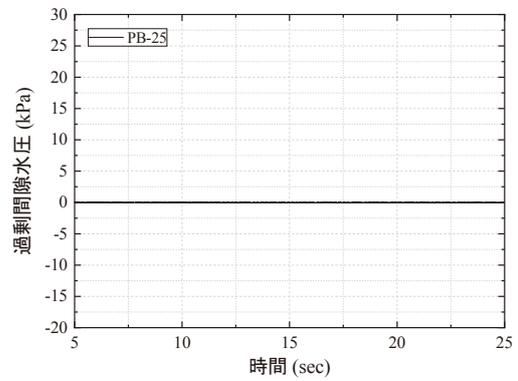
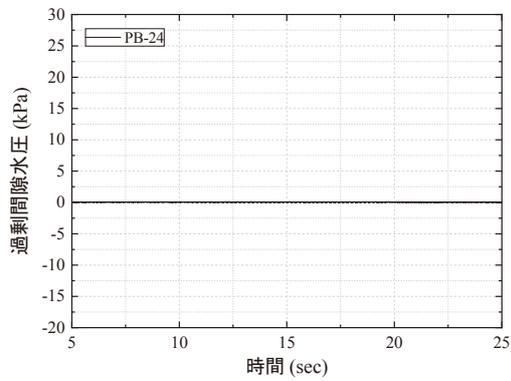
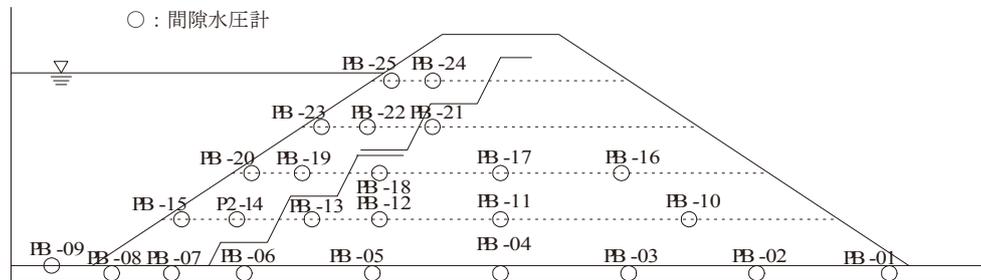


図 A19 Model-B における 240 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A19 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-B (170 gal).

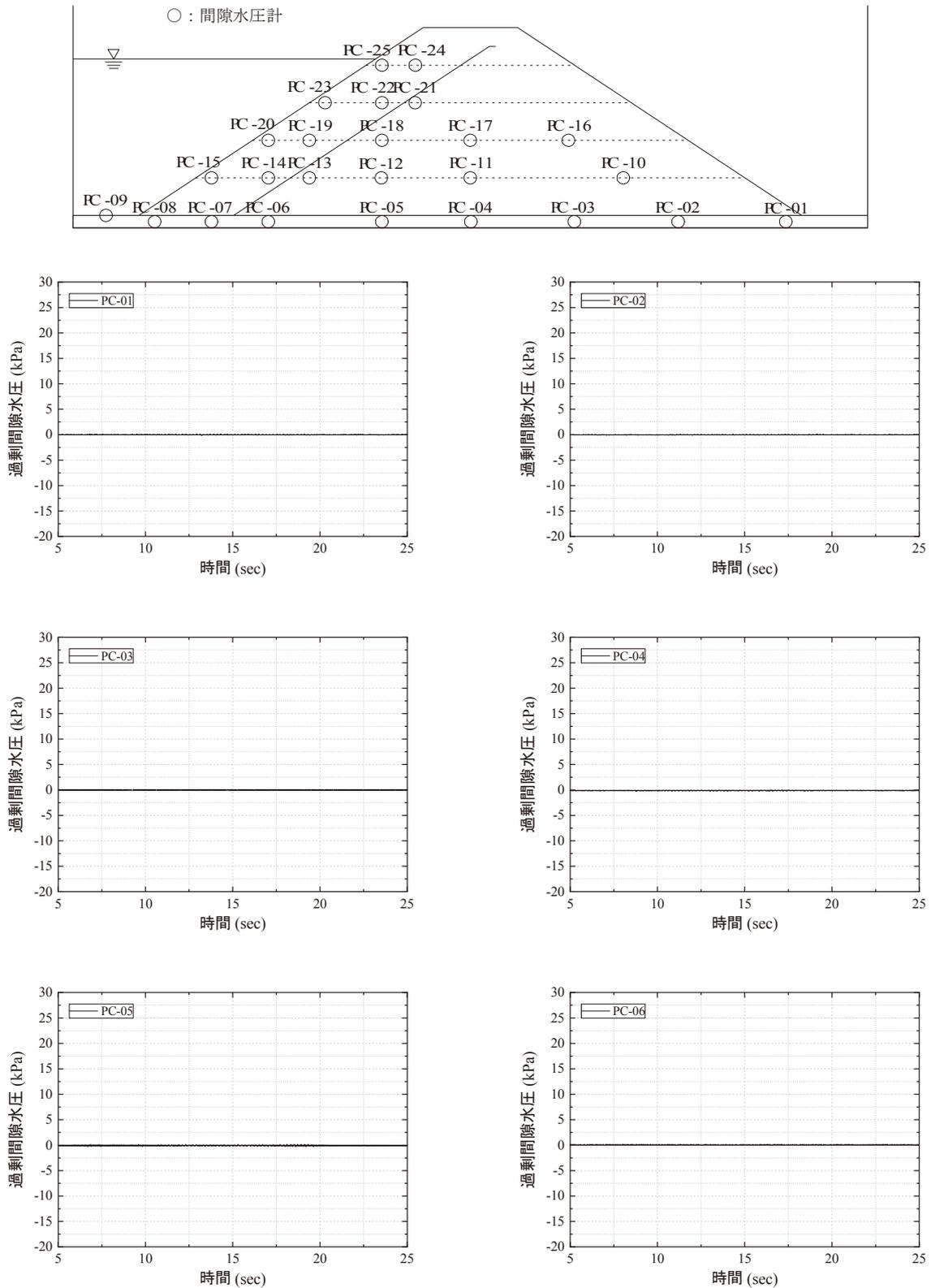


図 A20(1) Model-C における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A20(1) Pore water pressure responses of the base in Model-C (170 gal).

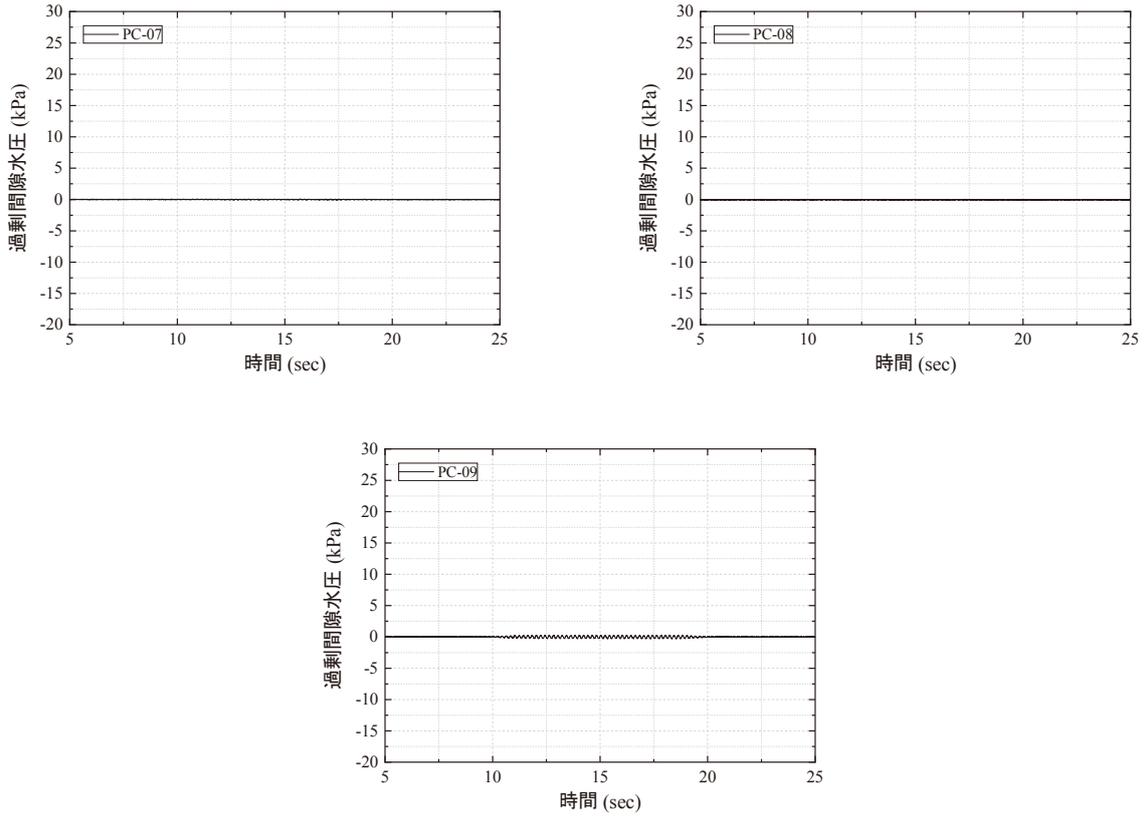


図 A20(2) Model-C における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A20(2) Pore water pressure responses of the base in Model-C (170 gal).

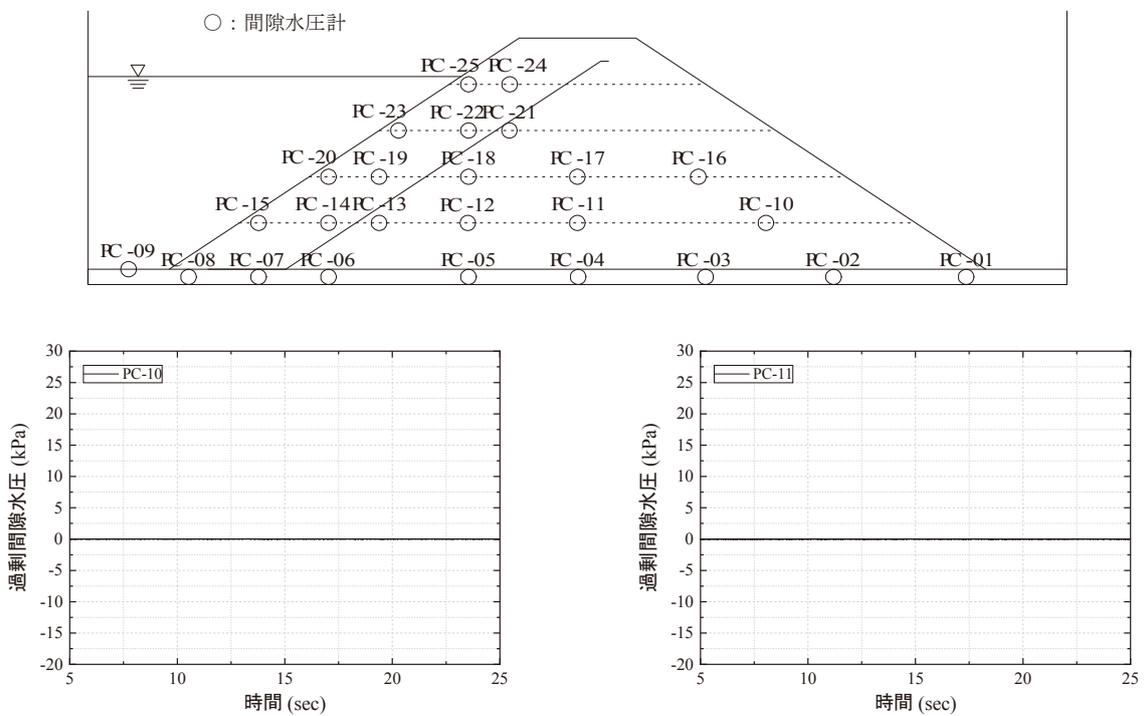


図 A21(1) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A21(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (170 gal).

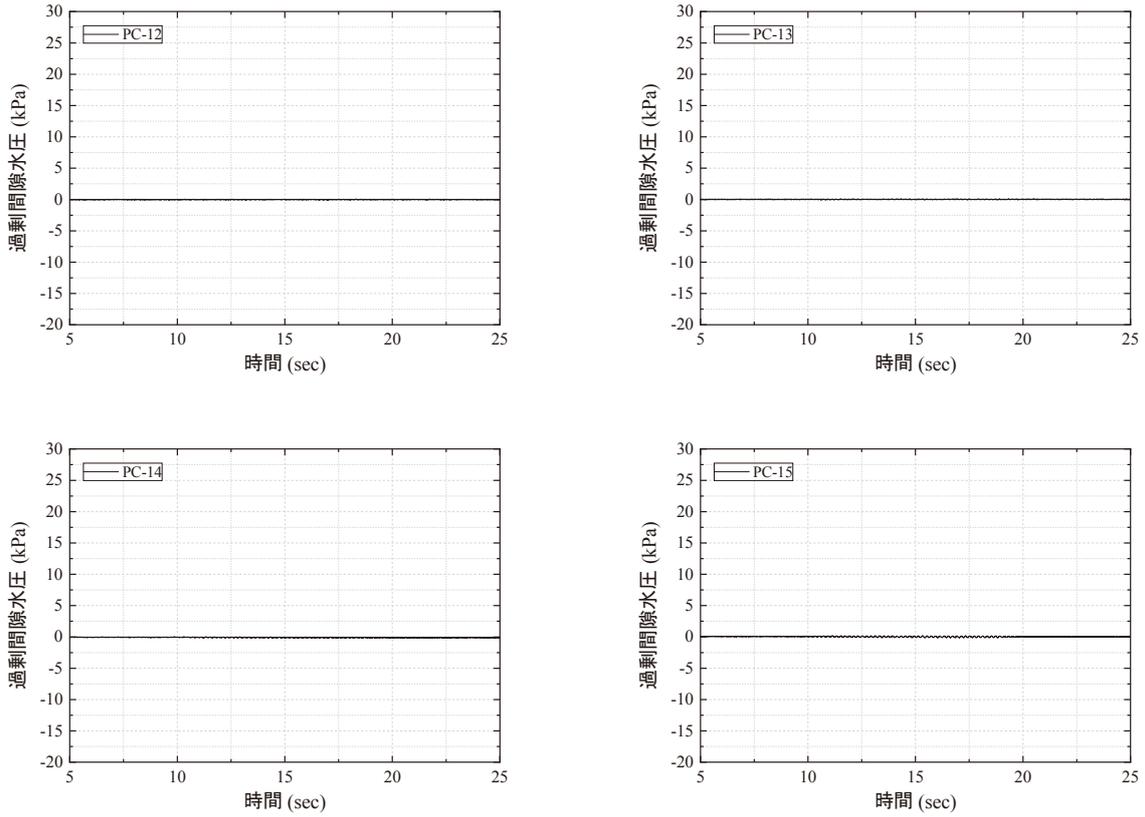


図 A21(2) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A21(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (170 gal).

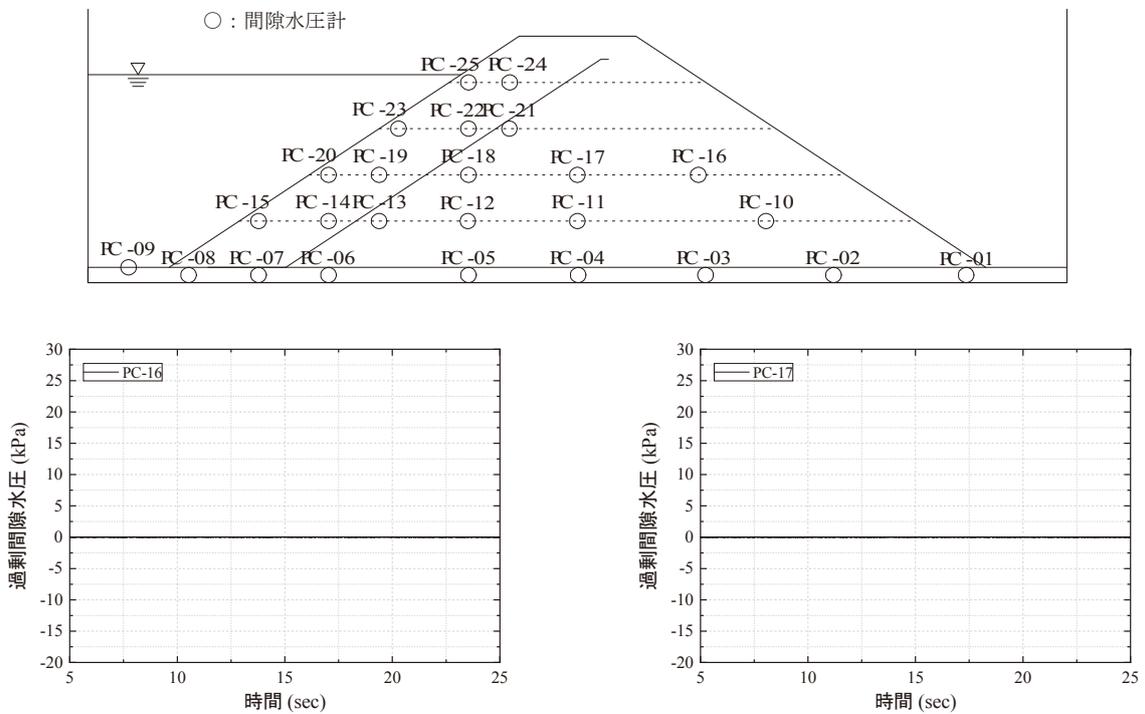


図 A22(1) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(170 gal 加振時)  
 Fig. A22(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (170 gal).

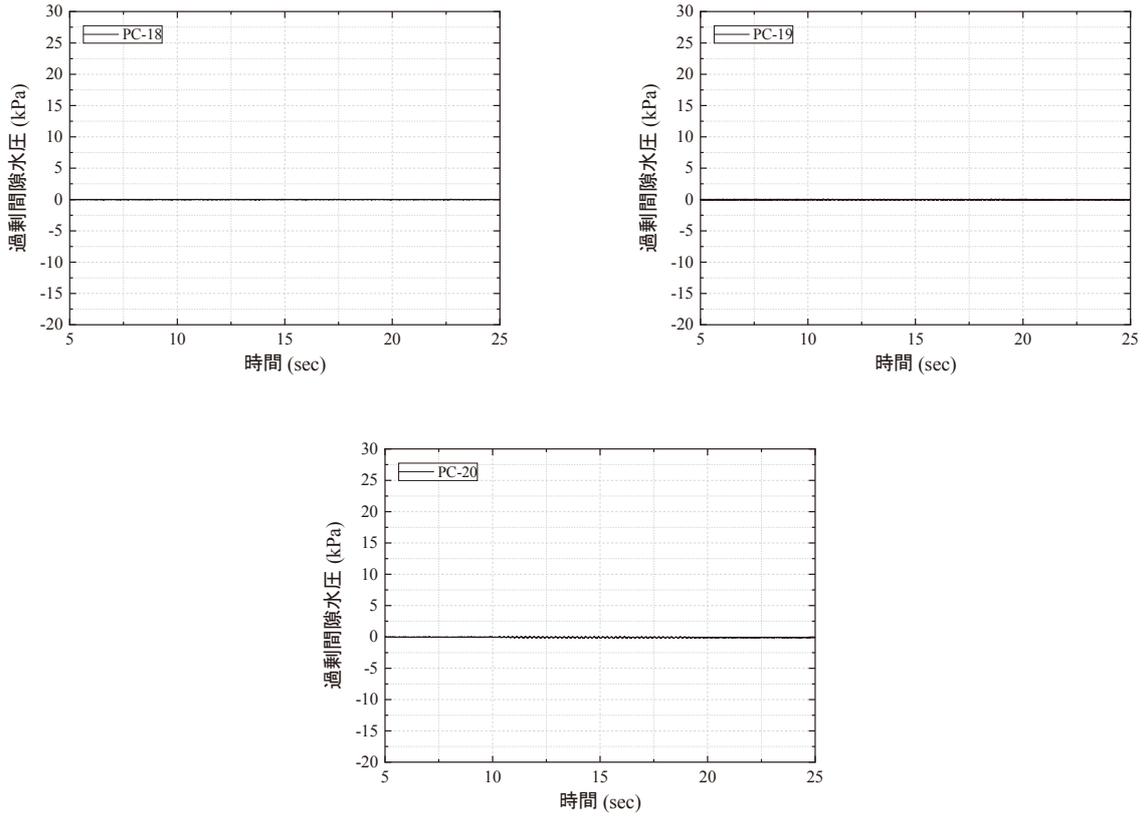


図 A22(2) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A22(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (170 gal).

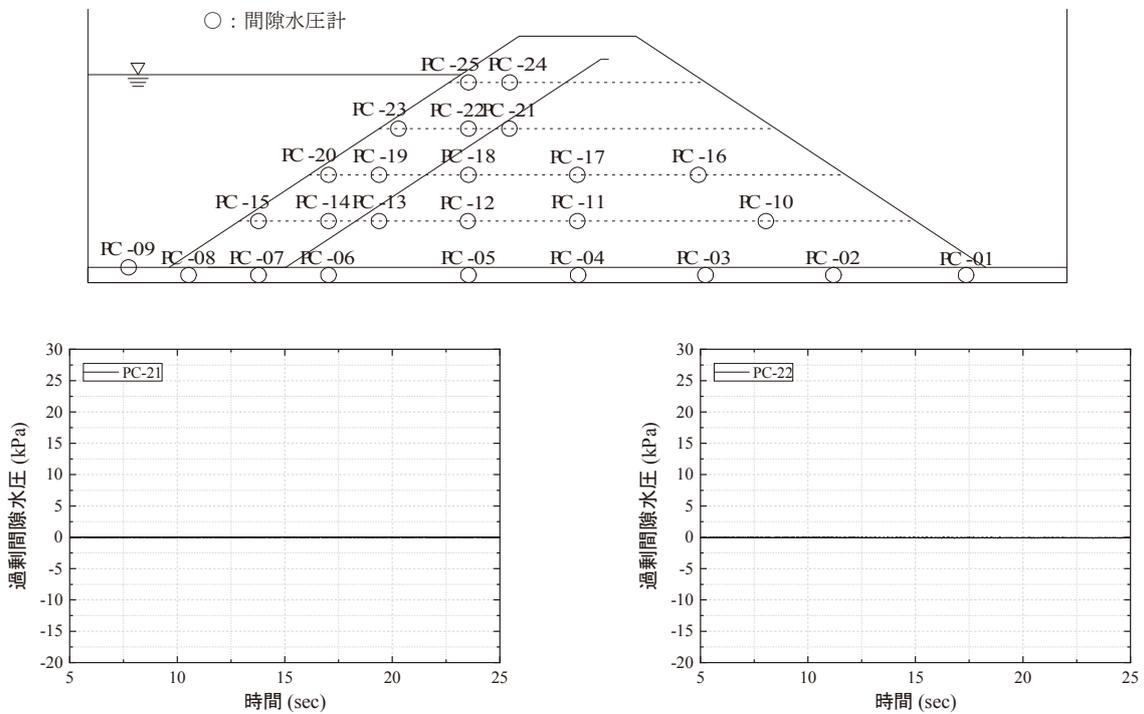


図 A23(1) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A23(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (170 gal).

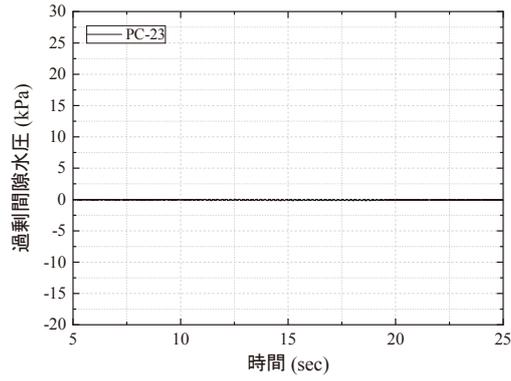


図 A23(2) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A23(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (170 gal).

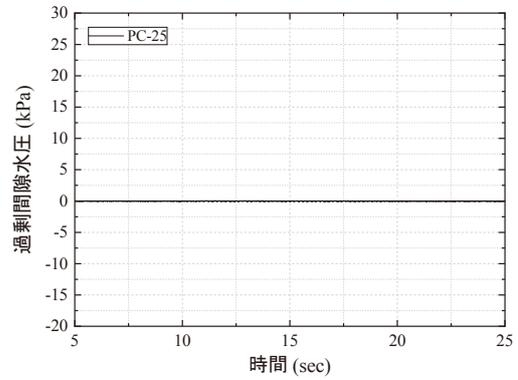
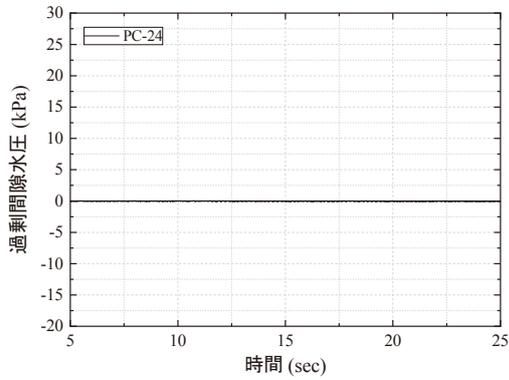
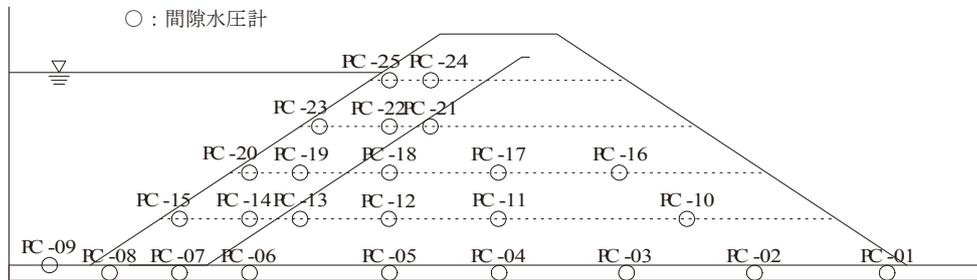
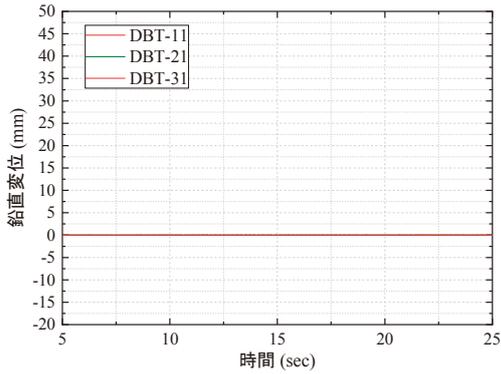
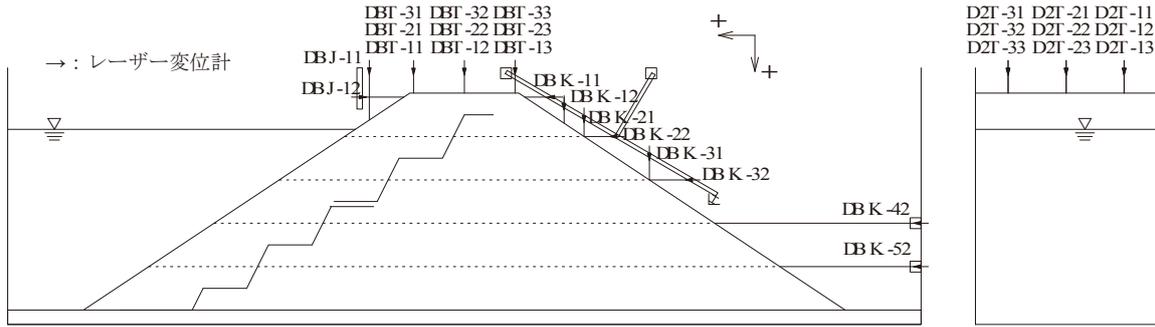
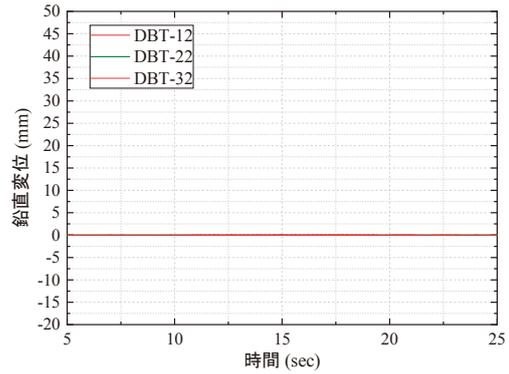


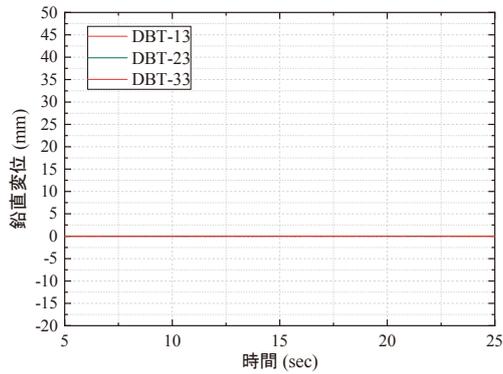
図 A24 Model-C における 240 cm 高さでの間隙水圧応答 (170 gal 加振時)  
 Fig. A24 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-C (170 gal).



(a) 天端 1



(b) 天端 2



(c) 天端 3

図 A25 Model-B における天端の鉛直変位(170 gal 加振時)

Fig. A25 Vertical deformations of the embankment crests in Model-B (170 gal).

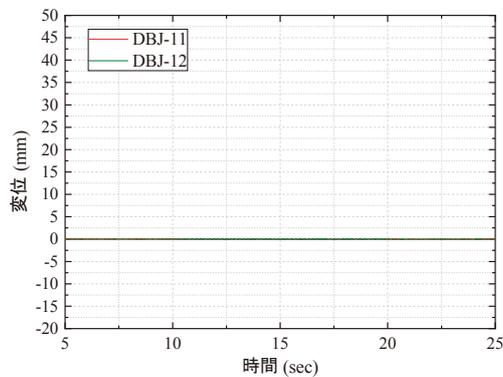


図 A26 Model-B における上流斜面の水平・鉛直変位(170 gal 加振時)

Fig. A26 Vertical and horizontal deformations of slope of the upstream side in Model-B (170 gal).

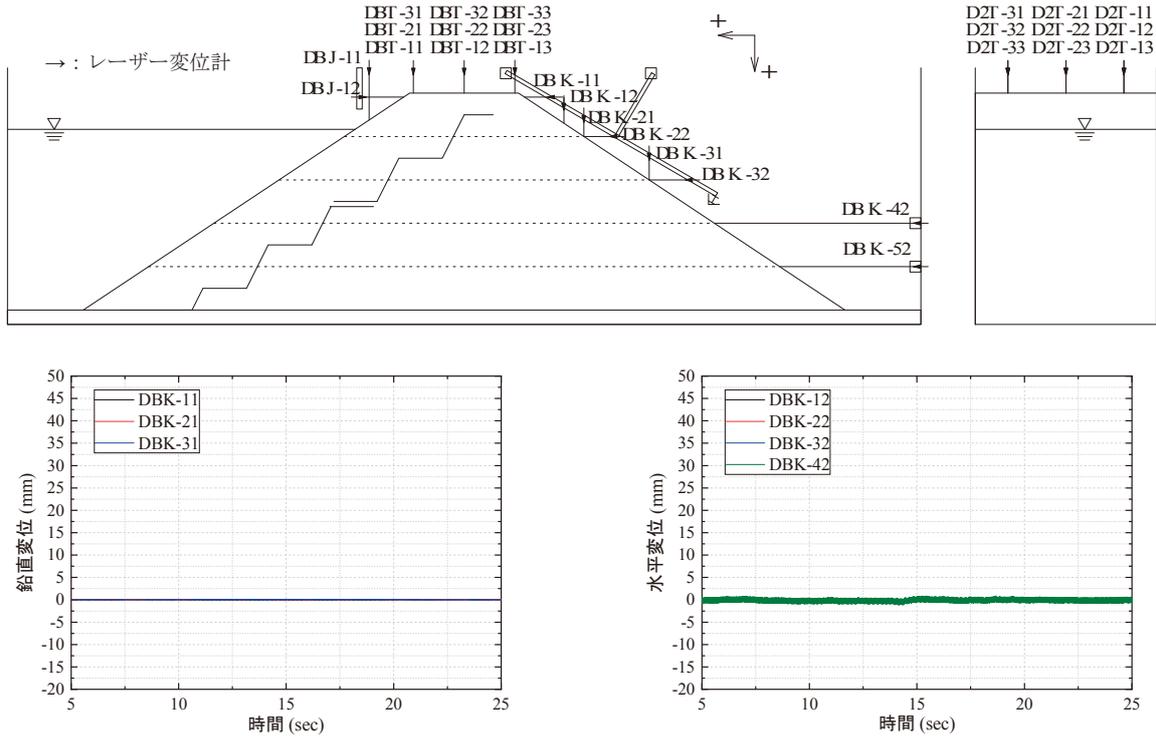
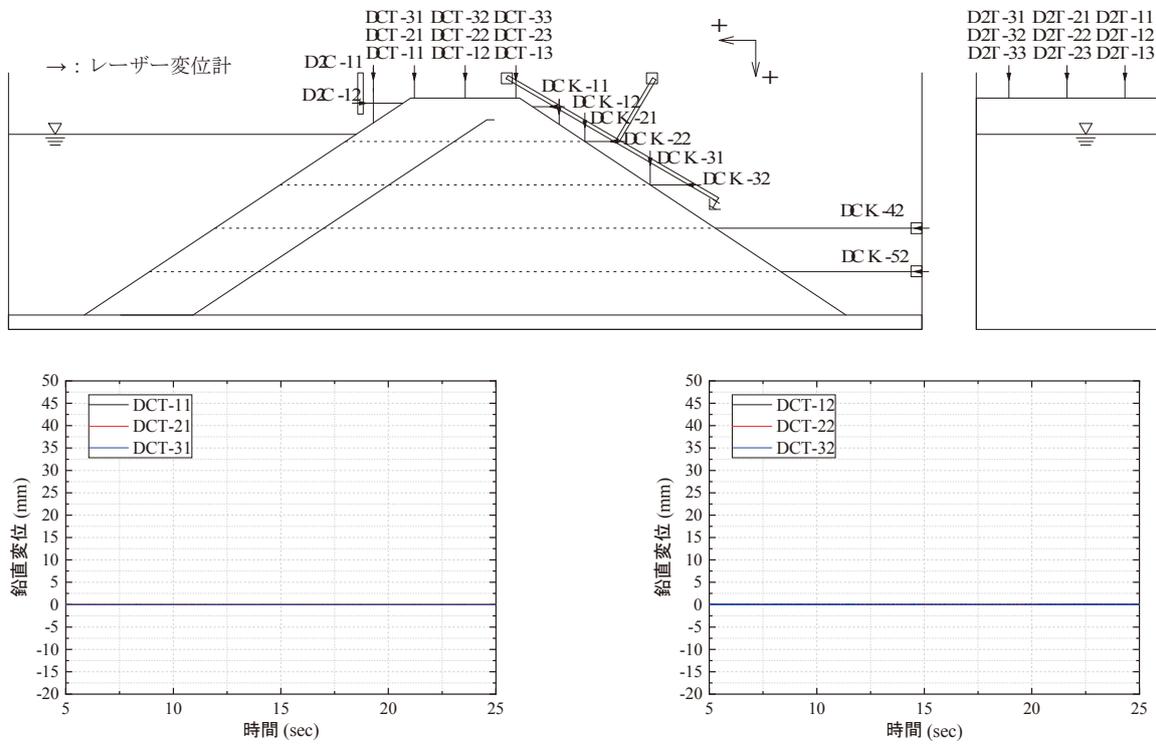


図 A27 Model-B における下流斜面の水平変位 (170 gal)

Fig. A27 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-B.

図 A28 Model-B における下流斜面の鉛直変位 (170 gal)

Fig. A28 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-B.

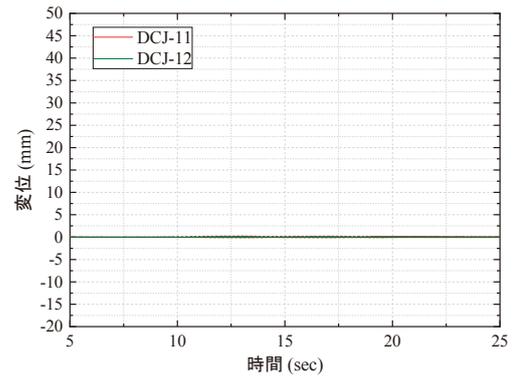
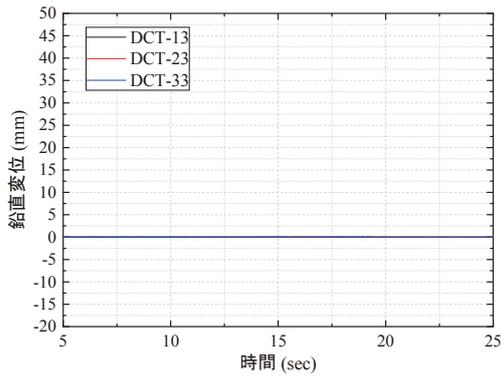
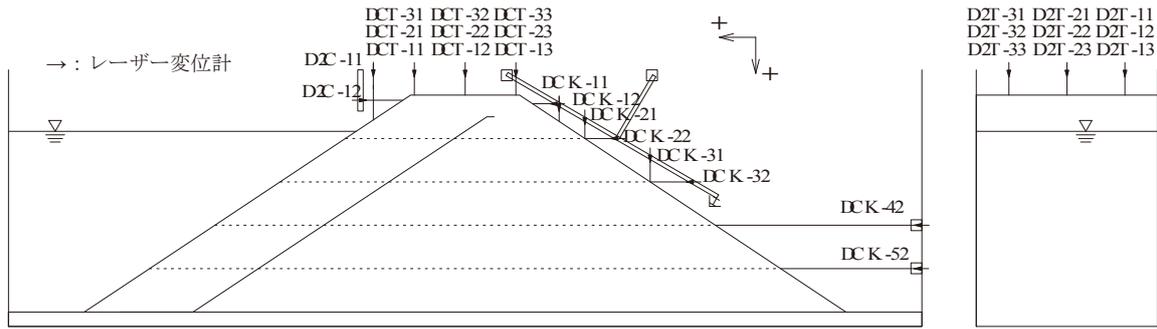


(a) 天端 1

(b) 天端 2

図 A29(1) Model-C における天端の鉛直変位 (170 gal 加振時)

Fig. A29(1) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (170 gal).



(c) 天端 3

図 A29(2) Model-C の天端の鉛直変位 (170 gal 加振時)  
Fig. A29(2) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (170 gal).

図 A30 Model-C の上流斜面の水平・鉛直変位 (170 gal 加振時)  
Fig. A30 Vertical and horizontal deformations of upstream side in Model-C (170 gal).

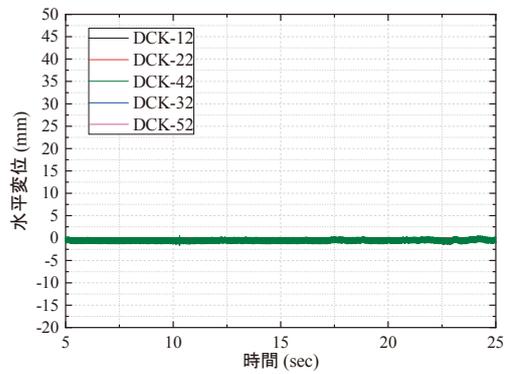
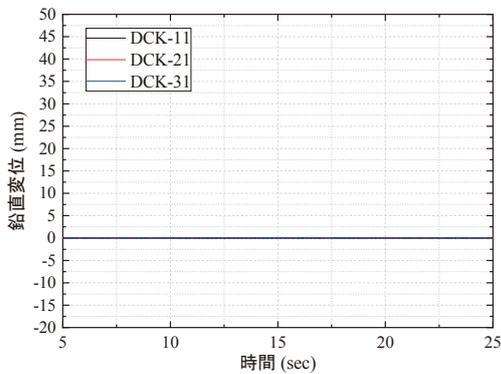


図 A31 Model-C における下流斜面の水平変位 (170 gal 加振時)  
Fig. A31 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-C (170 gal).

図 A32 Model-C における下流斜面の鉛直変位 (170 gal 加振時)  
Fig. A32 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-C (170 gal).

## A.2 440 gal 加振結果

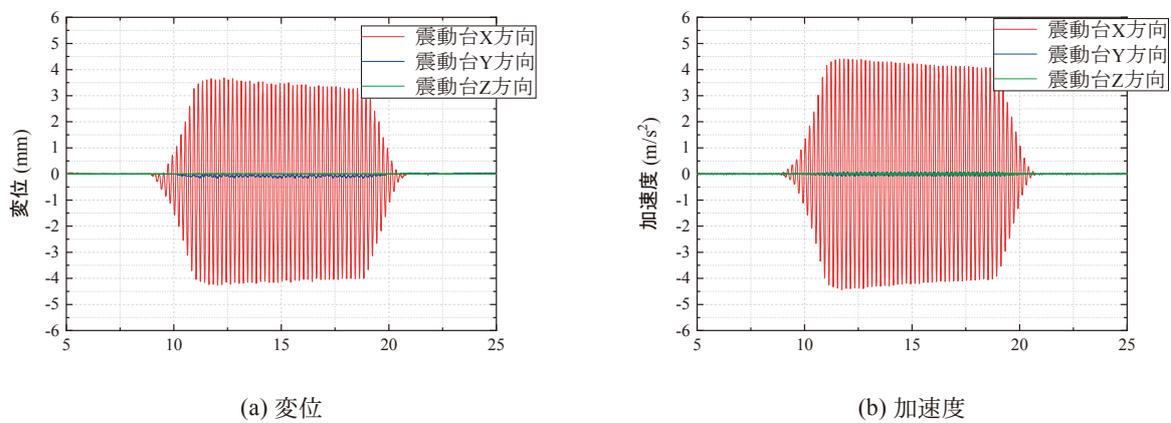


図 A33 震動台の変位および加速度(440 gal 加振時)

Fig. A33 Base displacement and acceleration time histories (440 gal).

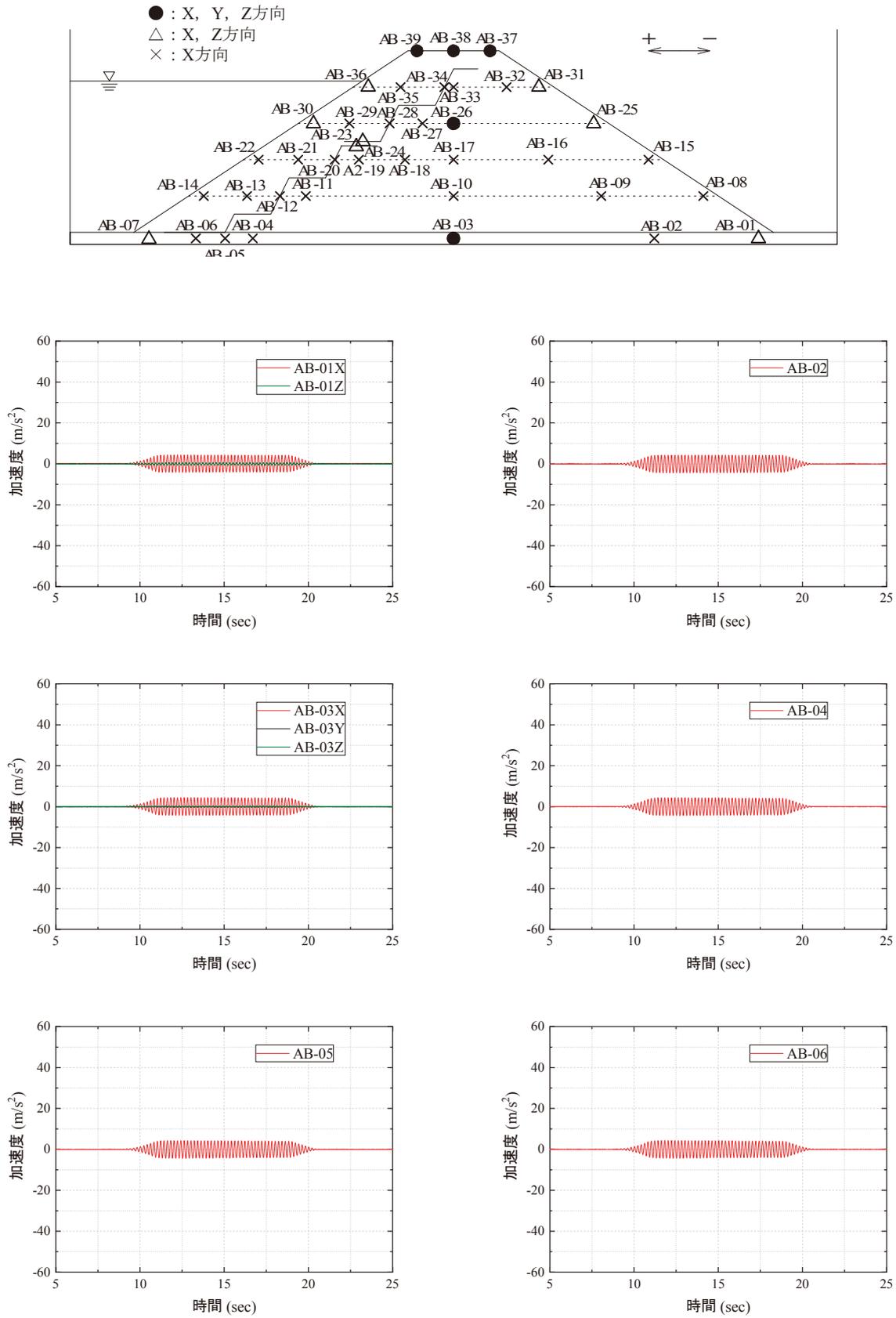


図 A34(1) Model-B における基盤内(-10 cm)の加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A34(1) Acceleration responses of the base in Model-B (440 gal).

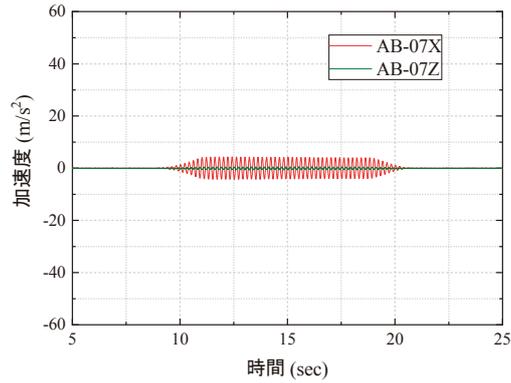


図 A34(2) Model-B における基盤内(-10 cm)の加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A34(2) Acceleration responses of the base in Model-B (440 gal).

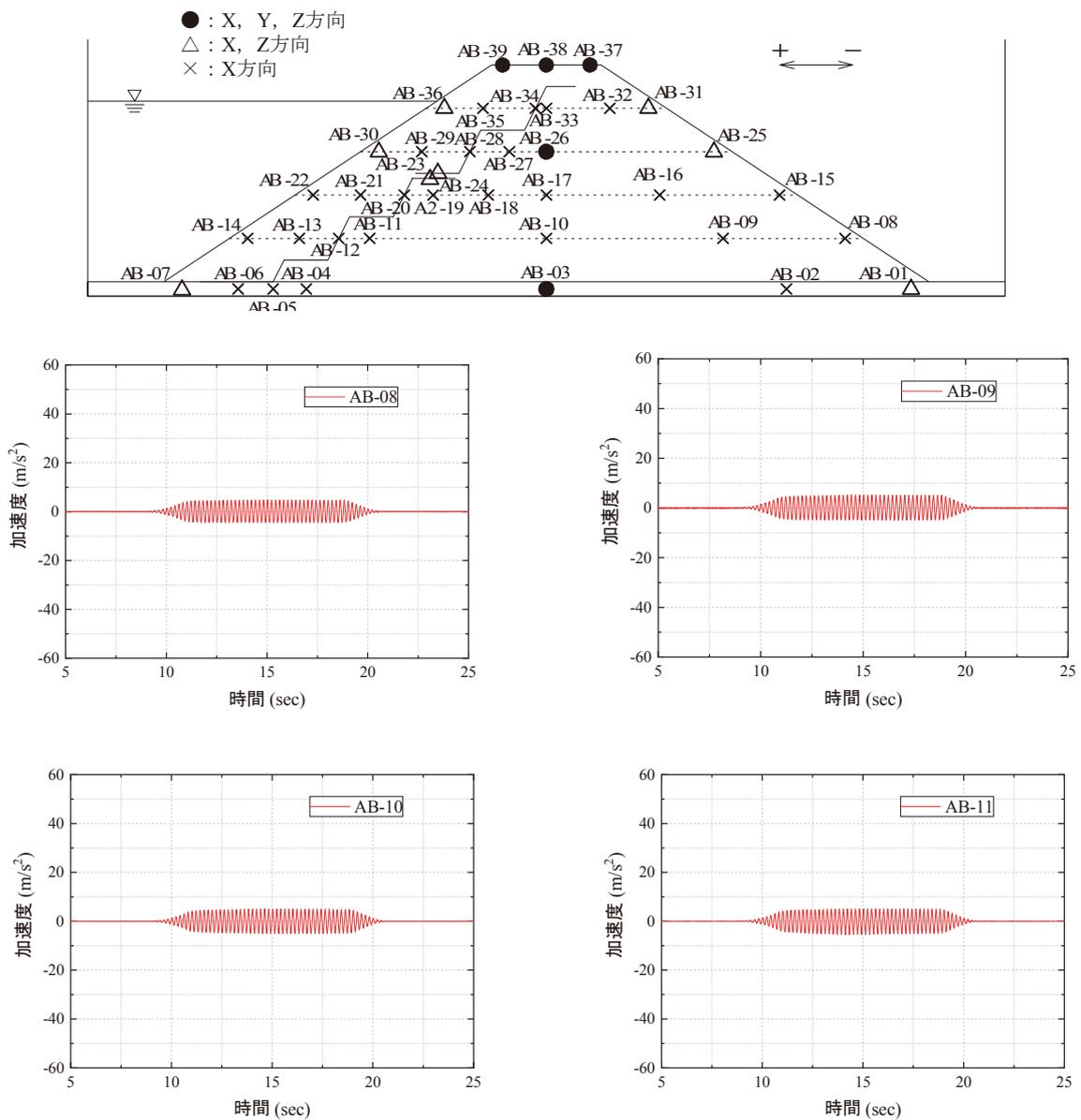


図 A35(1) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A35(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (440 gal).

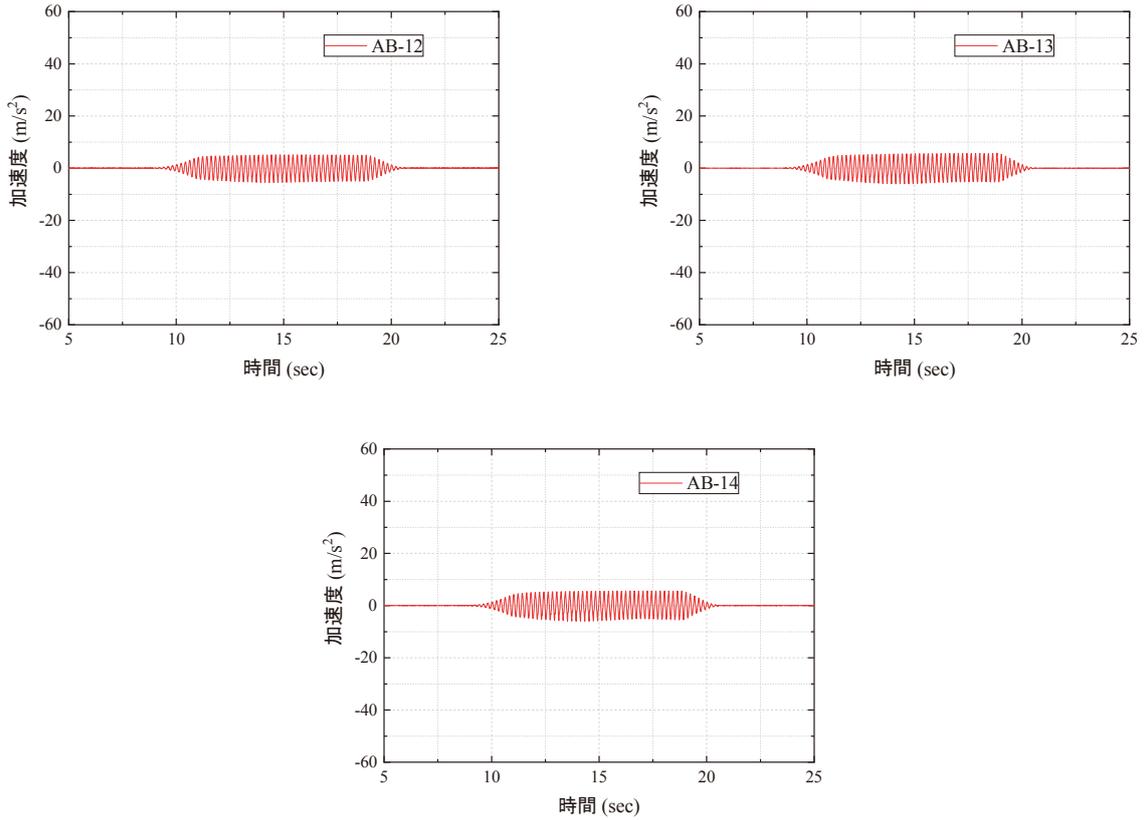


図 A35(2) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A35(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (440 gal).

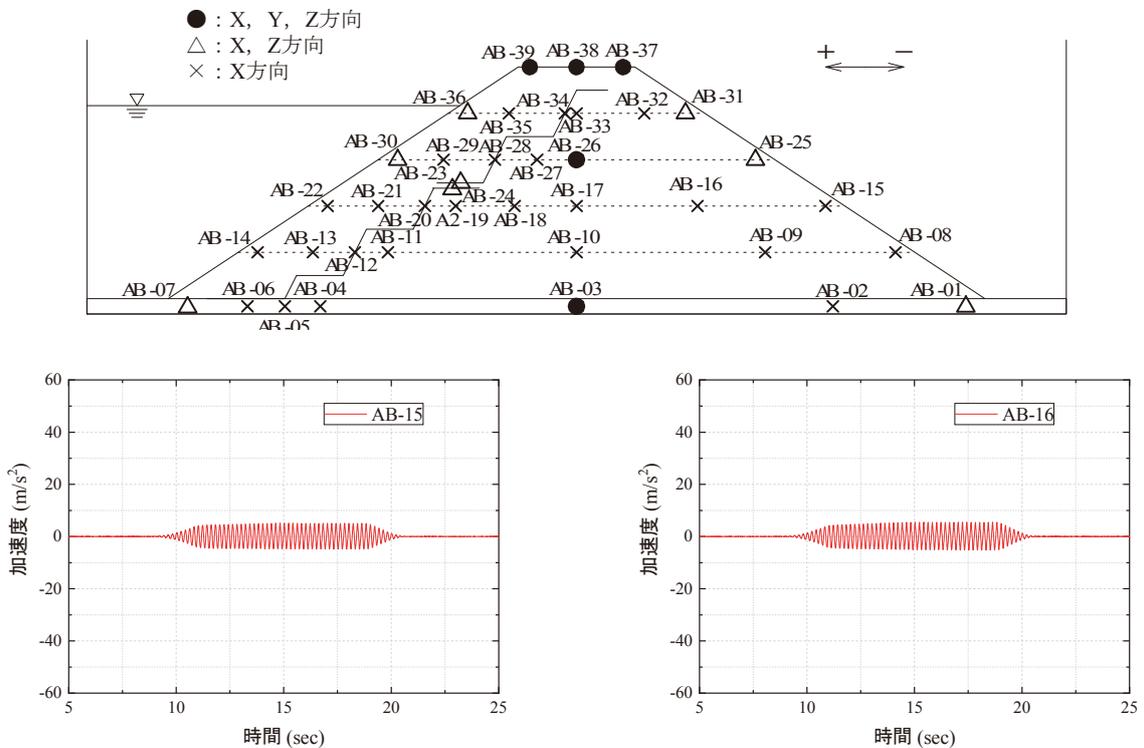


図 A36(1) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A36(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (440 gal).

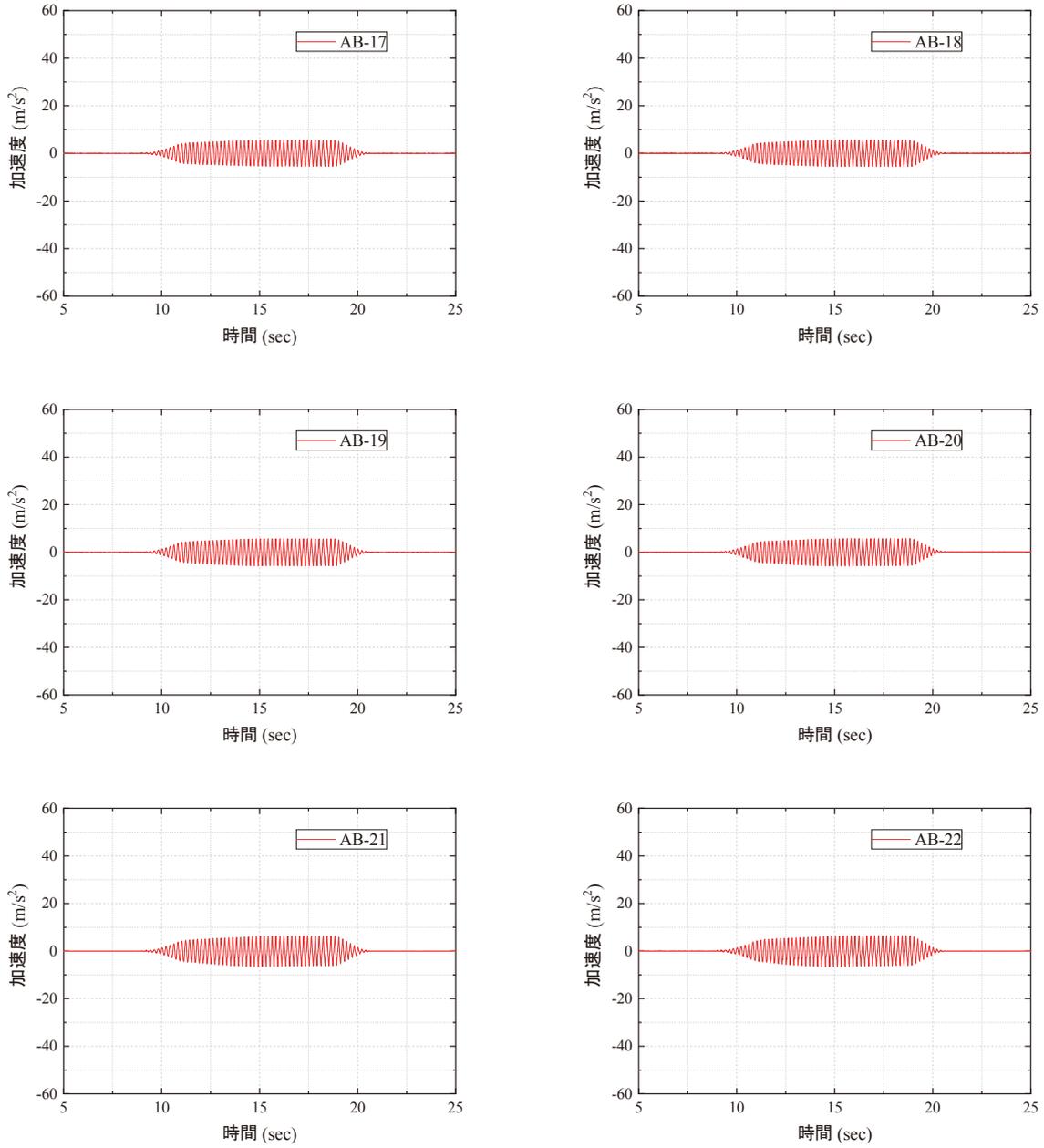


図 A36(2) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)

Fig. A36(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (440 gal).

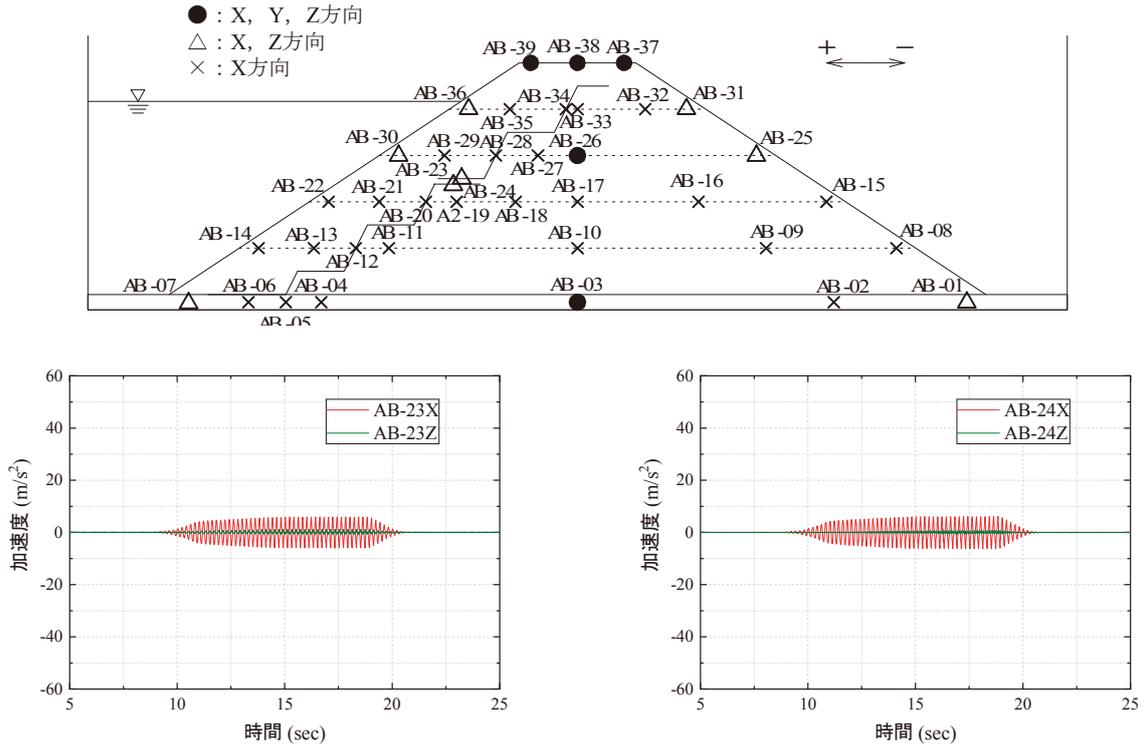


図 A37 Model-B における GCL 重ね合わせ部での加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A37 Acceleration responses at overlapped GCL in Model-B (440 gal).

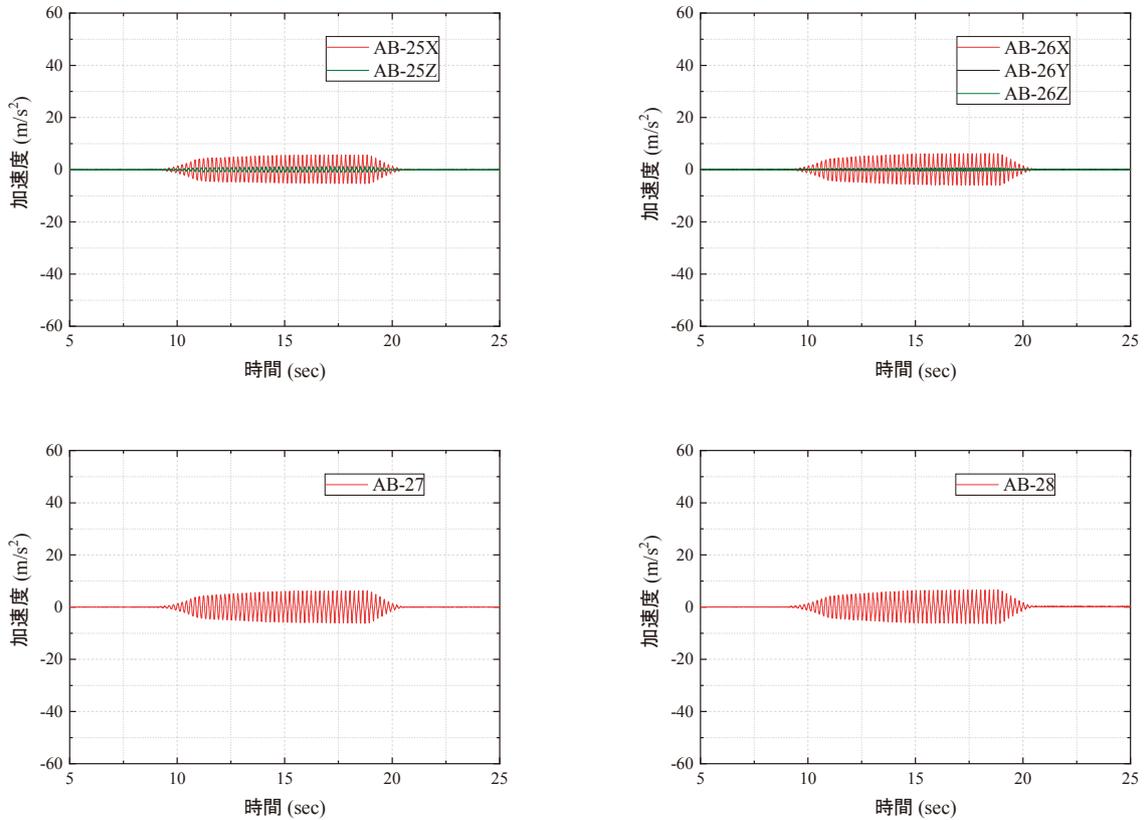


図 A38(1) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A38(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (440 gal).

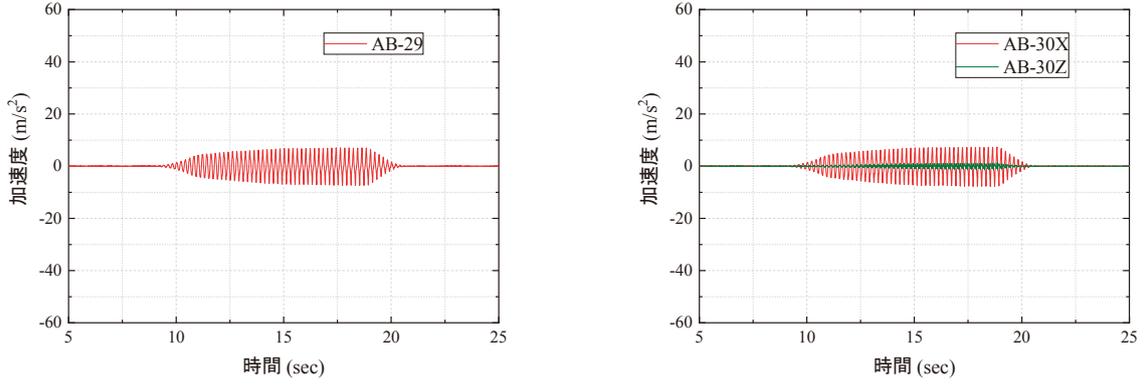


図 A38(2) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A38(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (440 gal).

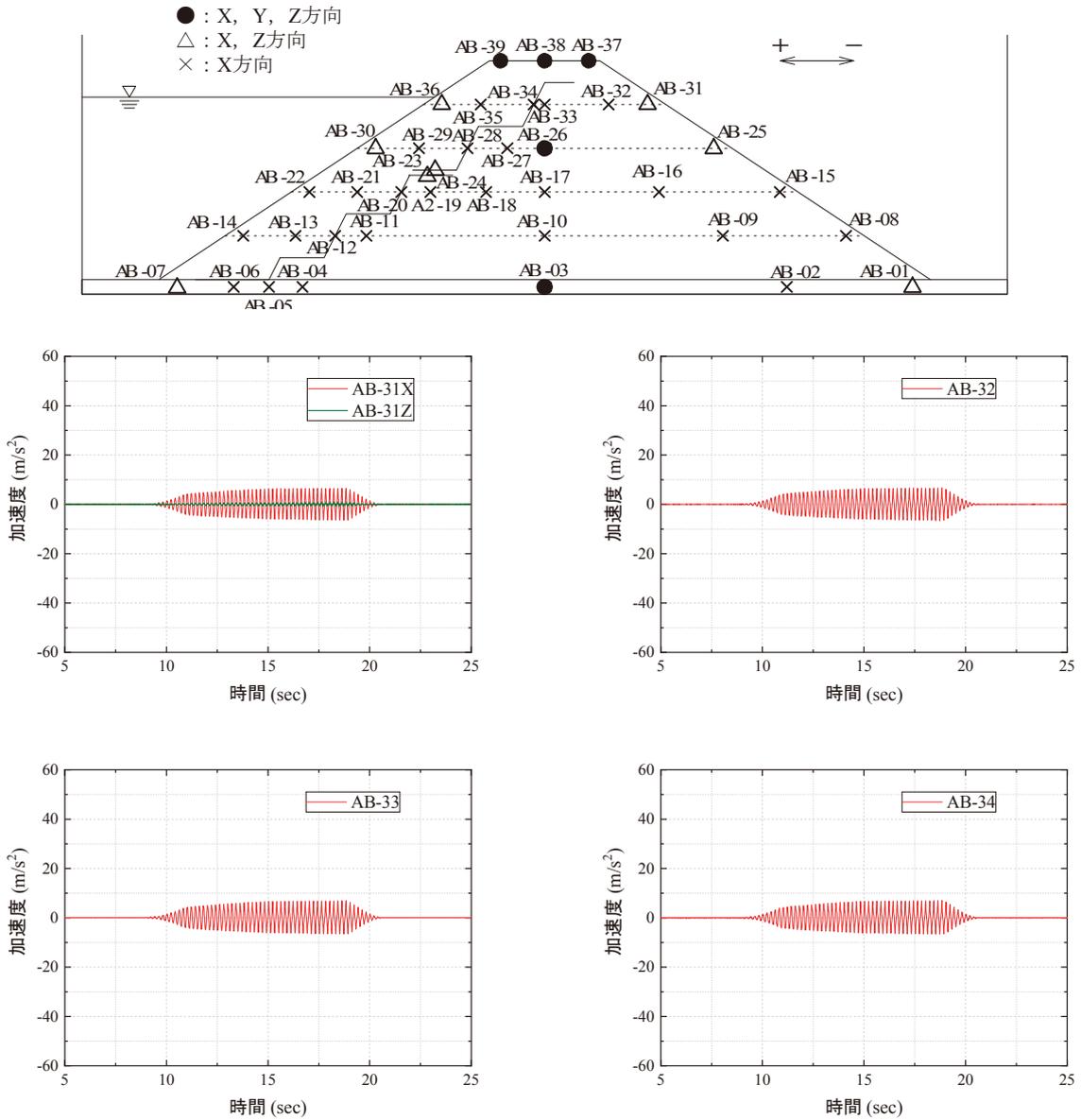


図 A39(1) Model-B における 240 cm から天端高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A39(1) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (440 gal).

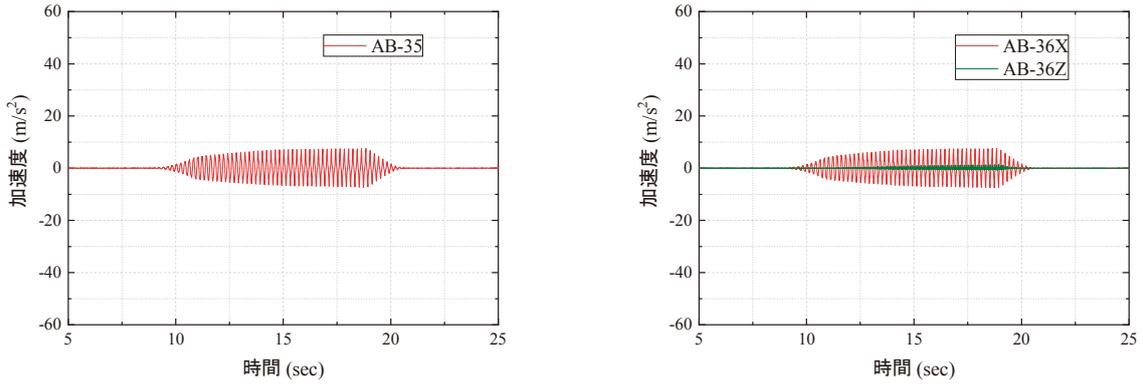


図 A39(2) Model-B における 240 cm での加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A39(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (440 gal).

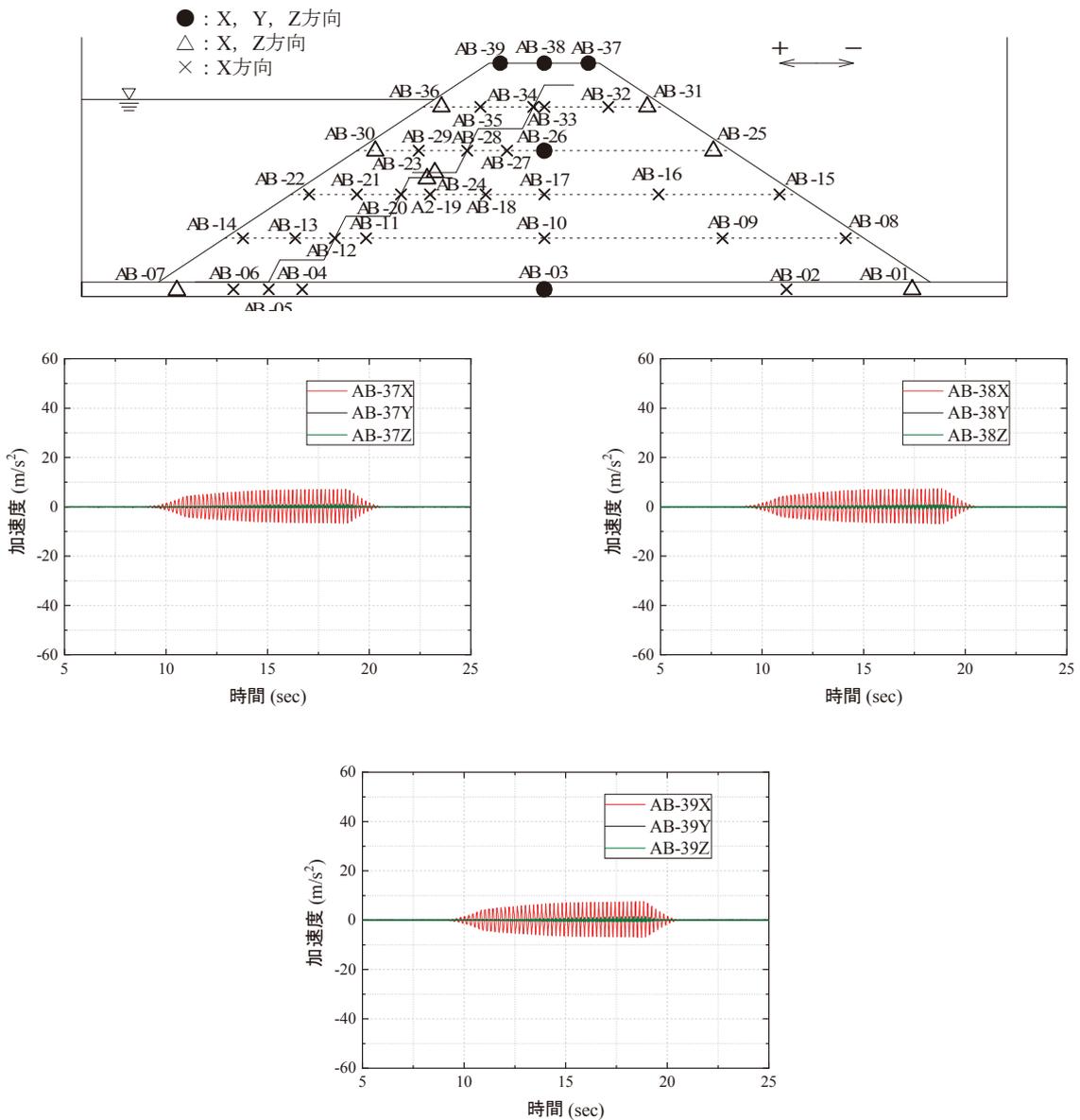


図 A40 Model-B における天端での加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A40 Acceleration responses at the embankment crests in Model-B (440 gal).

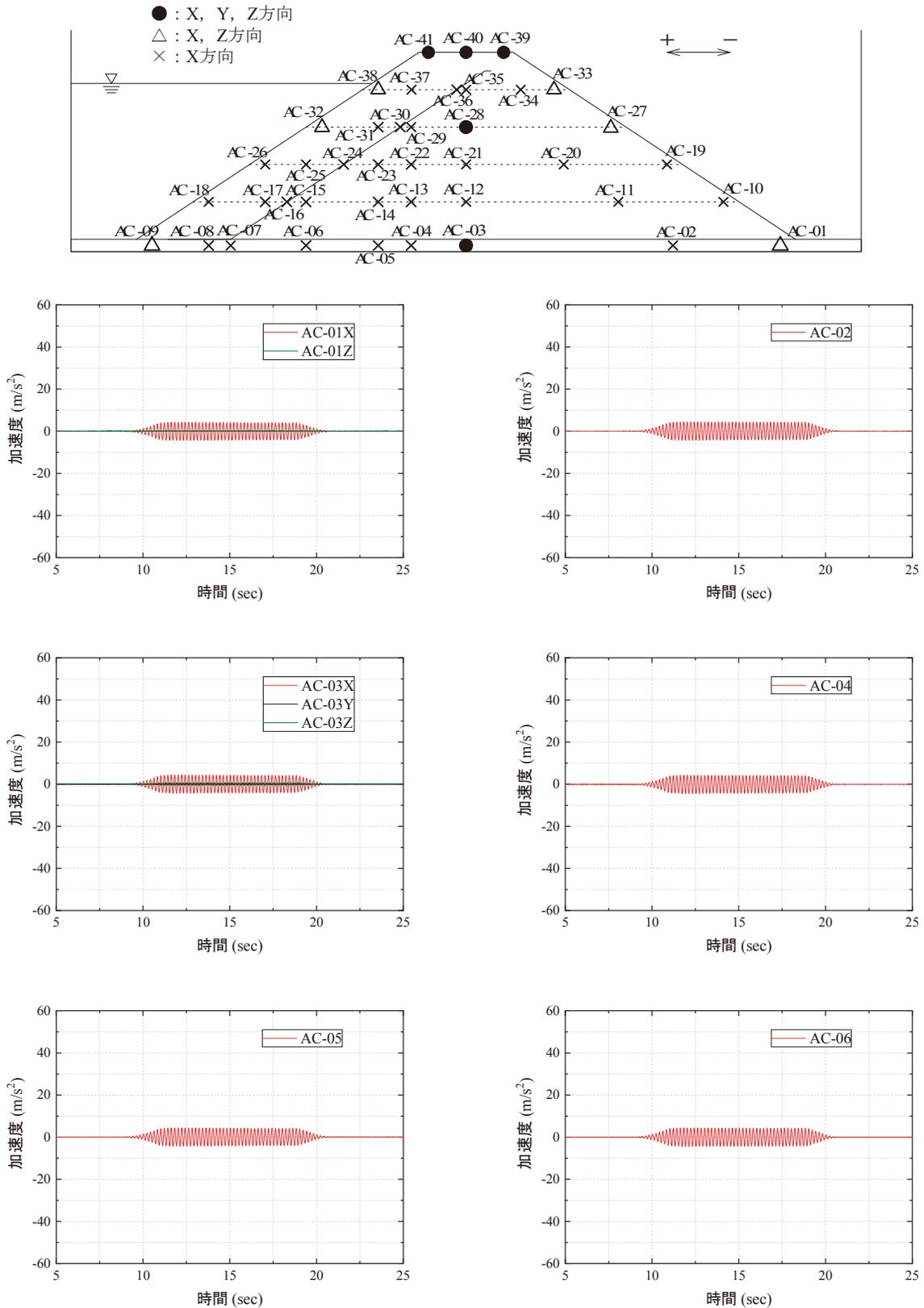


図 A41(1) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A41(1) Acceleration responses of the base in Model-C (440 gal).

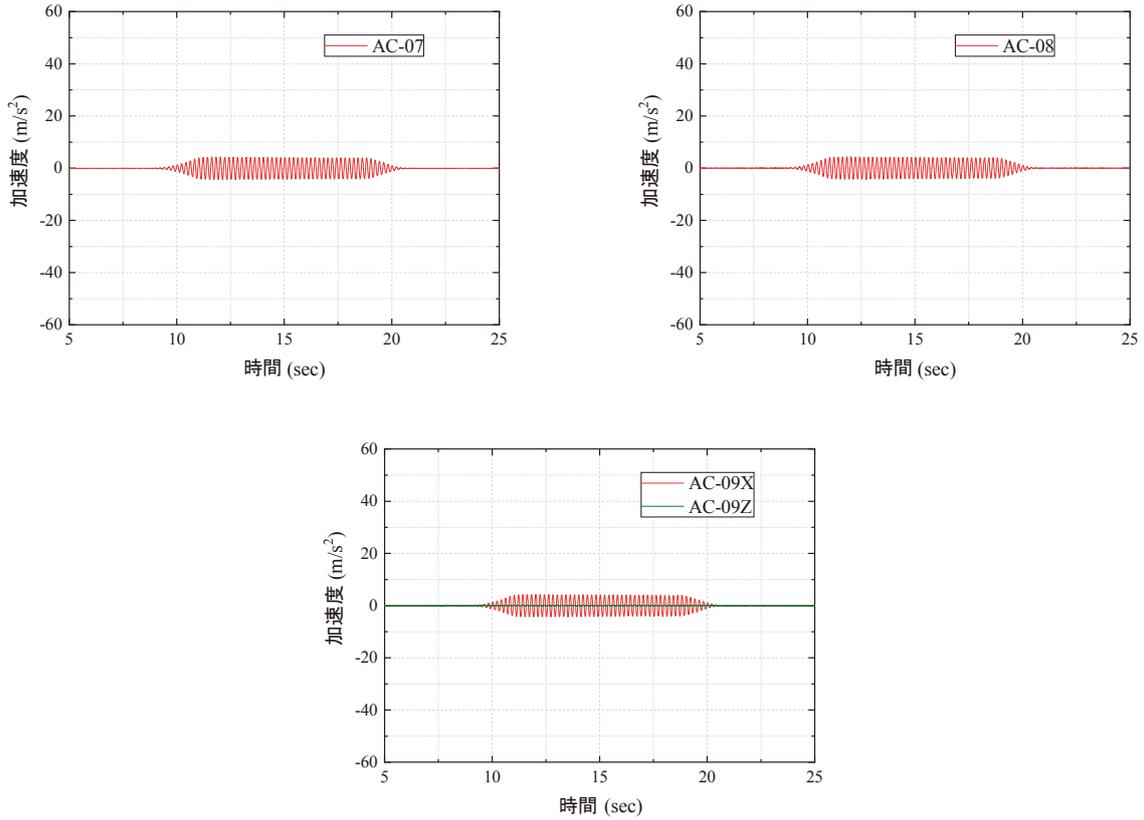


図 A41(2) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A41(2) Acceleration responses of the base in Model-C (440 gal).

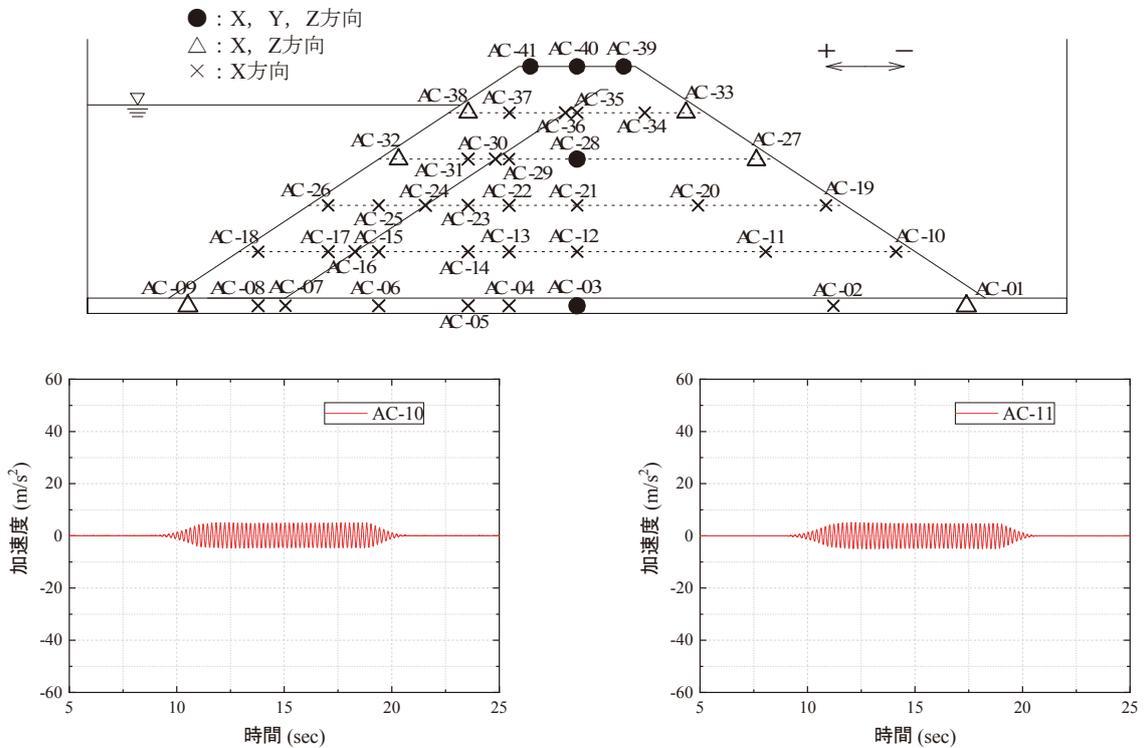


図 A42(1) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A42(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (440 gal).

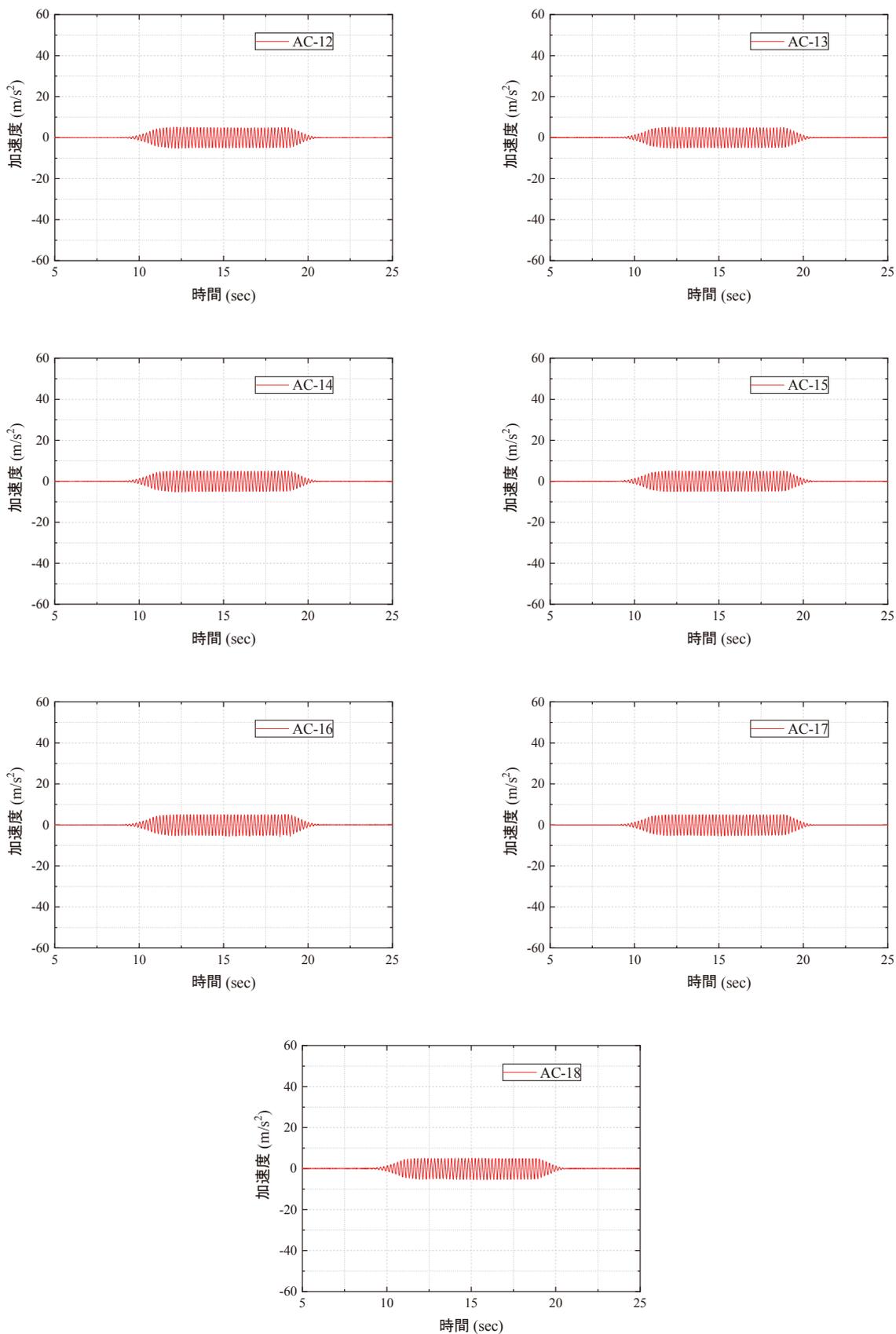


図 A42(2) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A42(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (440 gal).

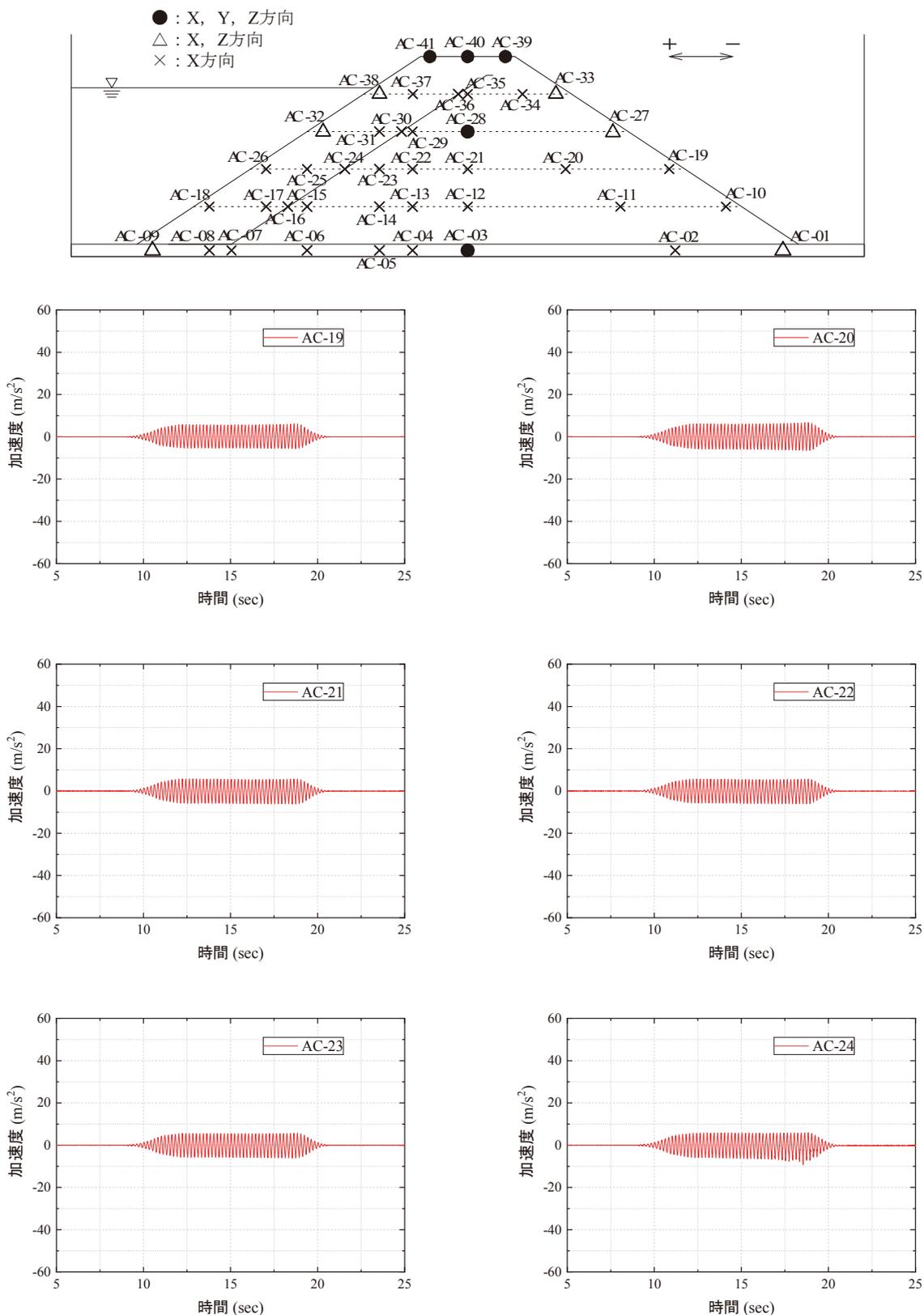


図 A43(1) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A43(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (440 gal).

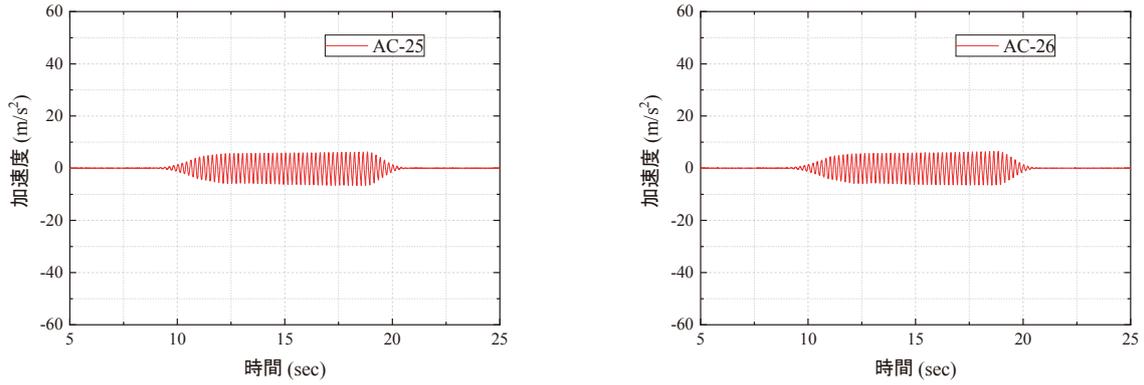


図 A43(2) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A43(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (440 gal).

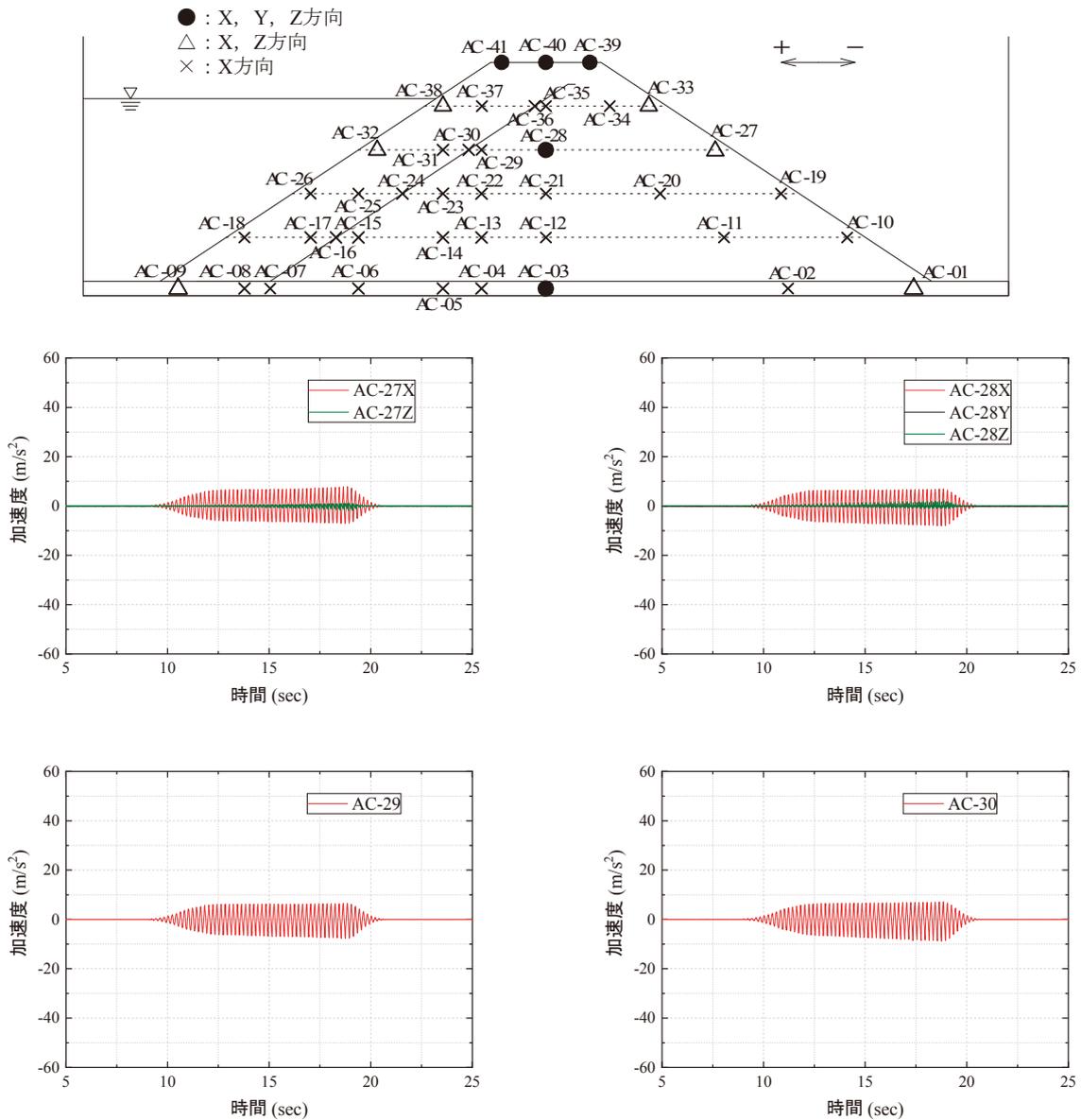


図 A44(1) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A44(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (440 gal).

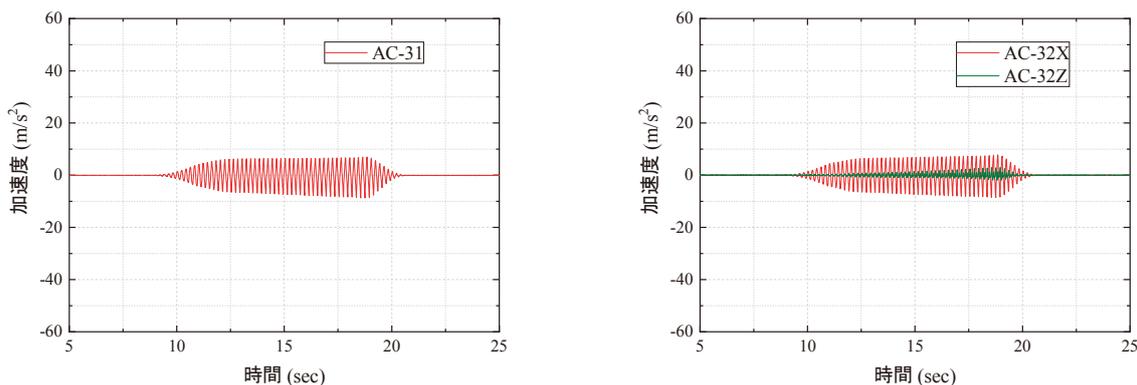


図 A44(2) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A44(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (440 gal).

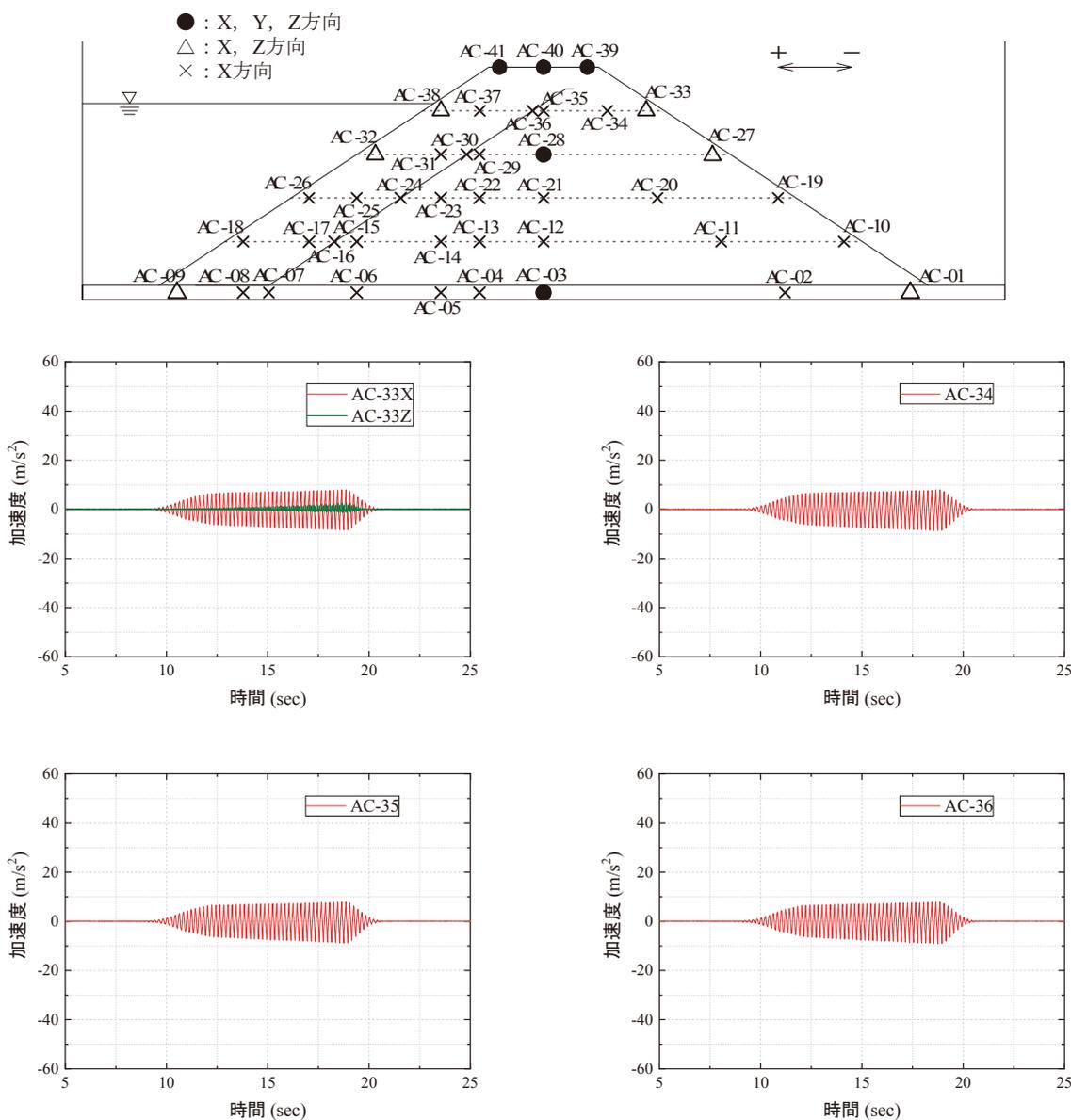


図 A45(1) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A45(1) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (440 gal).

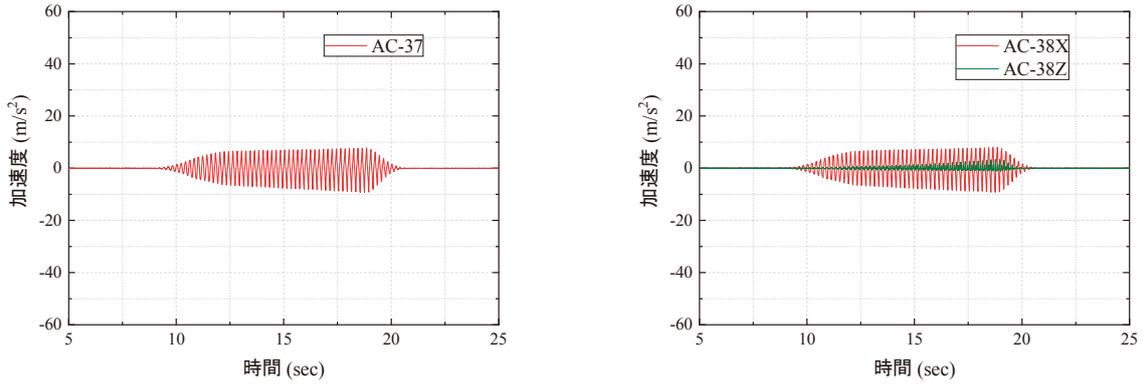


図 A45(2) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A45(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (440 gal).

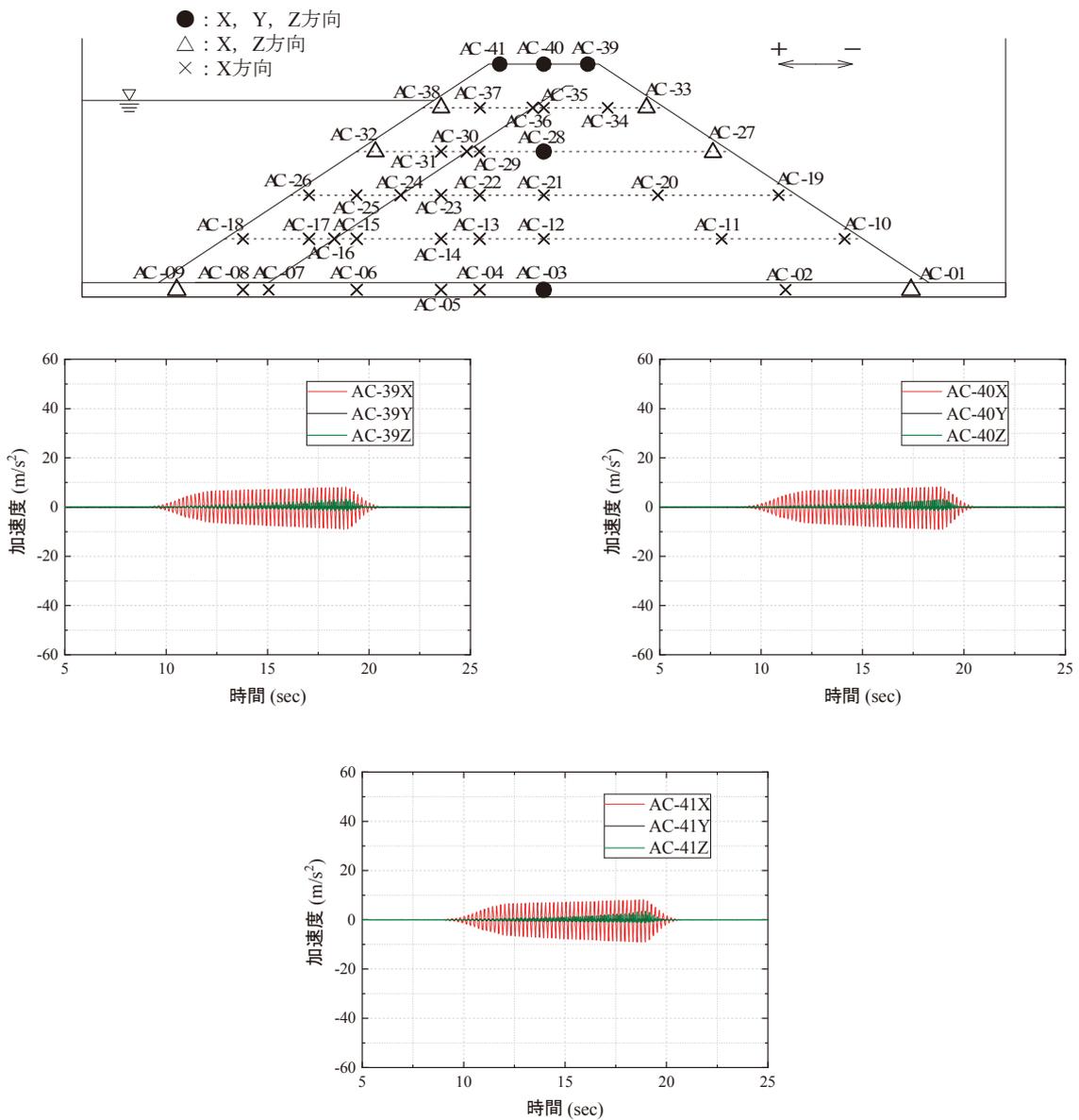


図 A46 Model-C における天端での加速度応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A46 Acceleration responses at the embankment crests in Model-C (440 gal).

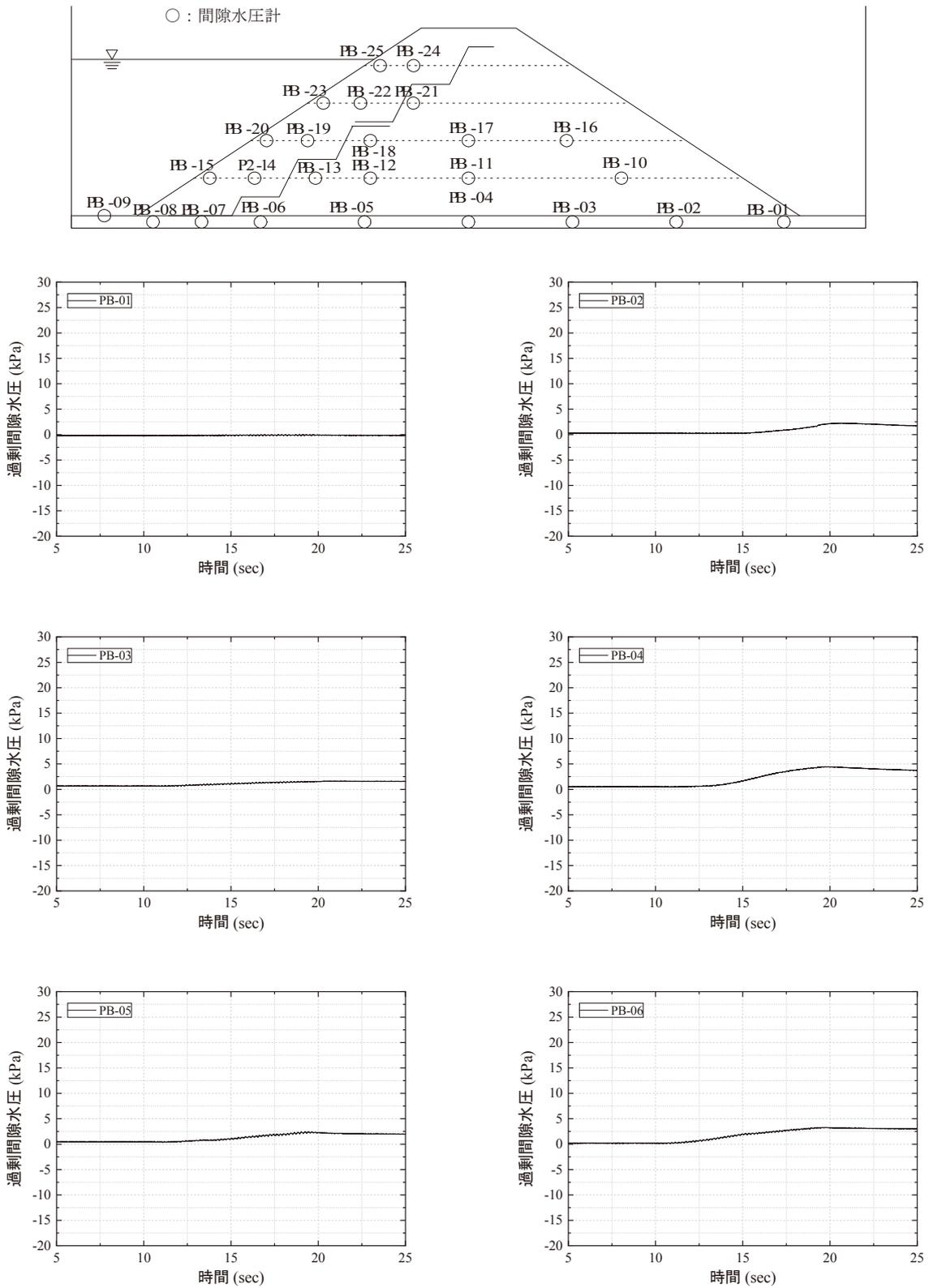


図 A47(1) Model-B における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A47(1) Pore water pressure responses of the base in Model-B (440 gal).

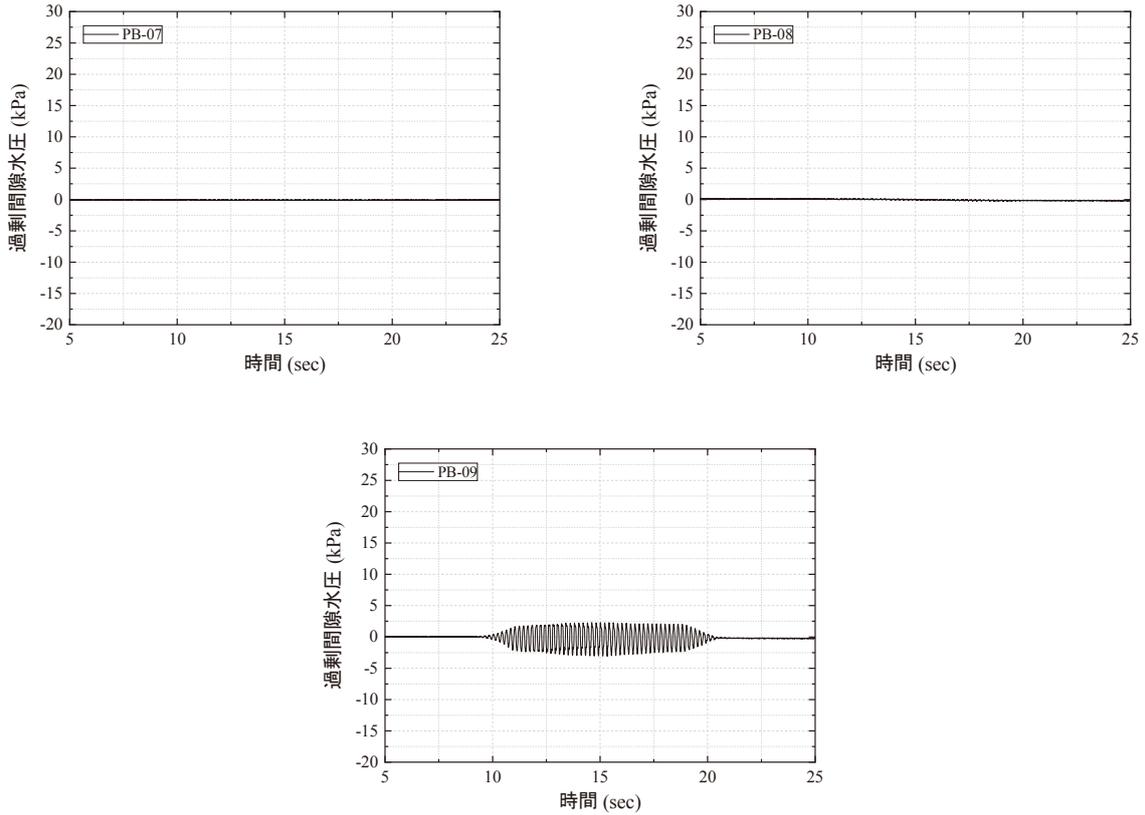


図 A47(2) Model-B における基盤内 (-10 cm) の間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A47(2) Pore water pressure responses of the base in Model-B (440 gal).

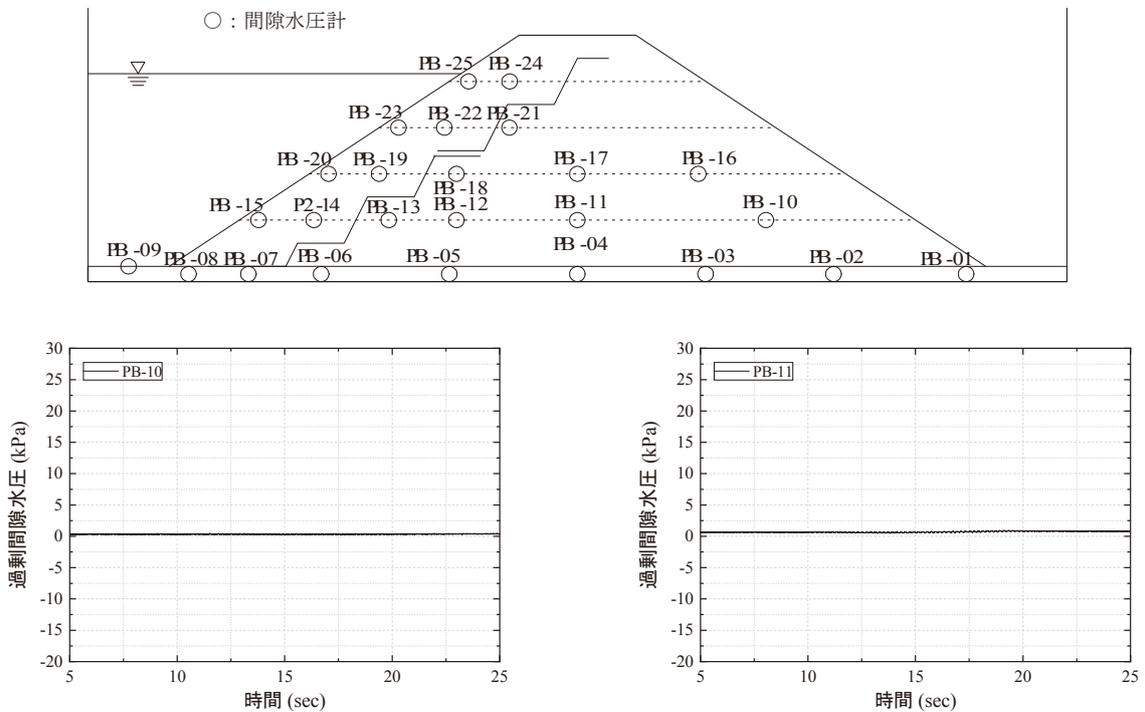


図 A48(1) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A48(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (440 gal).

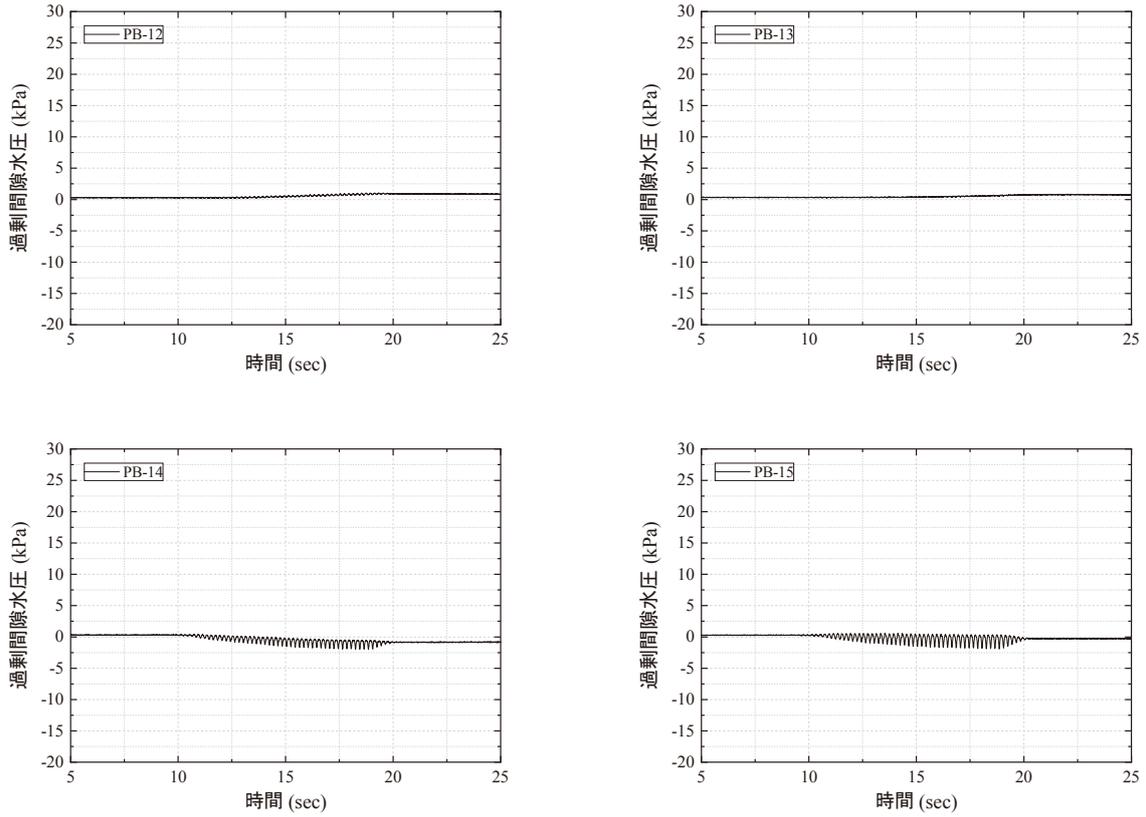


図 A48(2) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A48(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (440 gal).

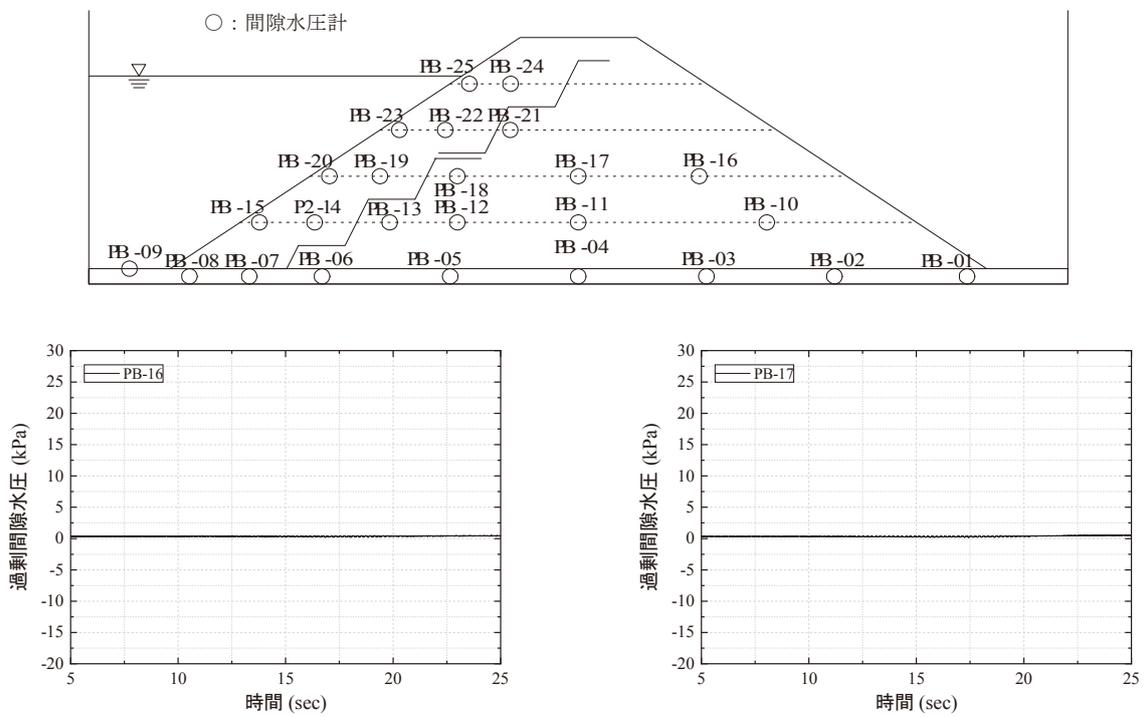


図 A49(1) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A49(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (440 gal).

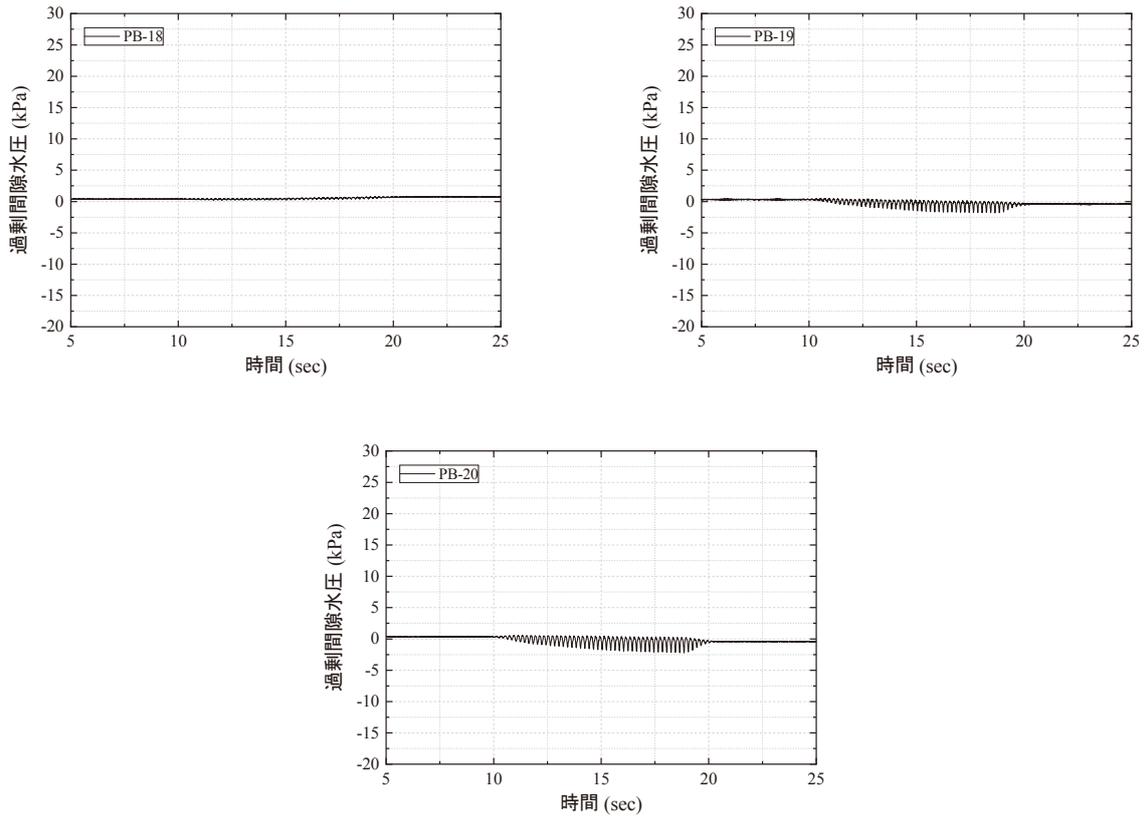


図 A49(2) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A49(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (440 gal).

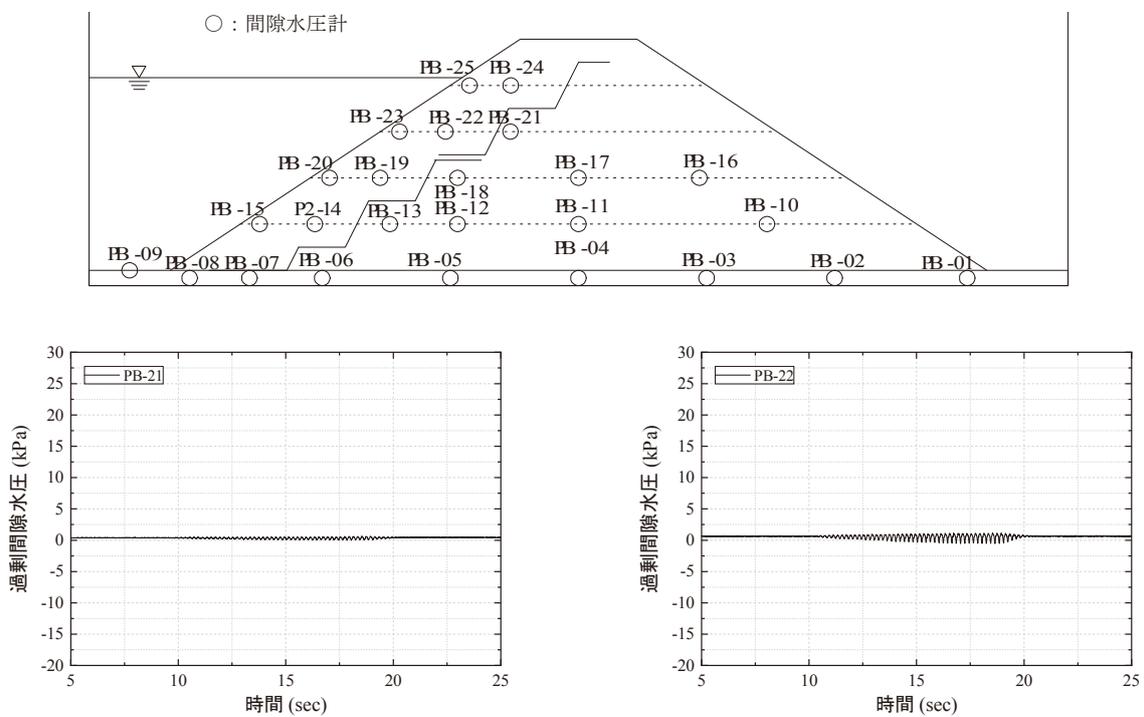


図 A50(1) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A50(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (440 gal).

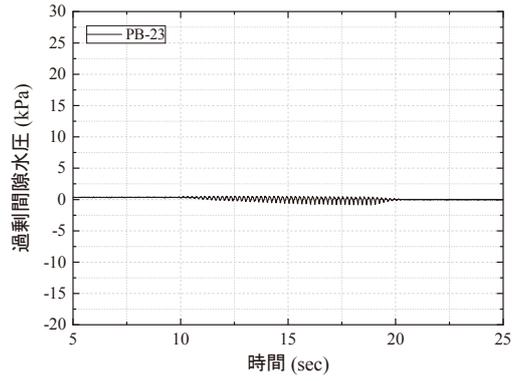


図 A50(2) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A50(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (440 gal).

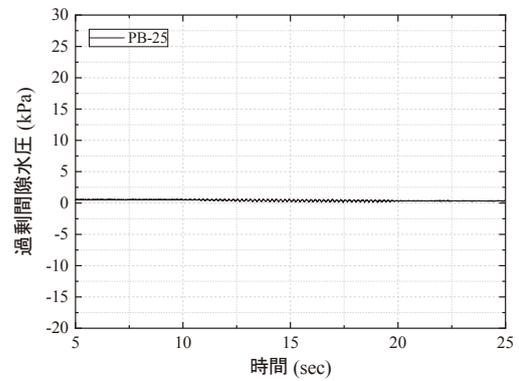
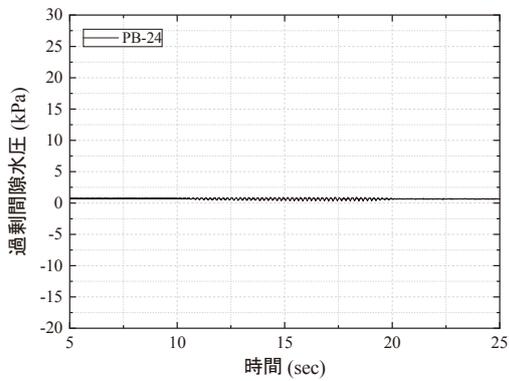
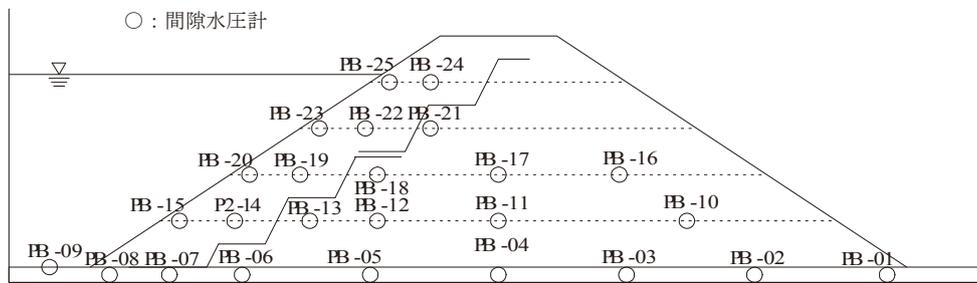


図 A51 Model-B における 240 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A51 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-B (440 gal).

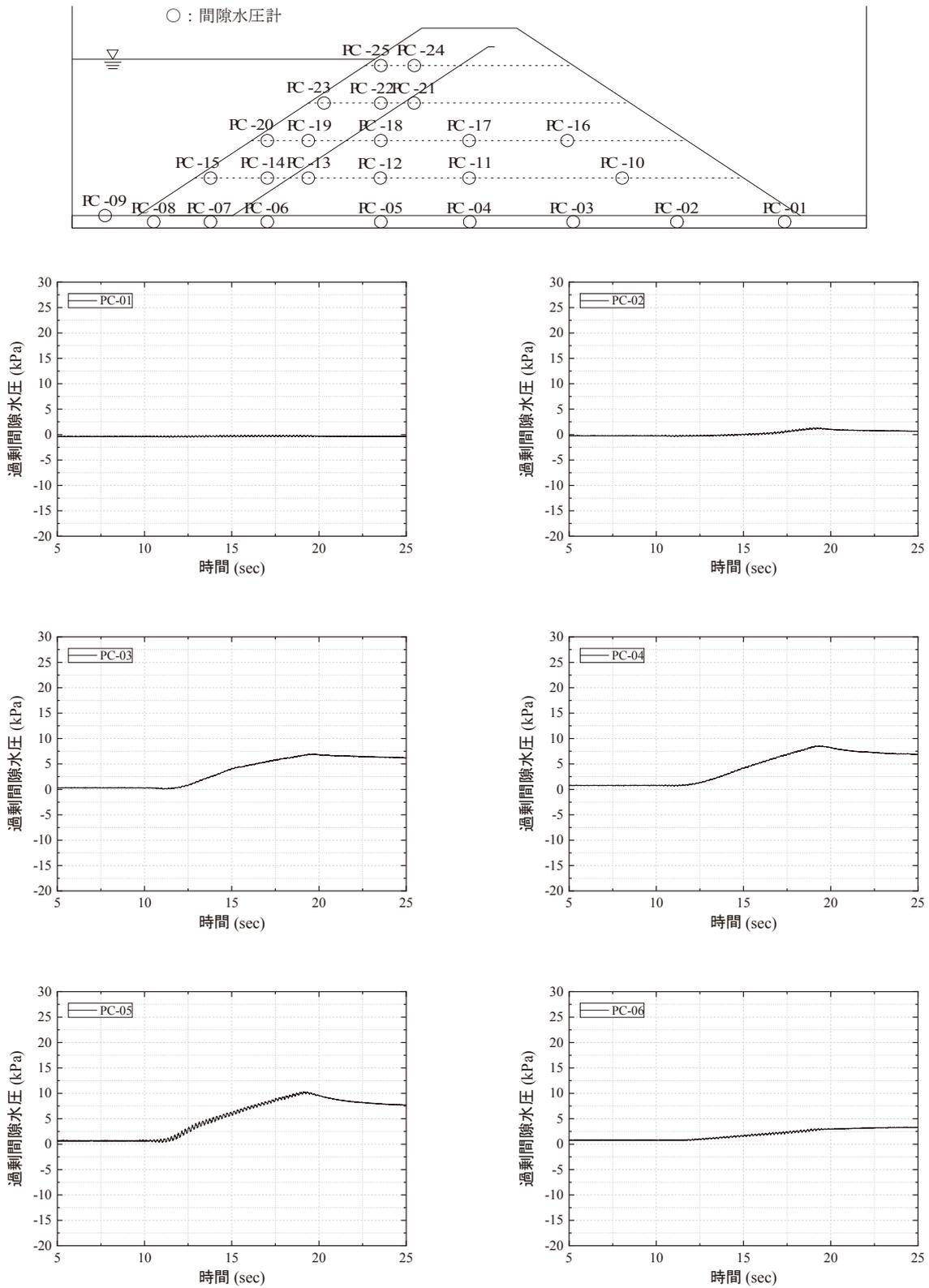


図 A52(1) Model-C における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A52(1) Pore water pressure responses of the base in Model-C (440 gal).

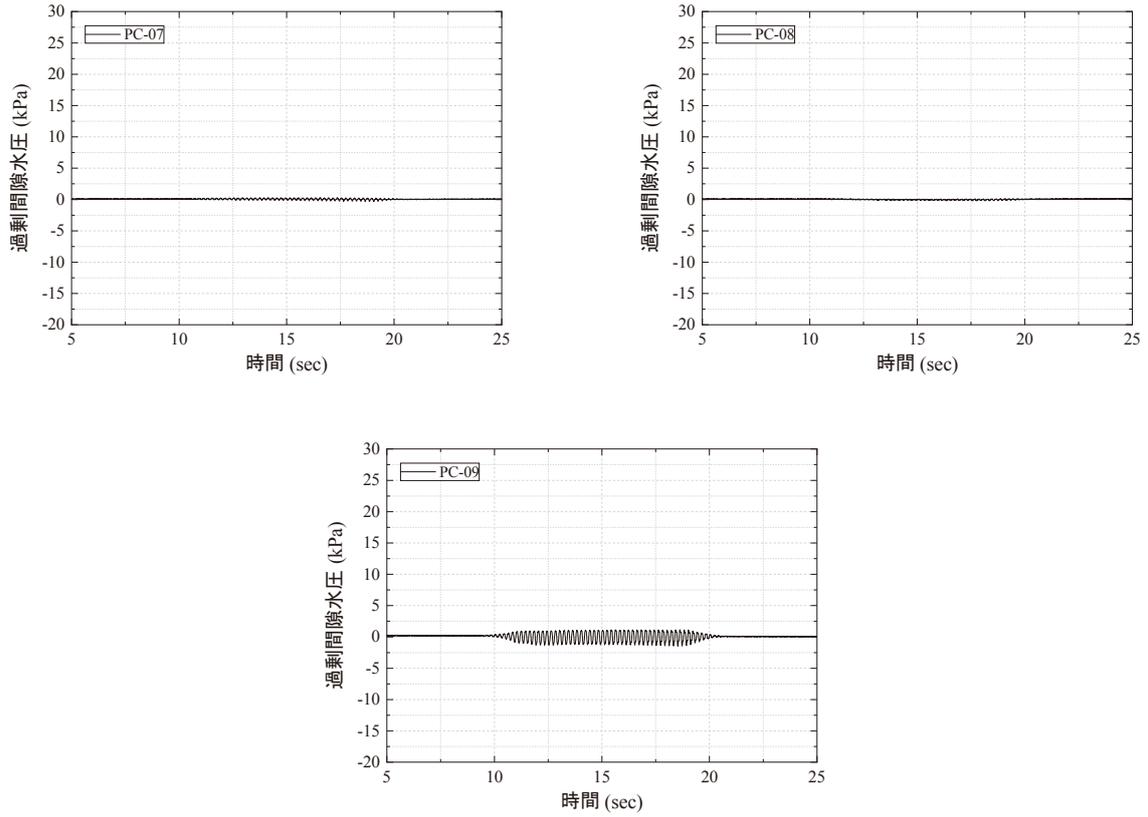


図 A52(2) Model-C における基盤内 (-10 cm) の間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A52(2) Pore water pressure responses of the base in Model-C (440 gal).

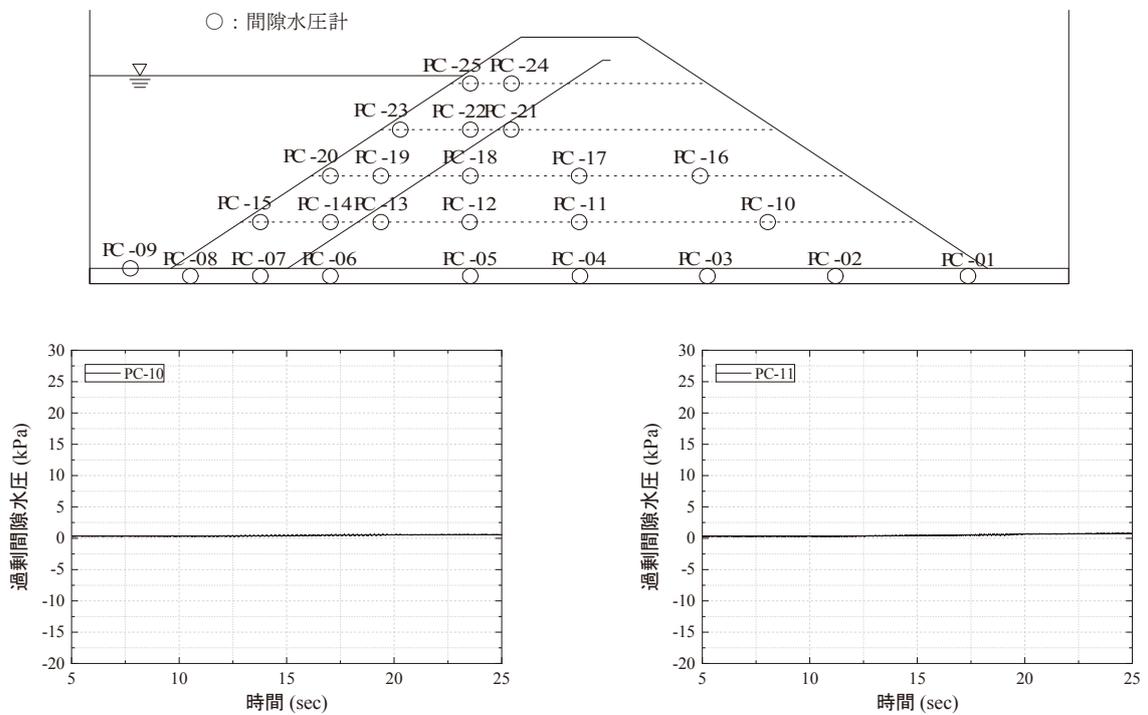


図 A53(1) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A53(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (440 gal).

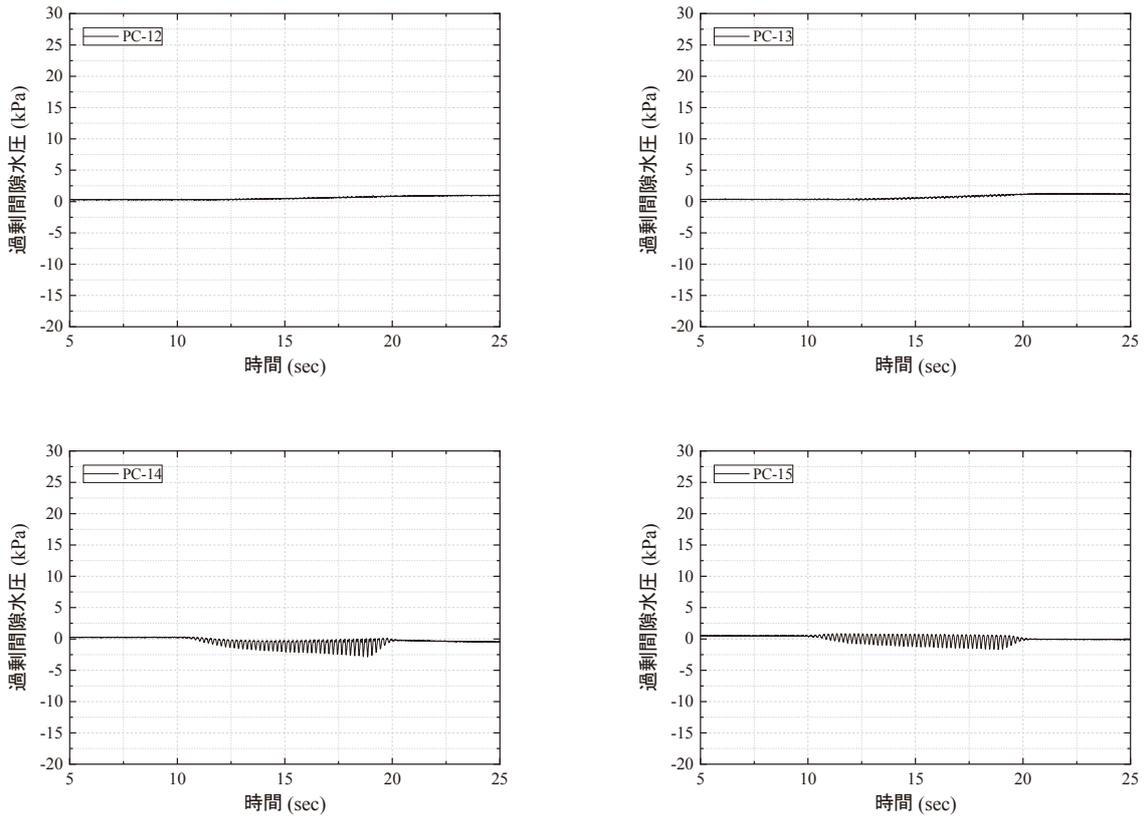


図 A53(2) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A53(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (440 gal).

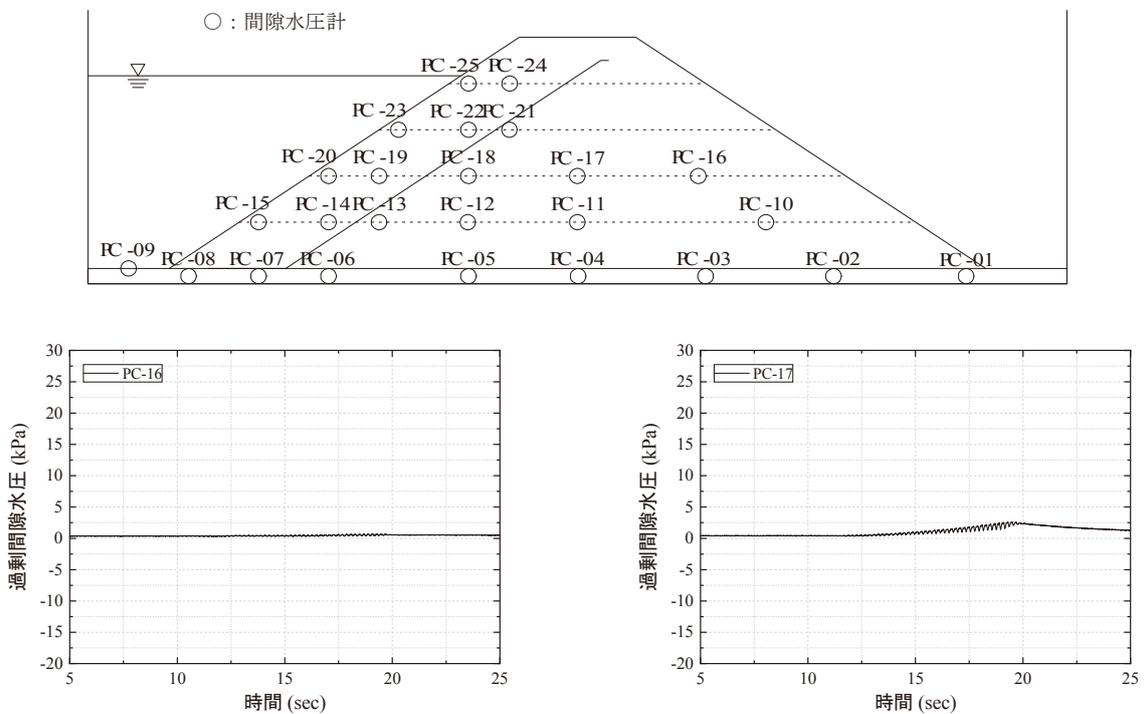


図 A54(1) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A54(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (440 gal).

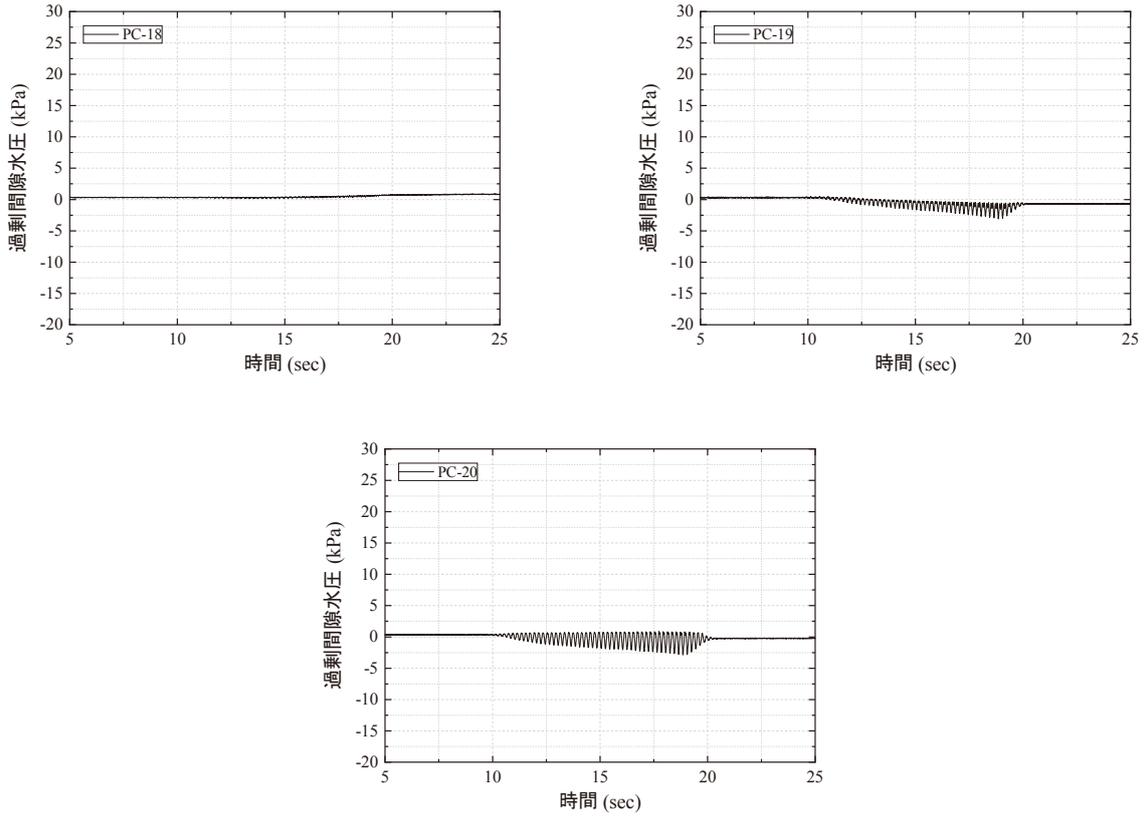


図 A54(2) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A54(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (440 gal).

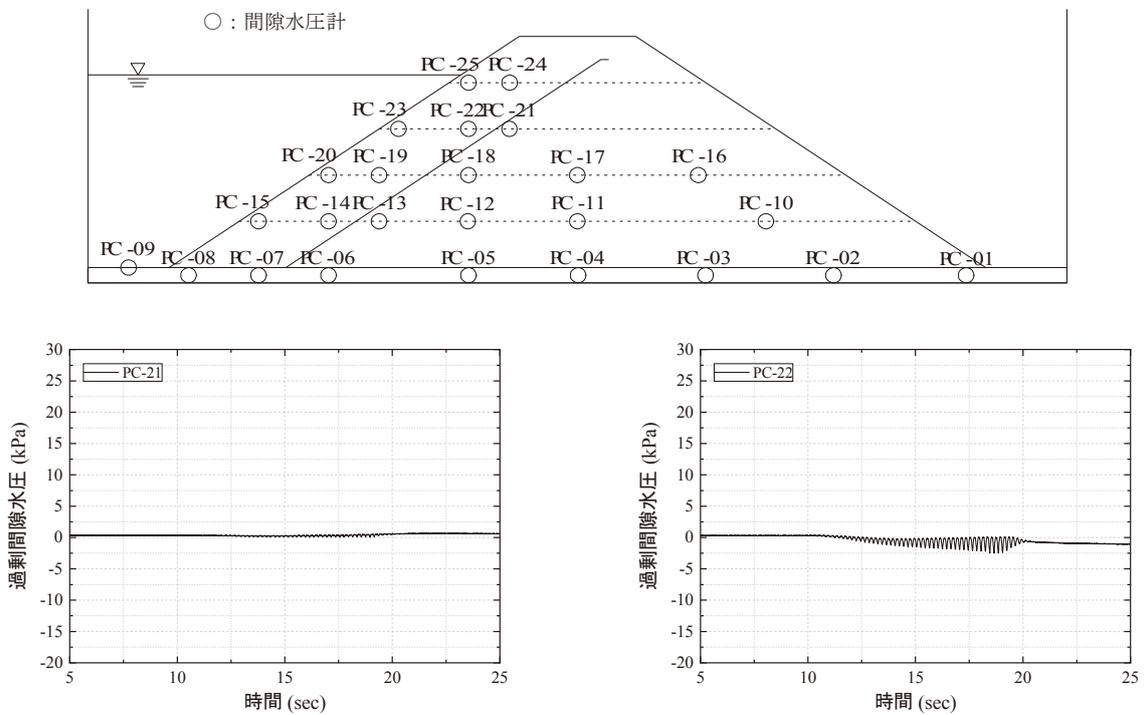


図 A55(1) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (440 gal 加振時)  
 Fig. A55(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (440 gal).

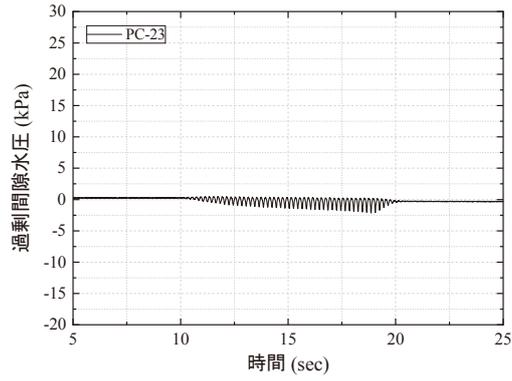


図 A55(2) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A55(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (440 gal).

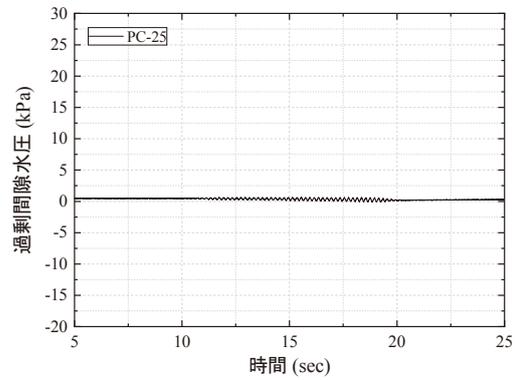
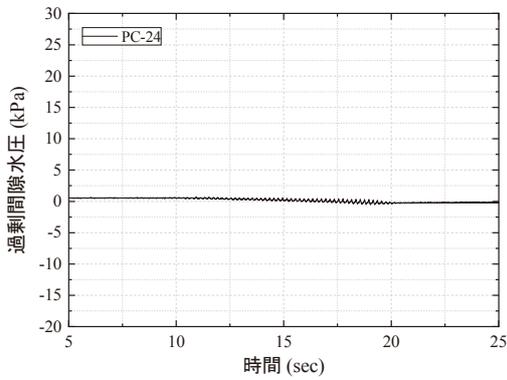
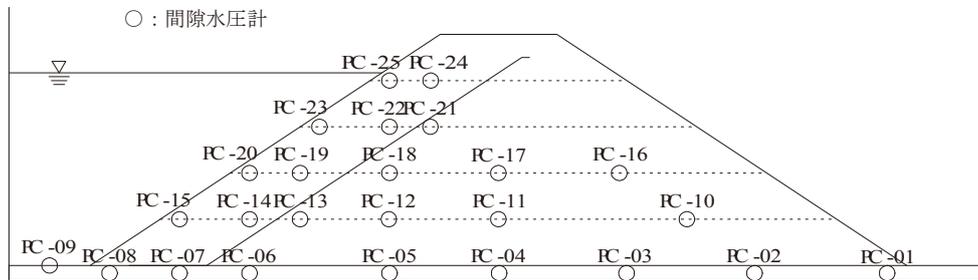
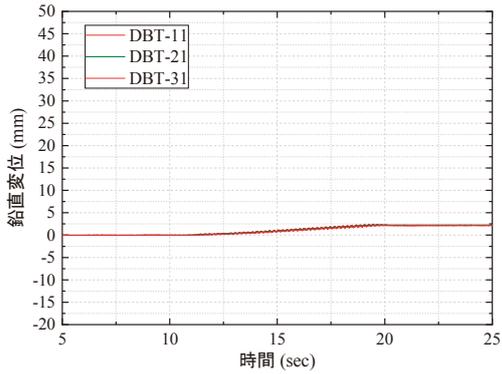
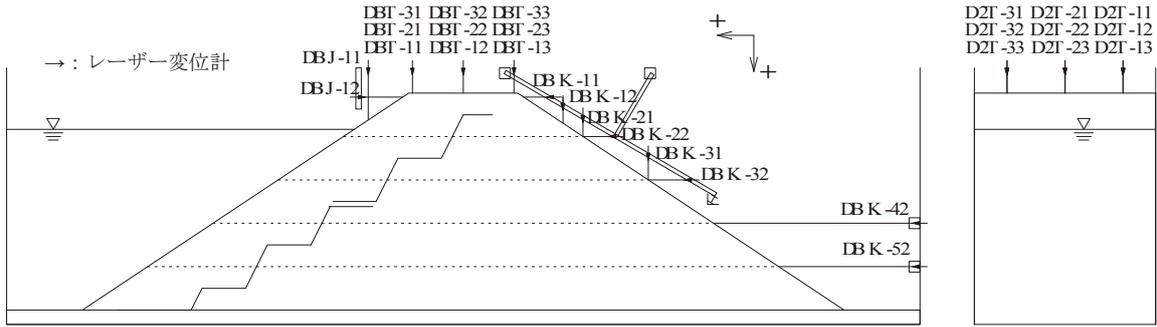
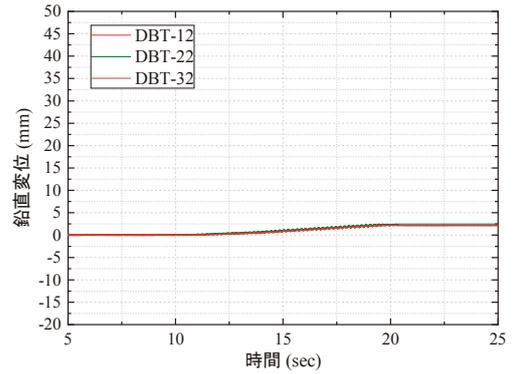


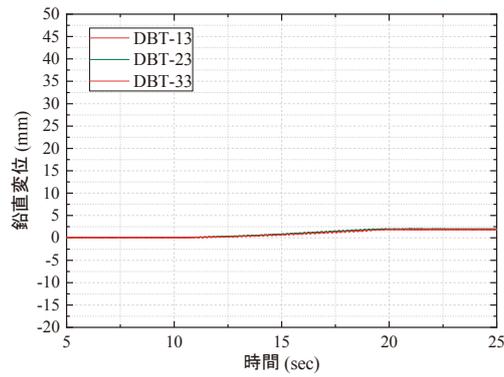
図 A56 Model-C における 240 cm 高さでの間隙水圧応答(440 gal 加振時)  
 Fig. A56 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-C (440 gal).



(a) 天端 1



(b) 天端 2



(c) 天端 3

図 A57 Model-B における天端の鉛直変位(440 gal 加振時)

Fig. A57 Vertical deformations of the embankment crests in Model-B (440 gal).

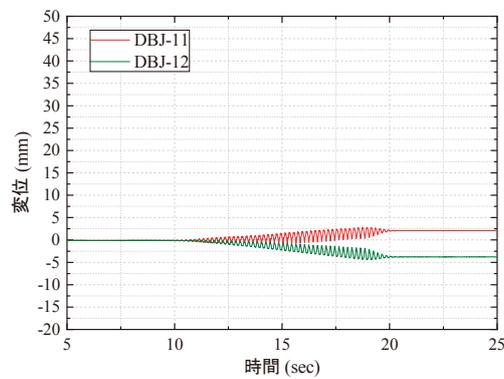


図 A58 Model-B における上流斜面の水平・鉛直変位(440 gal 加振時)

Fig. A58 Vertical and horizontal deformations of slope of the upstream side in Model-B (440 gal).

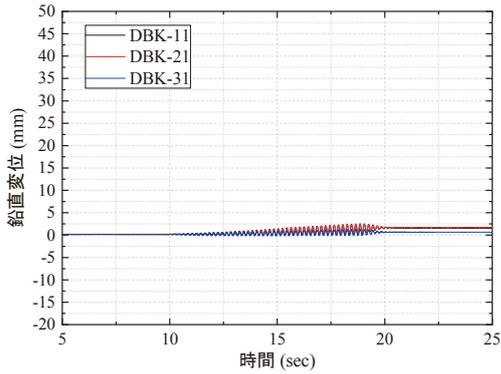
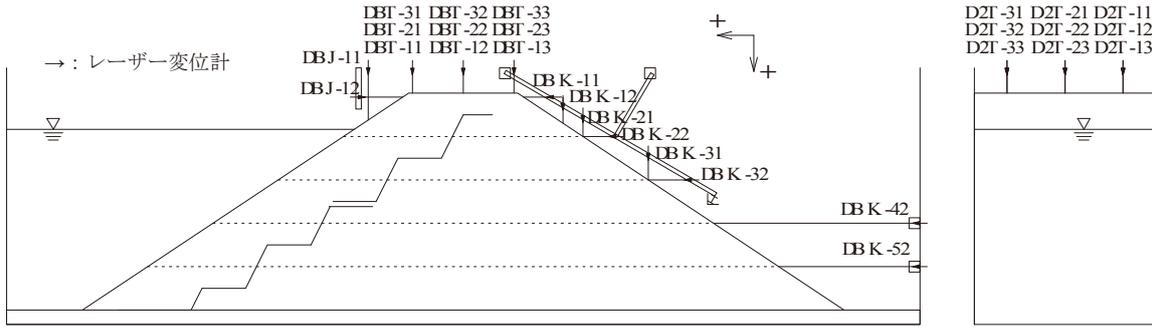


図 A59 Model-B における下流斜面の水平変位 (440 gal)

Fig. A59 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-B.

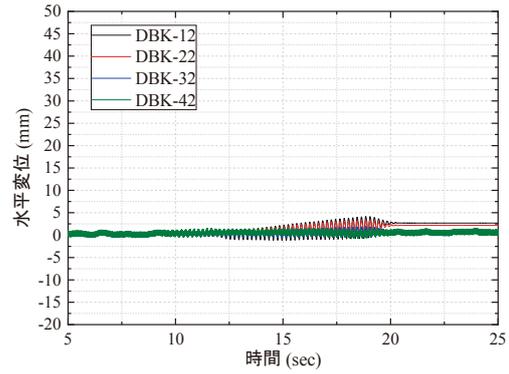
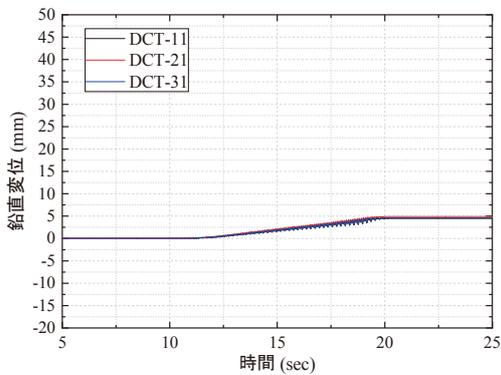
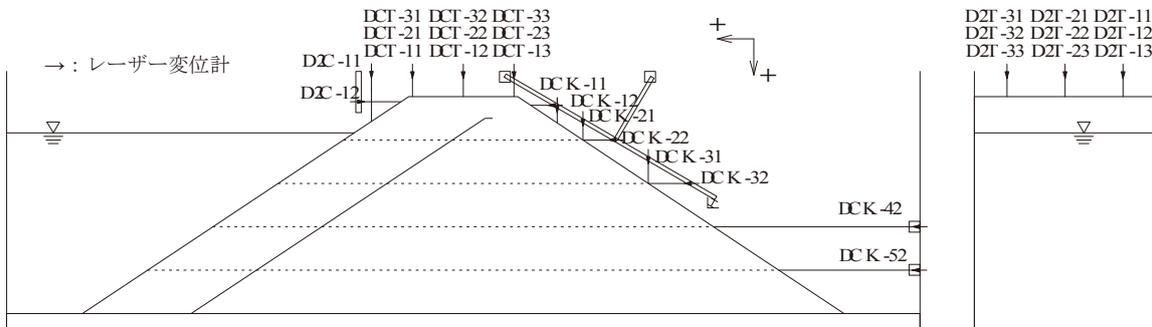
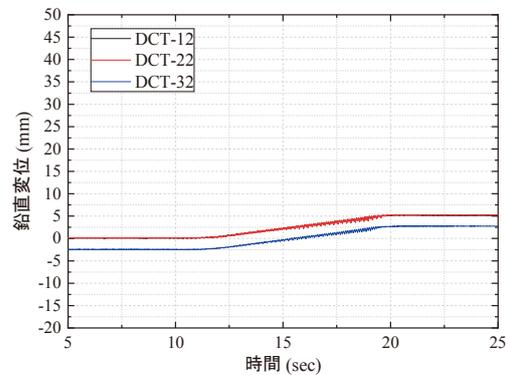


図 A60 Model-B における下流斜面の鉛直変位 (440 gal)

Fig. A60 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-B.



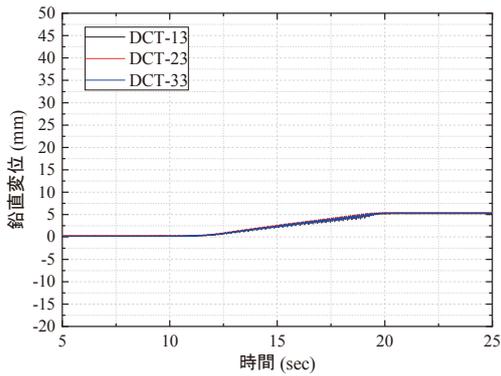
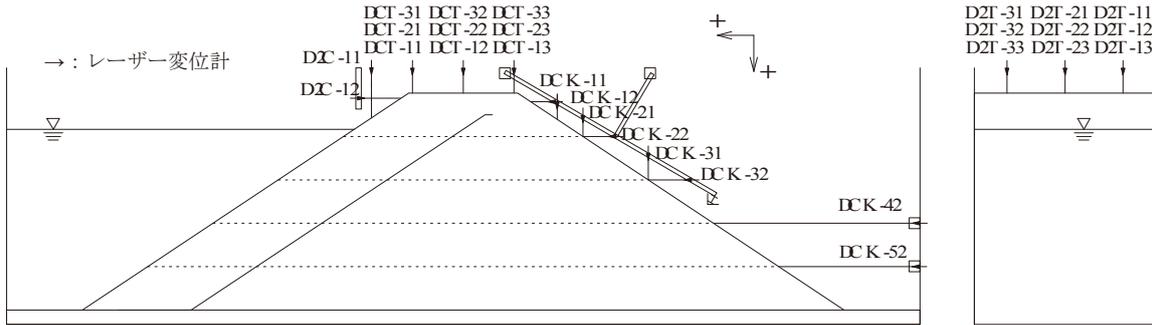
(a) 天端 1



(b) 天端 2

図 A61(1) Model-C における天端の鉛直変位 (440 gal 加振時)

Fig. A61(1) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (440 gal).



(c) 天端 3

図 A61(2) Model-C の天端の鉛直変位 (440 gal 加振時)

Fig. A61(2) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (440 gal).

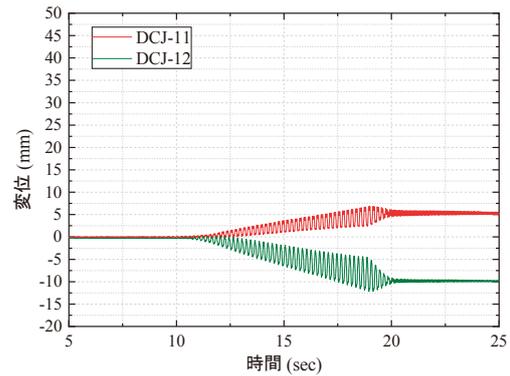


図 A62 Model-C の上流斜面の水平・鉛直変位 (440 gal 加振時)

Fig. A62 Vertical and horizontal deformations of upstream side in Model-C (440 gal).

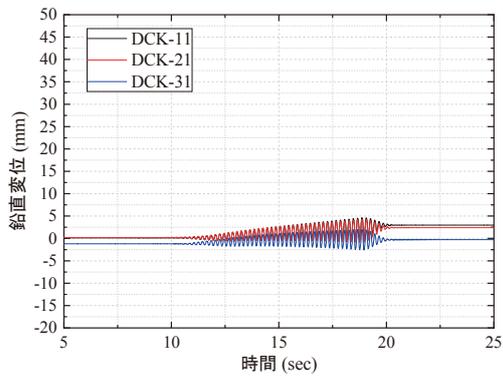


図 A63 Model-C における下流斜面の水平変位 (440 gal 加振時)

Fig. A63 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-C (440 gal).

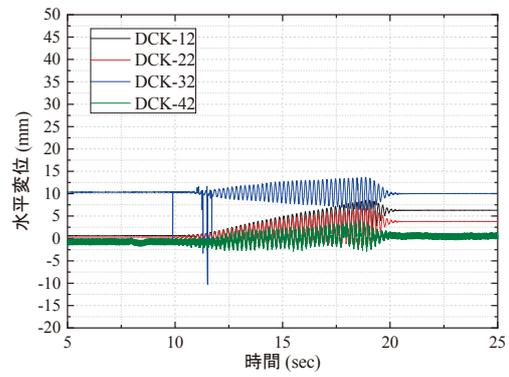
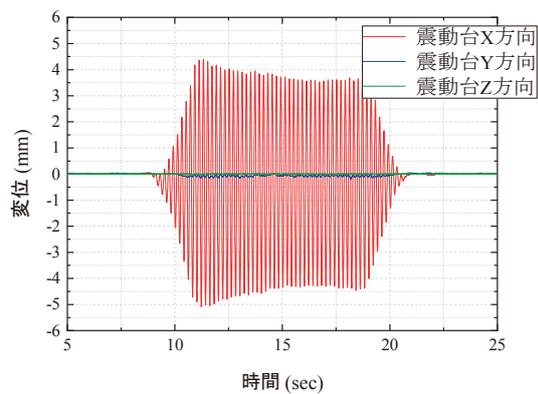


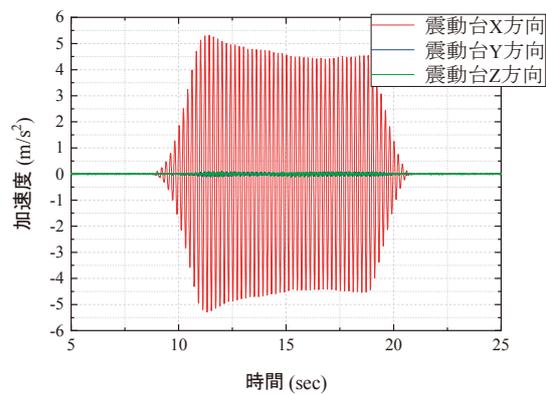
図 A64 Model-C における下流斜面の鉛直変位 (440gal 加振時)

Fig. A64 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-C (440 gal).

### A.3 530 gal 加振結果



(a) 変位



(b) 加速度

図 A65 震動台の変位および加速度(530 gal 加振時)

Fig. A65 Base displacement and acceleration time histories (530 gal).

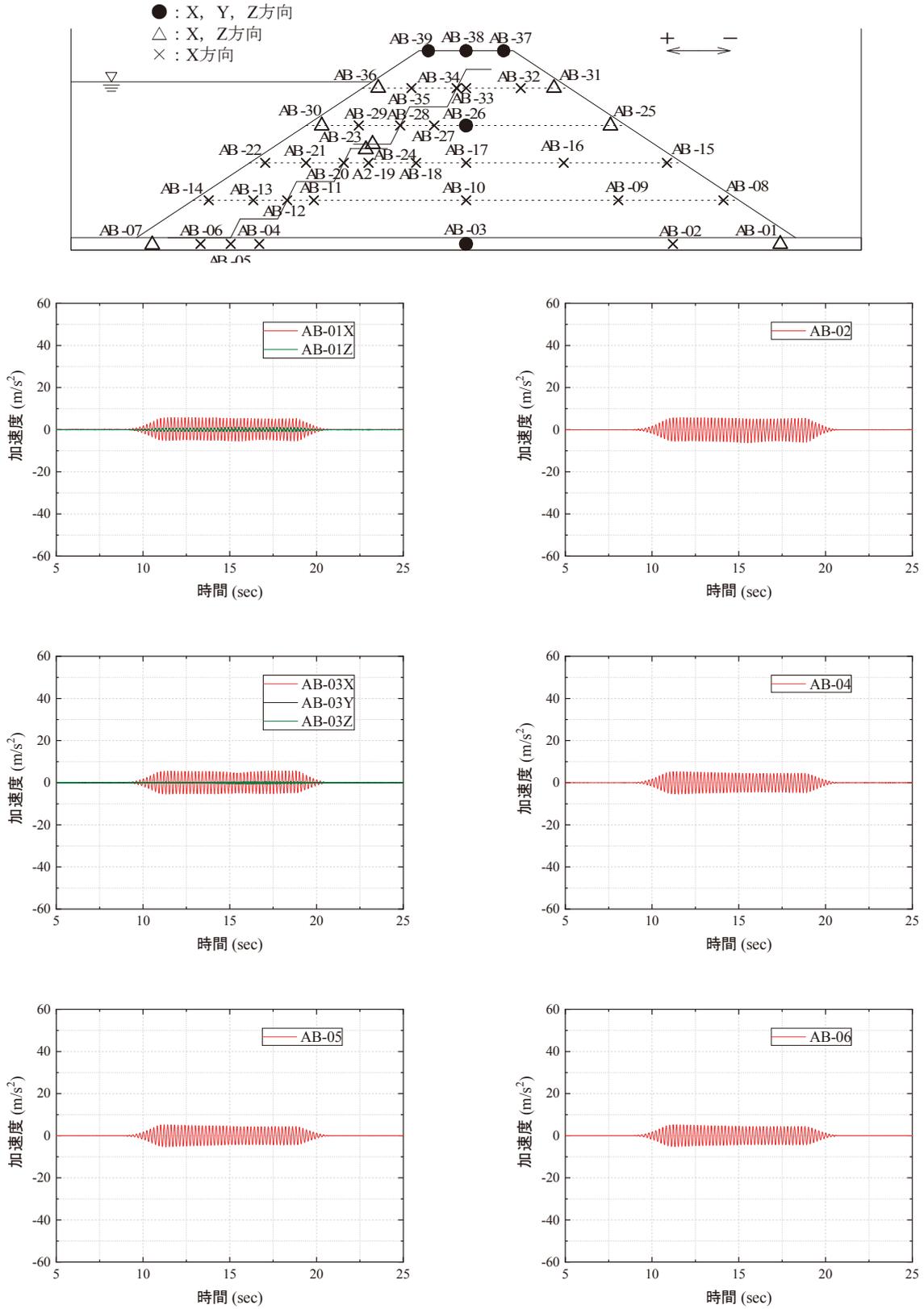


図 A66(1) Model-B における基盤内 (-10 cm) の加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A66(1) Acceleration responses of the base in Model-B (530 gal).

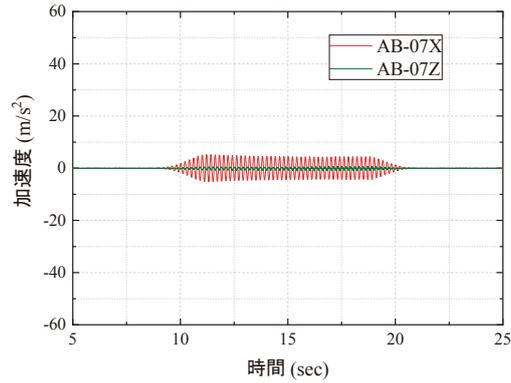


図 A66(2) Model-B における基盤内(-10 cm)の加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A66(2) Acceleration responses of the base in Model-B (530 gal).

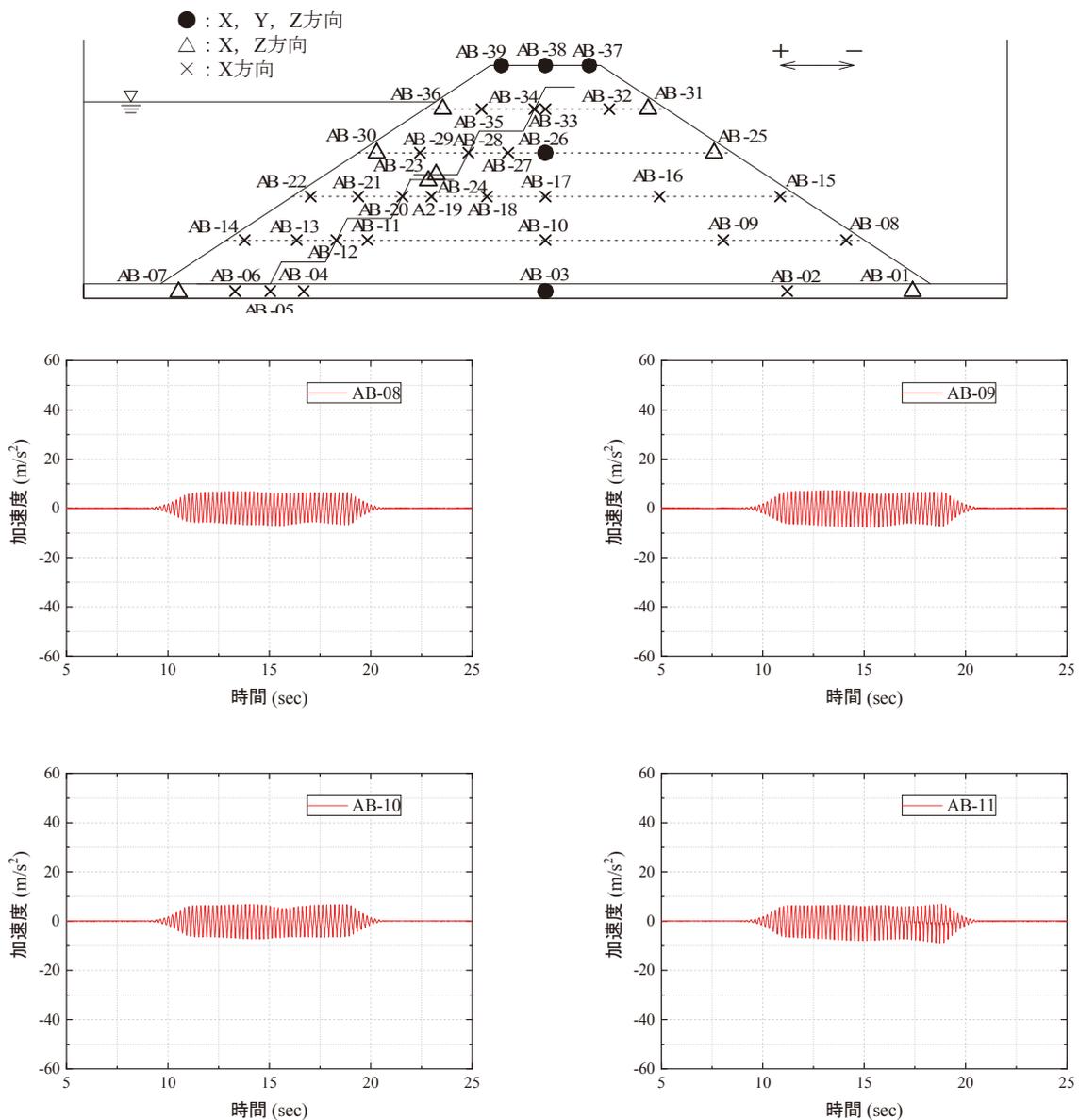


図 A67(1) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A67(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (530 gal).

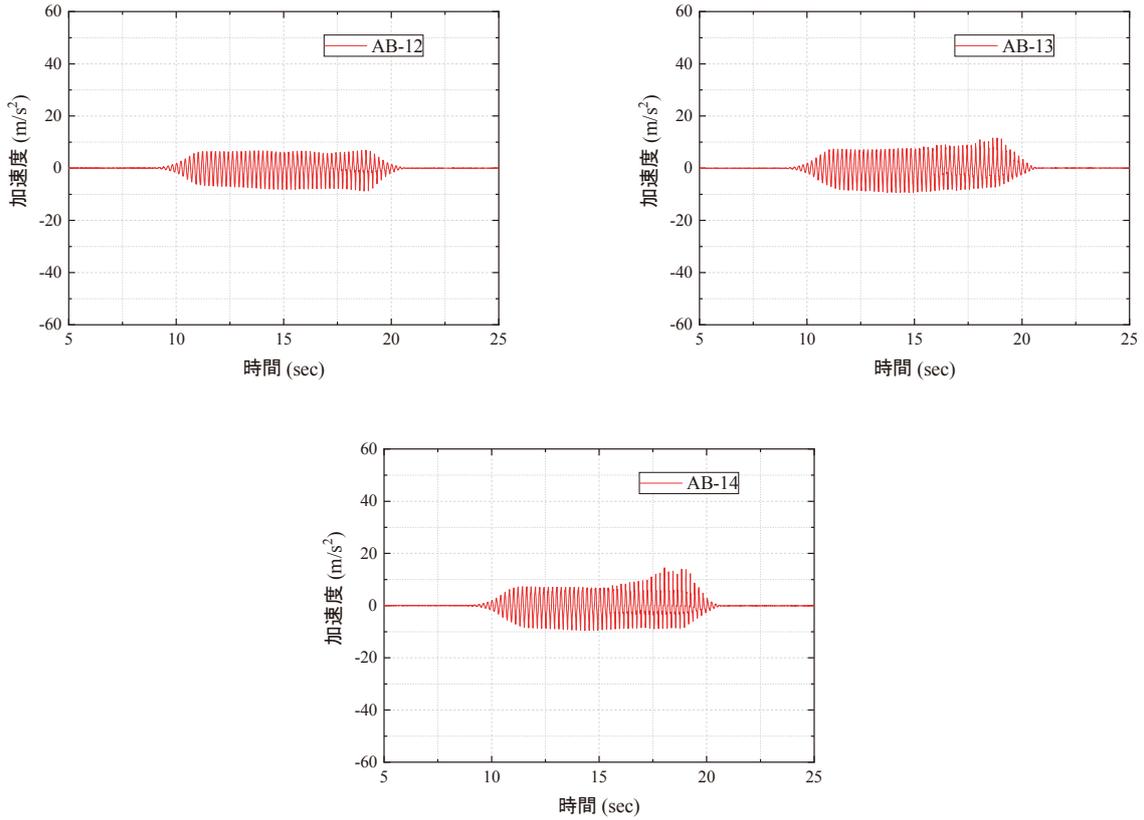


図 A67(2) Model-B における 60 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A67(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-B (530 gal).

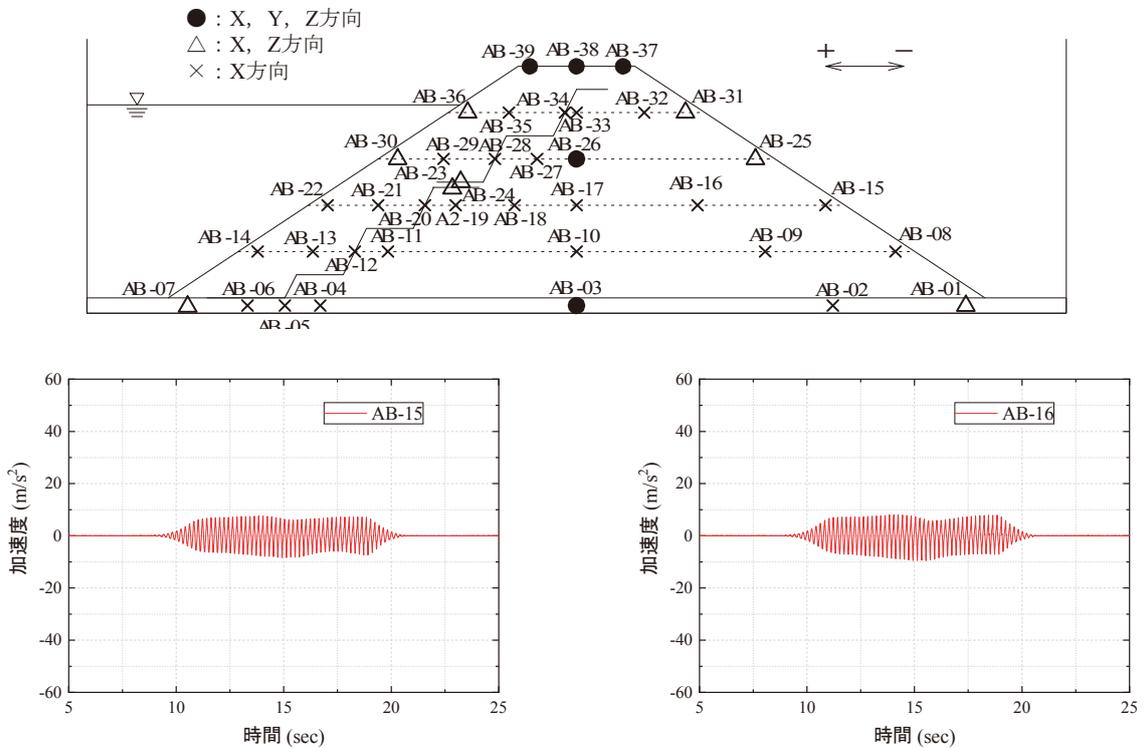


図 A68(1) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A68(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (530 gal).

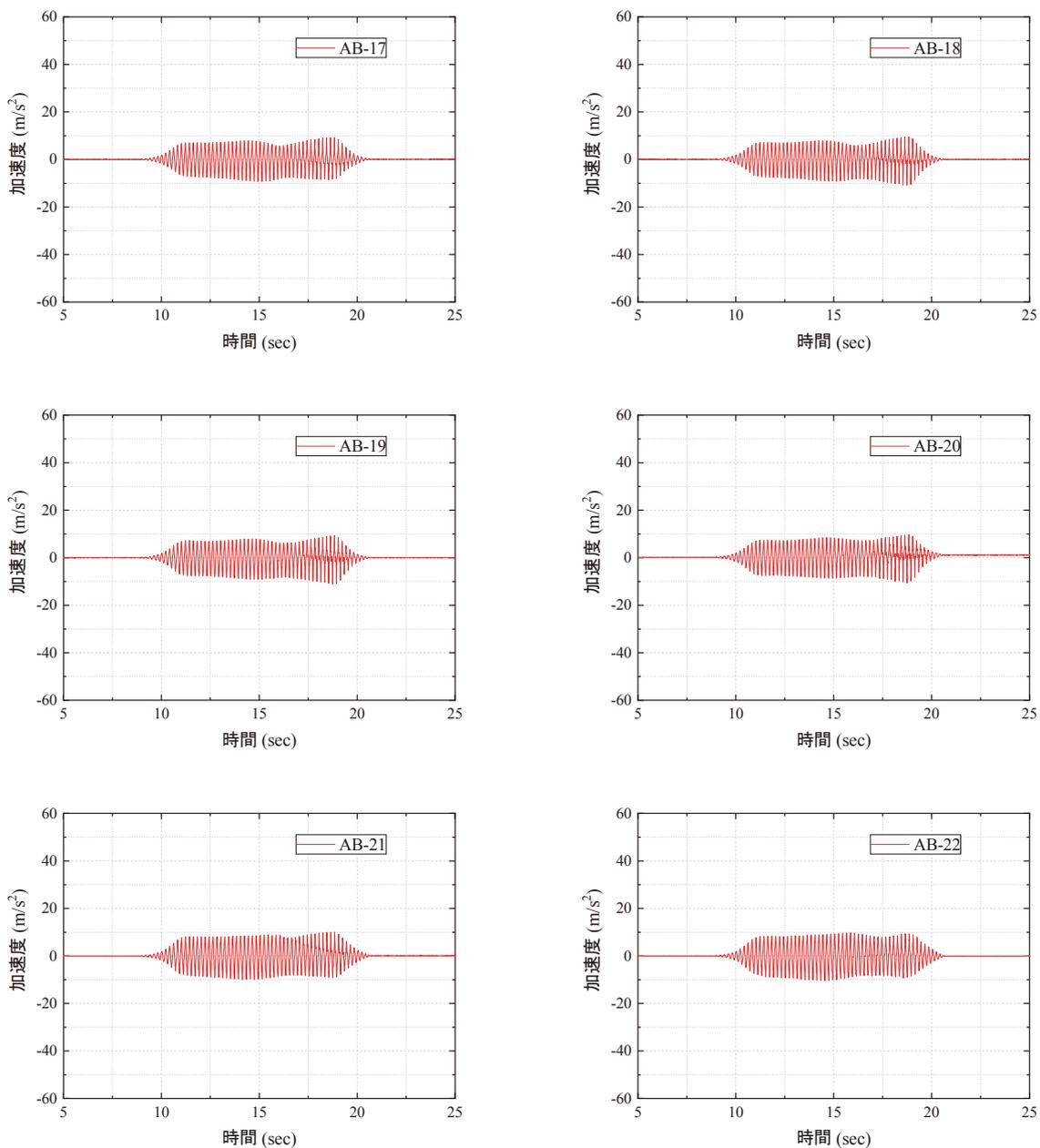


図 A68(2) Model-B における 120 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)

Fig. A68(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-B (530 gal).

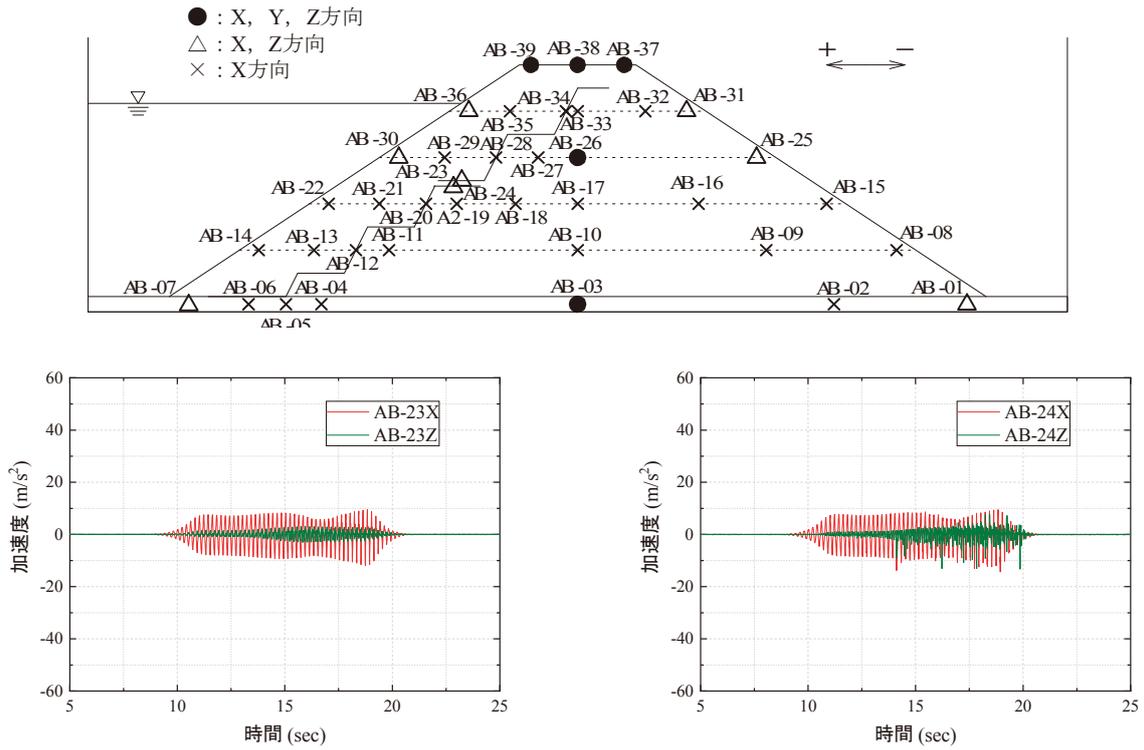


図 A69 Model-B における GCL 重ね合わせ部での加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A69 Acceleration responses at overlapped GCL in Model-B (530 gal).

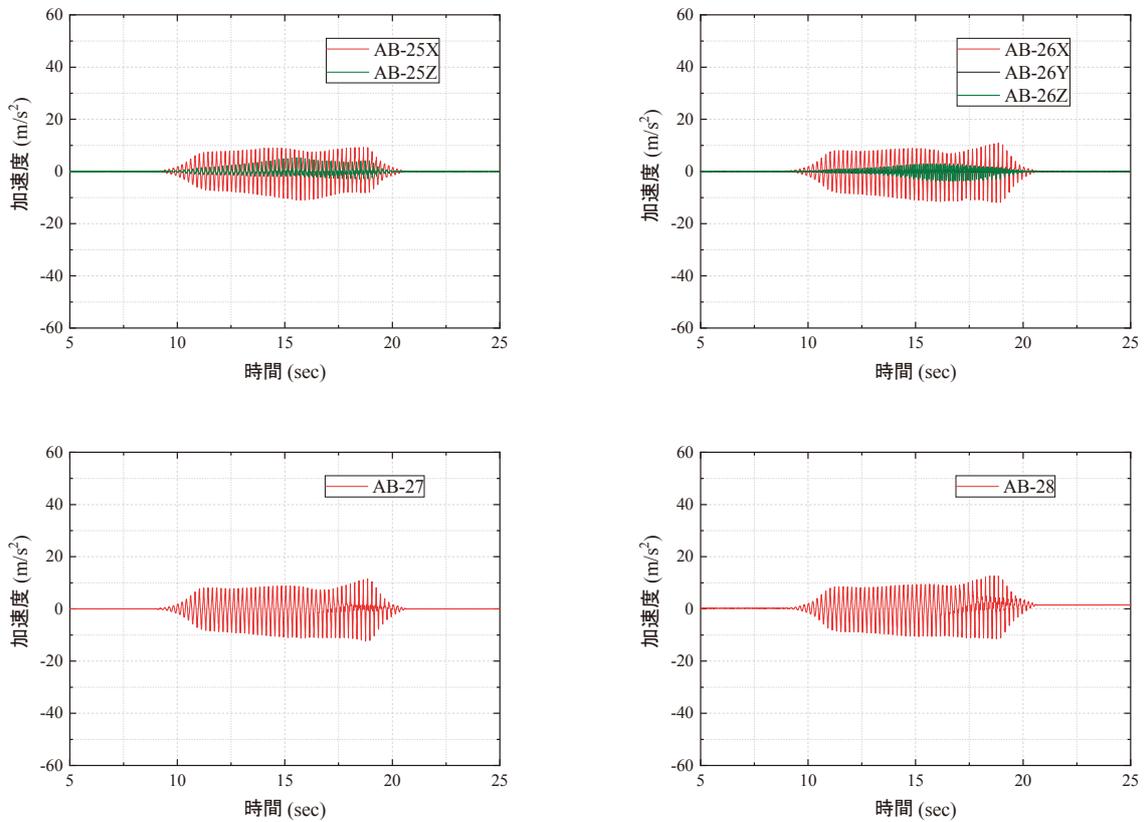


図 A70(1) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A70(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (530 gal).

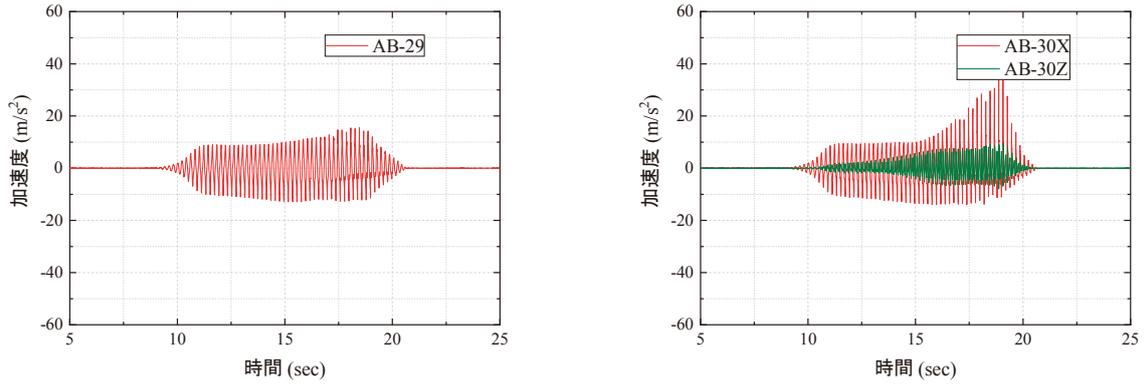


図 A70(2) Model-B における 180 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A70(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-B (530 gal).

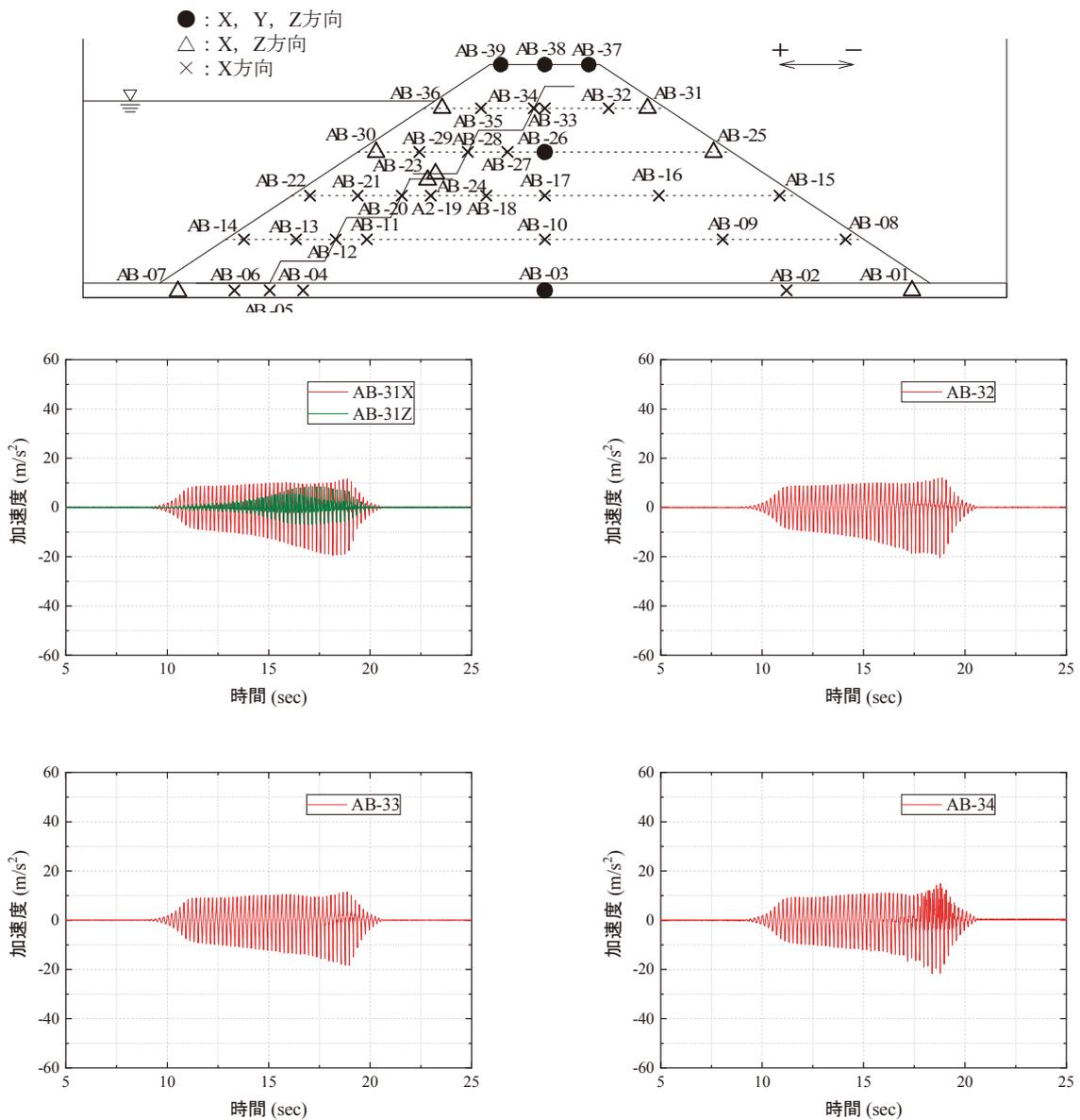


図 A71(1) Model-B における 240 cm から天端高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A71(1) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (530 gal).

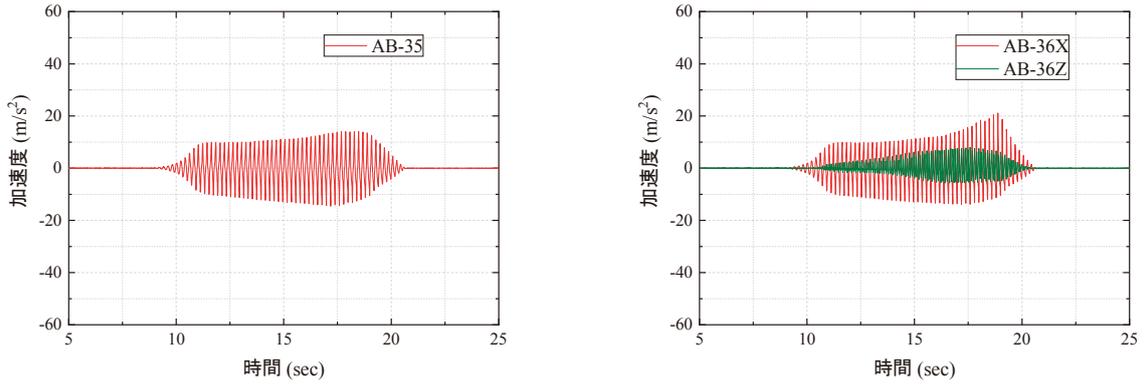


図 A71(2) Model-B における 240 cm での加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A71(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-B (530 gal).

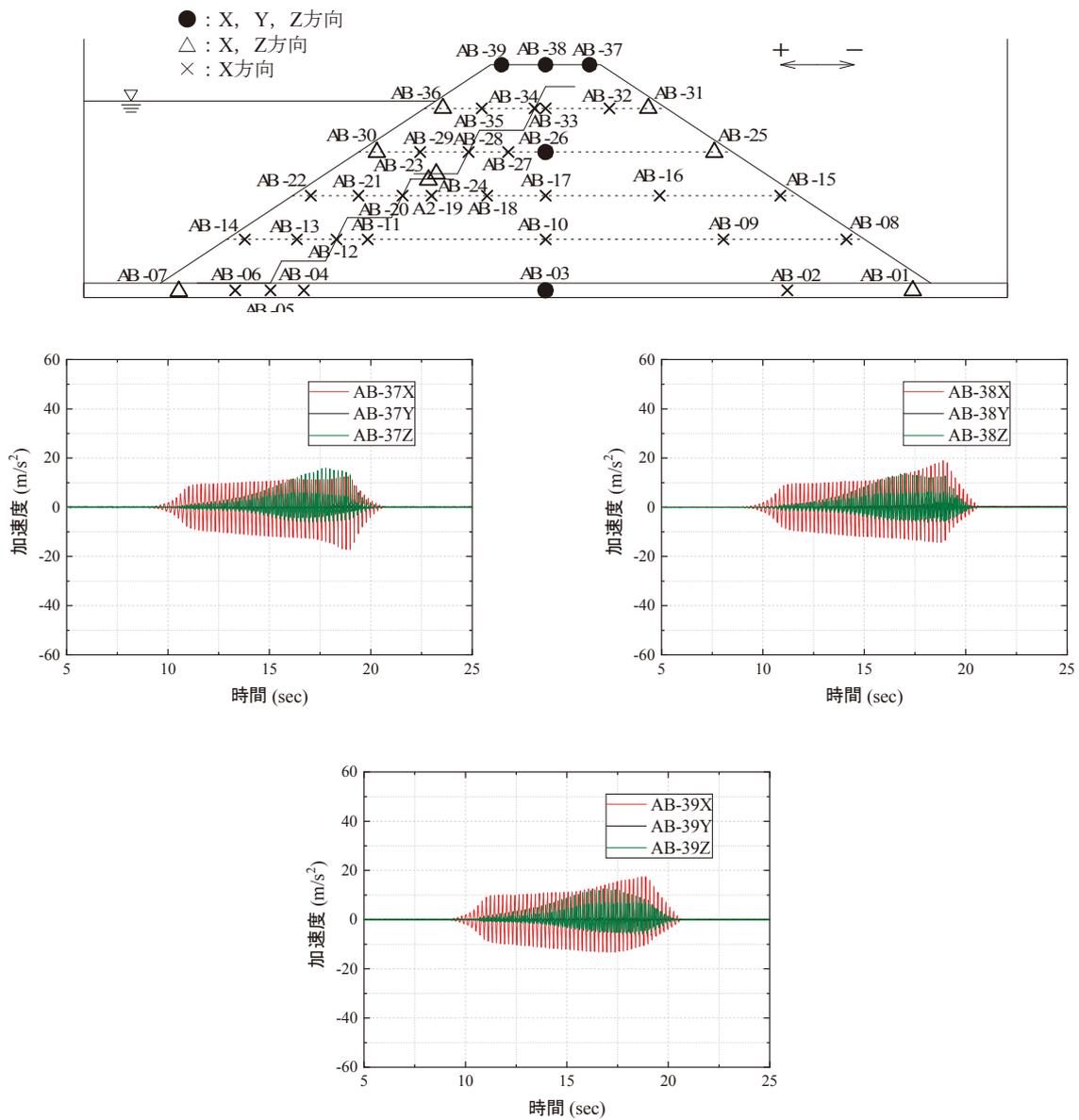


図 A72 Model-B における天端での加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A72 Acceleration responses at the embankment crests in Model-B (530 gal).

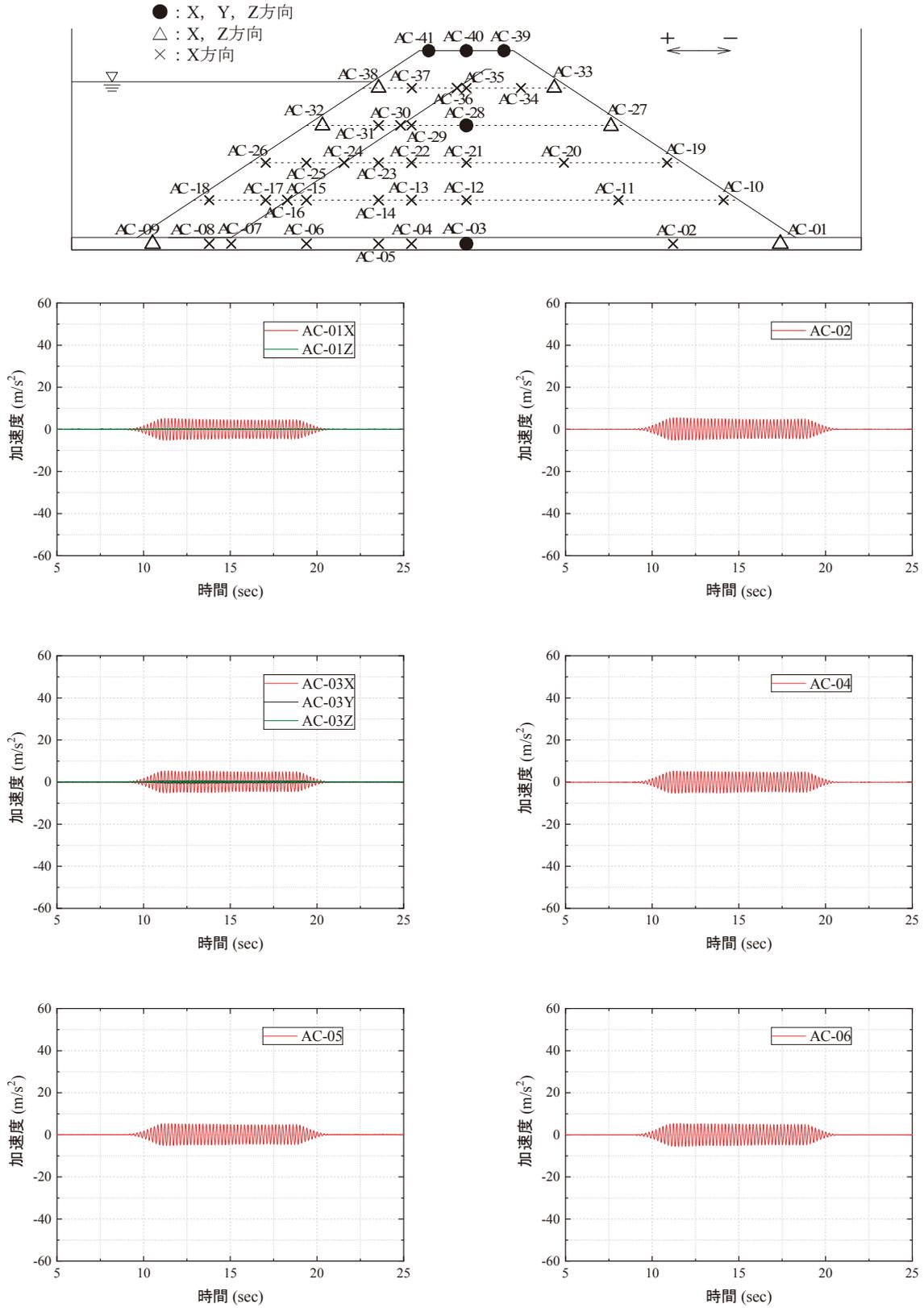


図 A73(1) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A73(1) Acceleration responses of the base in Model-C (530 gal).

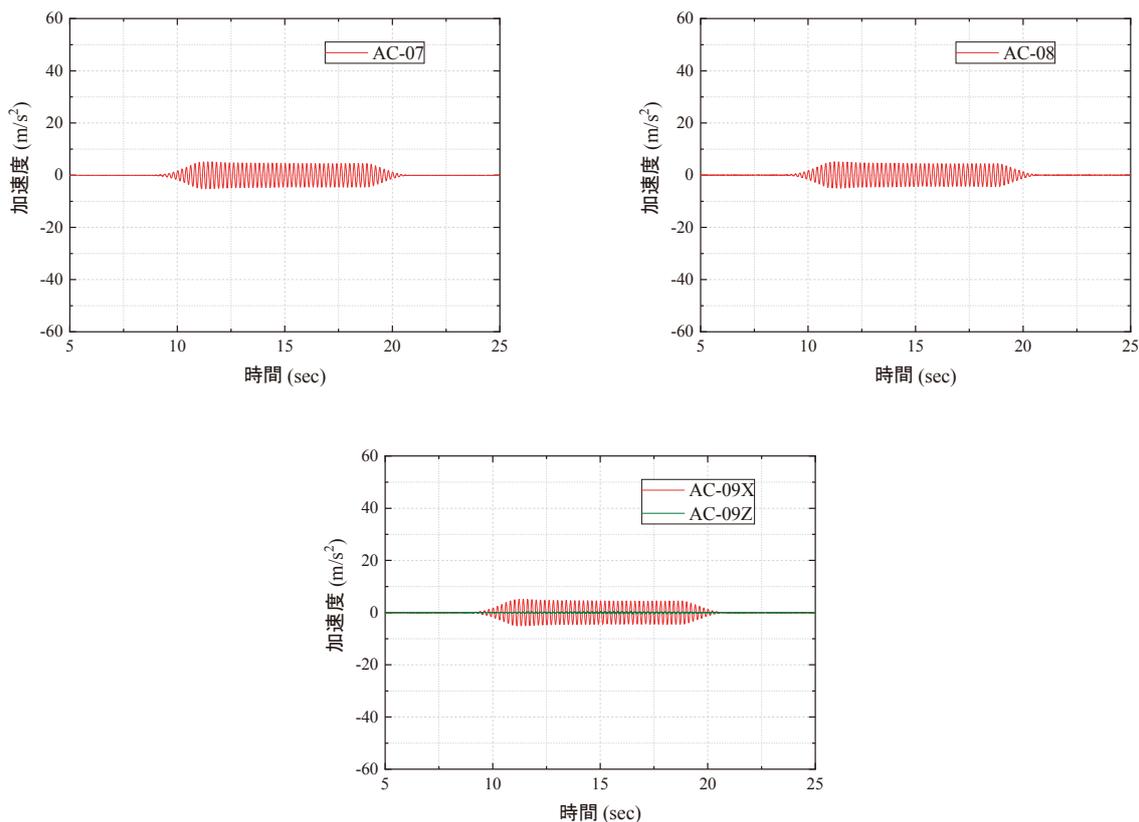


図 A73(2) Model-C における基盤内(-10 cm)の加速度応答(530 gal 加振時)

Fig. A73(2) Acceleration responses of the base in Model-C (530 gal).

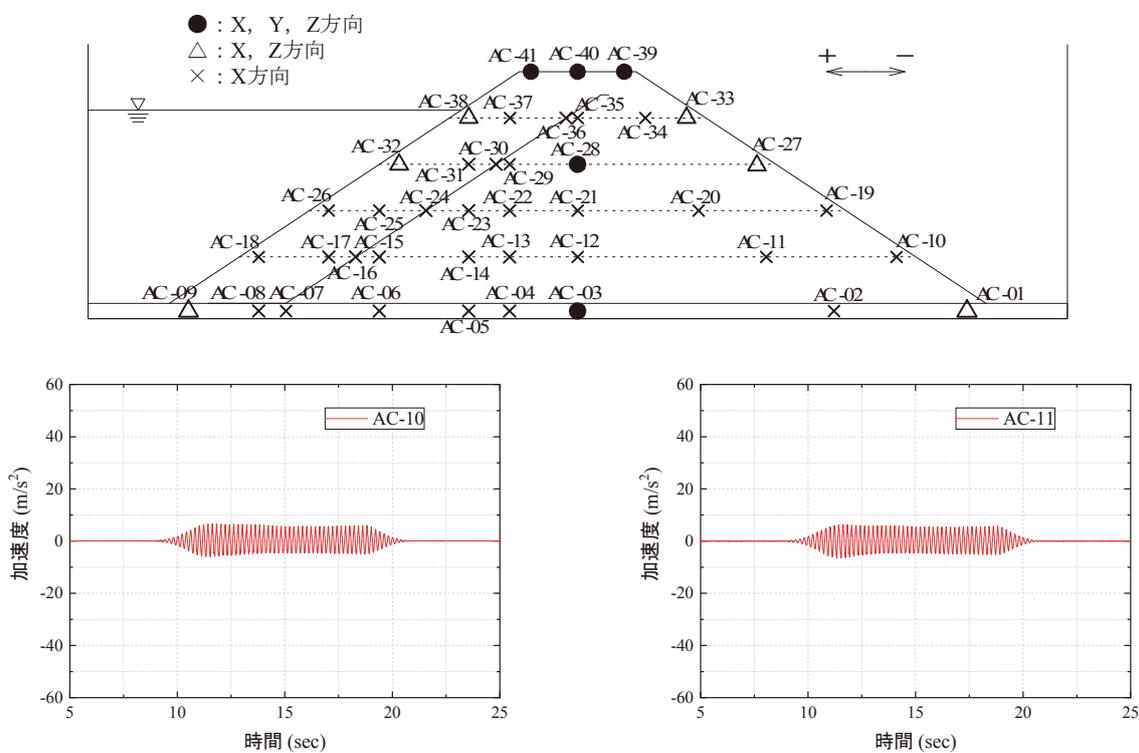


図 A74(1) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)

Fig. A74(1) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (530 gal).

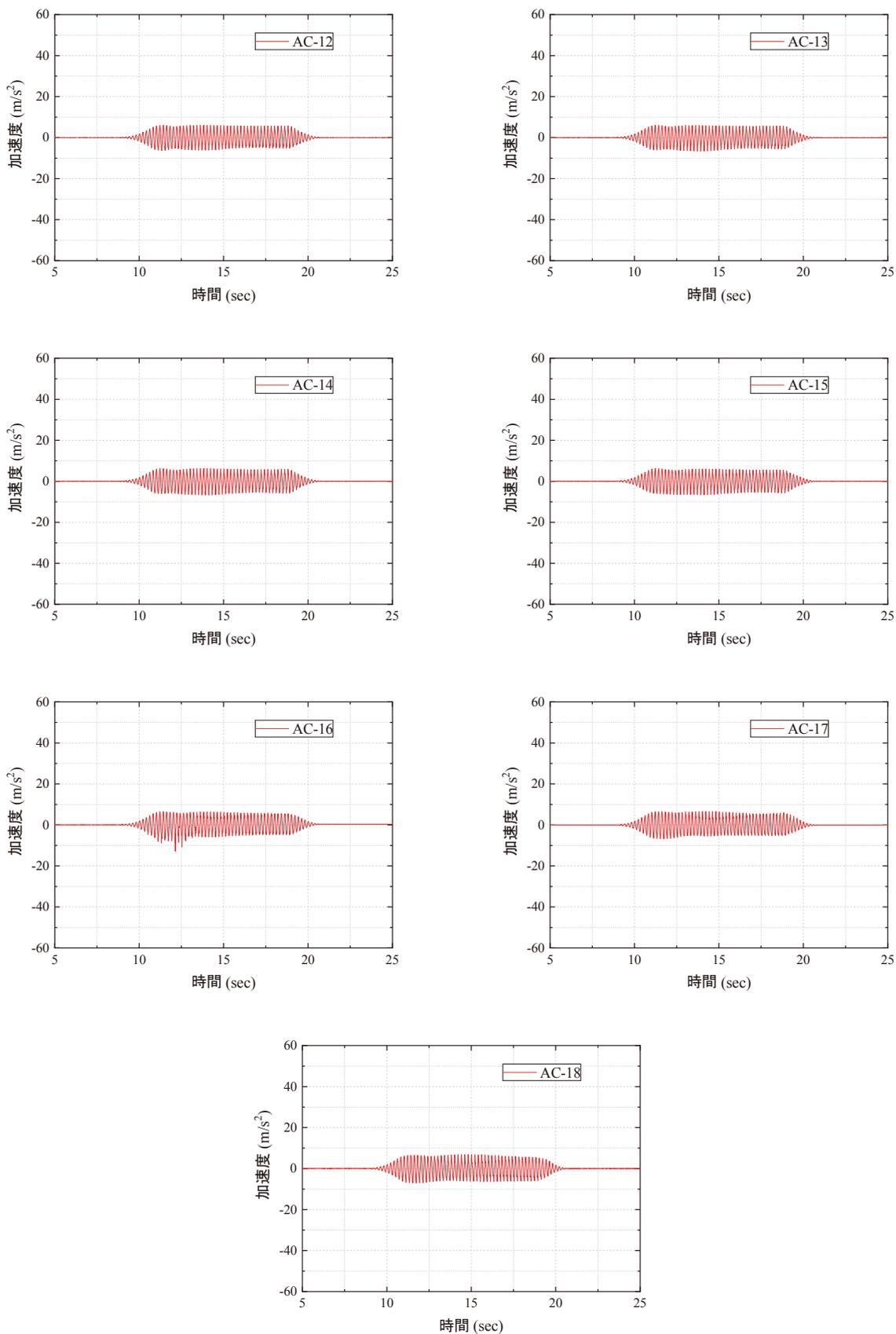


図 A74(2) Model-C における 60 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A74(2) Acceleration responses at 60 cm high in Model-C (530 gal).

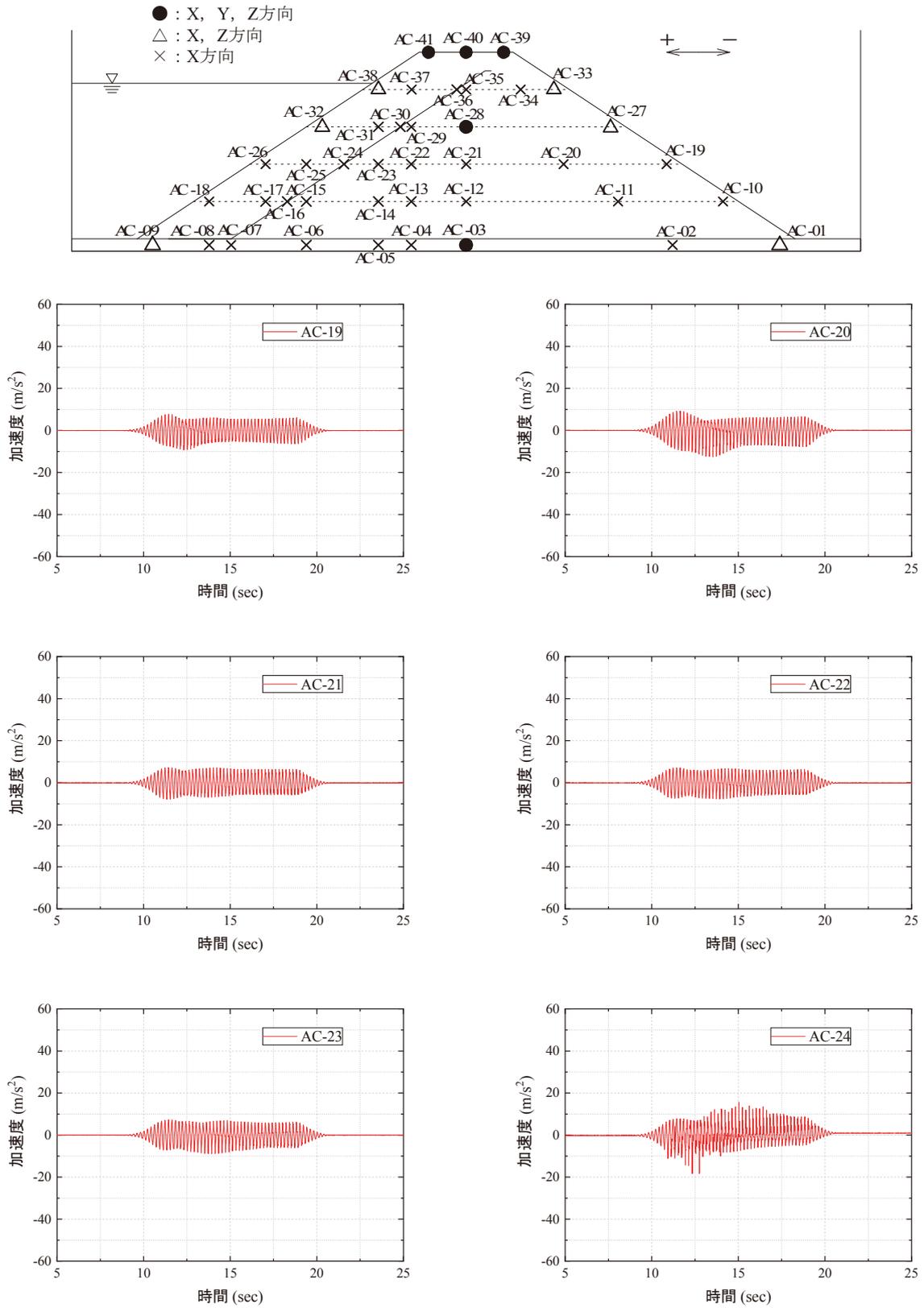


図 A75(1) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A75(1) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (530 gal).

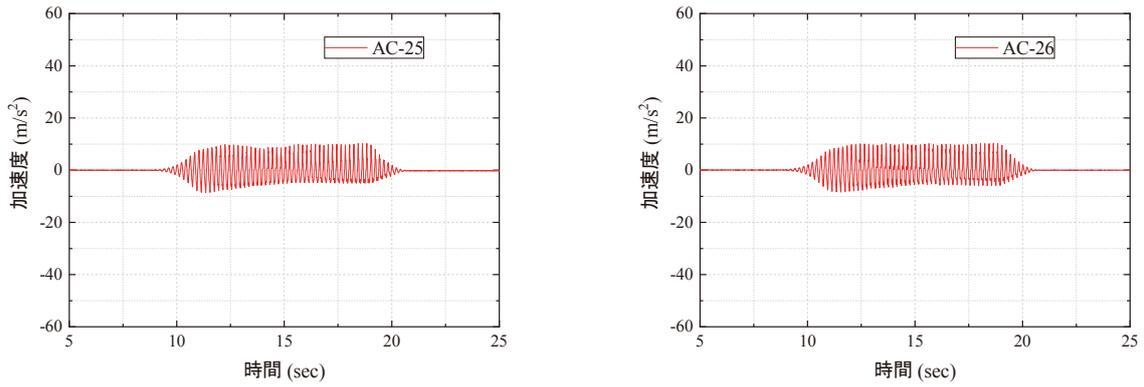


図 A75(2) Model-C における 120 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A75(2) Acceleration responses at 120 cm high in Model-C (530 gal).

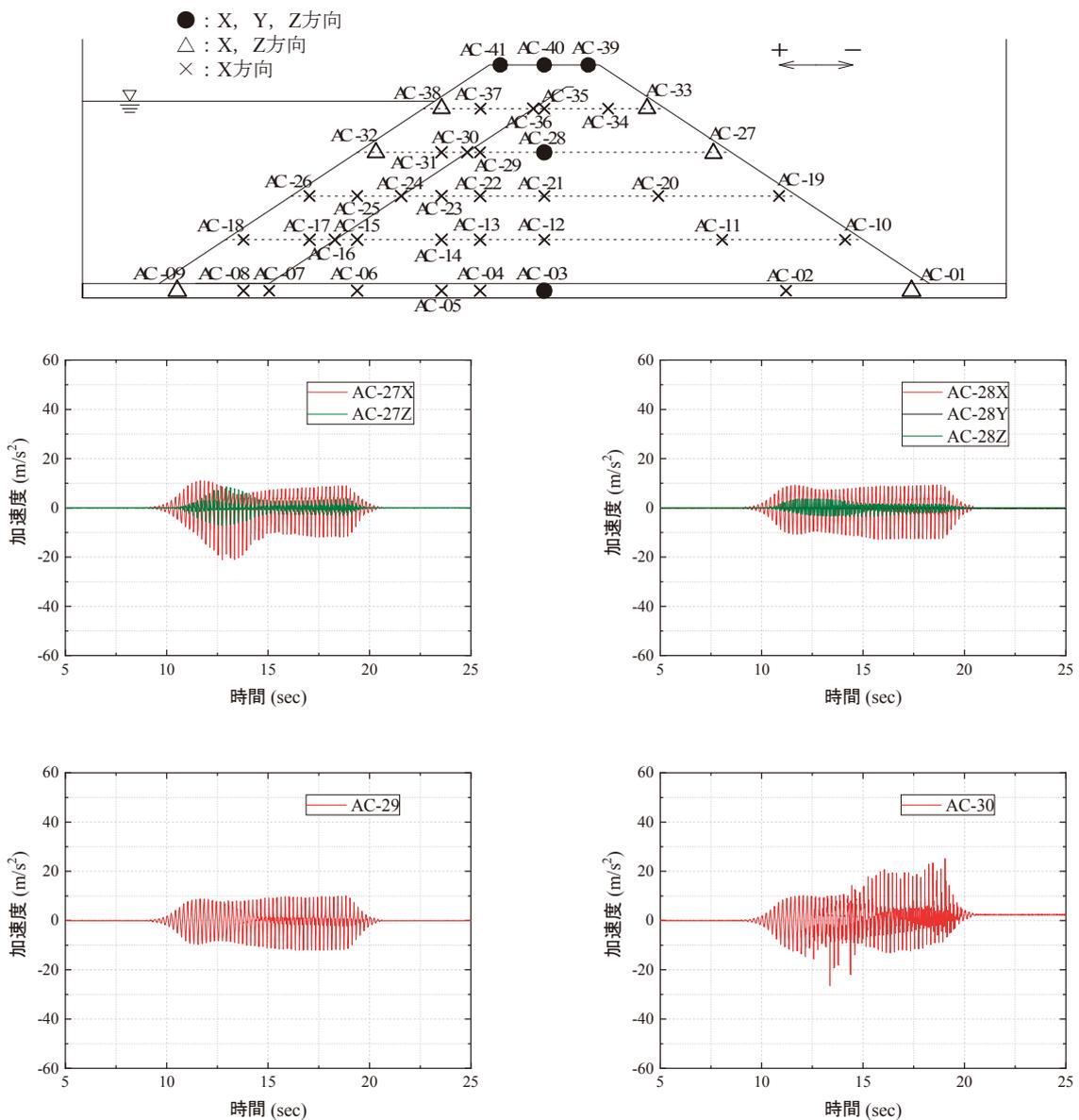


図 A76(1) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A76(1) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (530 gal).

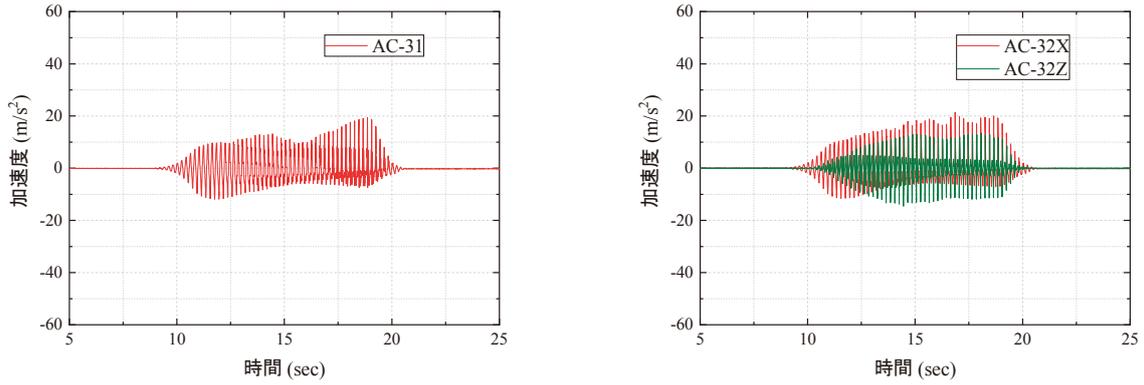


図 A76(2) Model-C における 180 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A76(2) Acceleration responses at 180 cm high in Model-C (530 gal).

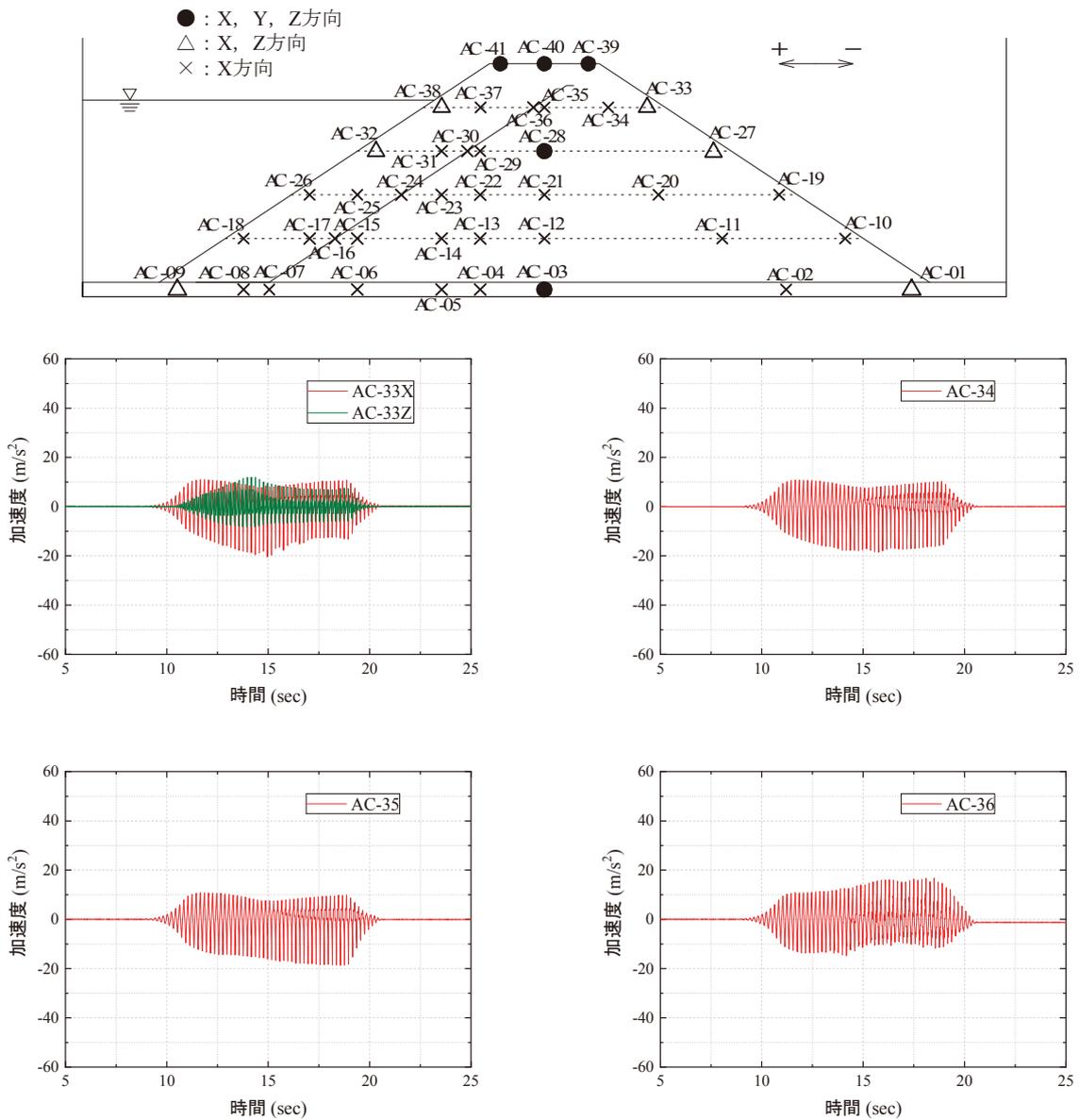


図 A77(1) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A77(1) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (530 gal).

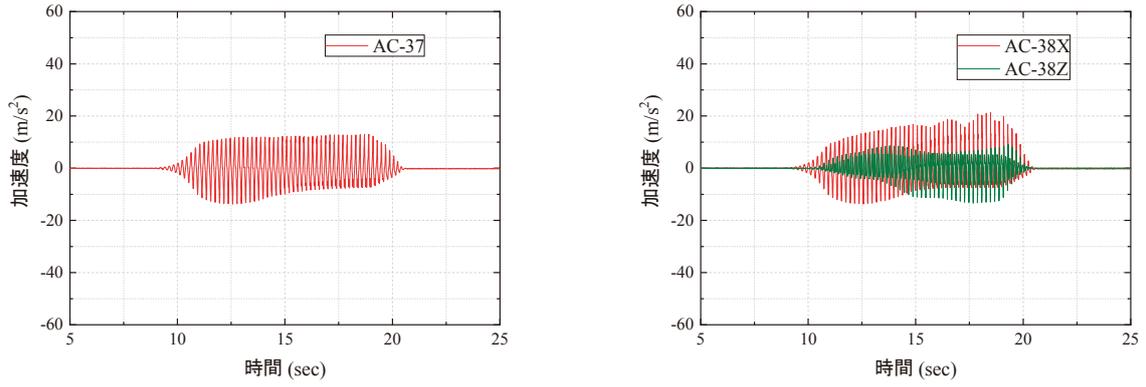


図 A77(2) Model-C における 240 cm 高さでの加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A77(2) Acceleration responses at 240 cm high in Model-C (530 gal).

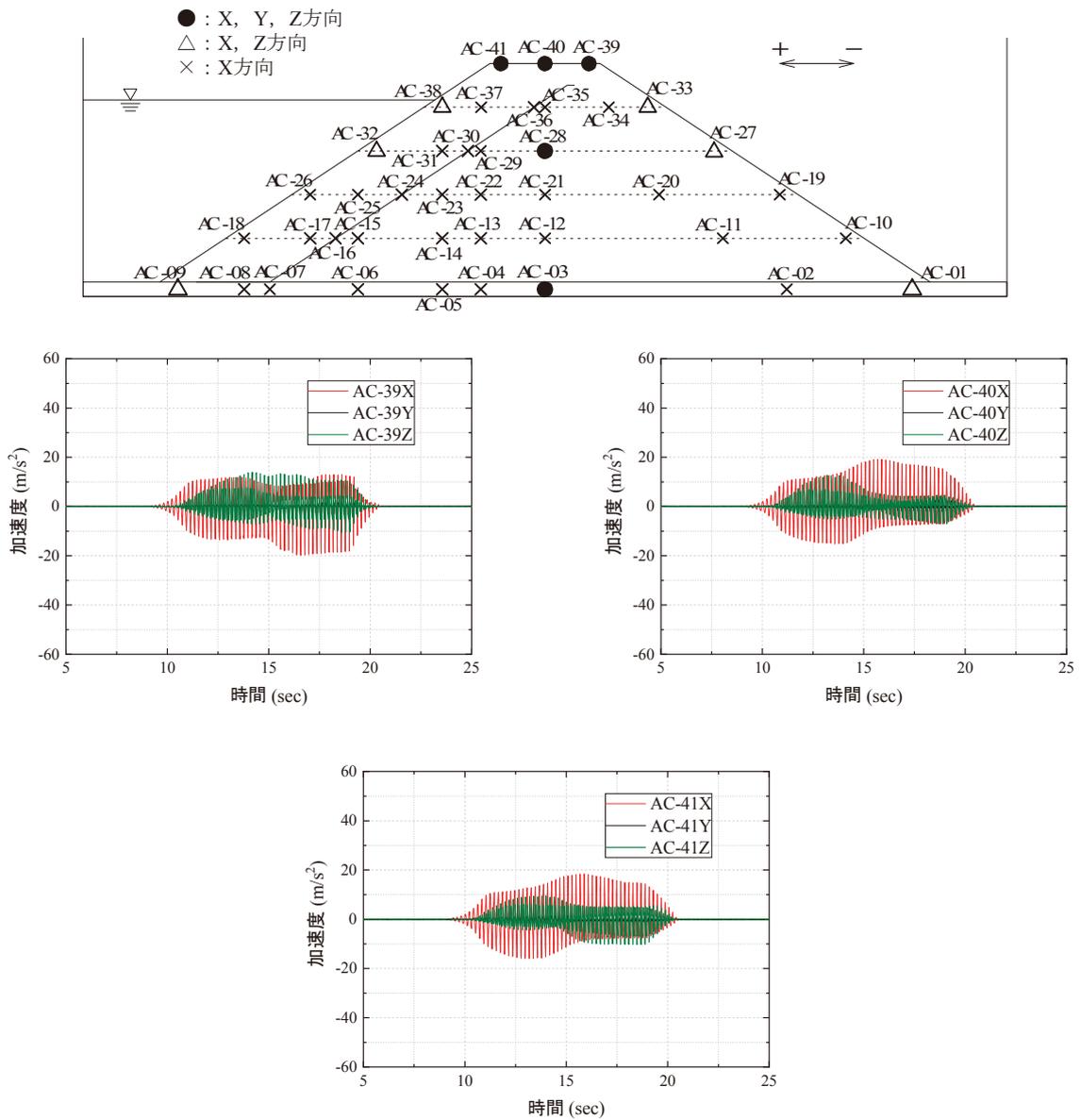


図 A78 Model-C における天端での加速度応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A78 Acceleration responses at the embankment crests in Model-C (530 gal).

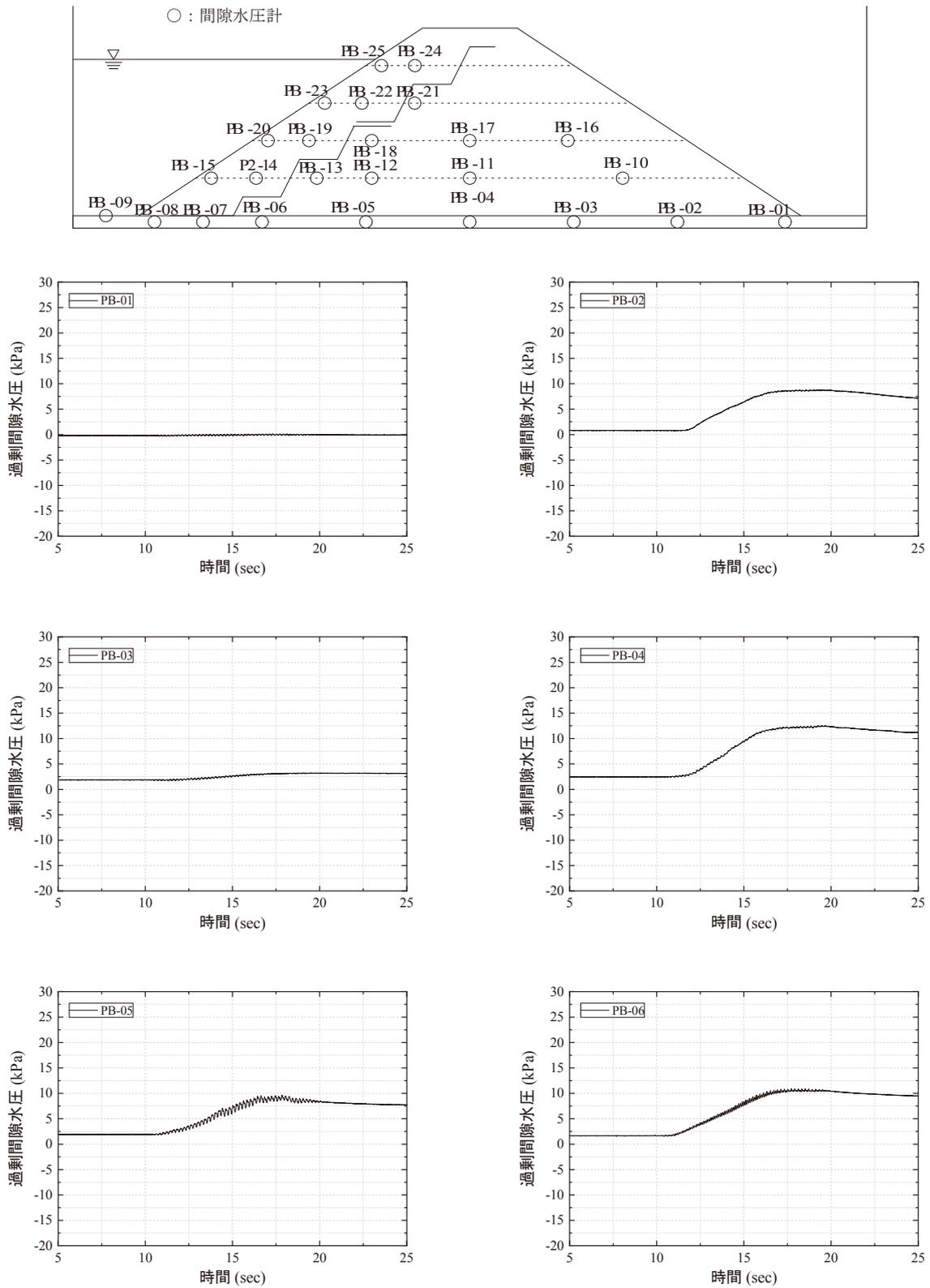


図 A79(1) Model-Bにおける基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(530 gal加振時)  
 Fig. A79(1) Pore water pressure responses of the base in Model-B (530 gal).

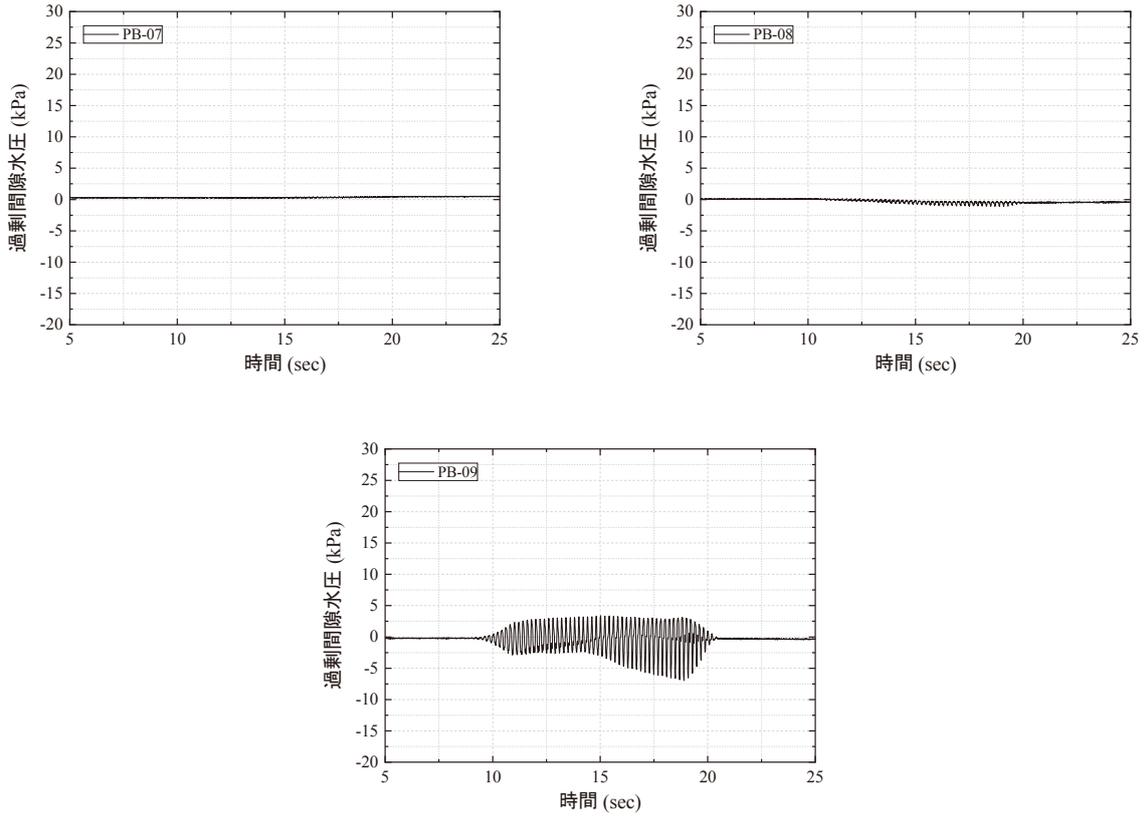


図 A79(2) Model-B における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A79(2) Pore water pressure responses of the base in Model-B (530 gal).

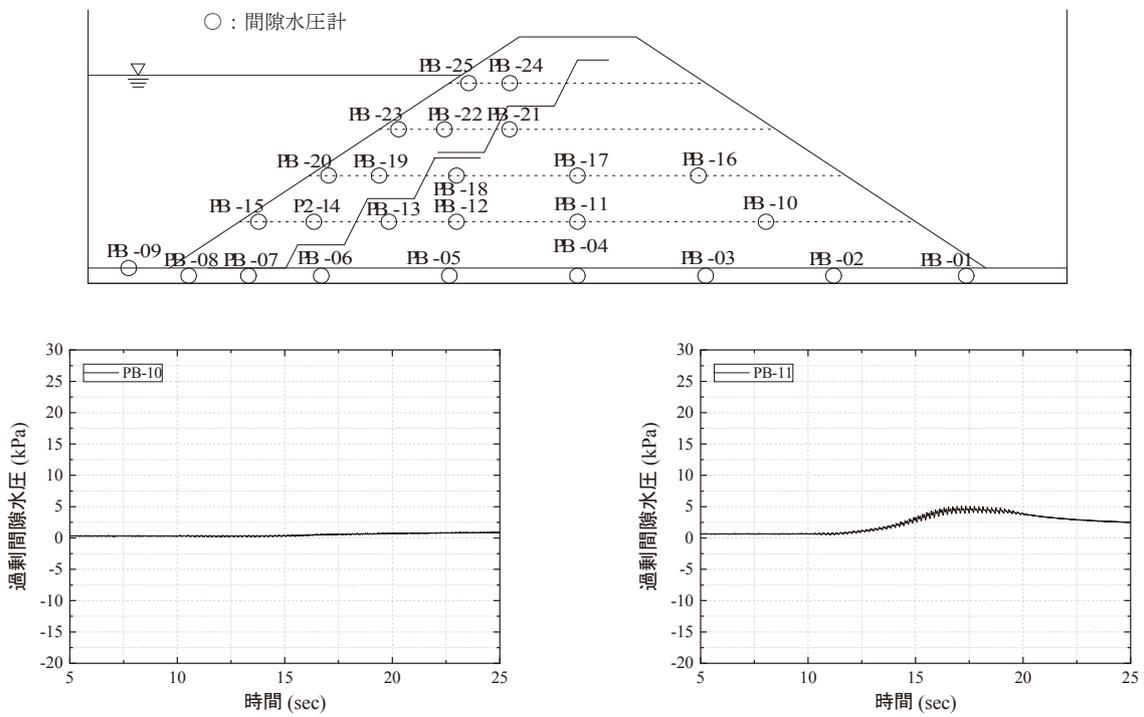


図 A80(1) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A80(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (530 gal).

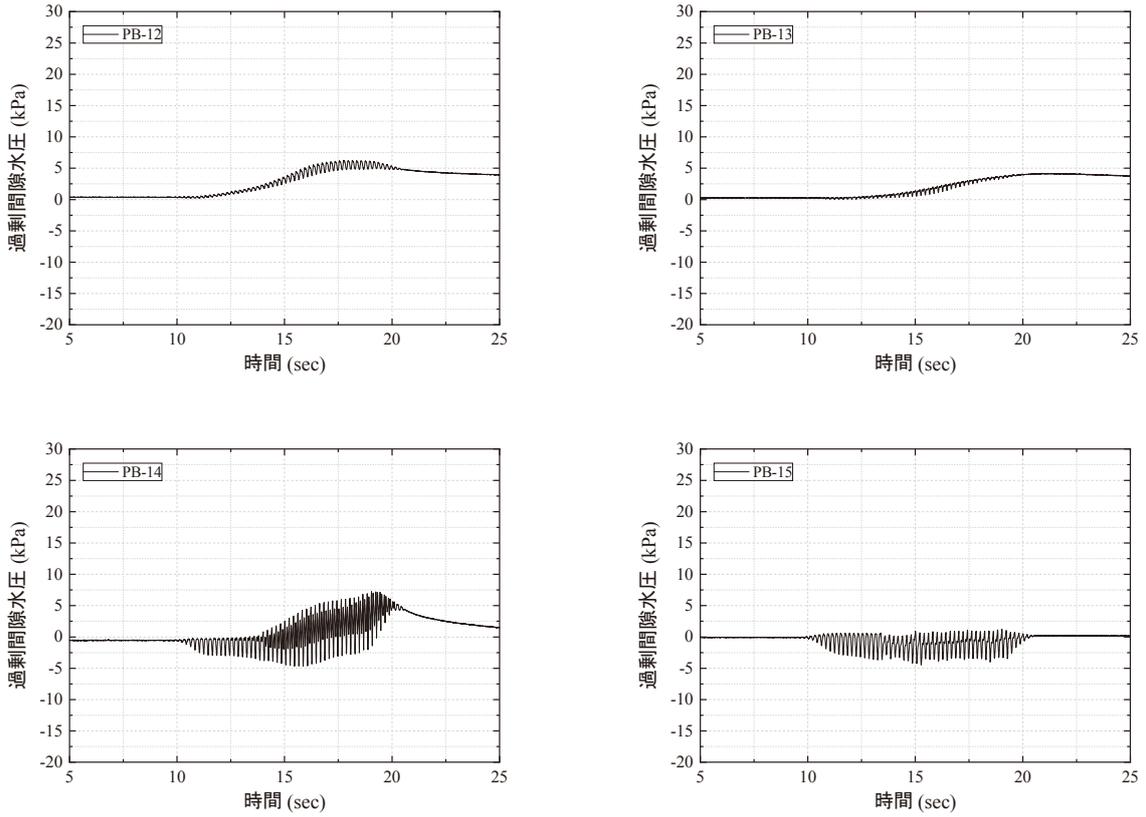


図 A80(2) Model-B における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A80(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-B (530 gal).

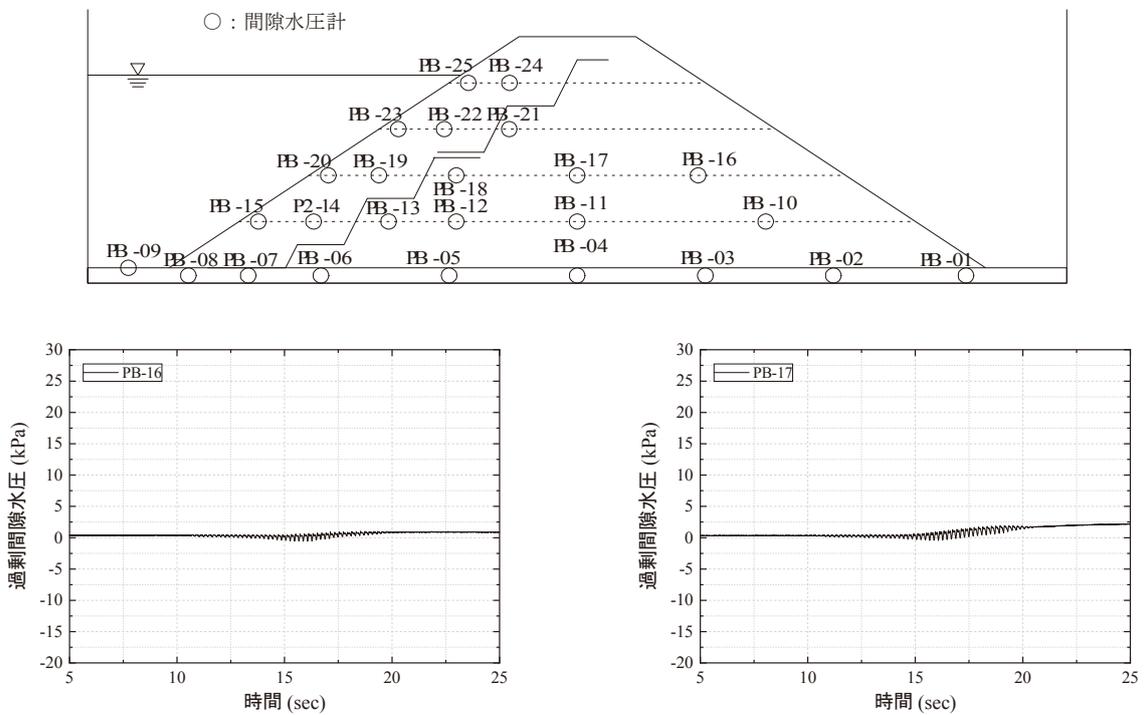


図 A81(1) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A81(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (530 gal).

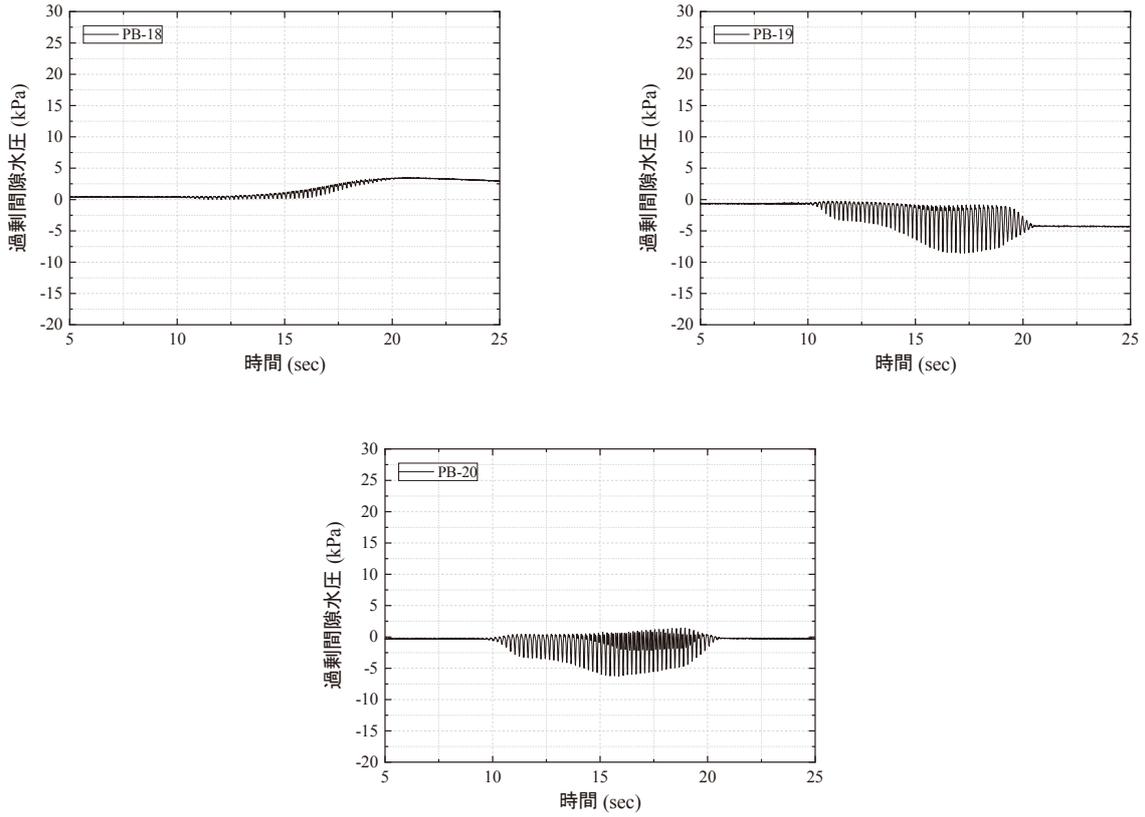


図 A81(2) Model-B における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A81(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-B (530 gal).

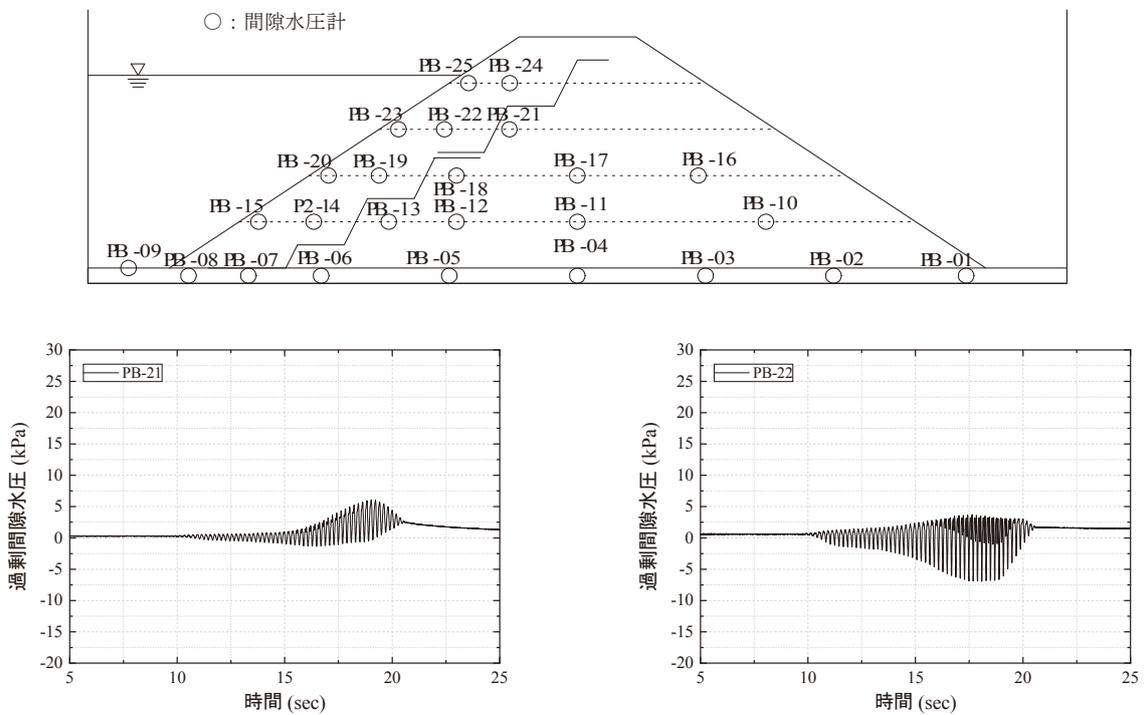


図 A82(1) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A82(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (530 gal).

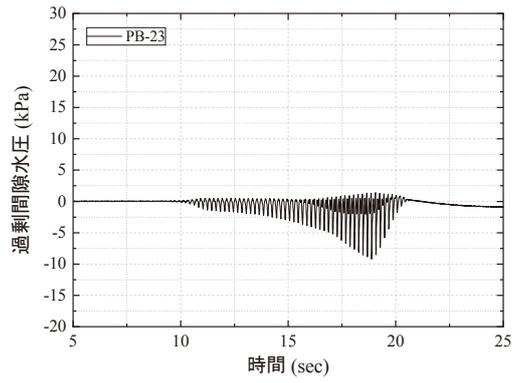


図 A82(2) Model-B における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A82(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-B (530 gal).

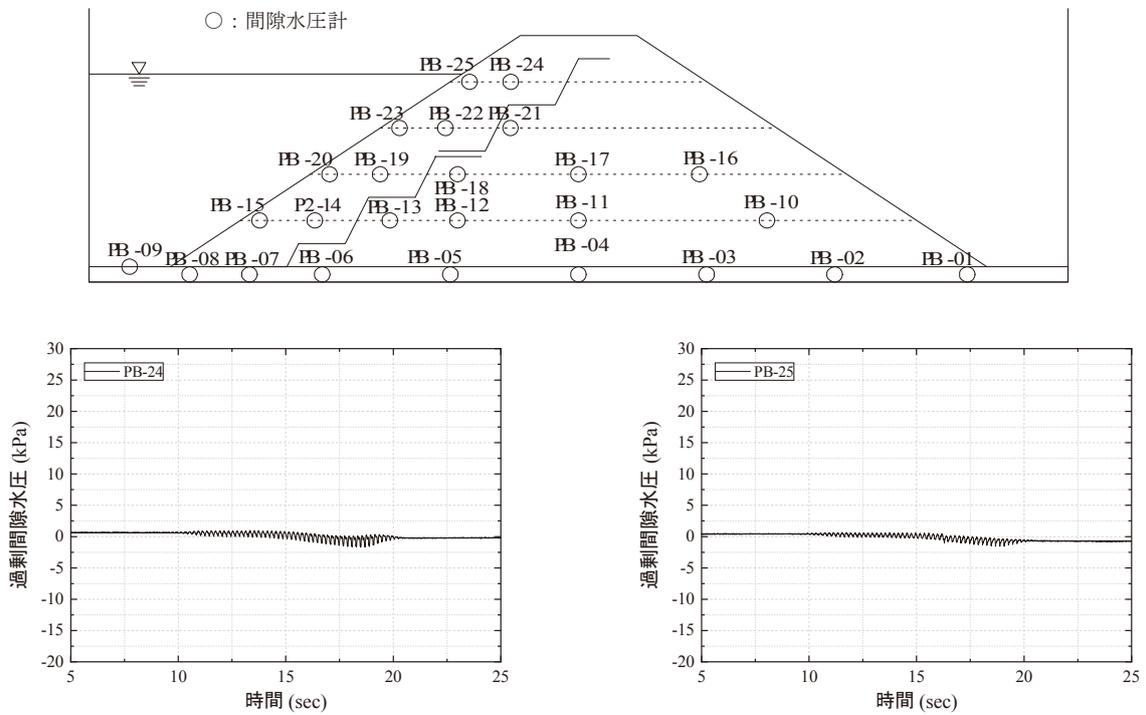


図 A83 Model-B における 240 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A83 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-B (530 gal).

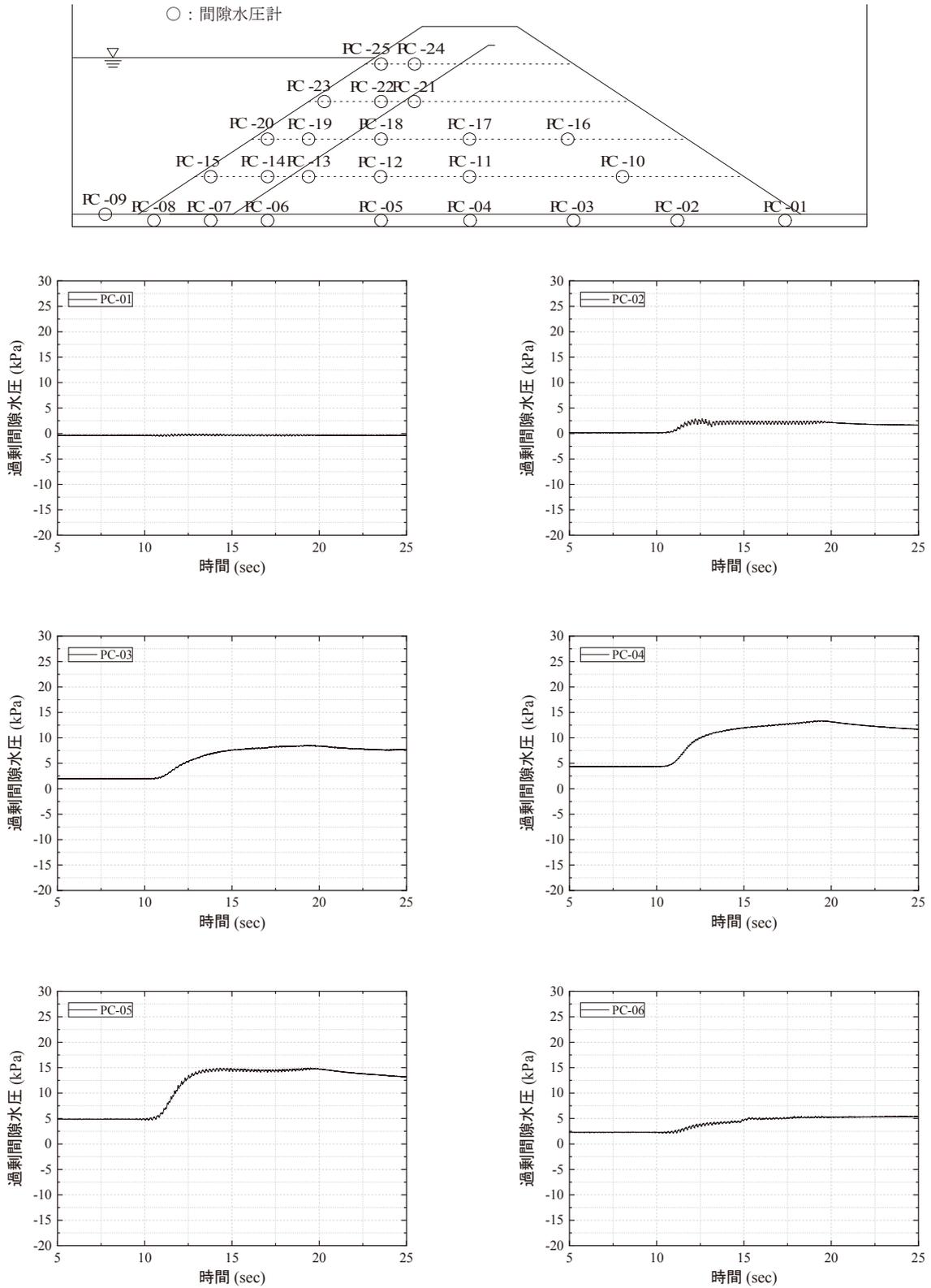


図 A84(1) Model-C における基盤内 (-10 cm) の間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A84(1) Pore water pressure responses of the base in Model-C (530 gal).

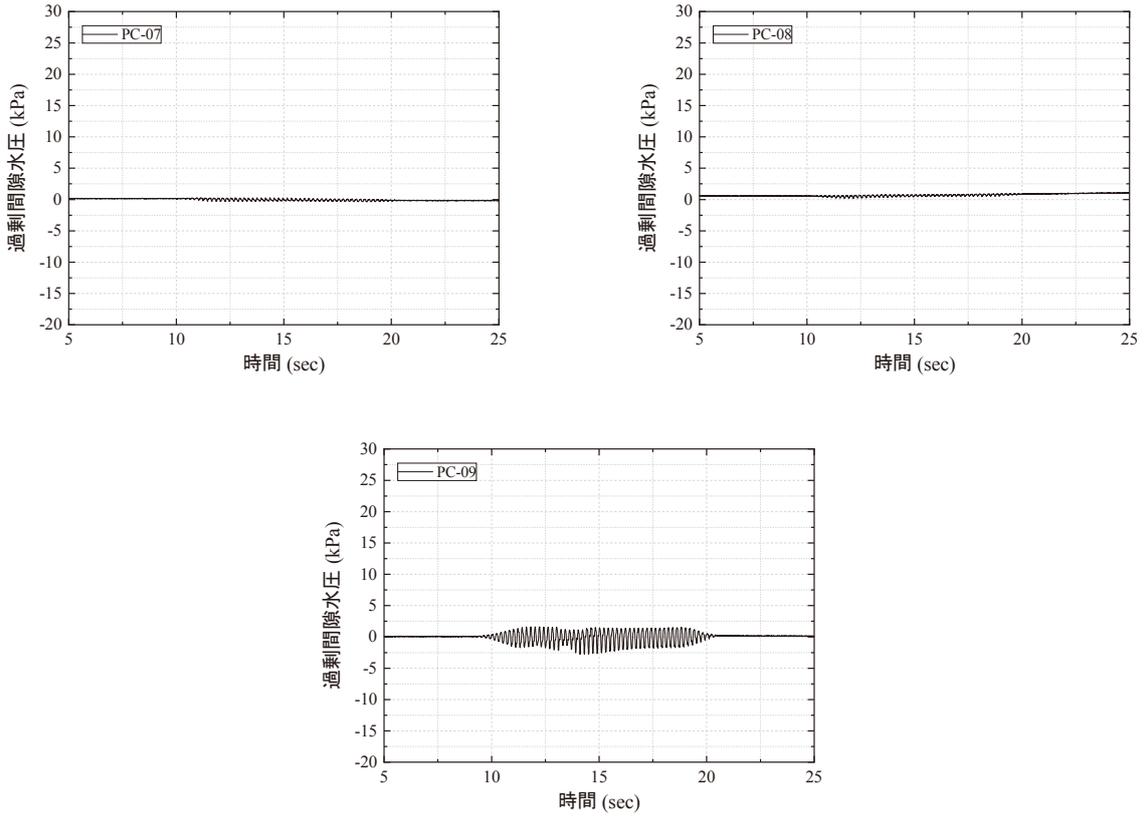


図 A84(2) Model-C における基盤内(-10 cm)の間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A84(2) Pore water pressure responses of the base in Model-C (530 gal).

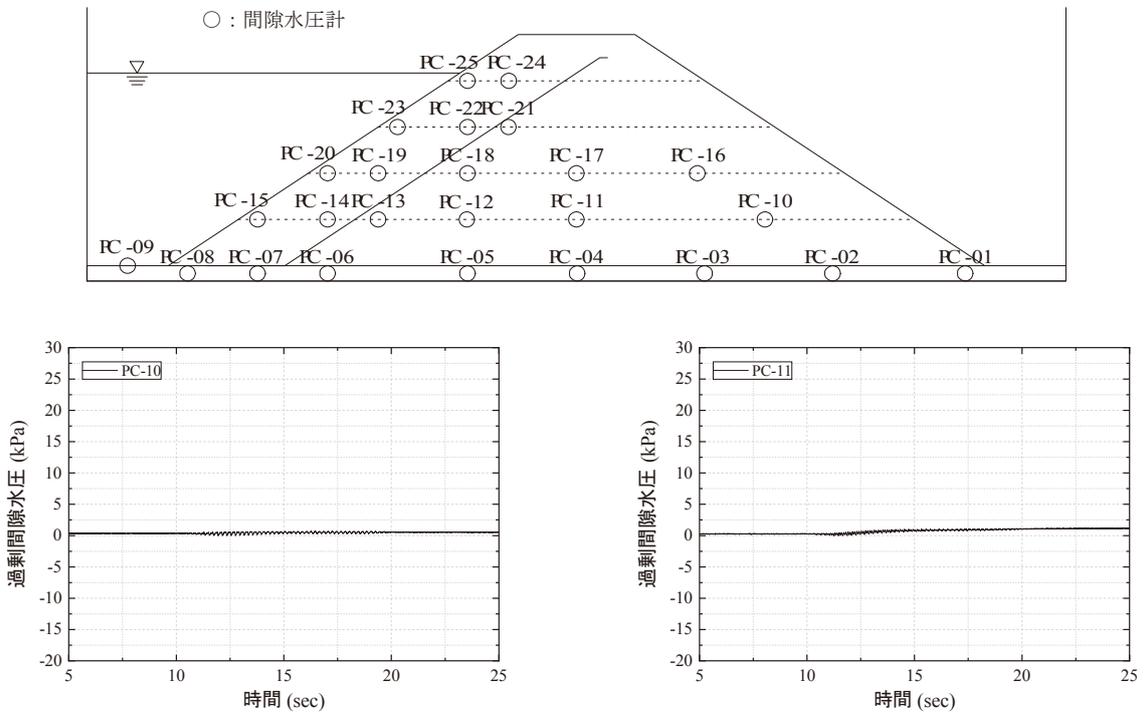


図 A85(1) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答(530 gal 加振時)  
 Fig. A85(1) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (530 gal).

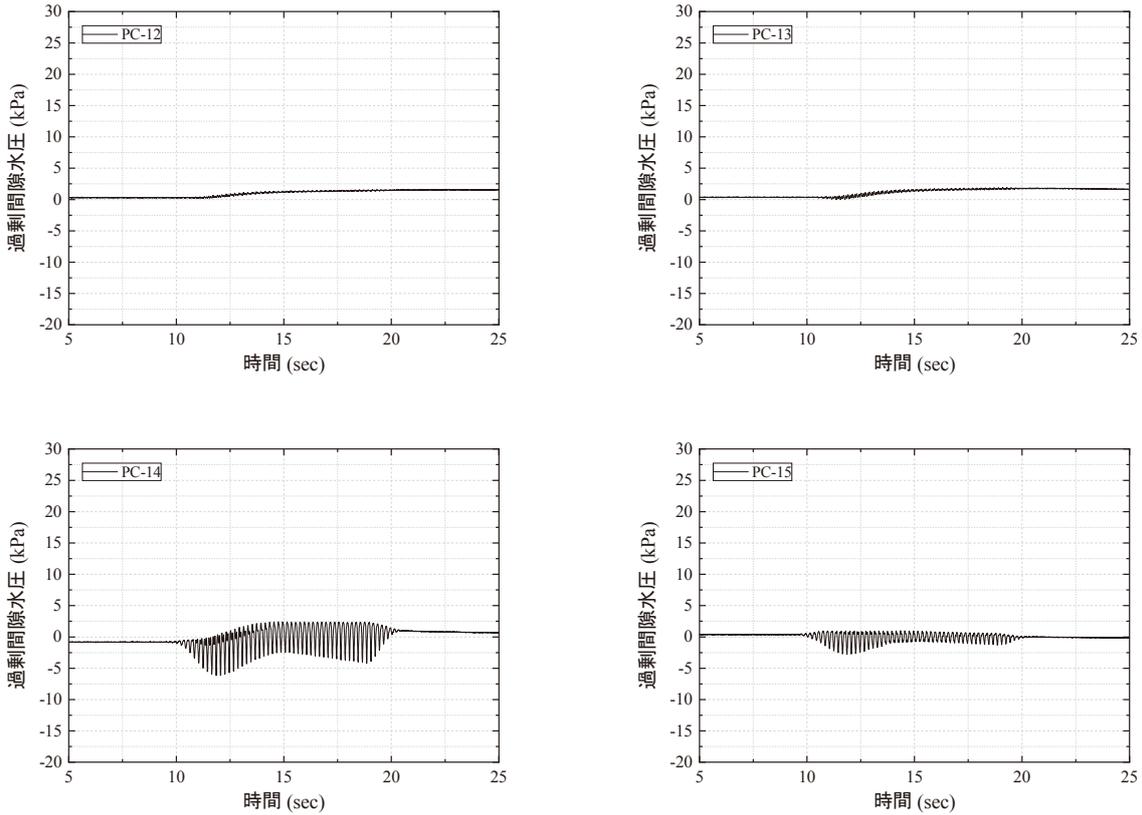


図 A85(2) Model-C における 60 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A85(2) Pore water pressure responses at 60 cm high of in Model-C (530 gal).

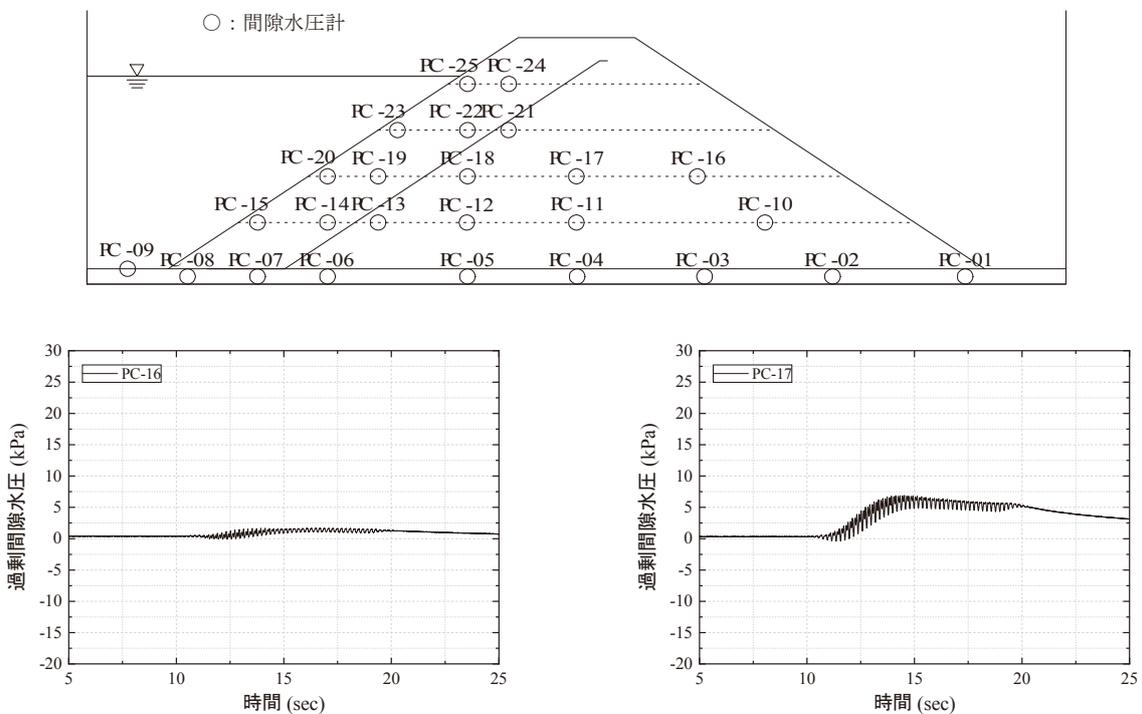


図 A86(1) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A86(1) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (530 gal).

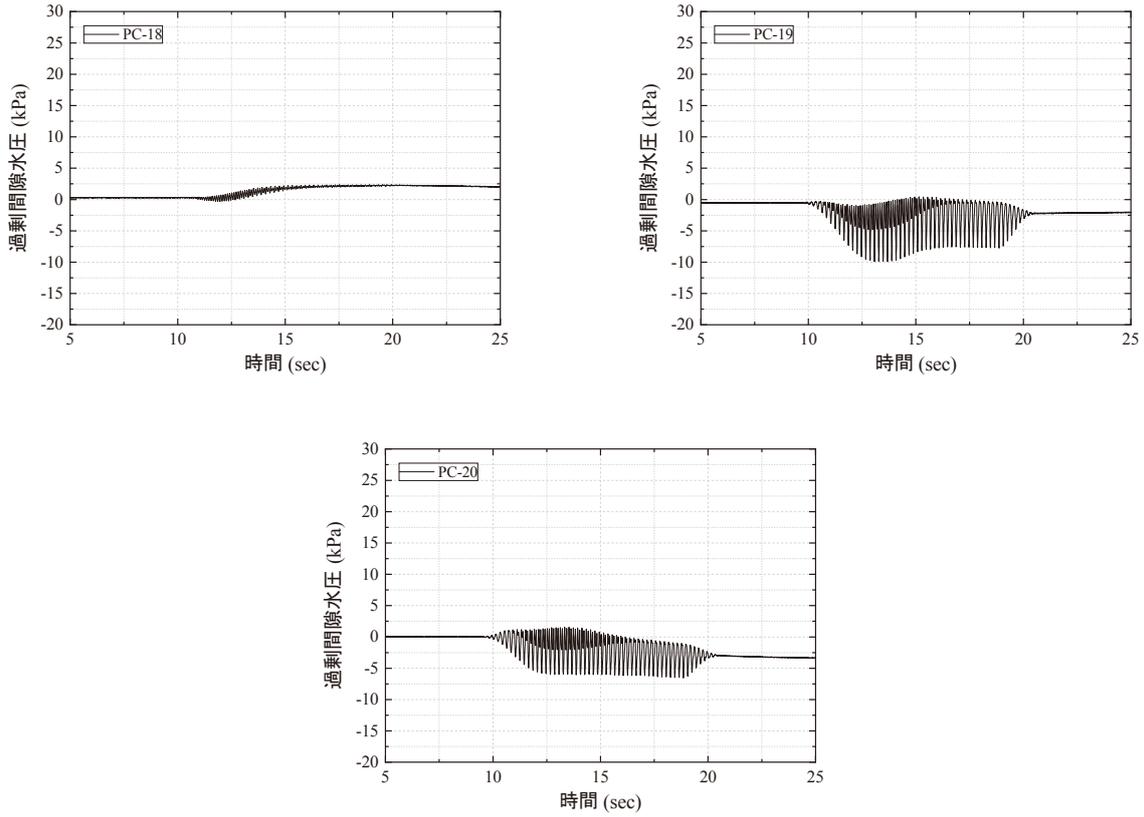


図 A86(2) Model-C における 120 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A86(2) Pore water pressure responses at 120 cm high of in Model-C (530 gal).

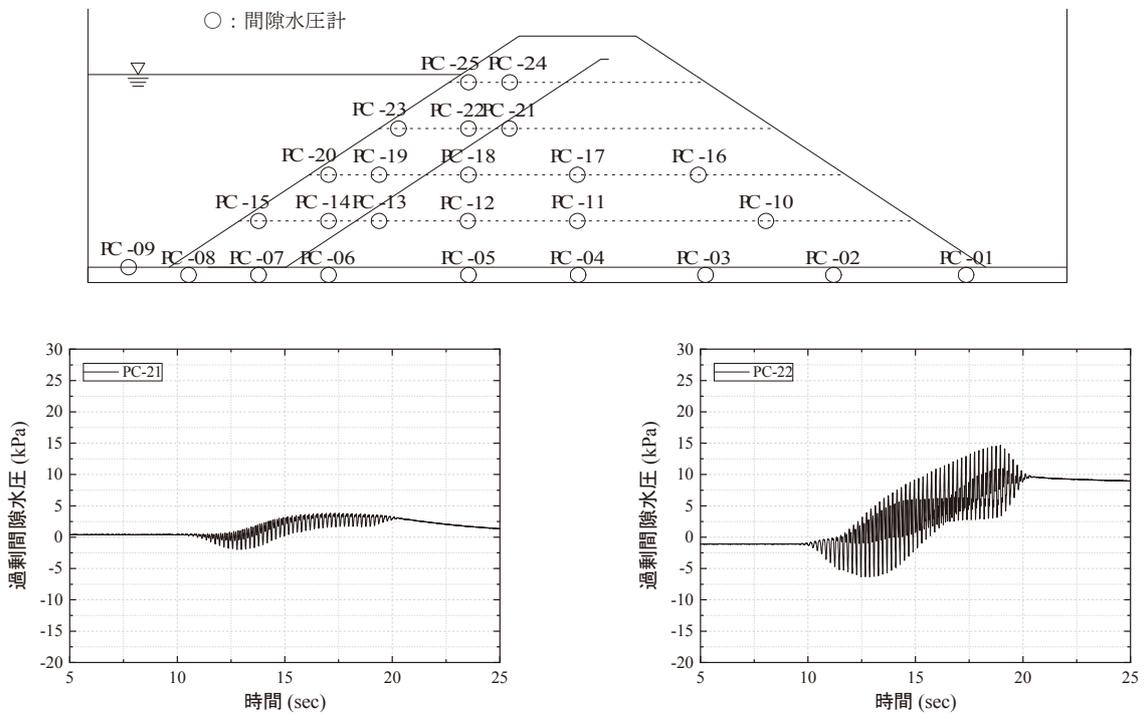


図 A87(1) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A87(1) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (530gal).

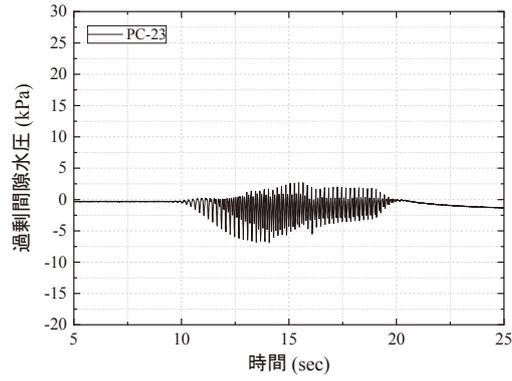


図 A87(2) Model-C における 180 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A87(2) Pore water pressure responses at 180 cm high of in Model-C (530 gal).

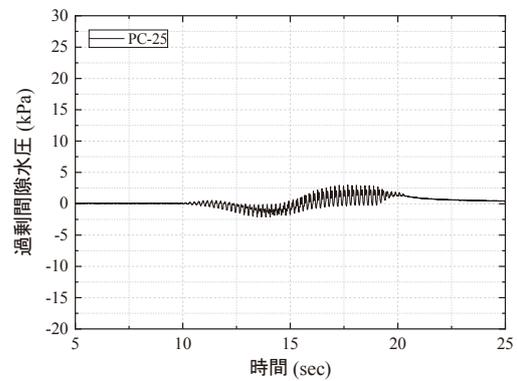
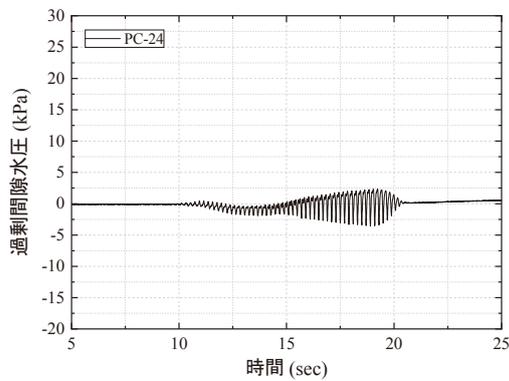
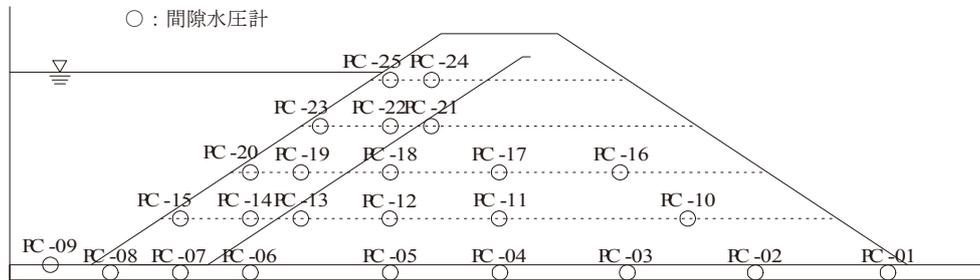
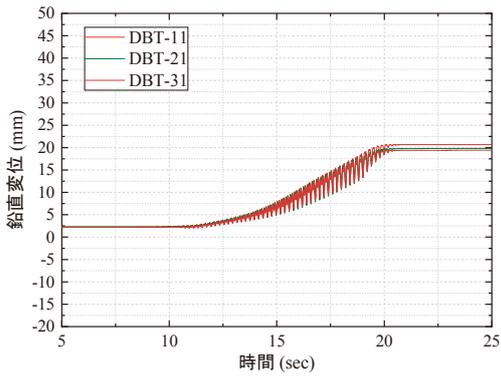
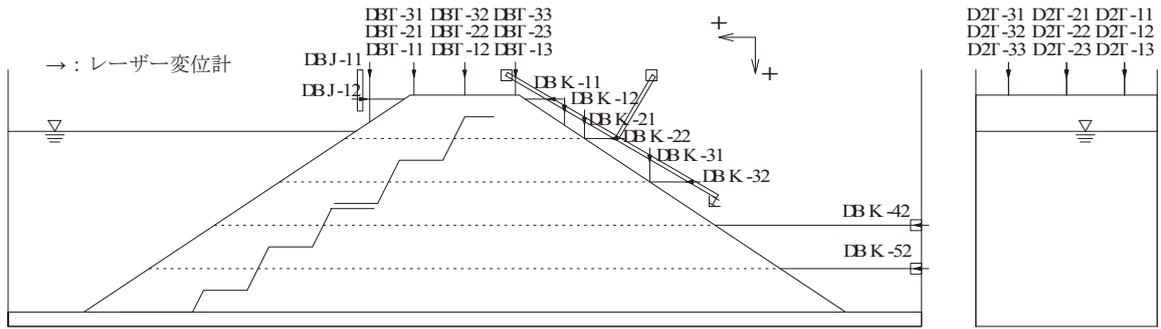
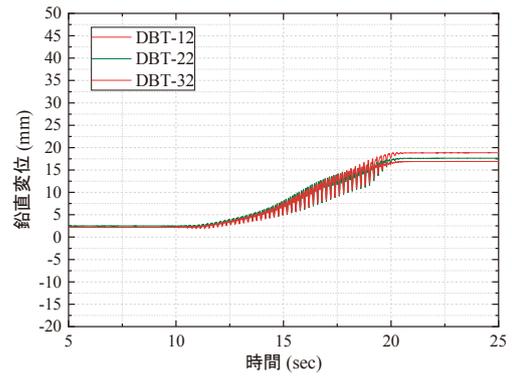


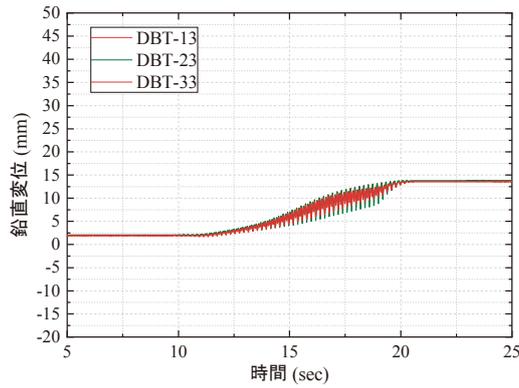
図 A88 Model-C における 240 cm 高さでの間隙水圧応答 (530 gal 加振時)  
 Fig. A88 Pore water pressure responses at 240 cm high of in Model-C (530 gal).



(a) 天端 1



(b) 天端 2



(c) 天端 3

図 A89 Model-B における天端の鉛直変位 (530 gal 加振時)

Fig. A89 Vertical deformations of the embankment crests in Model-B (530 gal).

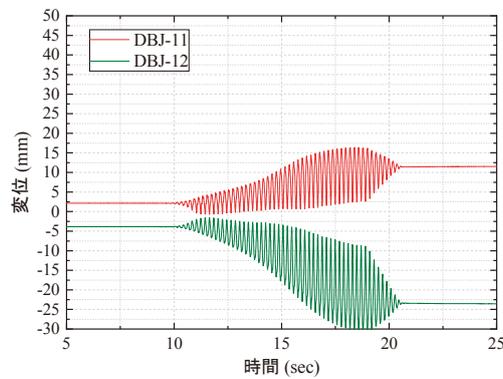


図 A90 Model-B における上流斜面の水平・鉛直変位 (530 gal 加振時)

Fig. A90 Vertical and horizontal deformations of slope of the upstream side in Model-B (530 gal).

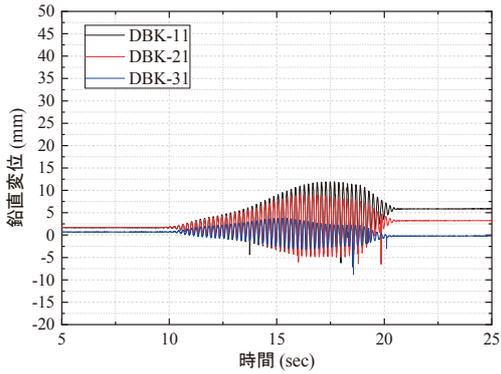
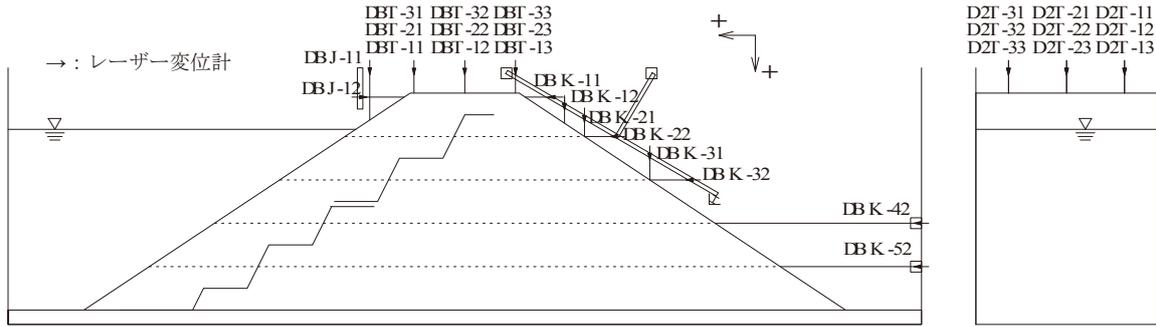


図 A91 Model-B における下流斜面の水平変位 (530gal)

Fig. A91 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-B.

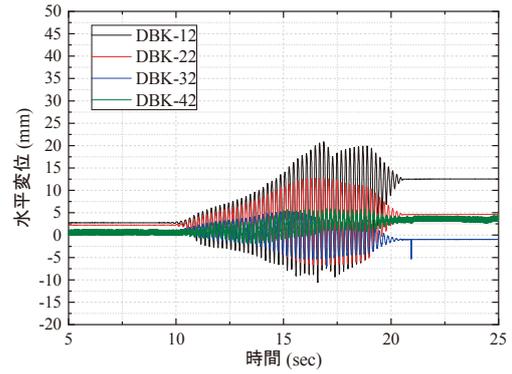
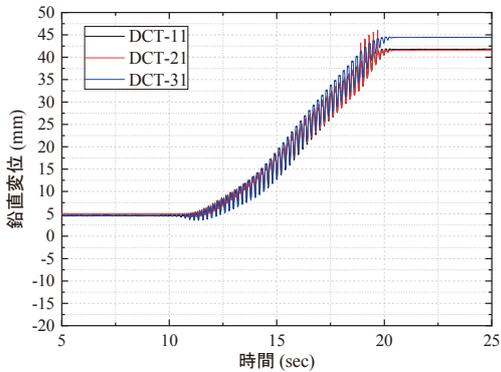
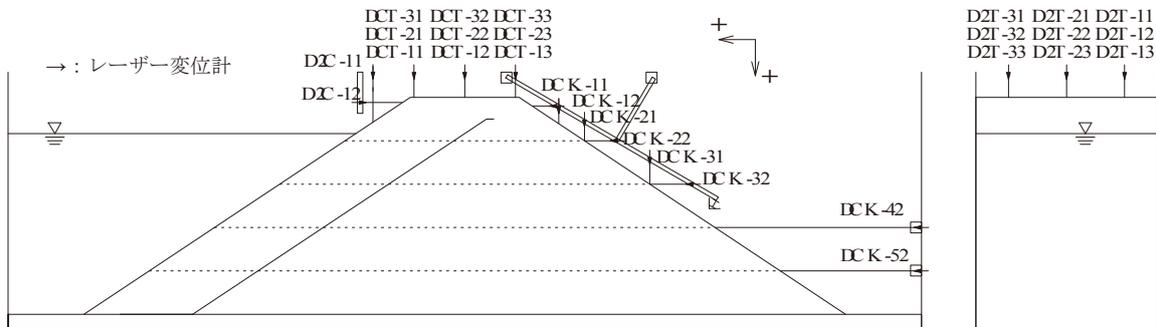
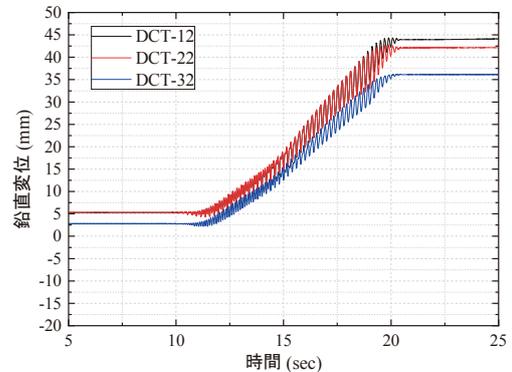


図 A92 Model-B における下流斜面の鉛直変位 (530gal)

Fig. A92 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-B.



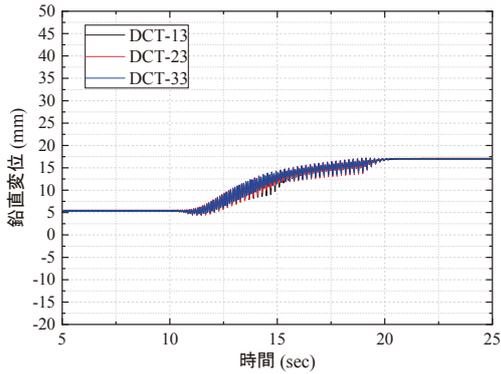
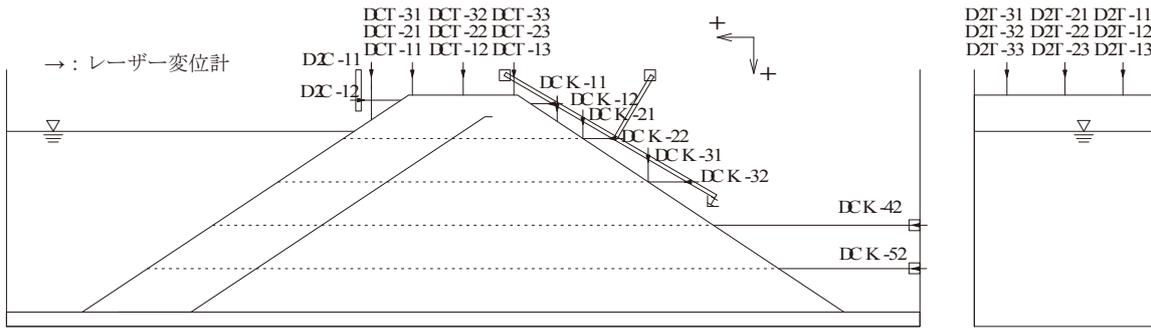
(a) 天端 1



(b) 天端 2

図 A93(1) Model-C における天端の鉛直変位 (530 gal 加振時)

Fig. A93(1) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (530 gal).



(c) 天端 3

図 A93(2) Model-C の天端の鉛直変位 (530 gal 加振時)  
Fig. A93(2) Vertical deformations of the embankment crests in Model-C (530 gal).

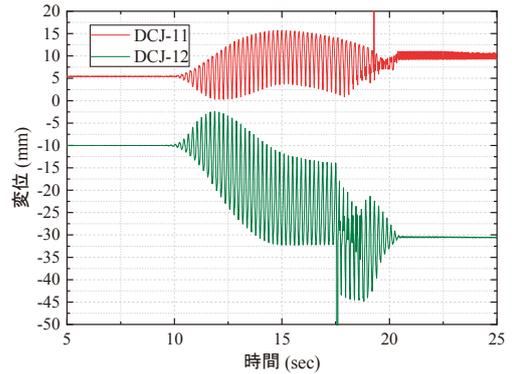


図 A94 Model-C の上流斜面の水平・鉛直変位 (530 gal 加振時)  
Fig. A94 Vertical and horizontal deformations of upstream side in Model-C (530 gal).

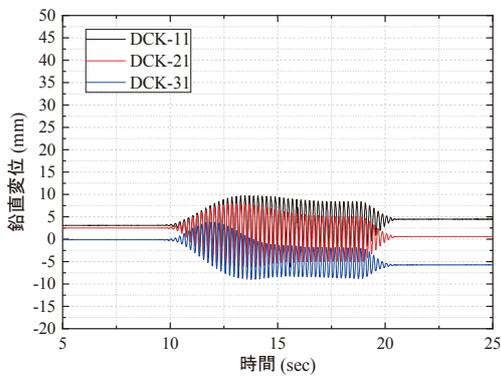


図 A95 Model-C における下流斜面の水平変位 (530 gal 加振時)  
Fig. A95 Horizontal deformations of slope of the downstream side in Model-C (530 gal).

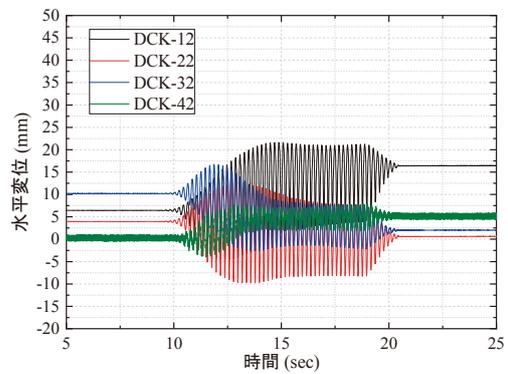


図 A96 Model-C における下流斜面の鉛直変位 (530 gal 加振時)  
Fig. A96 Vertical deformations of slope of the downstream side in Model-C (530 gal).