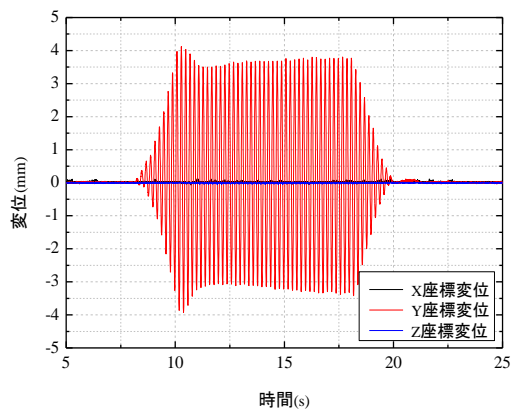
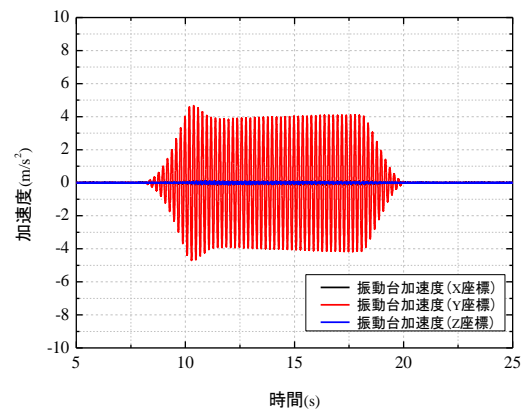


4.2 レベル 2 地震動による加振実験結果

図 59～89 にレベル 2 加振時の前刃金工法および遮水シート工法による堤体の時刻歴データをそれぞれ示す。図 27 に示したが、レベル 2 地震動相当とした 400gal による入力信号を震動台に与え、結果として、471gal の加速度が震動台に発生した。レベル 1 地震動による加振では、前刃金工法および遮水シート工法ともに、顕著な動的挙動が見られなかったが、レベル 2 地震動によるケースでは、応答加速度は、震動台と基盤内の加速度振幅はほぼ等しく、また、上流方向 (+) と下流方向 (-) の加速度に有意差はないこと、また、天端において沈下、下流法面上部においては上流側へ変形し、中央から底部にかけて下流側へはらみ出しが生じていること等が確認された。遮水シート工法では、加振中に天端にクラックが生じ、加振終了後、幅 10mm 程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数残留した。このため、後述に詳しいが、シート周辺の応答加速度、振動特性から発生メカニズムを検討した。なお、各時刻歴データからも分かるように、破壊的な挙動は確認されず、結果として、加振後に両堤体とも決壊や漏水は生じなかった。



(a) 変位



(b) 加速度

図 59 震動台の変位及び加速度 (400gal 加振時)

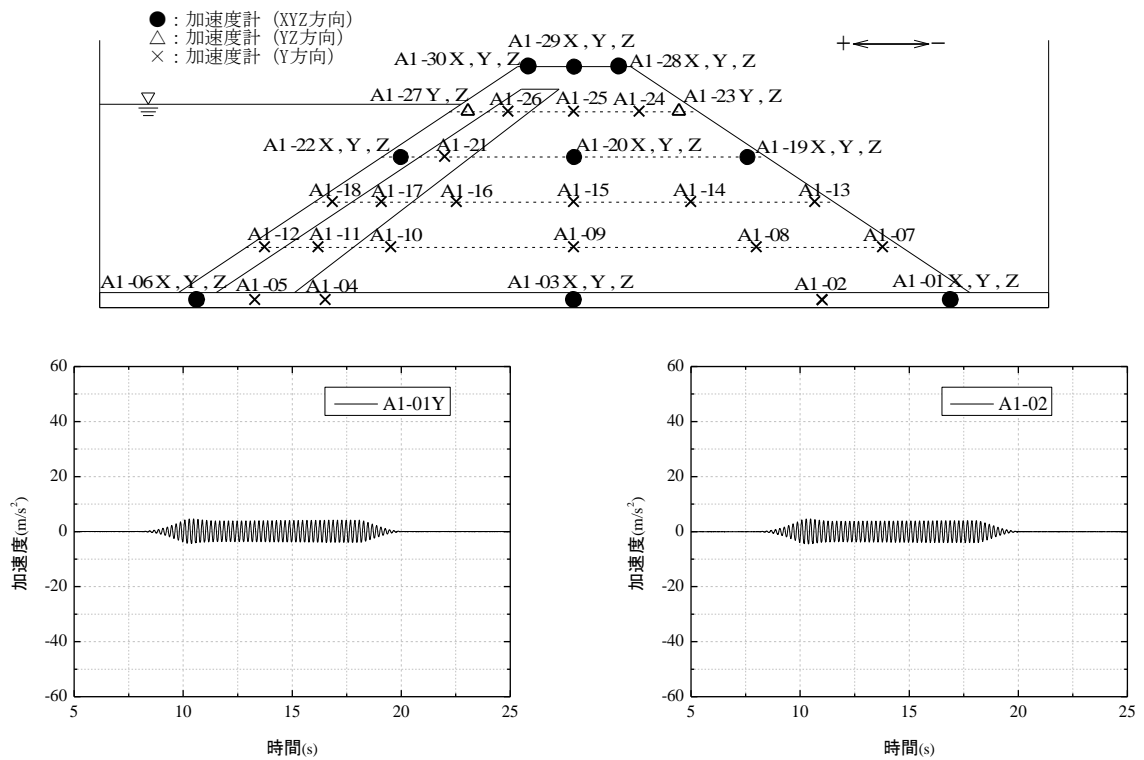


図 60 前刃金工法における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (400gal 加振時)

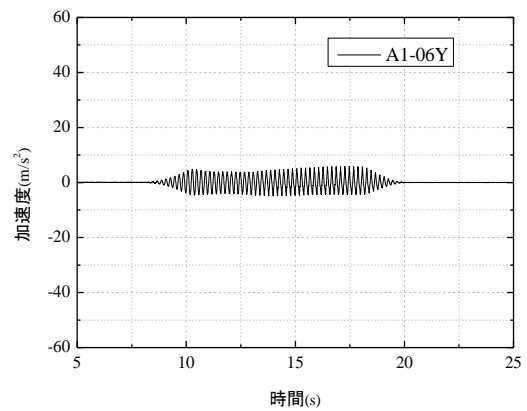
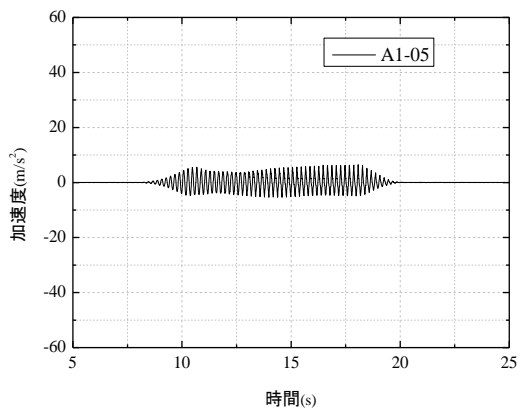
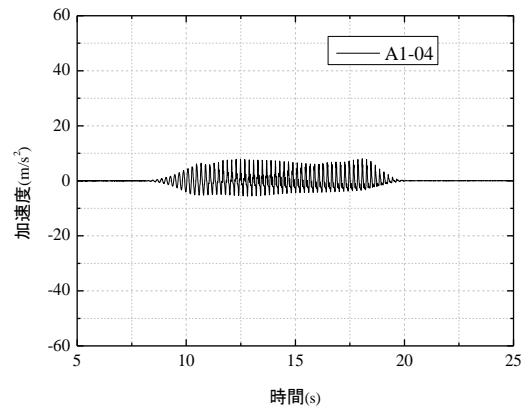
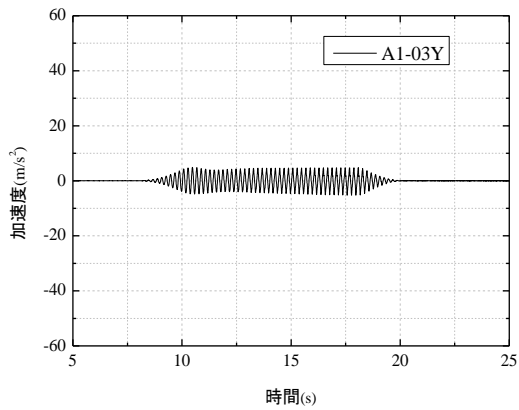
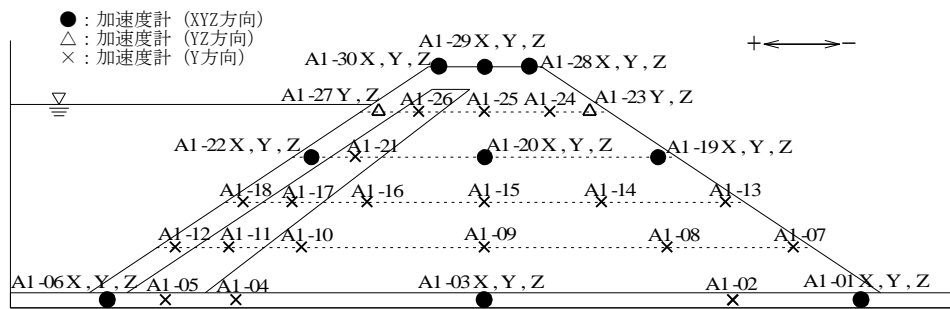


図 60 (2) 前刃金工法における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (400gal 加振時)

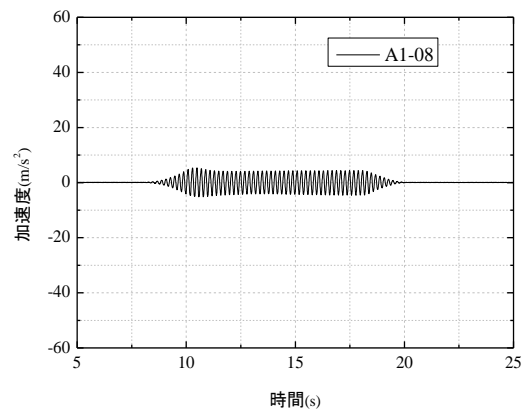
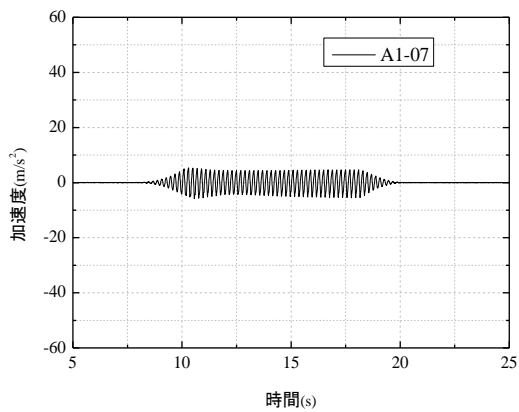


図 61 (1) 前刃金工法における 60cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

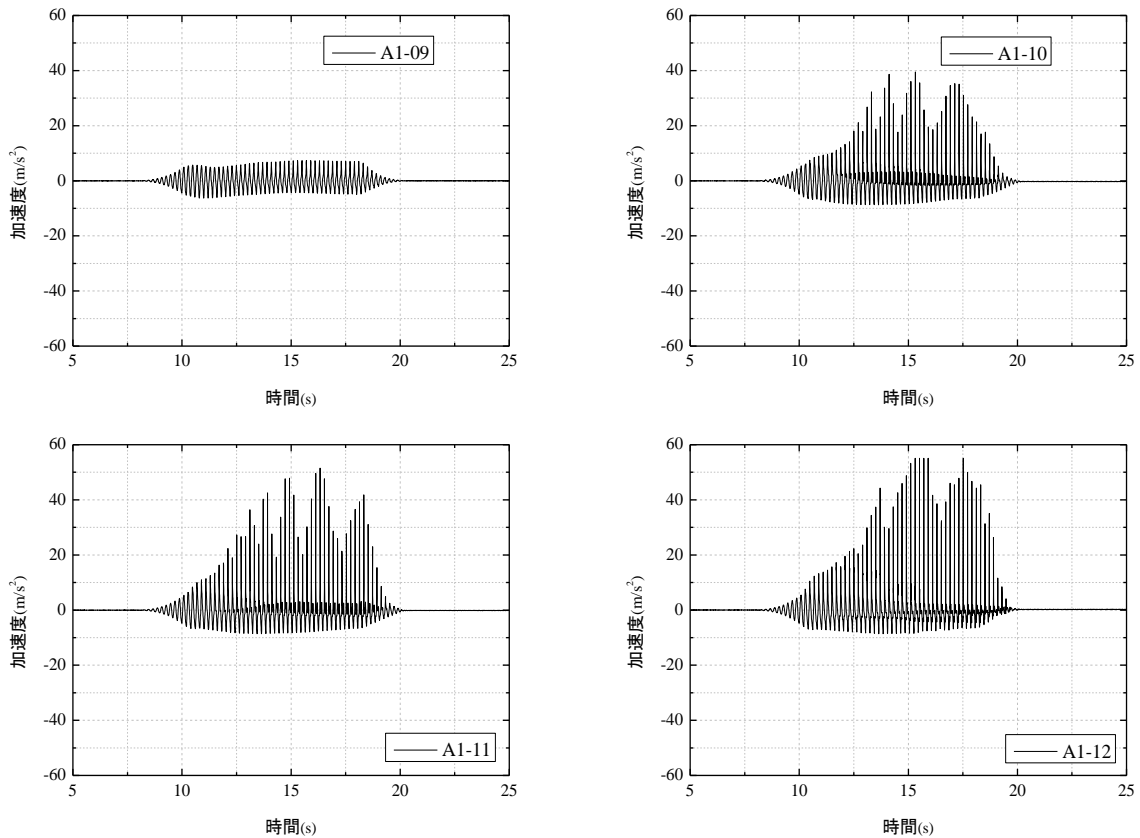
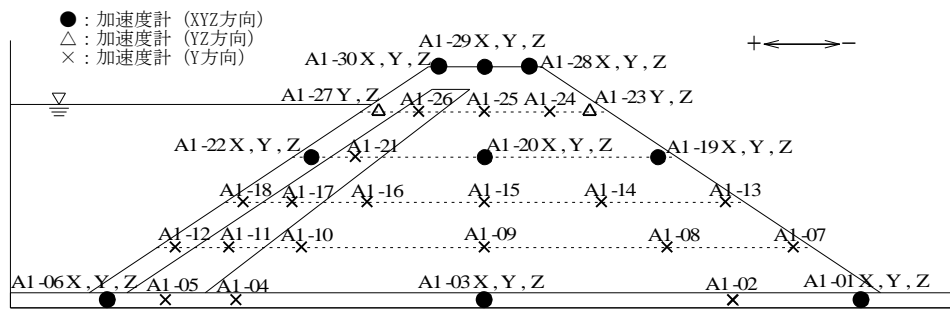


図 61(2) 前刃金工法における 60cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

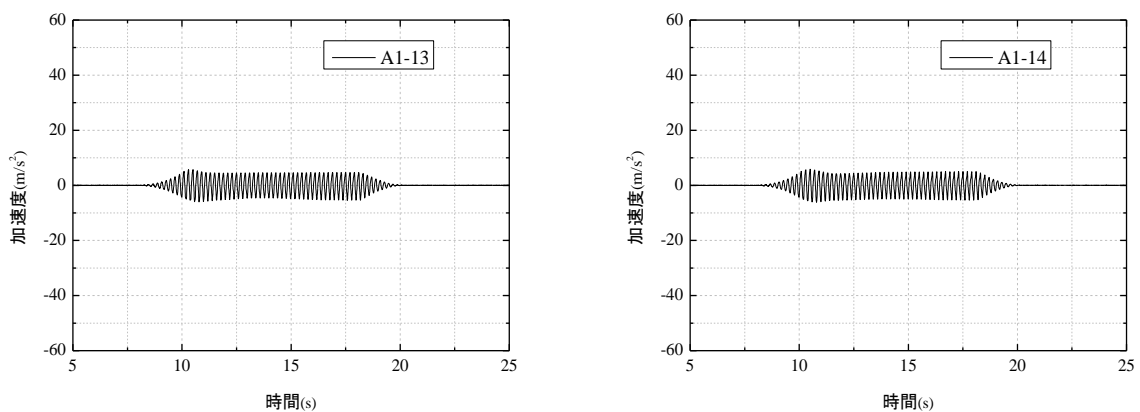


図 62(1) 前刃金工法における 120cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

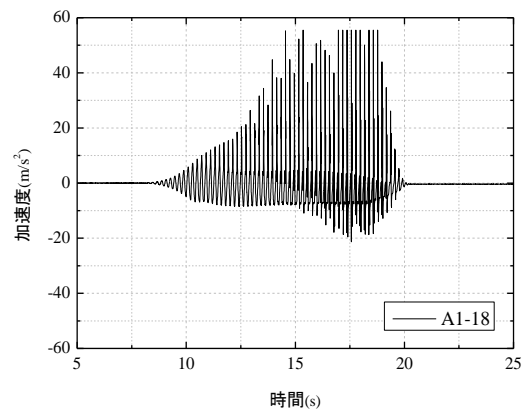
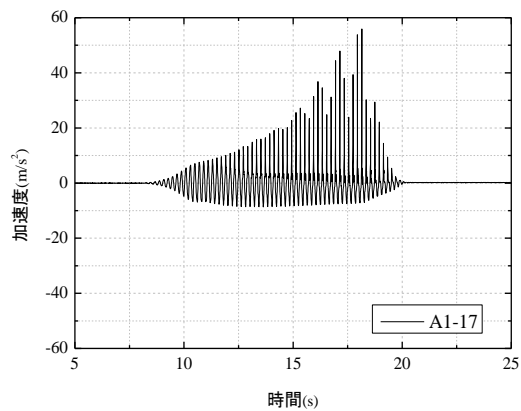
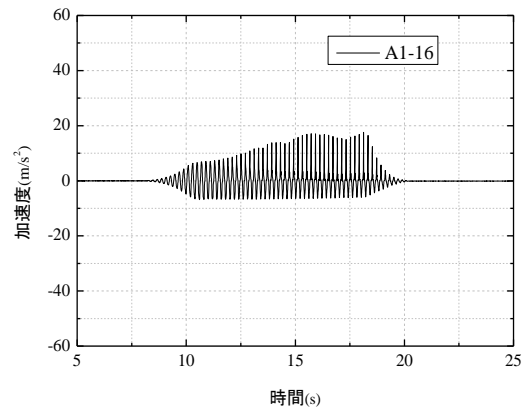
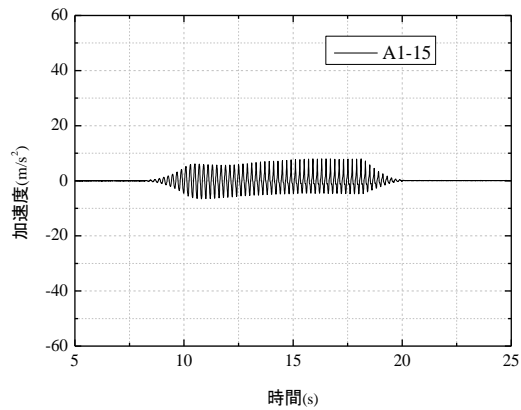
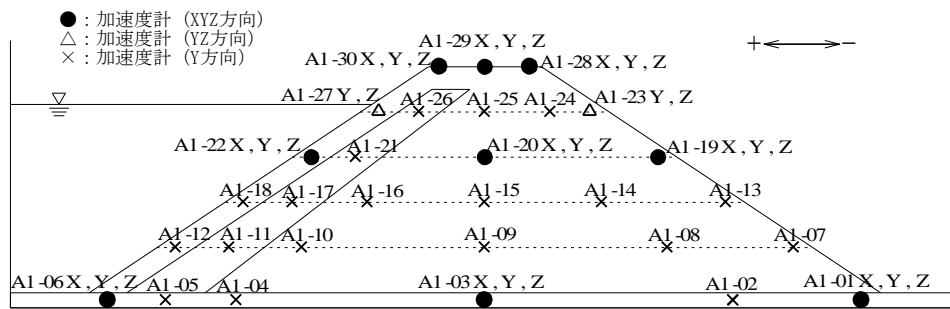


図 62(2) 前刃金工法における 120cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

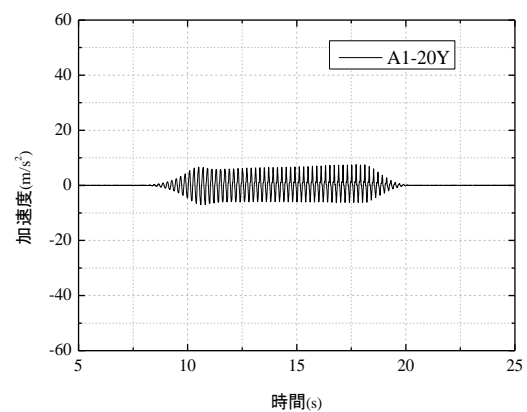
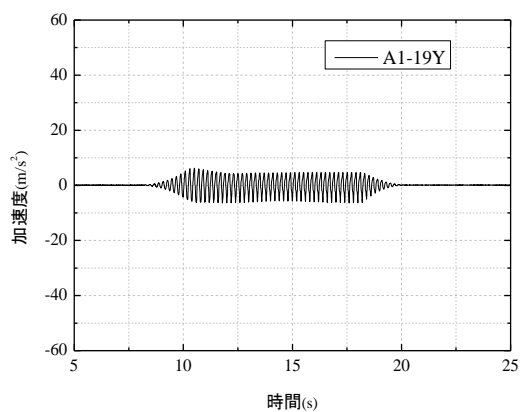


図 63(1) 前刃金工法における 180cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

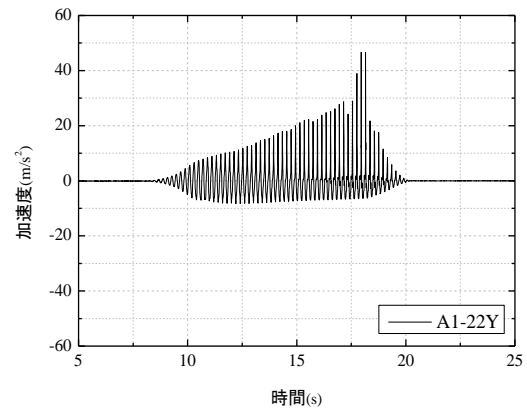
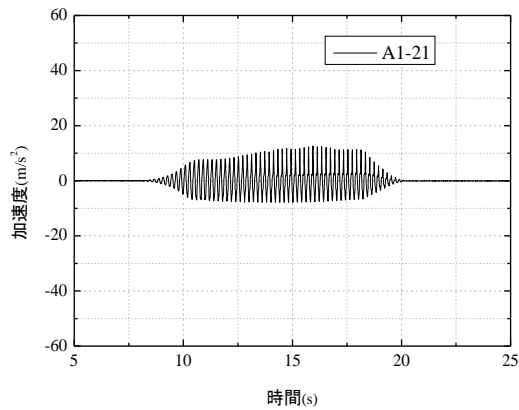
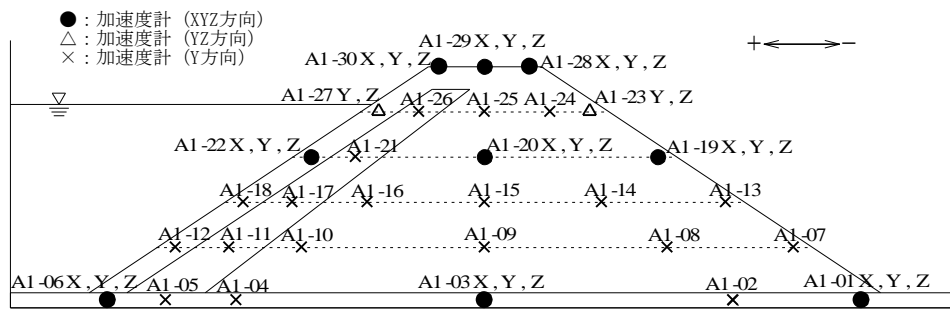


図 63(2) 前刃金工法における 180cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

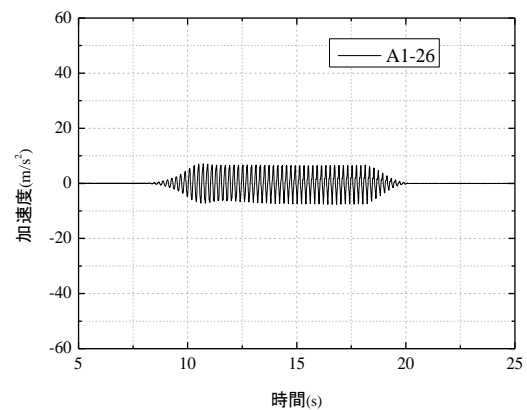
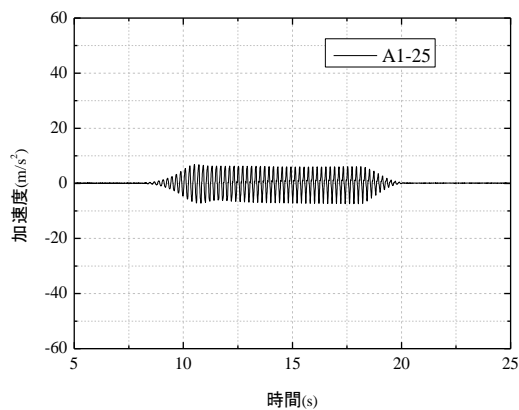
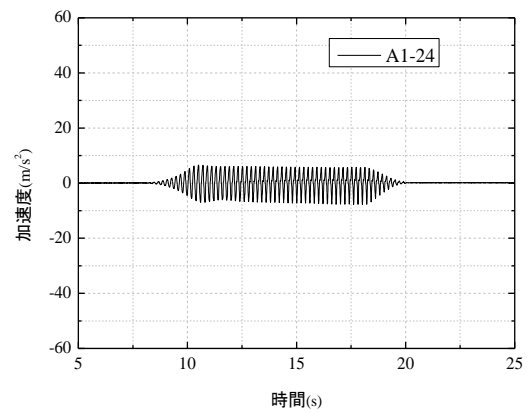
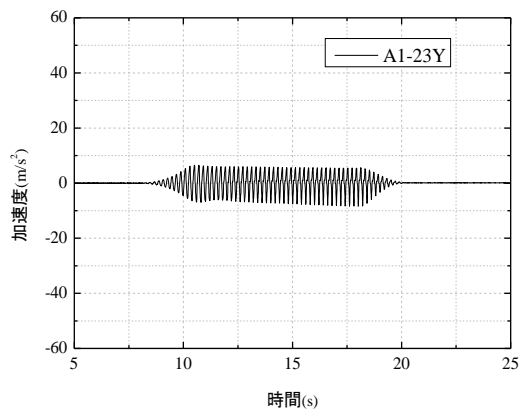


図 64(1) 前刃金工法における 240cm から天端高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

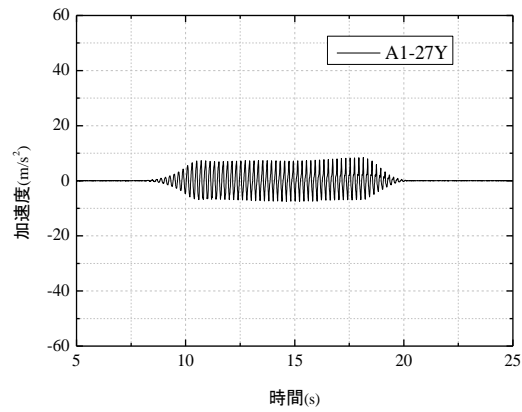
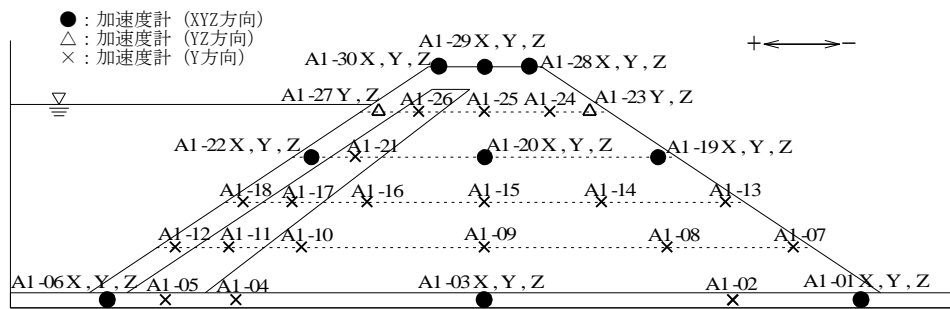


図 64(2) 前刃金工法における 240cm での加速度応答 (400gal 加振時)

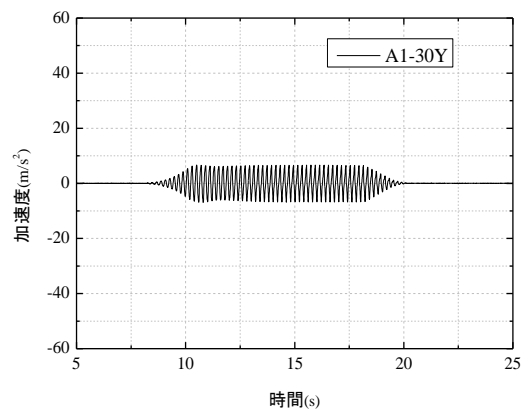
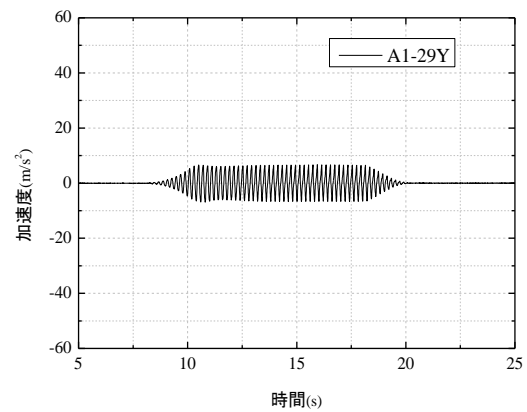
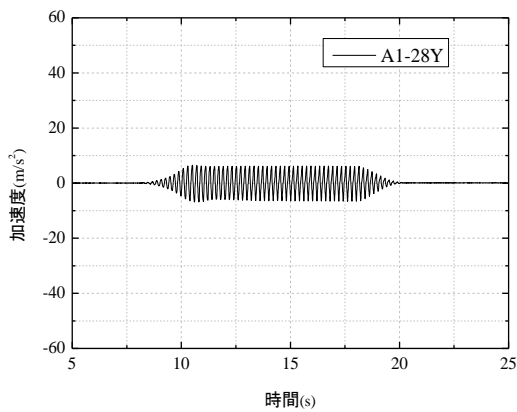


図 65 前刃金工法における天端での加速度応答 (400gal 加振時)

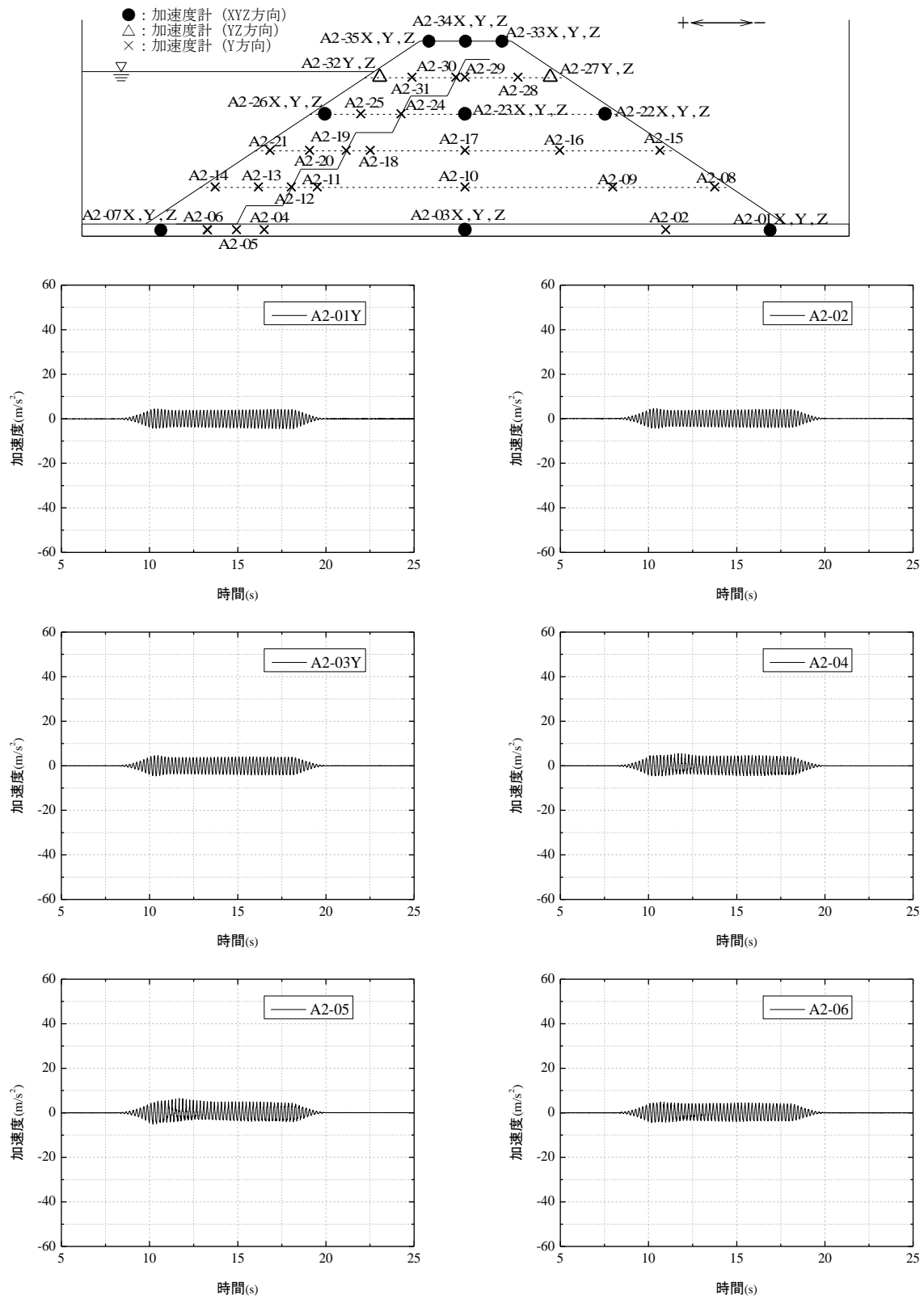


図 66(1) 遮水シート工法における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (400gal 加振時)

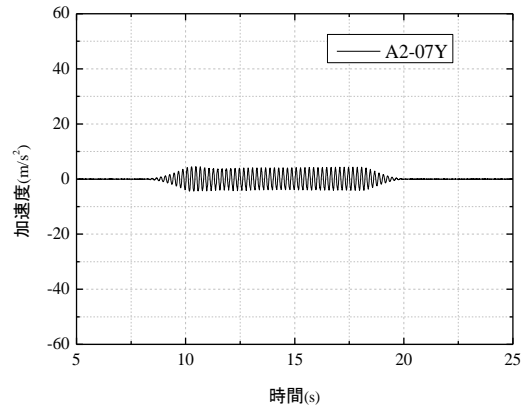
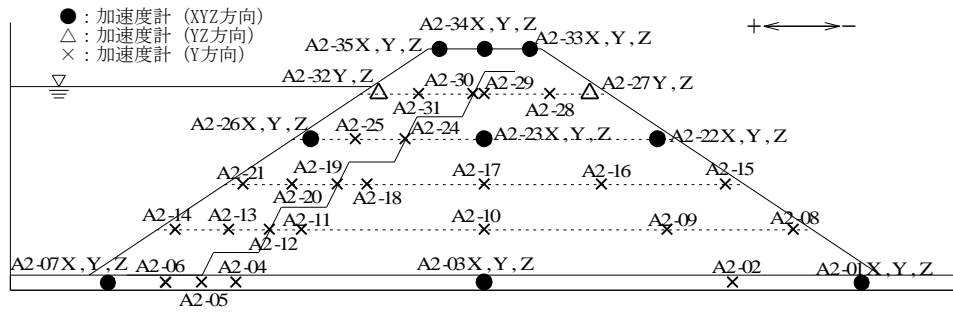


図 66(2) 遮水シート工法における基盤内 (-10cm) の加速度応答 (400gal 加振時)

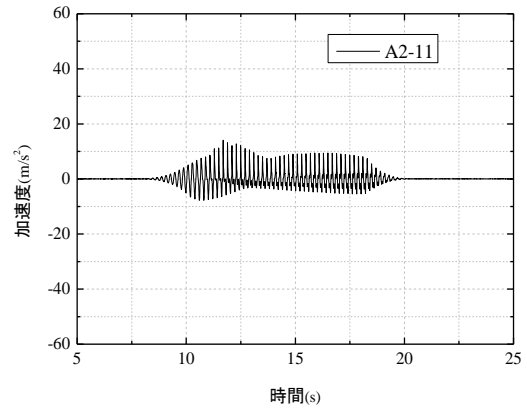
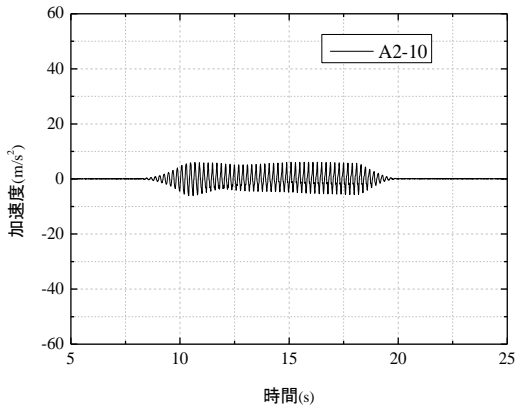
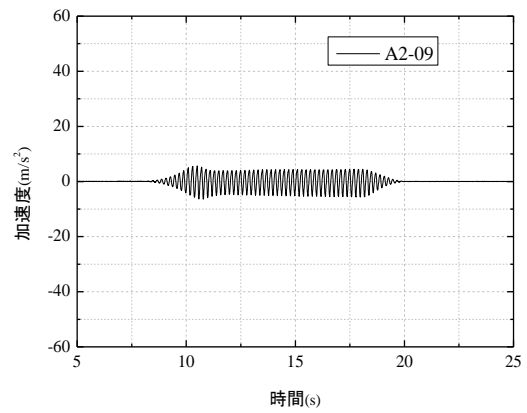
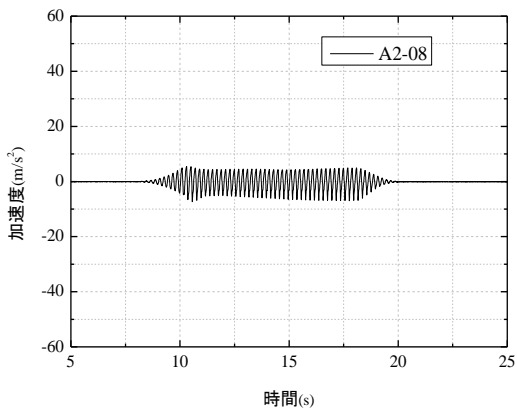


図 67(1) 遮水シート工法における 60cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

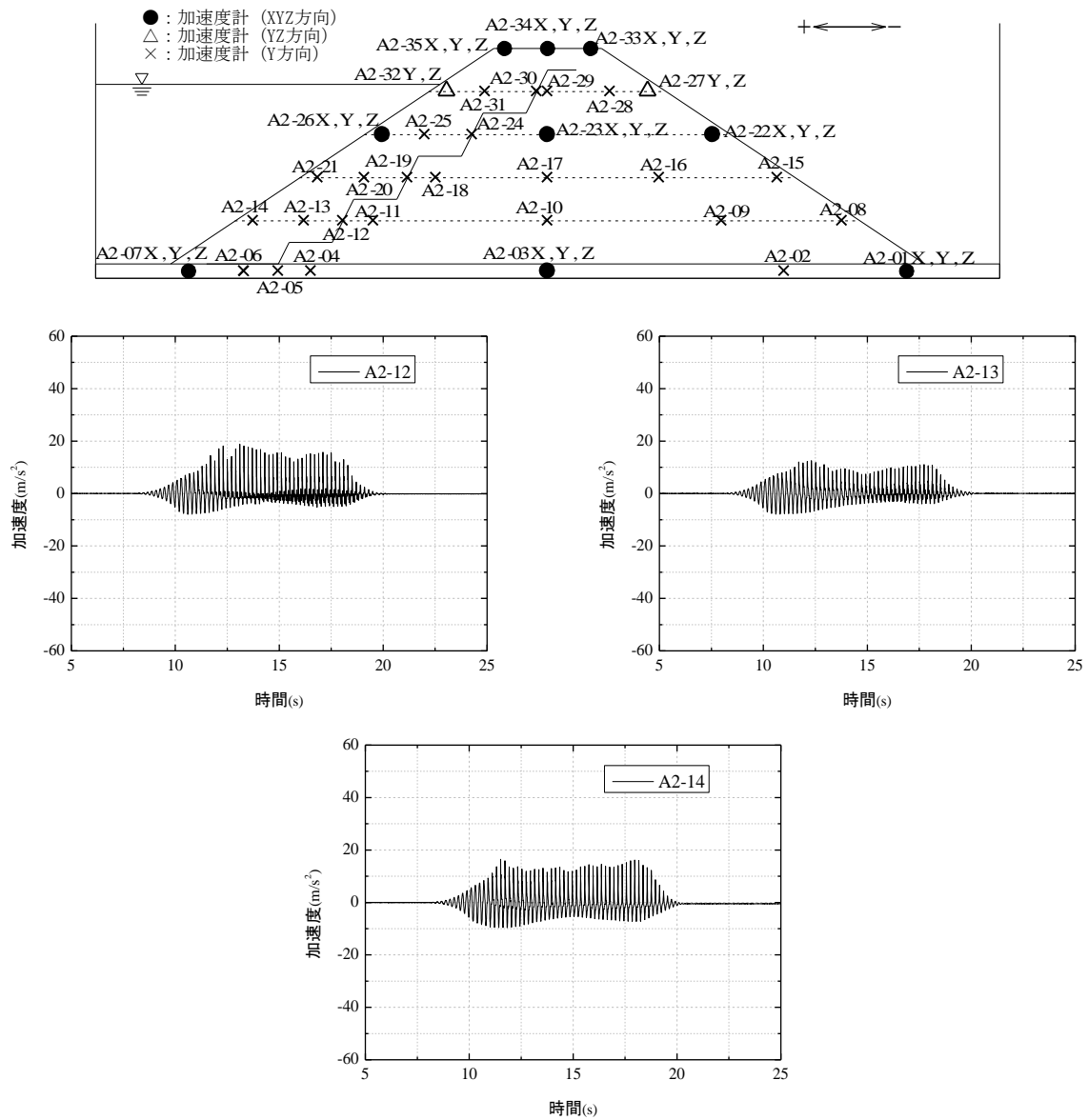


図 67(2) 遮水シート工法における 60cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

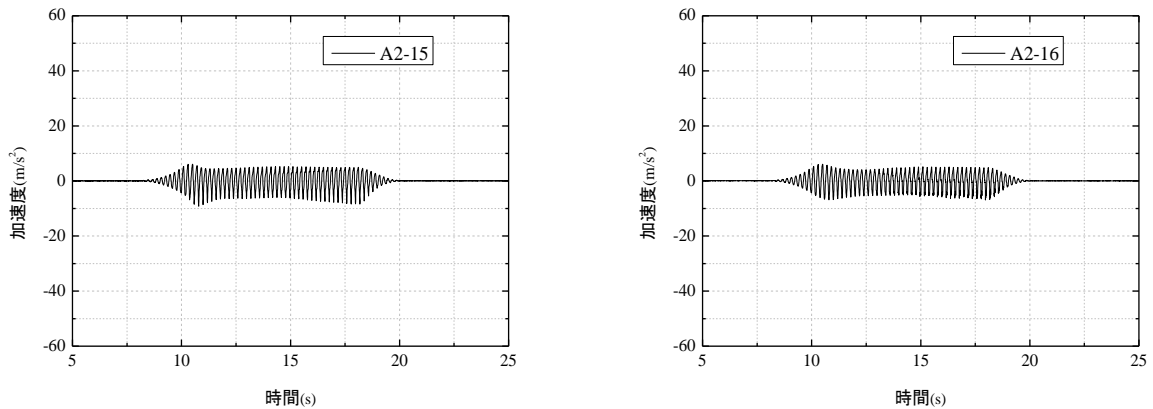


図 68(1) 遮水シート工法における 120cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

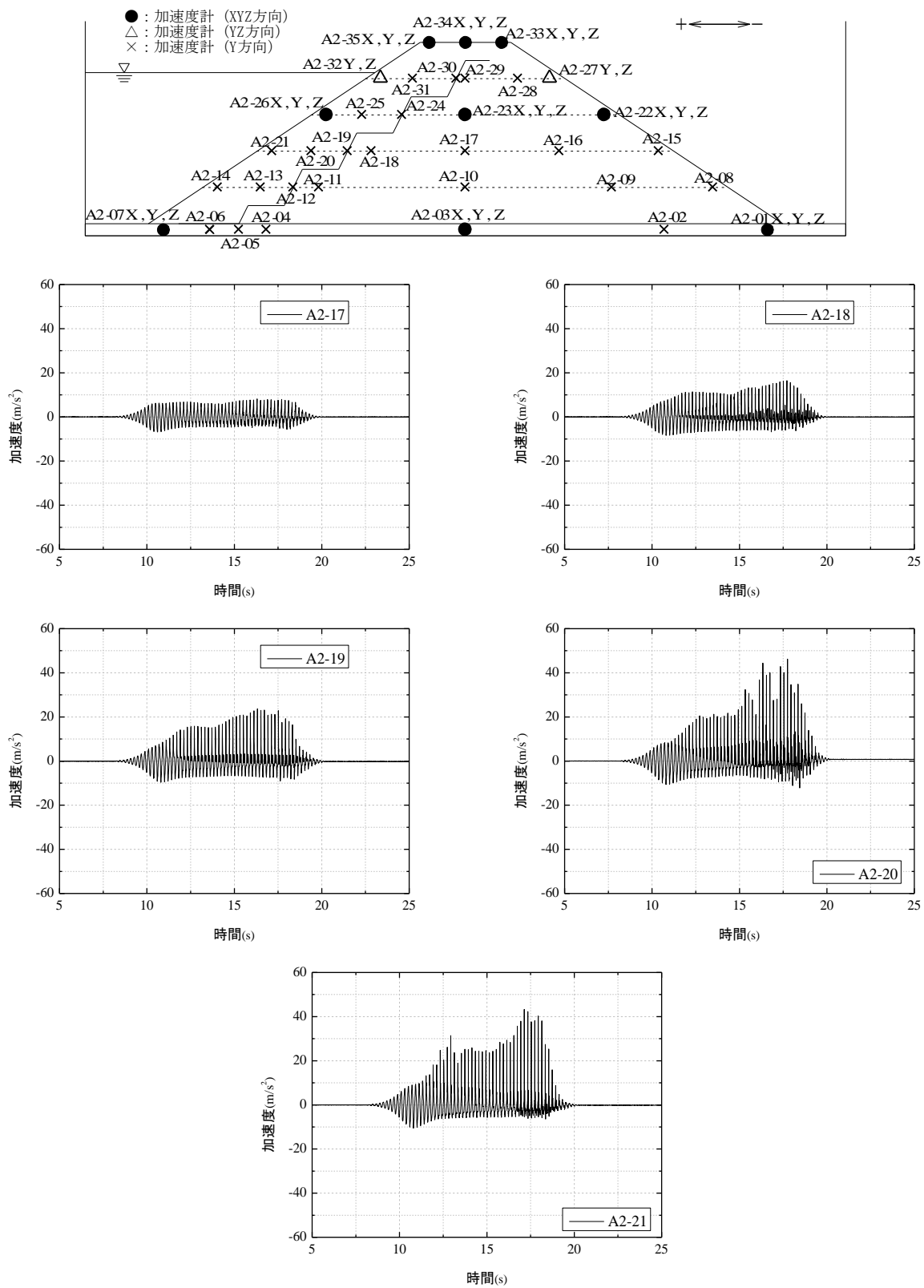


図 68(2) 遮水シート工法における 120cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

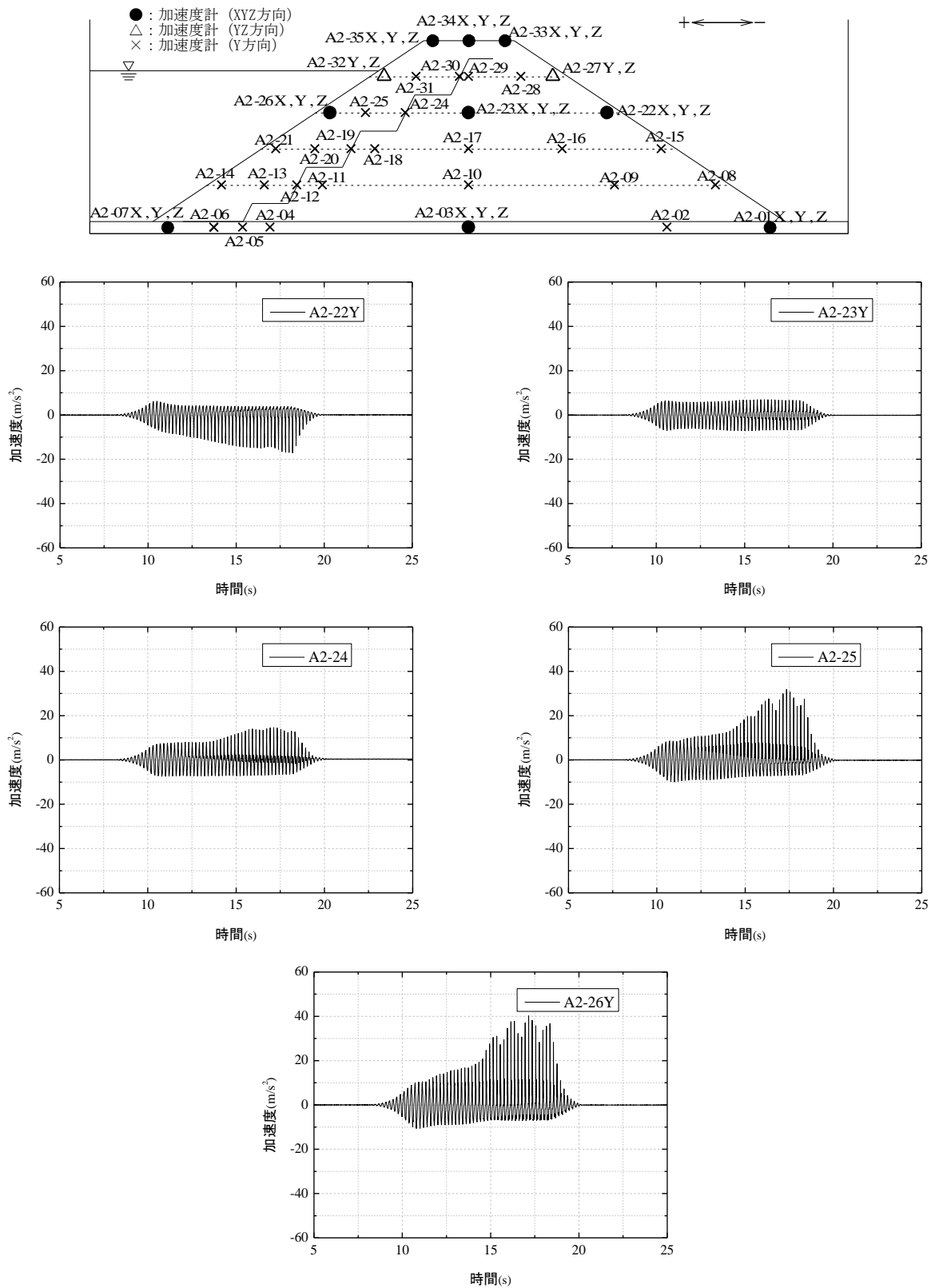


図 69 遮水シート工法における 180cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

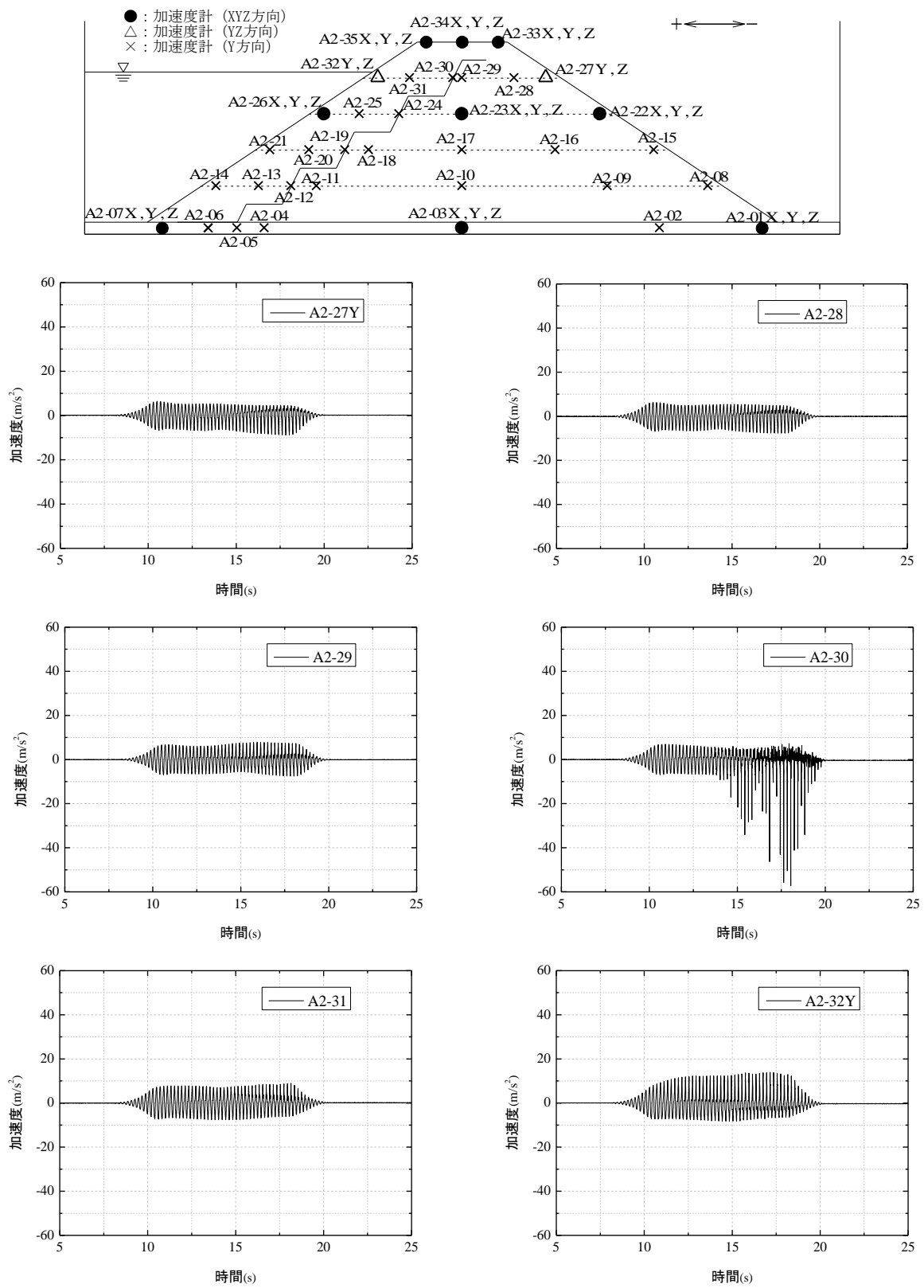


図 70 遮水シート工法における 240cm 高さでの加速度応答 (400gal 加振時)

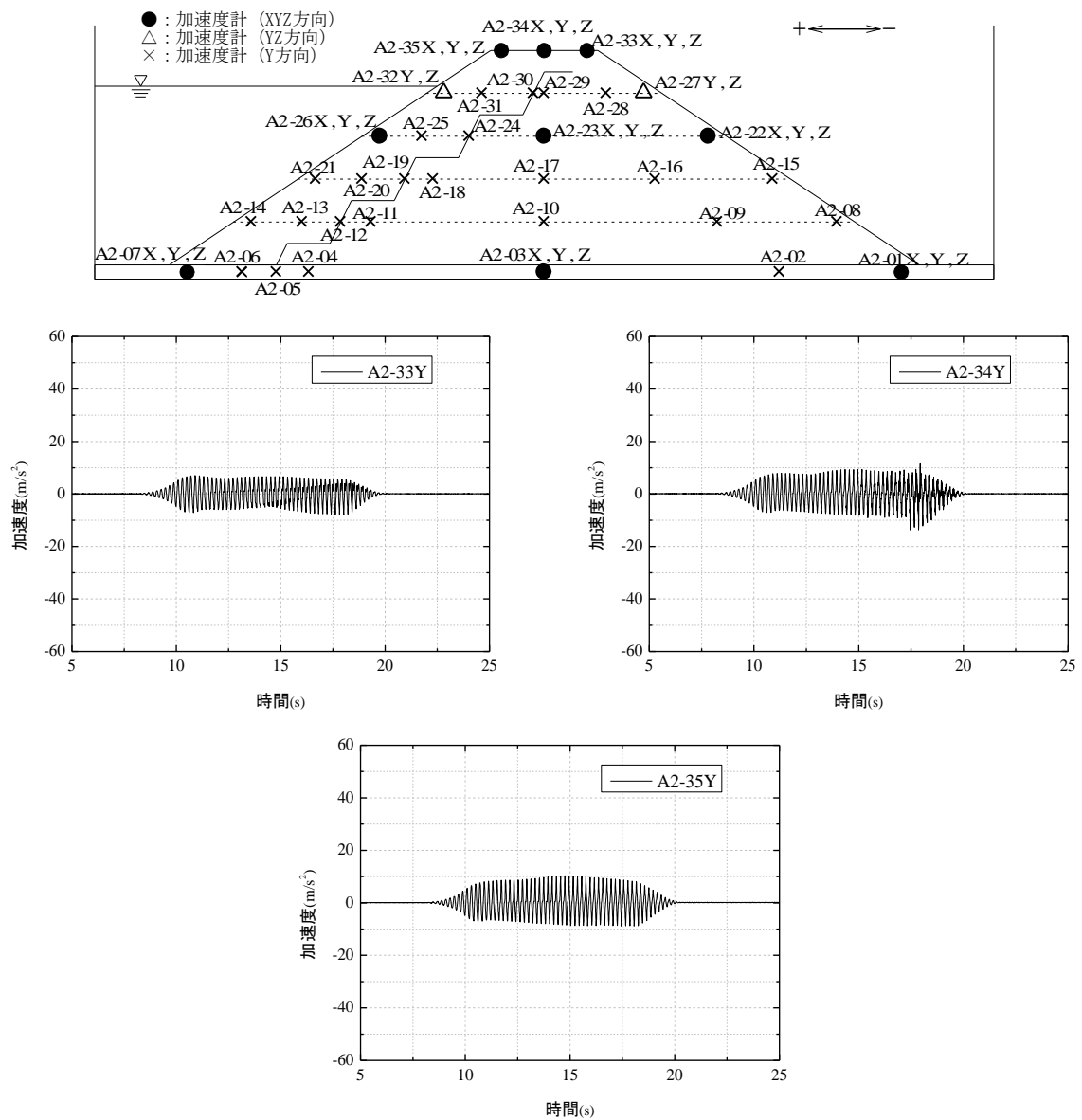


図 71 遮水シート工法における天端での加速度応答（400gal 加振時）

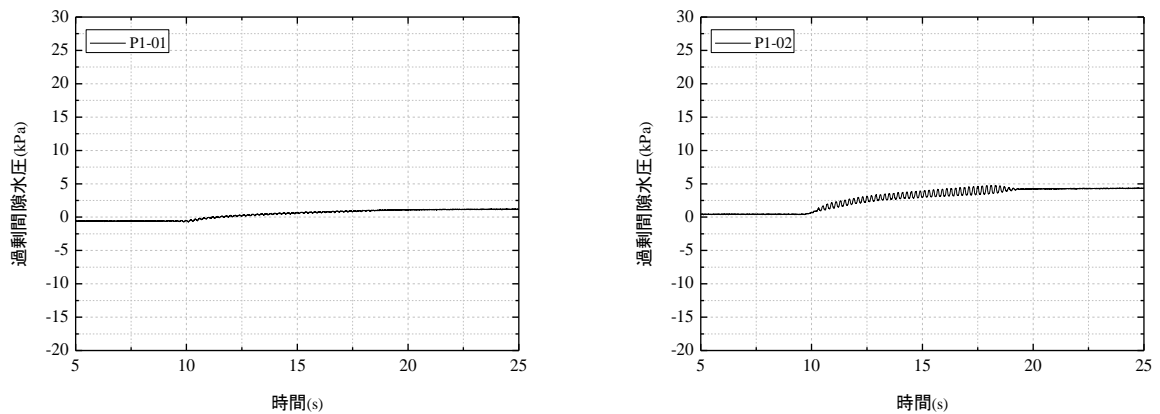


図 72(1) 前刃金工法における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答（400gal 加振時）
（センサー箇所は次ページに表示）

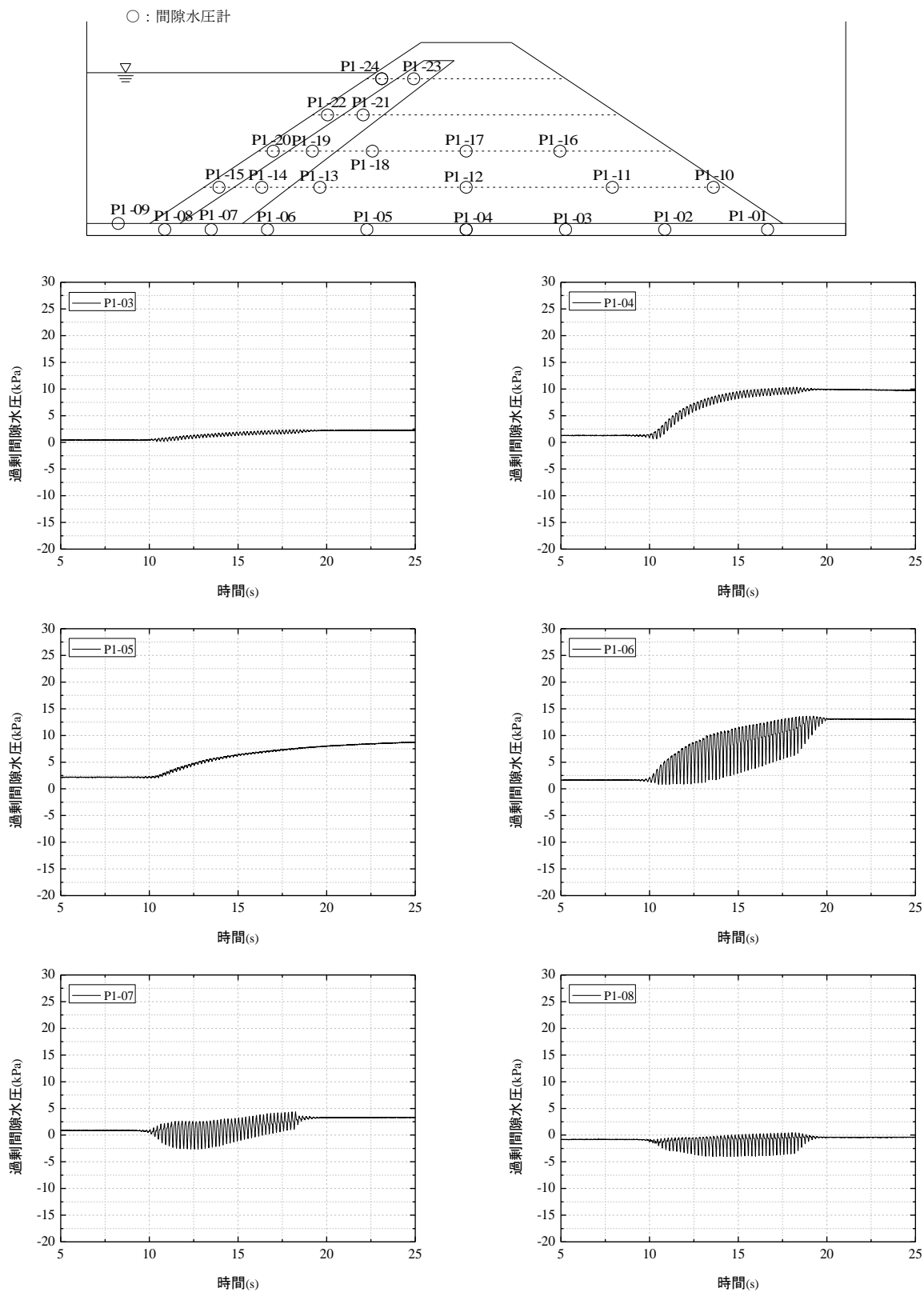


図 72(2) 前刃金工法における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (400gal 加振時)

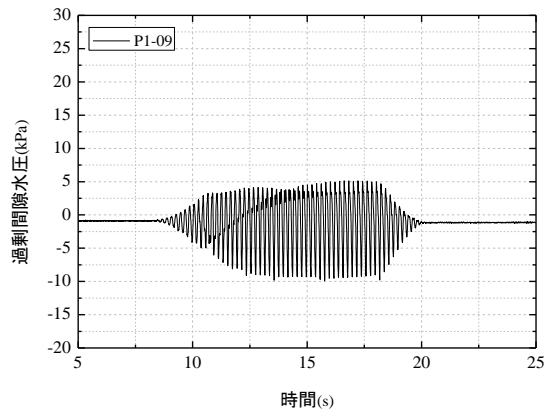
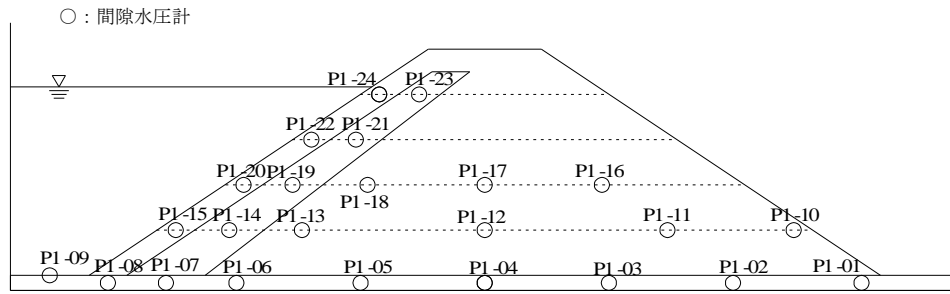


図 72(3) 前刃金工法における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (400gal 加振時)

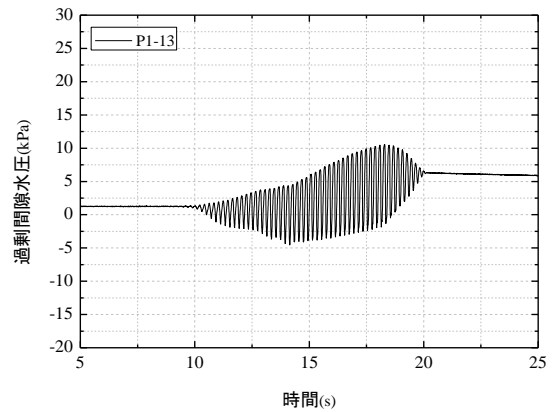
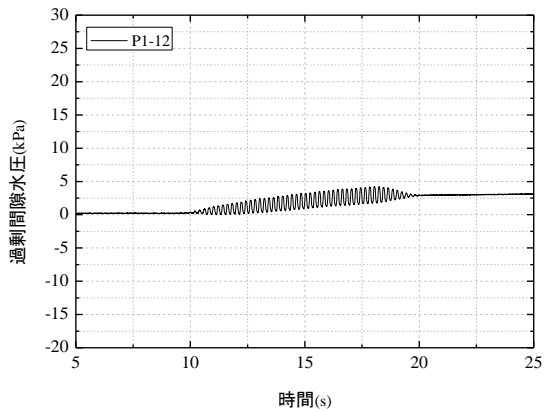
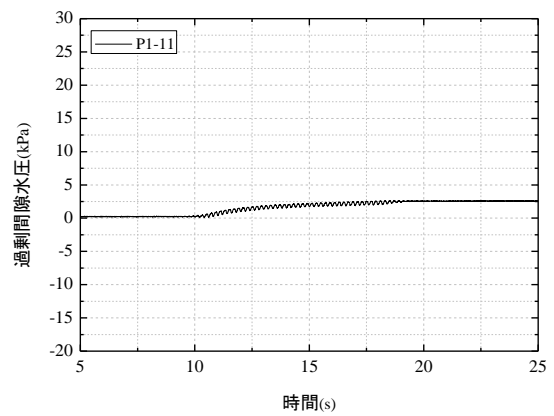
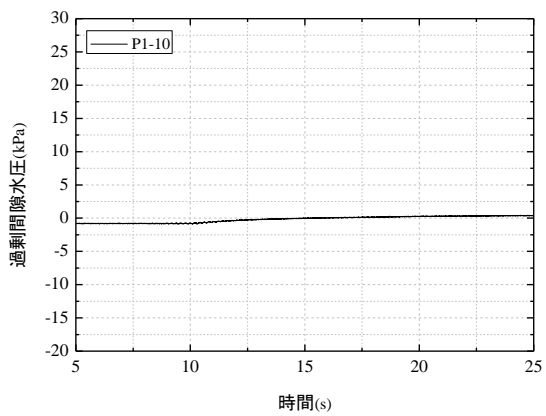


図 73(1) 前刃金工法における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

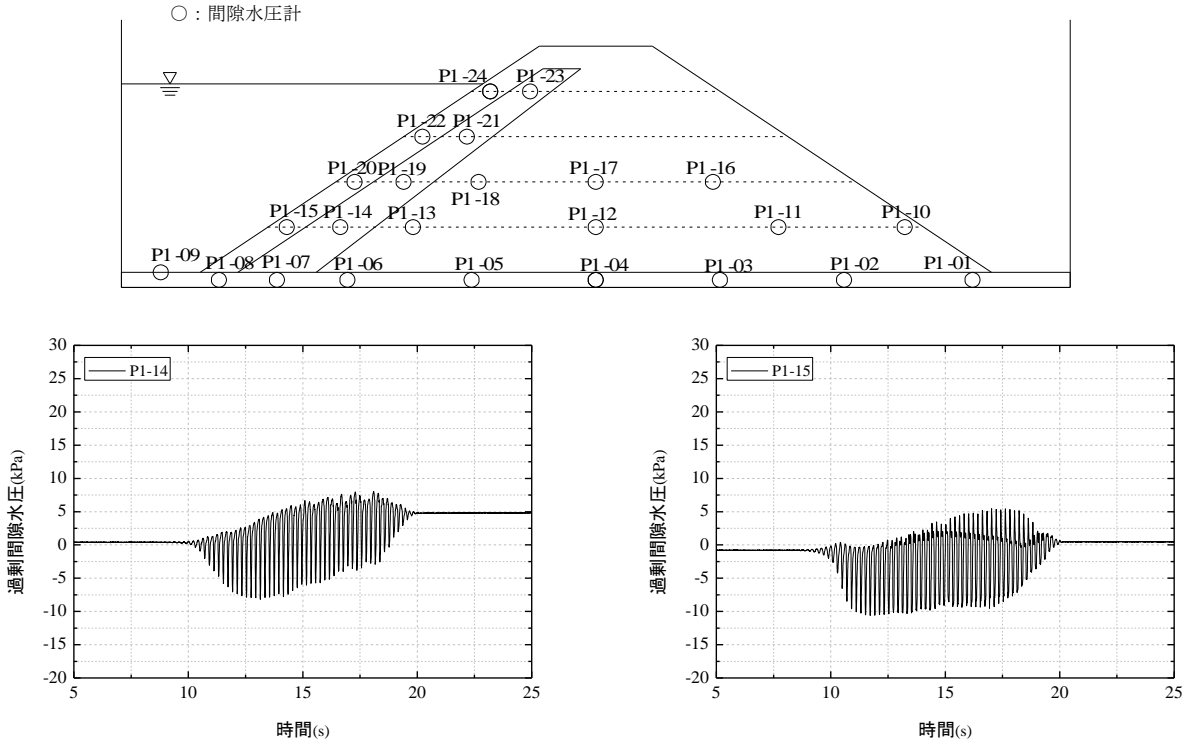


図 73(2) 前刃金工法における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

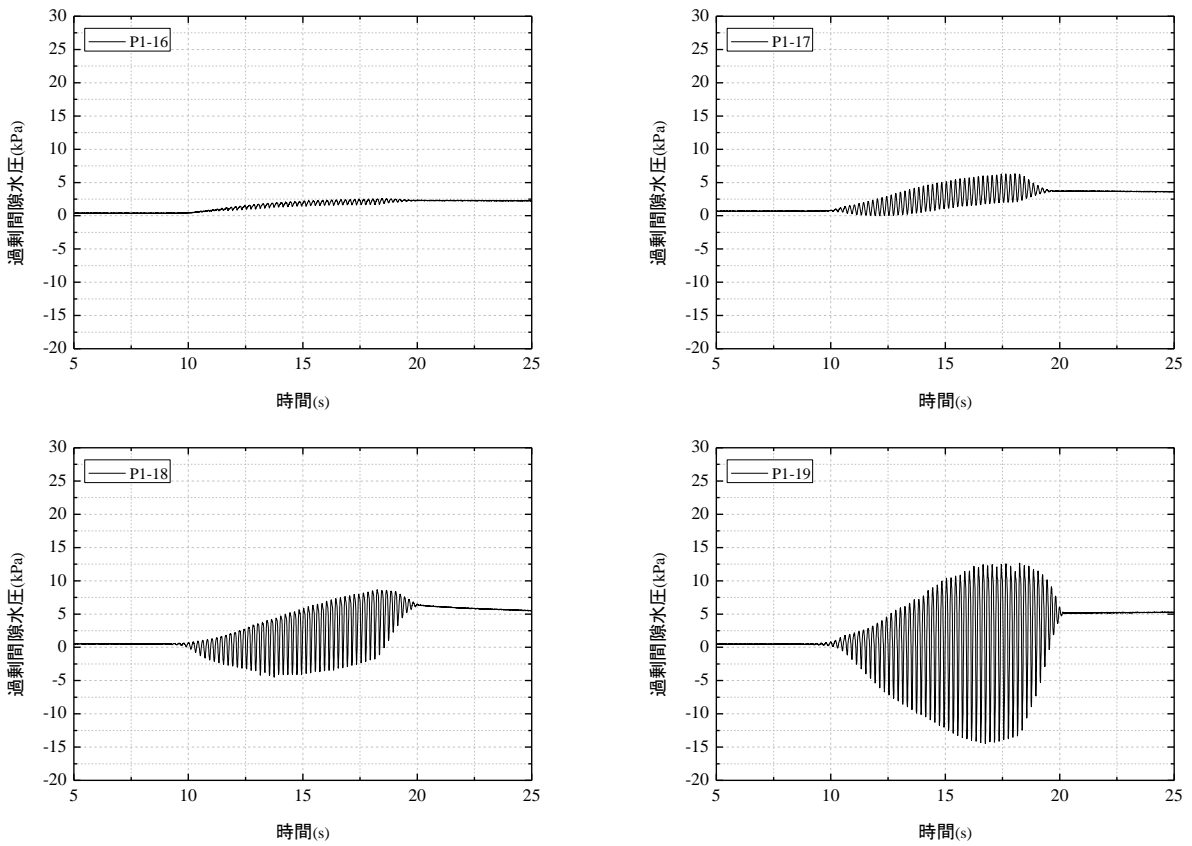


図 74(1) 前刃金工法における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

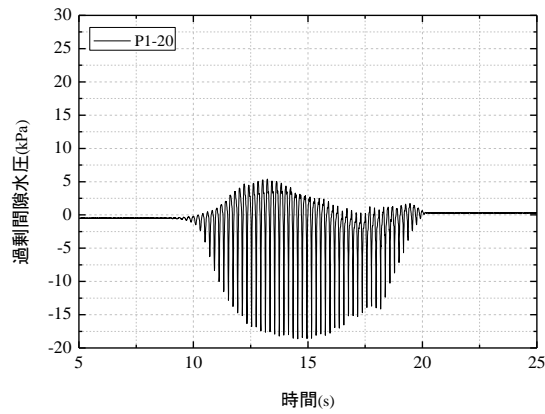
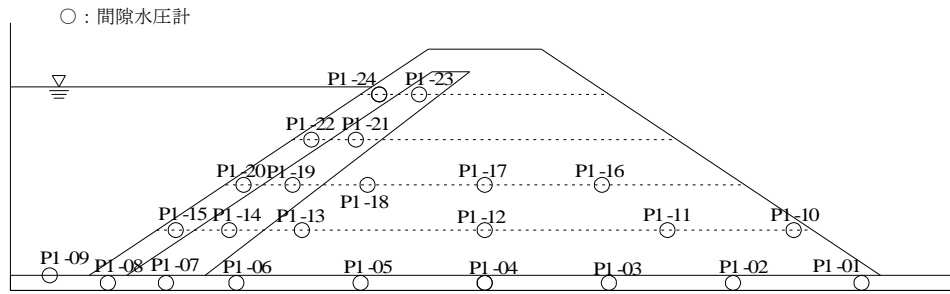


図 74(2) 前刃金工法における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

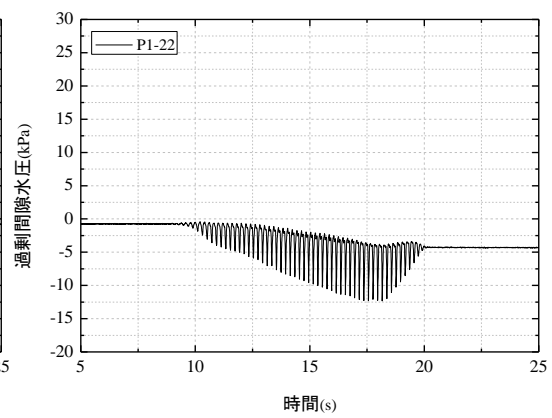
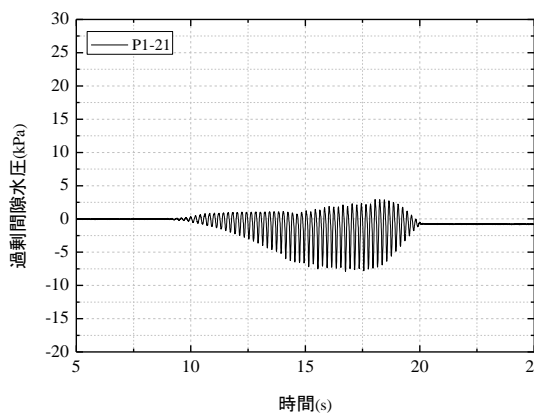


図 75 前刃金工法における 180cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

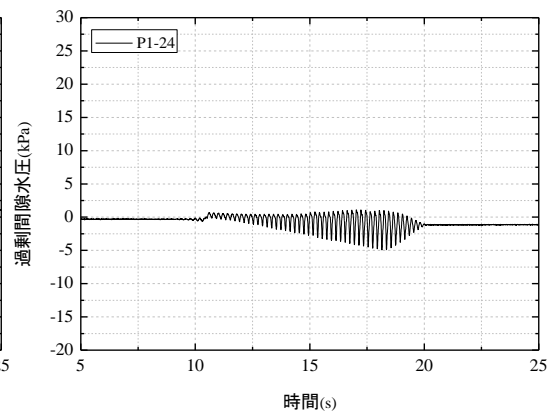
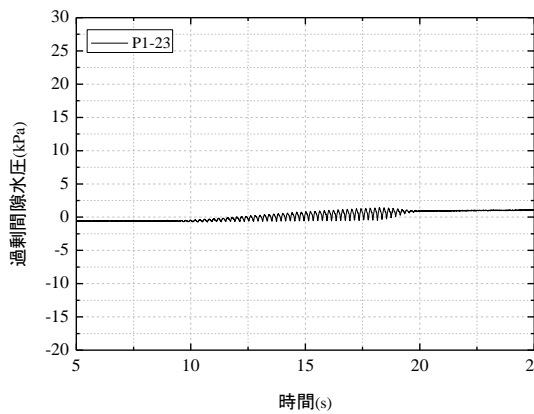


図 76 前刃金工法における 240cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

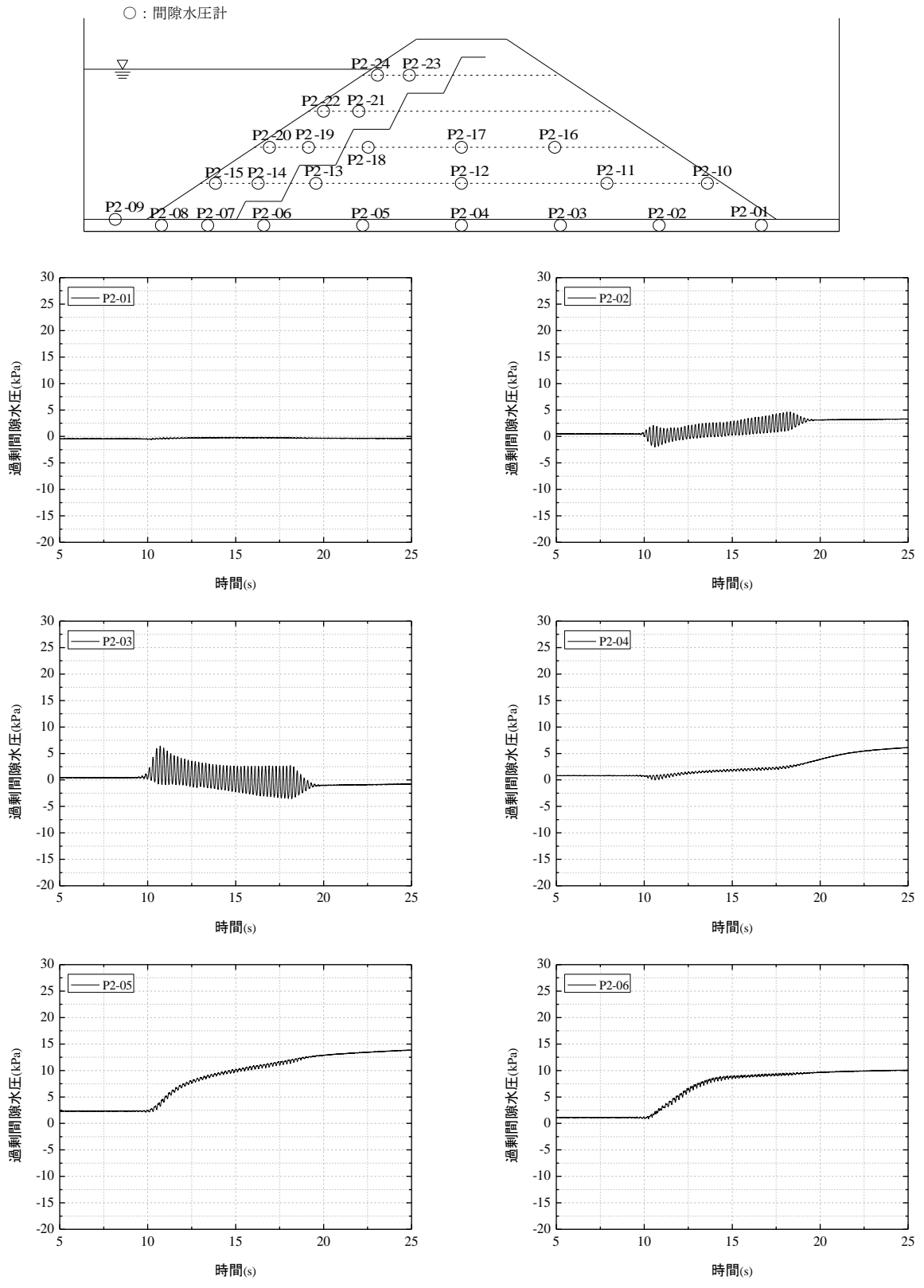


図 77(1) 遮水シート工法における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (400gal 加振時)

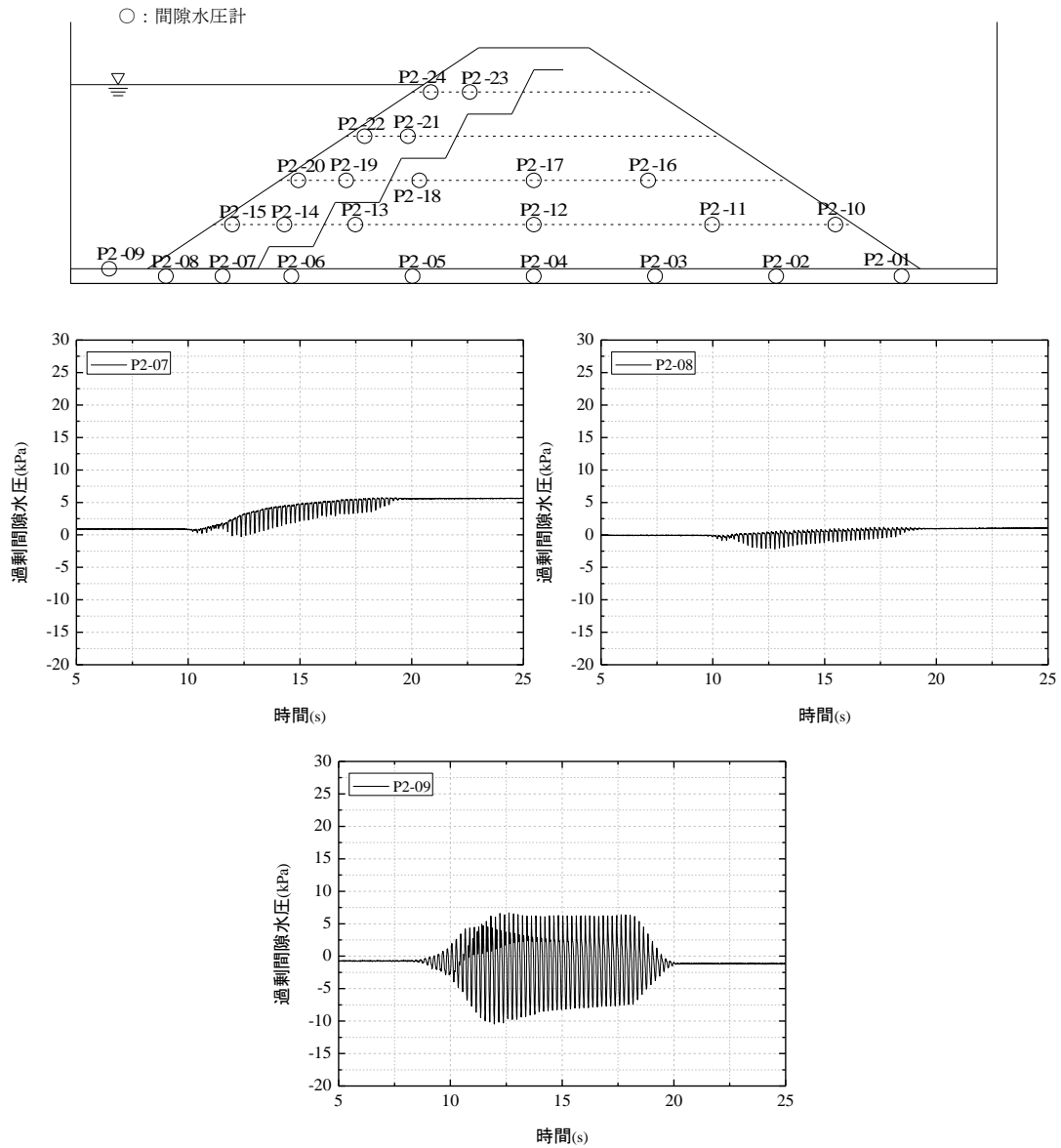


図 77(2) 遮水シート工法における基盤内 (-10cm) の間隙水圧応答 (400gal 加振時)

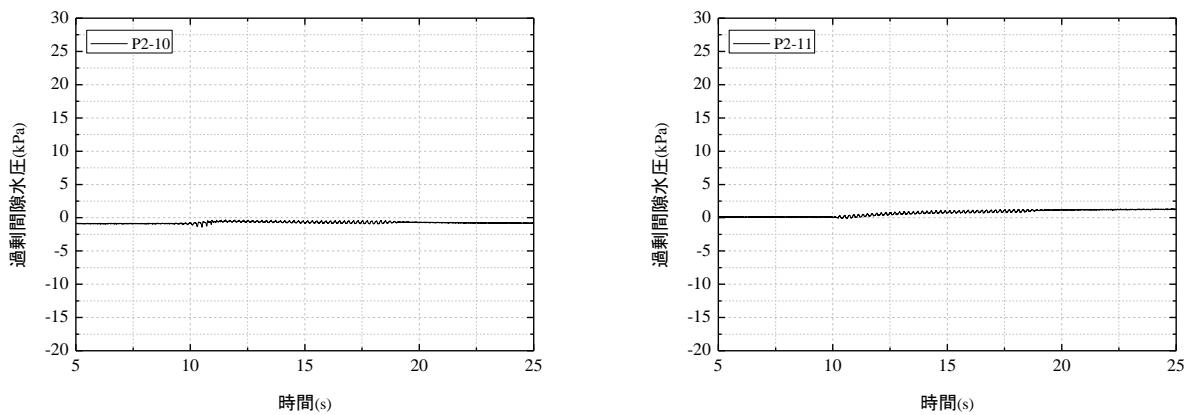


図 78(1) 遮水シート工法における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

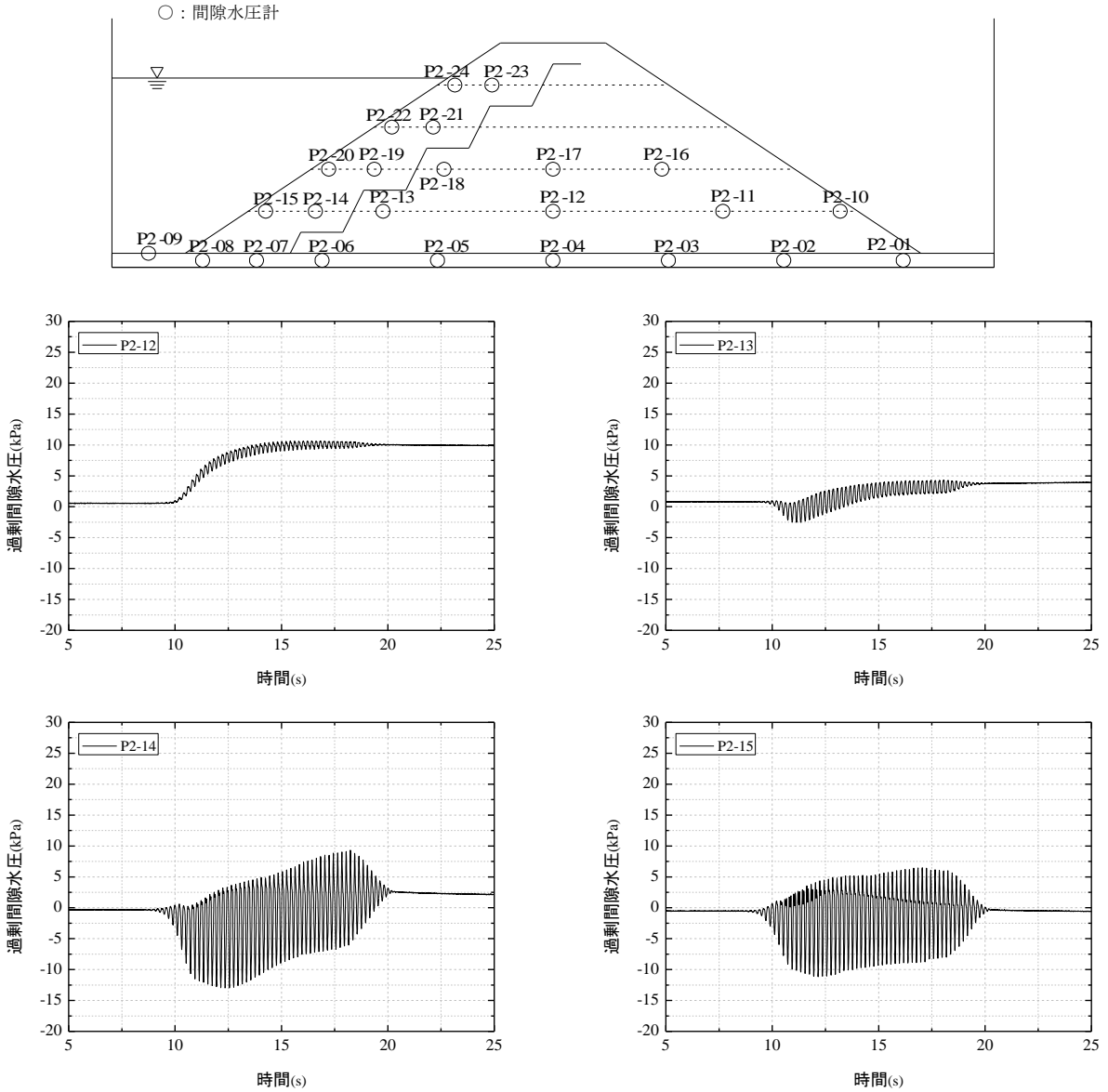


図 78(2) 遮水シート工法における 60cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

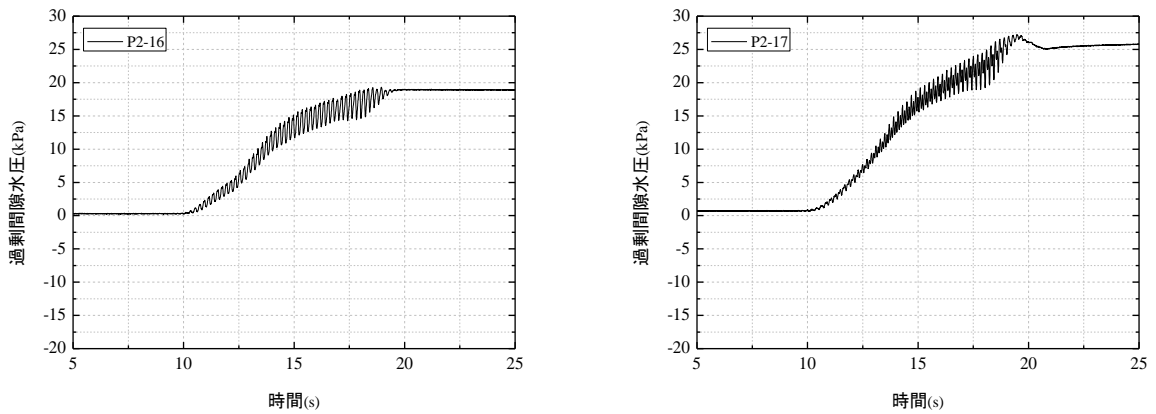


図 79(1) 遮水シート工法における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

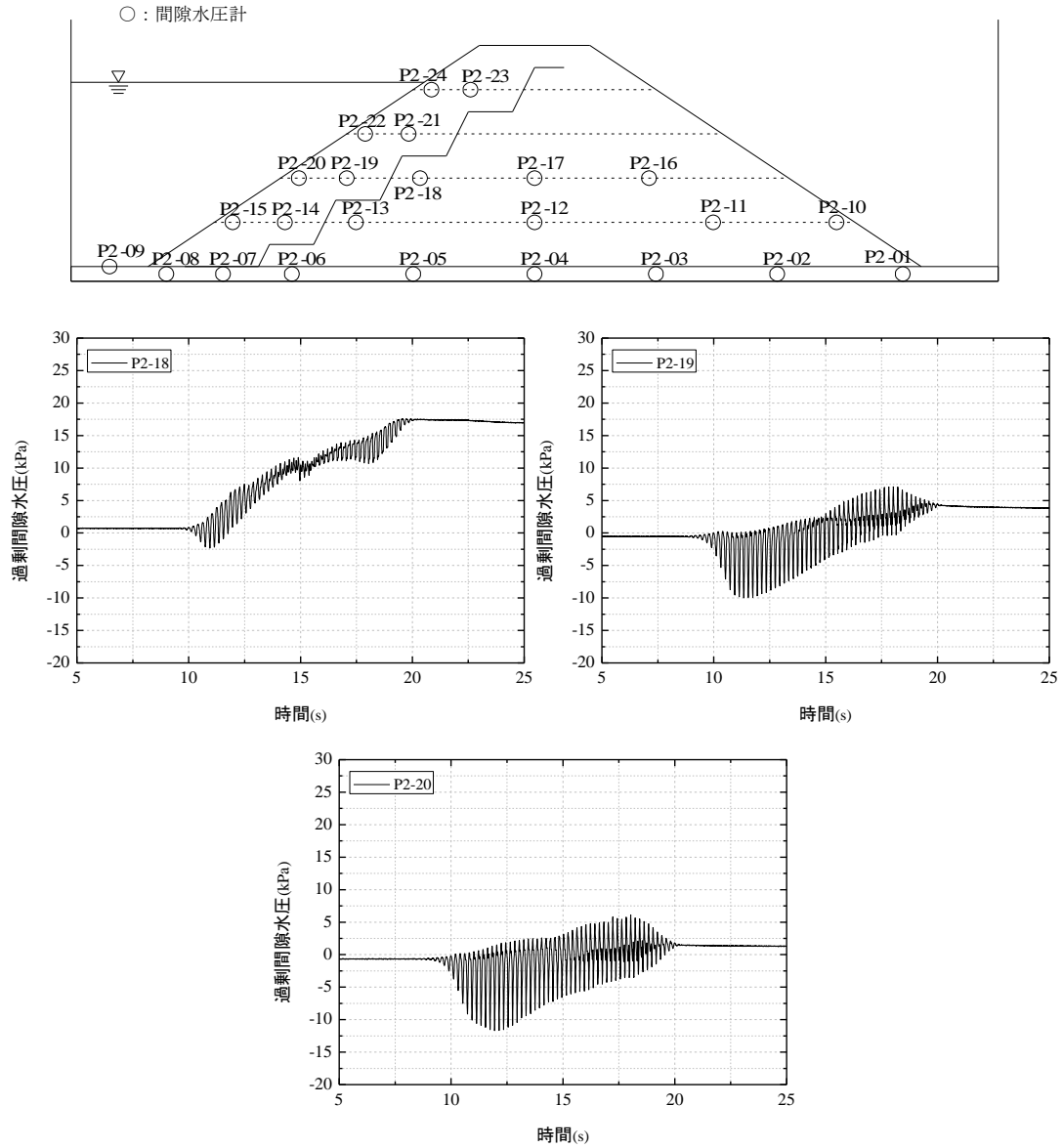


図 79(2) 遮水シート工法における 120cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

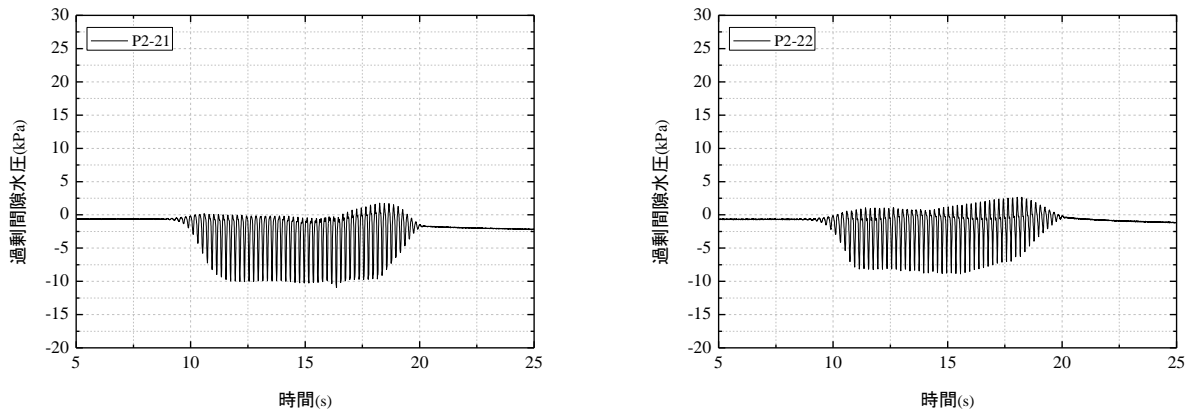


図 80 遮水シート工法における 180cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

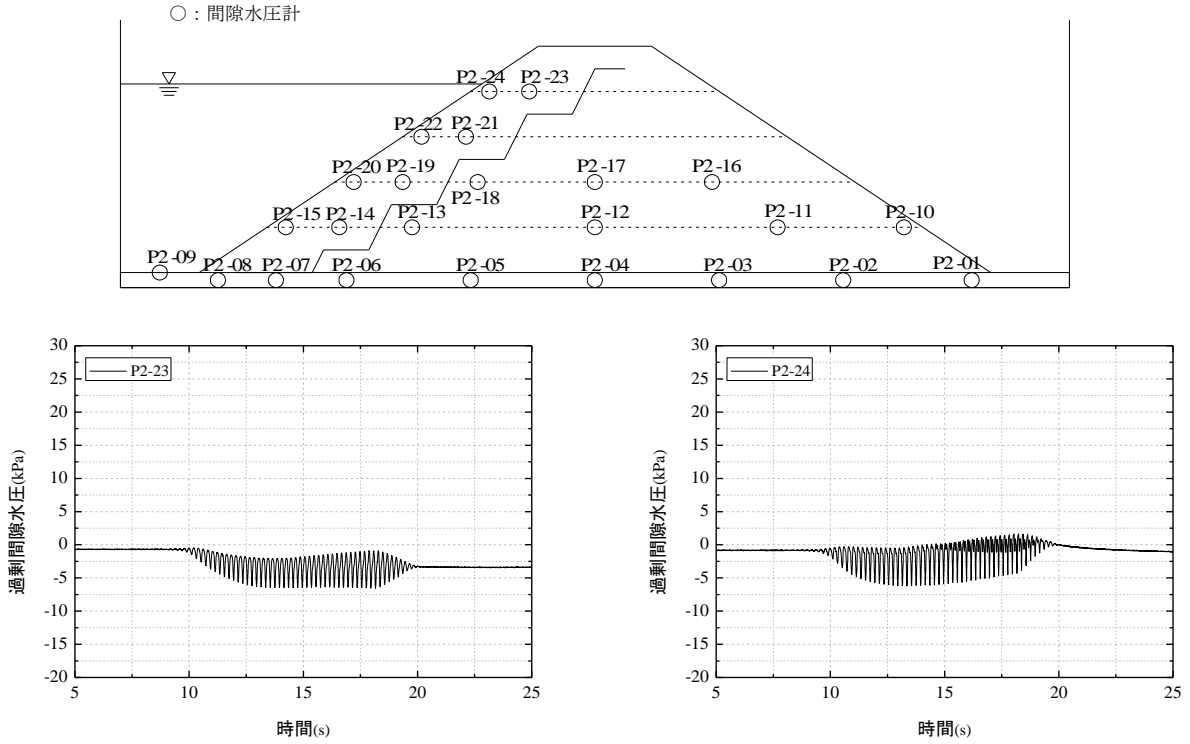


図 81 遮水シート工法における 240cm 高さでの間隙水圧応答 (400gal 加振時)

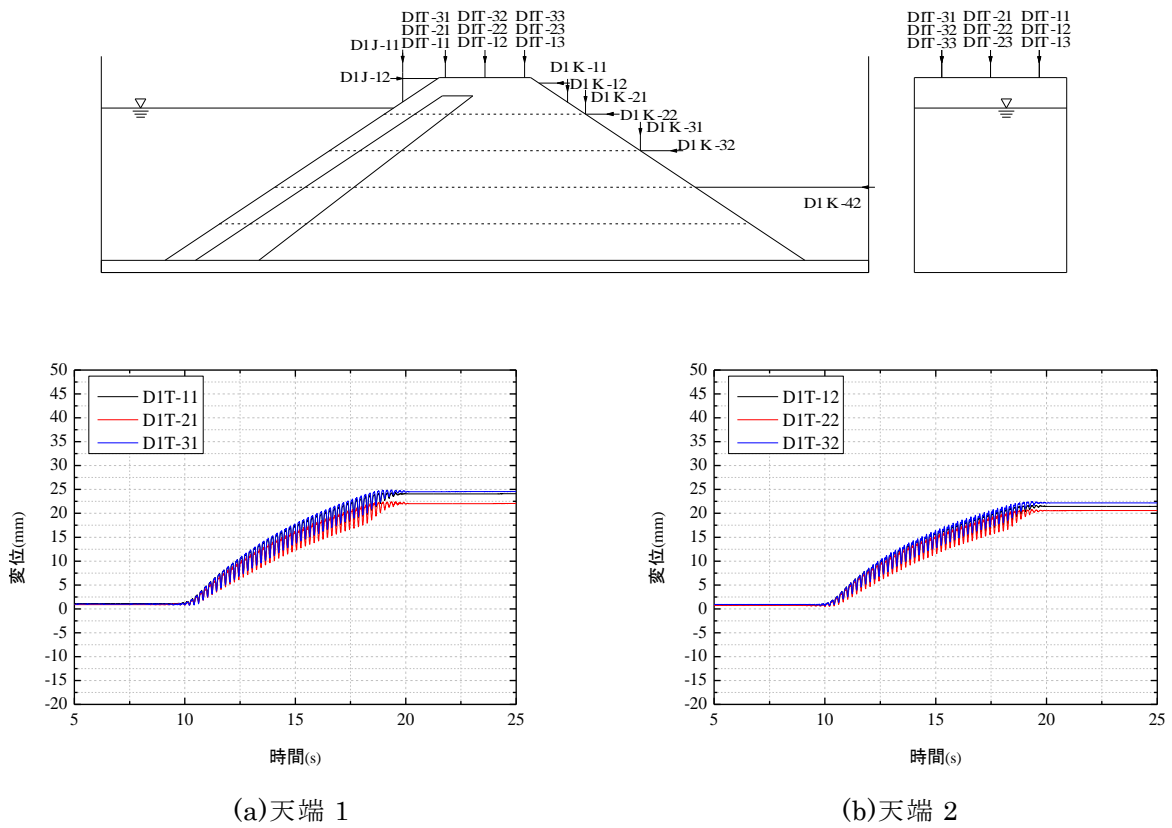
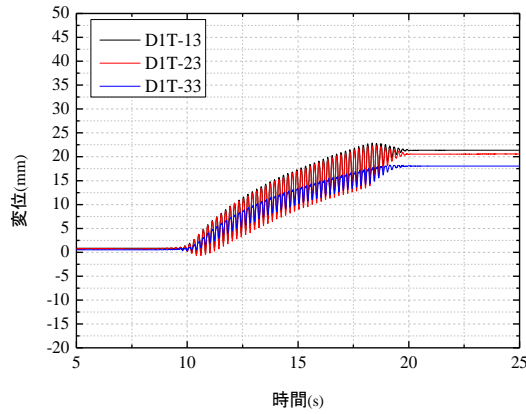
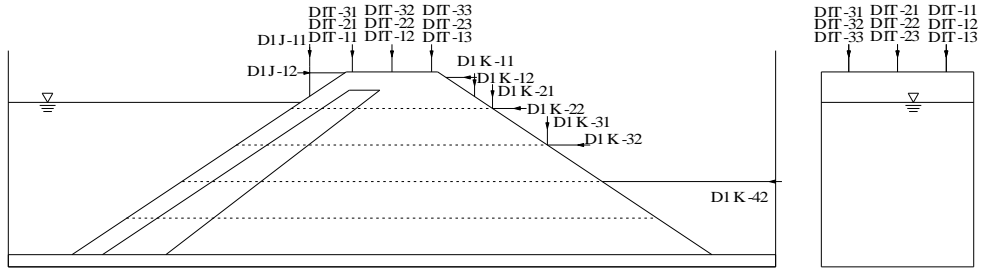


図 82(1) 前刃金工法における天端の鉛直変位 (400gal 加振時)



(c)天端 3

図 82(2) 前刃金工法における天端の鉛直変位 (400gal 加振時)

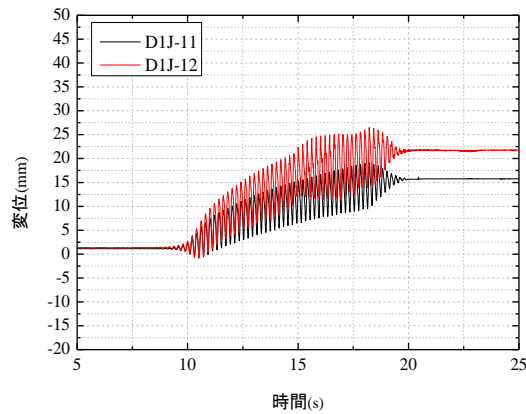


図 83 前刃金工法における上流斜面の水平・鉛直変位 (400gal 加振時)

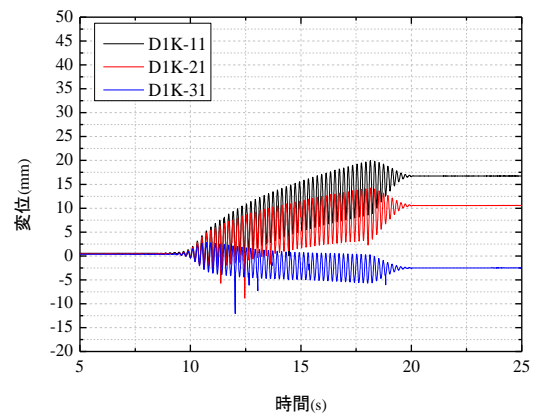
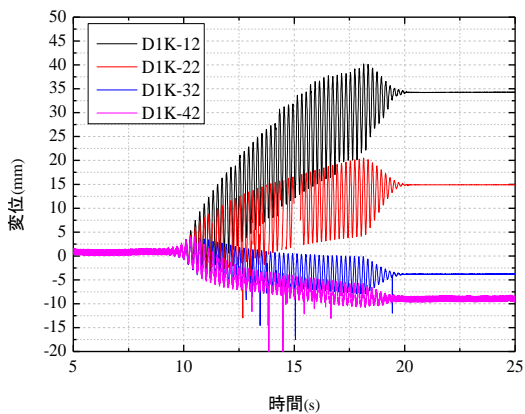


図 84 前刃金工法における下流斜面の水平変位 (400gal 加振時)

前刃金工法における下流斜面の鉛直変位 (400gal 加振時)

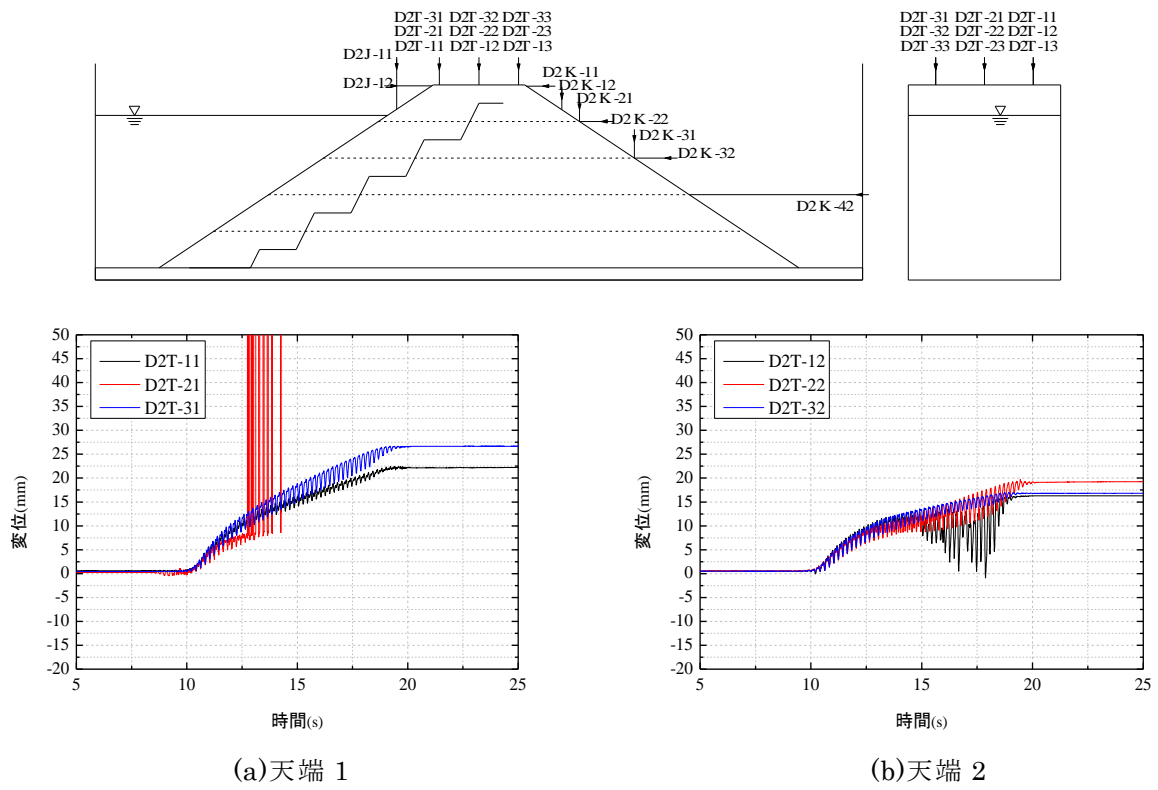


図 86 遮水シート工法における天端の鉛直変位（400gal 加振時）

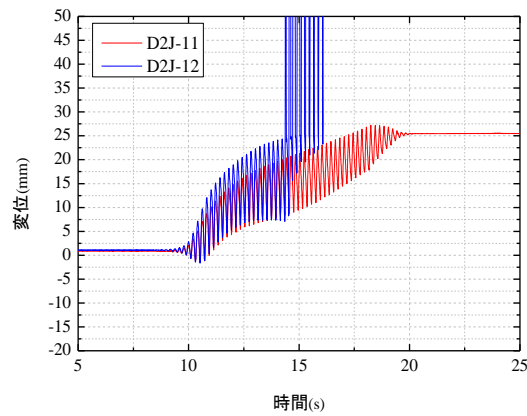


図 87 遮水シート工法における上流斜面の水平・鉛直変位（400gal 加振時）

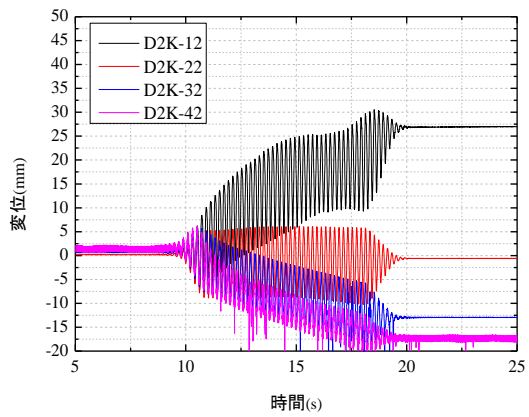
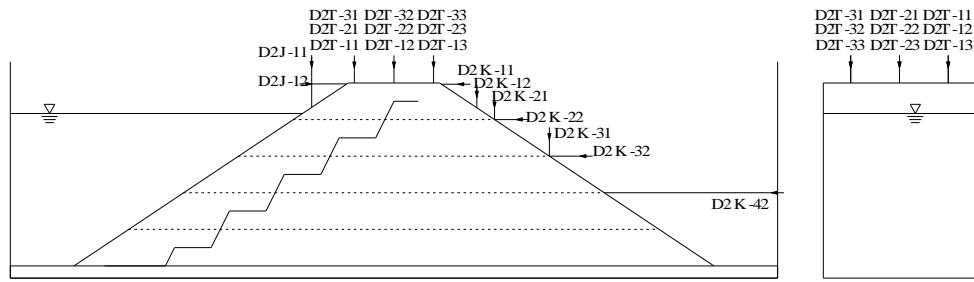


図 88 遮水シート工法における下流斜面の水平変位（400gal 加振時）

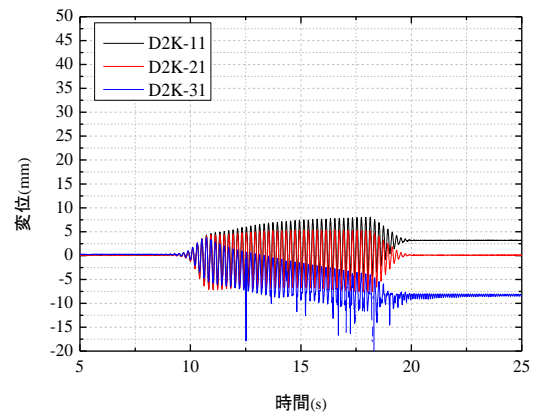


図 89 遮水シート工法における下流斜面の鉛直変位（400gal 加振時）

第 5 章 加振時動的挙動に関する考察

第 4 章に示した各加振時時刻歴データに基づき、以下に堤体挙動に関する考察を行う。

5.1 レベル 1 地震動

レベル 1 地震動を想定した最大 177gal の加振を行った結果、両ケースとも漏水は発生せず、天端の沈下量、下流側法面の水平変位量ともに 1mm 以下であった。また、堤体の外観にクラックの発生は認められなかった。これらの結果から、レベル 1 の地震動において、両堤体はほぼ無被害であったと判断できる。

5.2 レベル 2 地震動

5.2.1 加振結果の概要

レベル 2 地震動を想定した最大 471 gal の加振を与えた結果についての概要を述べる。前刃金工法では、上流および下流法面に深さ 10cm 程度で幅 1mm 程度の小さなクラックが生じた。一方、遮水シート工法では、堤体天端に幅 10mm 程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数発生した。当クラックの深さを調べるために、加振後に水で溶いた石灰をクラックに流し込んだ。また、シート周辺の応答加速度、振動特性から、これらの発生メカニズムを検討した。なお、加振後の損傷状況に関する詳細は、後述する。結果として、クラックは発生したものの、両堤体とも決壊や漏水は生じなかった。この結果から、高さ 3m という小規模なため池堤体は、十分に締め固められていれば、設計指針¹³⁾で要求される耐震性能は保持されるものと考えられる。

5.2.2 堤体の変位

図 90 および図 91 に前刃金工法の天端中央の鉛直変位と下流法面の水平変位を示す。鉛直変位は下向き（沈下）を正、水平変位は上流側の方向を正とした。すなわち、天端においては沈下、下流法面上部においては上流側へ変形し、中央から底部においては下流側へはらみ出しが生じている。また、堤体の変形は、図 92 に示すように、光波測定の結果から得られた加振前後における堤体形状からもわかる。天端の鉛直変位は、各ケースにおいて 9 箇所測定しており、それらの残留変位の平均は前刃金工法のケースで 22mm、遮水シート工法のケースで 19mm であった。また、図 90 からわかるように、上流側の沈下が中央および下流側の沈下よりも大きく発生した。さらに、沈下は法面の水平変位とともに、徐々に増大することから、震動時における堤体中央部から下部のせん断剛性低下にともなうはらみ出しに起因するものと推察される。図 92 より、法面の変位は、下流側よりも上流側の方が若干大きいことがわかる。特に上流の法先の変形が大きい。この理由として、上流側の水の慣性力等の影響が考えられるが、更なる詳細な検討が必要である。

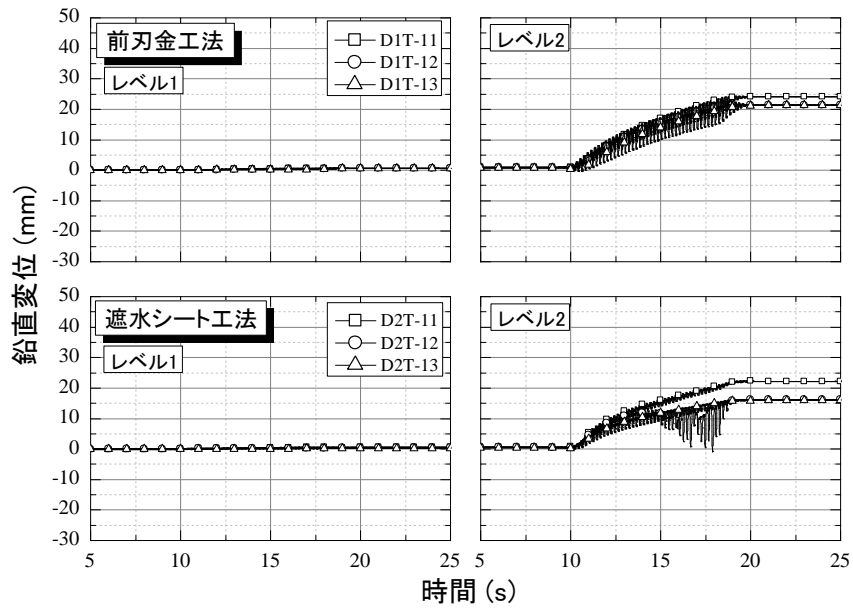


図 90 堤体天端の鉛直変位時刻歴

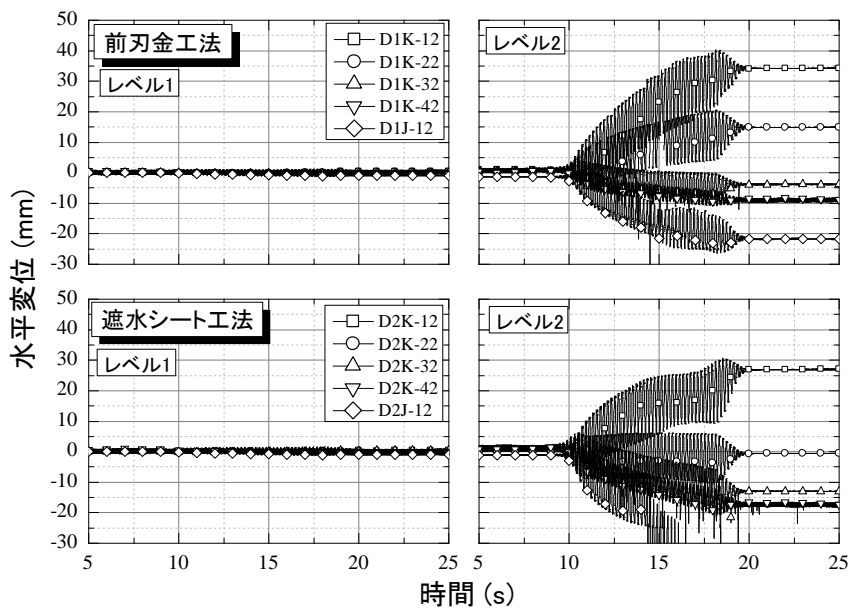


図 91 堤体法面の水平変位時刻歴

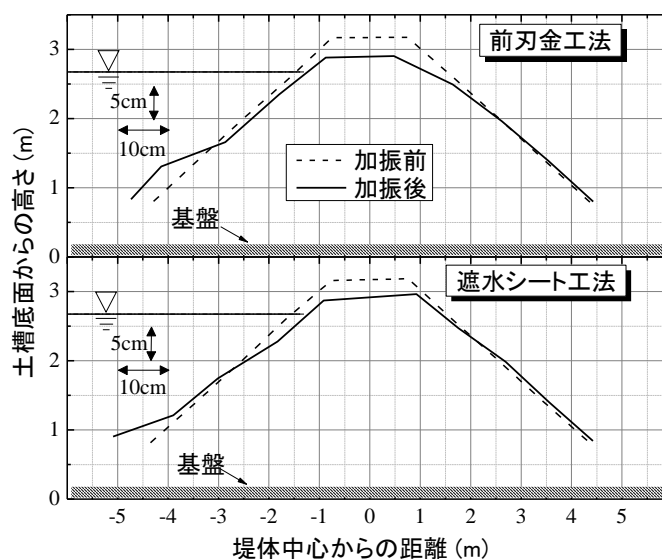


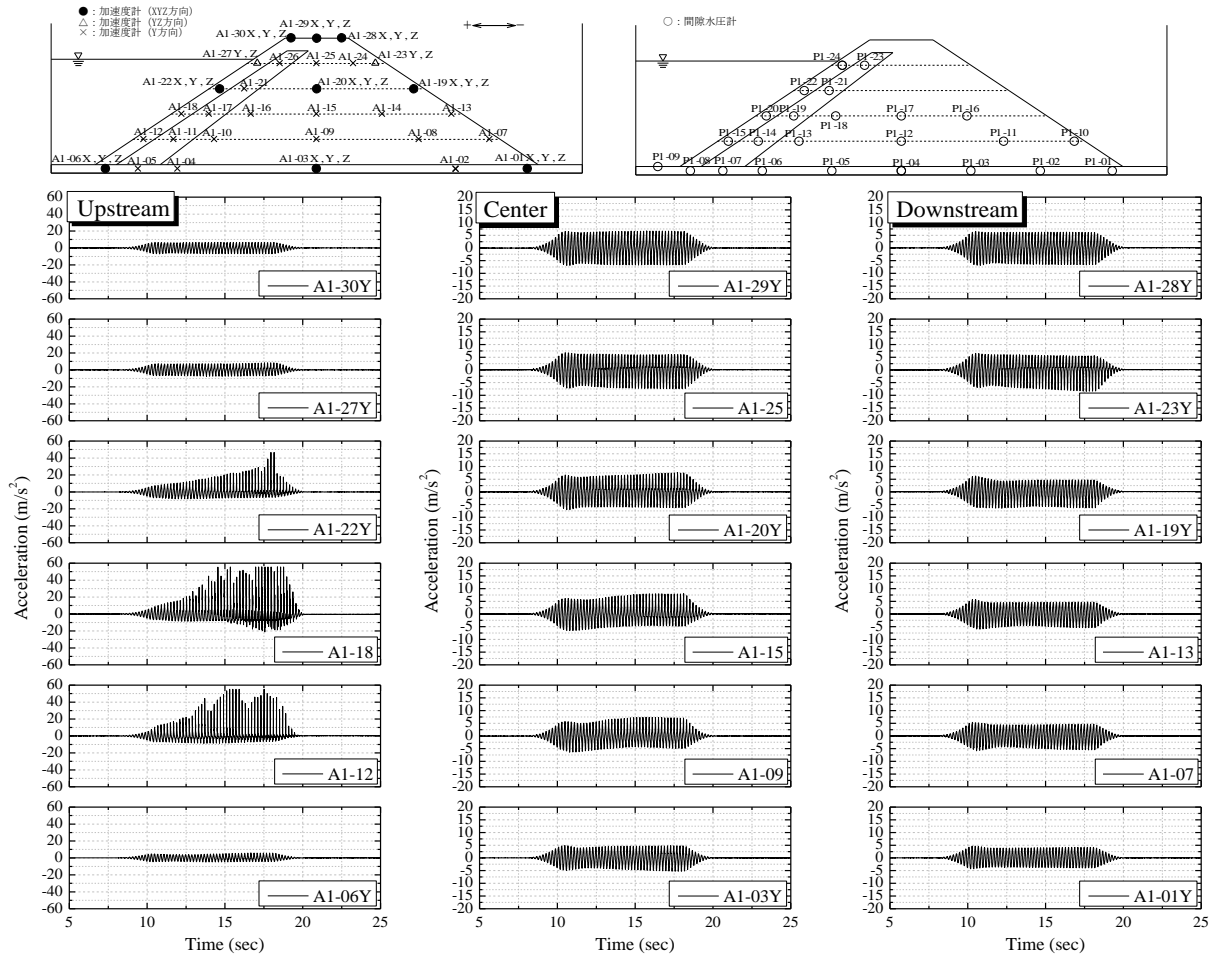
図 92 加振前後における堤体の形状¹⁷⁾

5.2.3 加速度応答

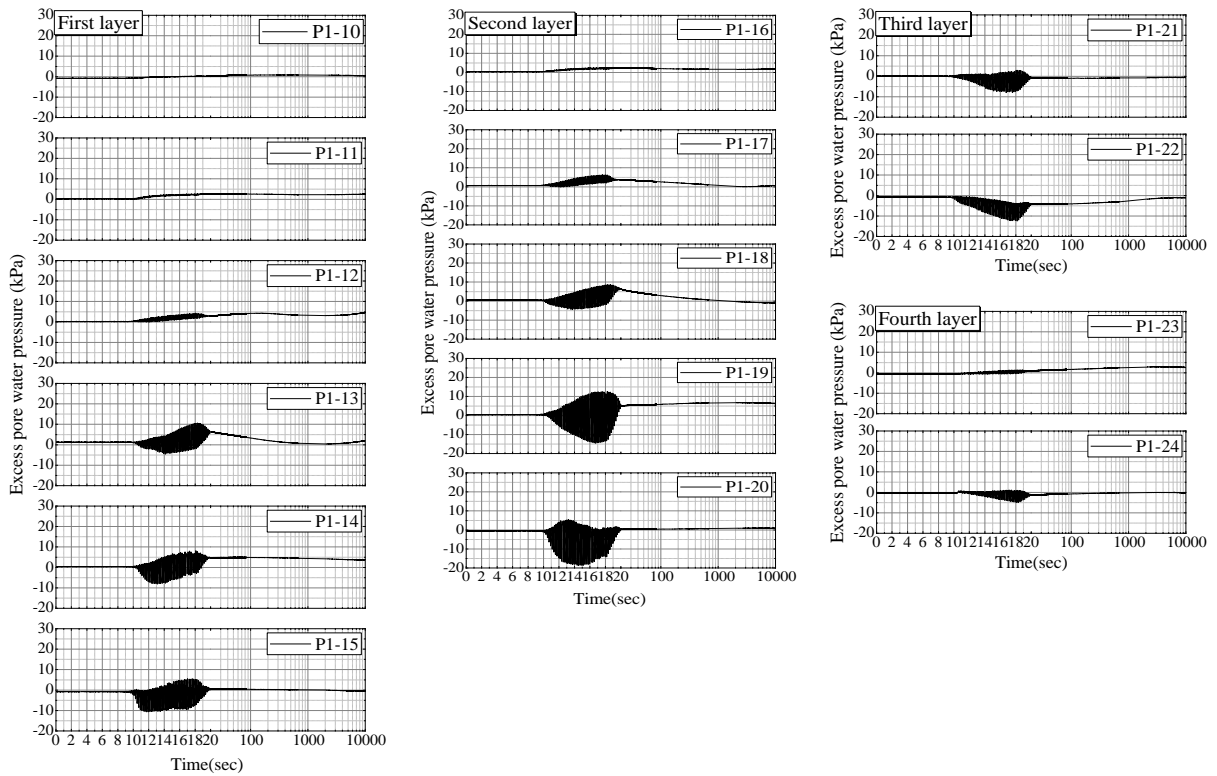
前刃金、遮水シート両工法における代表的な加速度の時刻歴を図 93 および図 94 に示す。また、レベル 2 加振時に発生した最大加速度をピックアップし作製したコンター図を図 95 に示す。堤体全体の動的挙動を把握するため、まずは、これら両図において、最大 471gal 加振時（レベル 2 地震）の堤体中央における -10cm（基盤内）、120cm、300cm（天端）高さに設置された加速度計の応答加速度に着目する。基盤内の応答加速度の振幅は、図 27 に示した震動台の加速度の振幅とほぼ等しい。また、上流方向（+）と下流方向（-）の加速度に大きな差はない。120cm 高さにおいては、前刃金工法で 13 秒付近、遮水シート工法では 11 秒付近から、上流方向の加速度が下流方向より大きくなるのがわかる。この結果は、上流側の変形が下流よりも大きい図 92 の結果と定性的に整合する。また、遮水シート工法のケースでは、天端において、約 17.5 秒付近から、下流方向の加速度が大きくなるのがわかる。ここでの図示ができないが、撮影動画によると、天端クラックの発生は 13 秒付近であることから、クラックの発生と関係があるものと推察される。クラックの発生と応答加速度については、事項で説明する。

図 96 に堤体の高さ（堤高 3m で除して無次元化）と応答加速度の増幅率を示す。増幅率は、加速度計が設置された高さ毎に以下の式(3)より求めた。

$$\alpha(h) = \frac{A_{\max}(h)}{A_{\text{basepeak}}(h)} \quad (3)$$

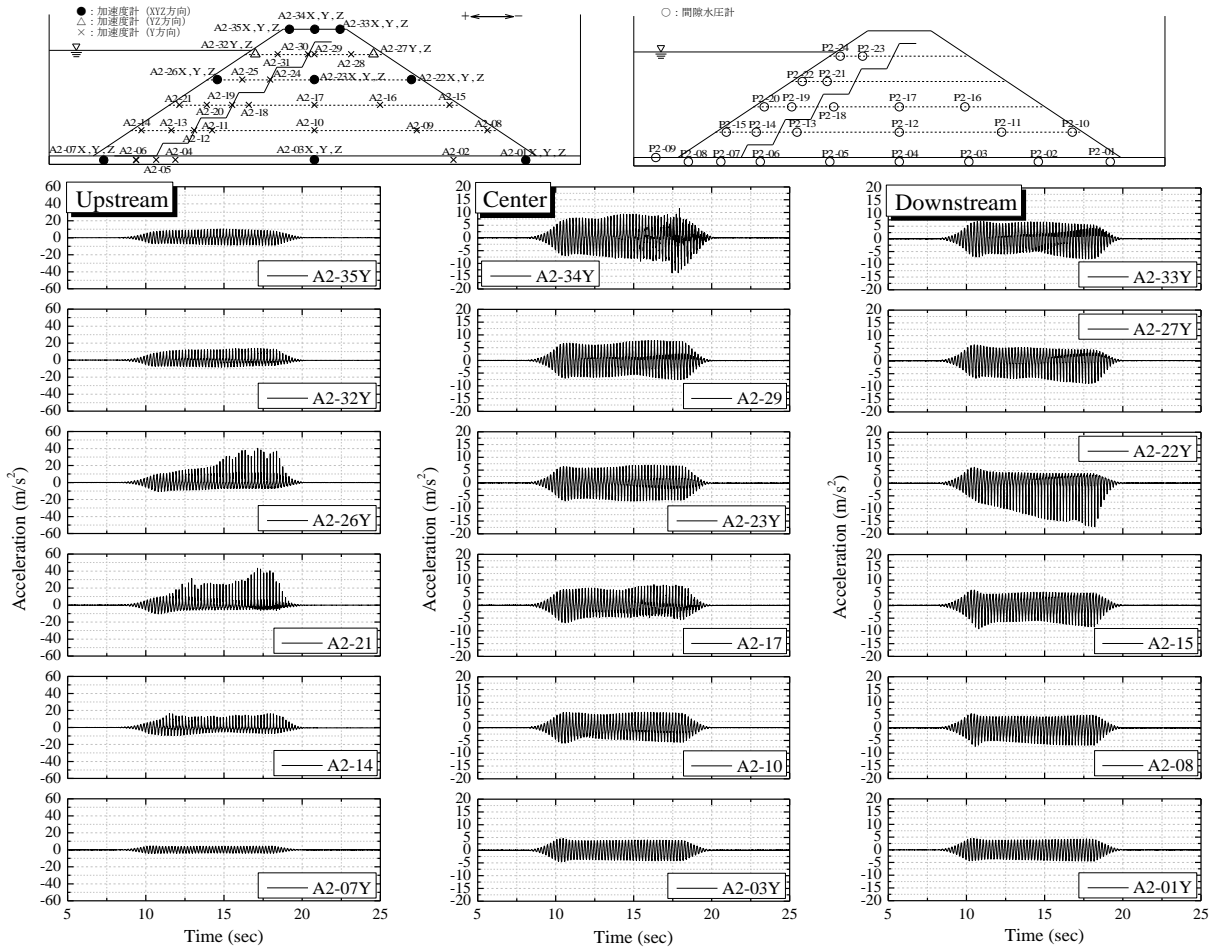


(a) 加速度応答

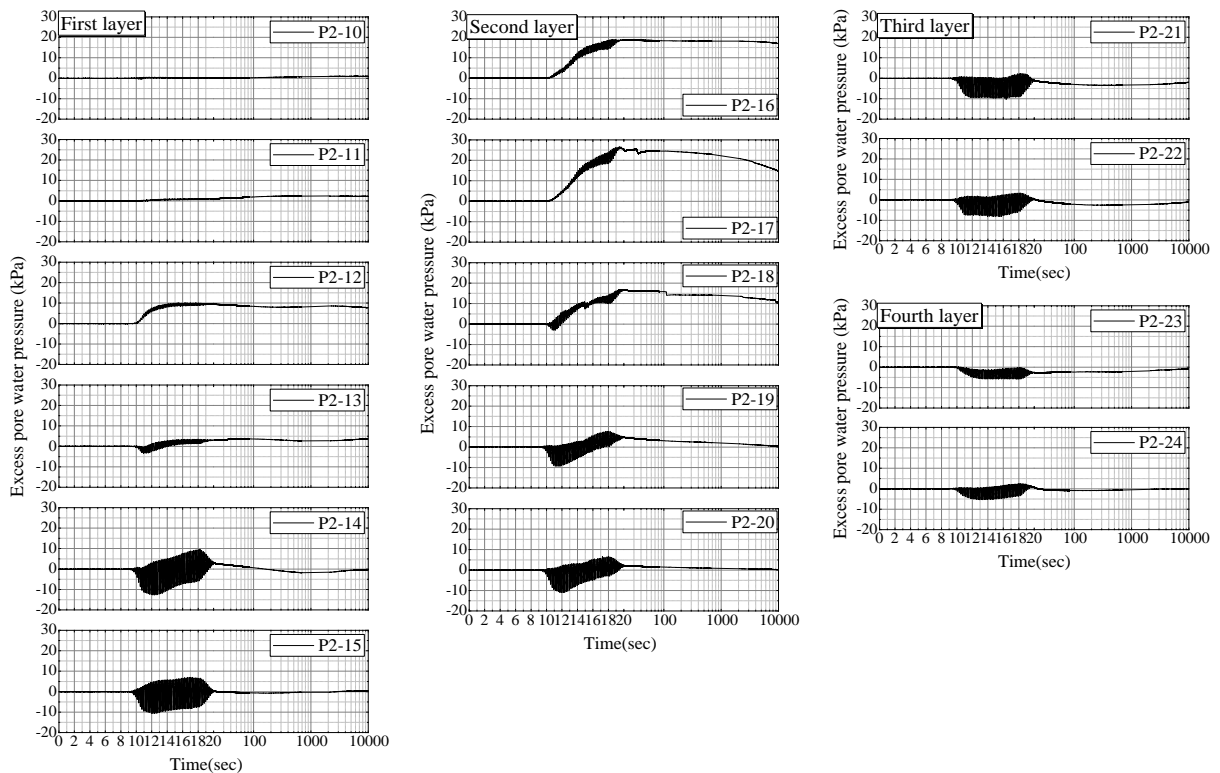


(b) 間隙水圧応答

図 93 前刃金工法における代表的時刻歴データのとりまとめ



(a) 加速度応答



(b) 間隙水圧応答

図 94 遮水シート工法における時刻歴データのとりまとめ

ここに、 $\alpha(h)$ は、堤体高さ h における応答加速度の増幅率、 $A_{\max}(h)$ は、堤体高さ h における応答加速度の最大値、 $A_{\text{basepeak}}(h)$ は、 $A_{\max}(h)$ を発生させた基盤内加速度のピーク値である。

遮水シート工法では、加振時の挙動が異なると想定されたクラック発生前と発生後に分けて検討した。図 96 より、最大 177 gal の加振の場合、両工法とも、増幅率は概ね堤高の増加にともない増加し、天端で 1.3 倍程度であった。レベル 2 地震動を想定した最大 471 gal の加振の場合、中心よりもやや底部で極値をとるような特徴的な分布形状を有しており、天端の増幅率は前刃金工法で 1.4 倍、遮水シート工法においては、クラック発生前で 2.1 倍、クラック発生後で 3.3 倍であった。

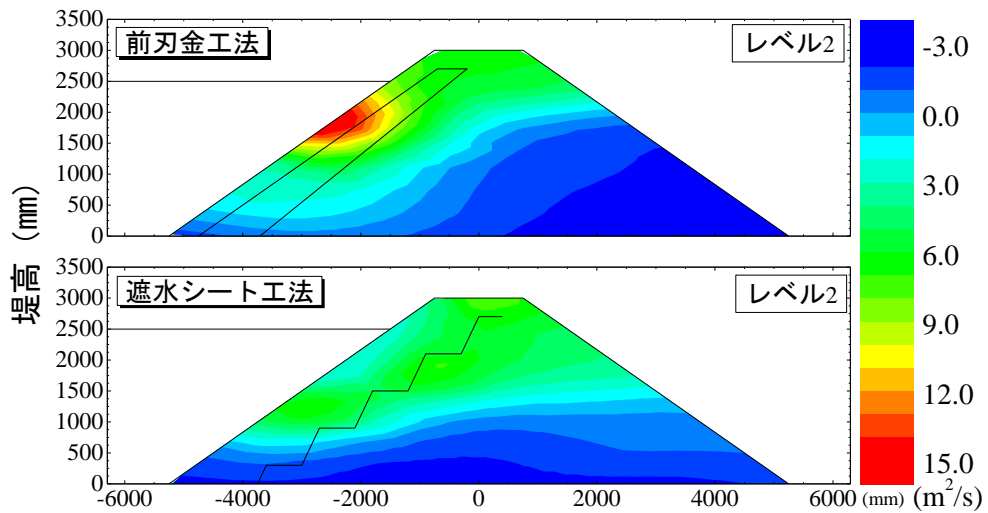


図 95 最大加速度分布図

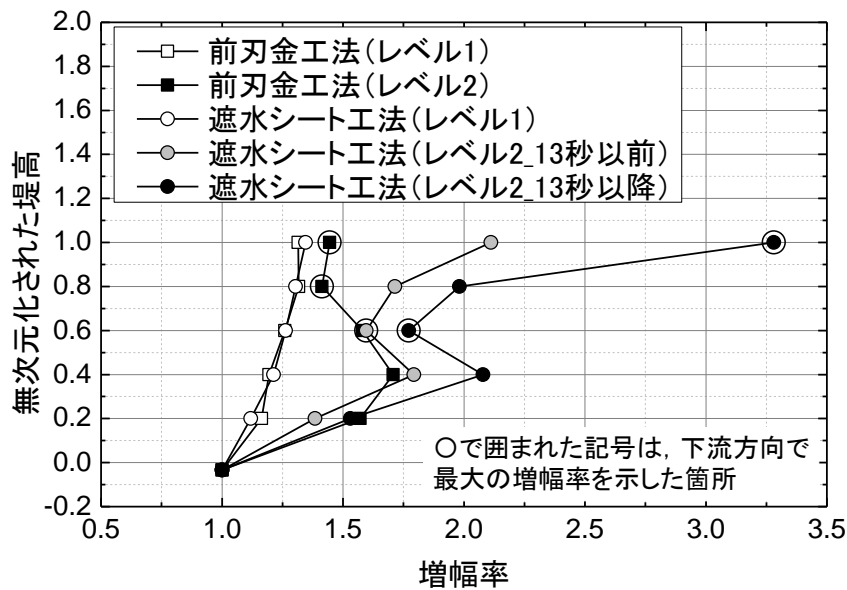


図 96 増幅率と無次元化された堤高の関係¹⁷⁾

5.2.4 間隙水圧応答

図 93 と図 94 に、レベル 2 加振時の過剰間隙水圧の時刻歴データが示されている。加振後の過剰間隙水圧の消散プロセスを確認するため、経過時間の 20 秒後から対数軸とした。前刃金と遮水シートより上流側の過剰間隙水圧は、負圧が生じた P1-22 と P2-19 を除き、上昇および蓄積がほとんど見られない。また、加振時の過剰間隙水圧の振幅は、非対称であり、負圧側に大きな傾向を示している。この負の過剰間隙水圧は、密な土の非排水せん断挙動に起因しているものと考えられる。すなわち、今回の実験では、地震動の周期および継続時間が比較的短く、非常に密に締め固められた飽和砂は非排水状態を保持していたことが考えられる。負の過剰間隙水圧は、有効応力を増加させるため、上流側での滑りが抑制される効果が期待される。この結果から、設計指針¹³⁾で示される最大乾燥密度の 95% 以上で締め固めを行う密度管理は、堤体の耐震性を大きく向上させるものと考えられる。

一方、前刃金工法の P1-22 においては、負の過剰間隙水圧が加振時に蓄積し、加振後に元に戻ることがわかる。このことは土要素の吸水膨張を示している。したがって、この過程で土要素は軟化し、その後の最大余震等の地震により、破壊に至る可能性が推察される。

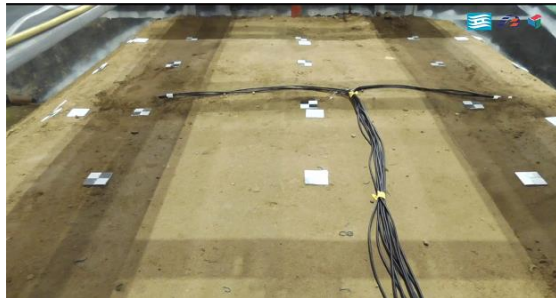
さらに、遮水シート工法では、P2-21 と P2-22 の過剰間隙水圧は、加振終了後に低下し、その後回復することがわかる。この挙動から、加振時に遮水シートと上流側の堤体に隙間が生じ、加振終了後に発生した隙間への間隙水の浸透流が生じたものと推察される。

また、遮水シート工法においては、堤体天端中央から下流側にかけて、加振時における過剰間隙水圧の増加が顕著である。P2-17 周辺では、浸潤線以浅の不飽和領域であることが推測されるが、施工時の飽和度が 72.6% と比較的高い状態であった。さらに、図 90 で示されるように堤体中央天端で約 17 mm もの沈下が発生していることから、土骨格が収縮したことが考えられる。P2-17 の最大過剰間隙水圧は 25.7 kPa に対し、天端から 1.8 m の深度における土被り圧は 36.6 kPa である。すなわち、液状化には達していない。しかし、過剰間隙水圧が長時間残留していることから、その後に大きな余震が発生した場合には、液状化に至る可能性も否定できない。

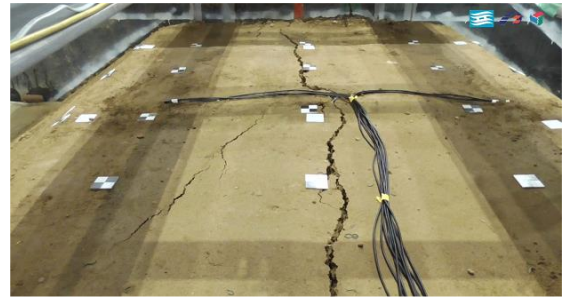
5.2.5 クラックの発生と加速度応答について

第 6 章で詳述するが、まず堤体外観の損傷状態について述べる。レベル 2 加振では、写真 18 に示すように、堤体天端に幅 10mm 程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数発生したが、漏水については、実験中に確認されなかった。既に述べたが、図 92 等に示すとおり、堤体天端センターラインの沈下量は最大 23mm 程度であった。表面の破壊状況を図 97 に示すが、堤体天端中央付近のセンターラインの位置と上流側肩付近に比較的大きなクラックが生じていることがわかる。当クラックの深さを調べるために、水で溶いた石灰をクラックに流し込み、写真 19 に示すように慎重に掘削を行った。掘削調査の結果を図 98 に示すが、堤体天端のセンターライン付近に発生したクラックに注ぎ込んだ石灰は、鉛直方向に深さ 30cm まで達したのち、ベントナイトシートに沿って付着していることが判明した。すなわち、盛土内に階段状に設置しているベントナイトシートが、実験で発生したクラックの原因であることが明らかになった。また、上流側法肩付近に発生したクラックに注ぎ込んだ石灰は、鉛直方向に 45cm まで達しており、それ以上はクラック幅が小さく、

石灰が流れ込まなかった。クラック発生状況調査より、二つのクラックは、それぞれ独立して発生していることが確認された。



(a) レベル 1 地震動加震後



(b) レベル 2 地震動加震後

写真 18 遮水シート工法における堤体天端状況 18)

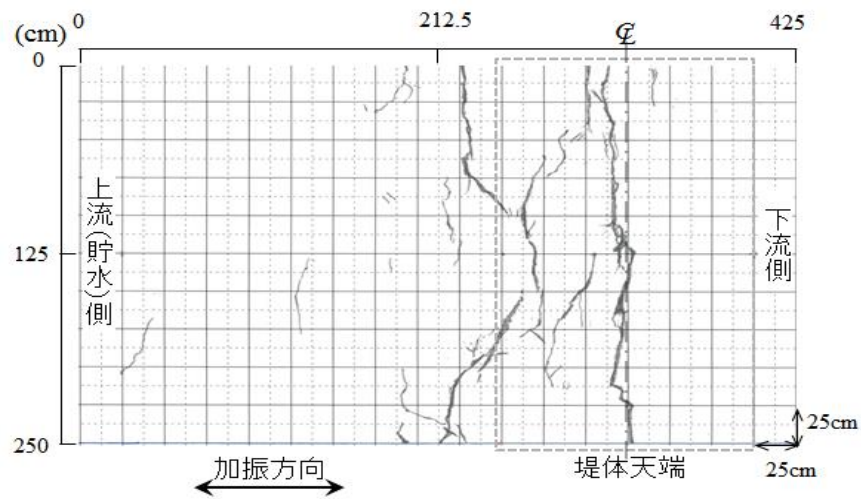


図 97 堤体表面破壊状況 (平面図) 18)



写真 19 発生クラックの掘削調査状況 18)

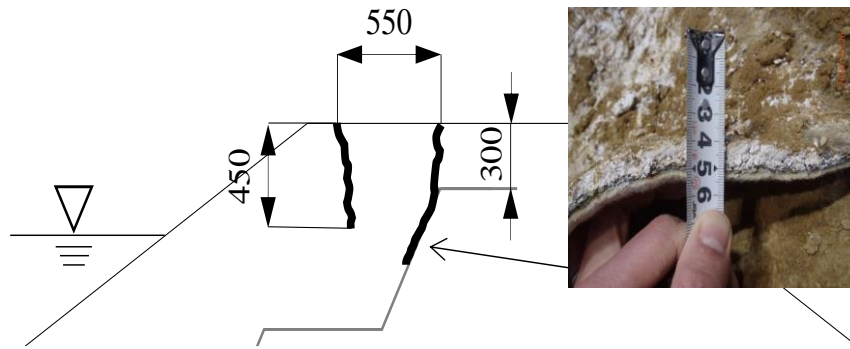


図 98 堤体クラック発生状況（断面図）¹⁸⁾

上述のクラックについて、堤体中央部における鉛直方向の応答加速度に基づき考察する。図 99 に堤体中央の基盤部 (A-03) および基盤+180cm (A-23)、基盤+300cm の天端 (A-34) における鉛直方向加速度の経時変化を示す。前述したように、今回の実験では水平 1 方向のみの加振を与えた。A-03 では鉛直成分の加速度はほとんど発生していないが、A-23、A-34 では鉛直方向の加速度が発生していることがわかる。また、天端のクラックが発生したおよそ 13.2 秒以降、A-34 では、鉛直方向の加速が増大している。これは破壊によって鉛直方向の加速度が局所的に大きくなっていることを示すものと考えられる。

次に、遮水シート周辺土の応答加速度について考察する。図 101 に遮水シートの上下流側およびシート底部に設置した加速度の応答 (11 秒～14 秒) を示す。基盤の加速度は、シート上流側と下流側の両者がほぼ一致している。基盤から 60cm 上がりの加速度は、はじめ両者が一致しているものの 11.5 秒付近から、シート上流側の加速度応答に遅れが生じ始めていることがわかる。シート下流側の加速度応答 (A-11, A-18, A-23, A-29) を比較すると、高さの増加に従い、加速度応答が遅れていることがわかる。これは、一般的な盛土の振動特性と類似している。一方、シート上流部の加速度 (A-13, A-20, A-25, A-31) で比較すると、おおむね同位相である。したがって、図 100 に示すように、シートを境に上流側堤体が基盤および下流側堤体と異なる挙動を示していることが示唆される。この要因として、シート上流側の飽和土とシート下流側の不飽和土の振動特性が異なることや、土とシートの摩擦強度が土のせん断強度よりも低いことに起因するものと考えられる。特に、基盤に沿わせて設置したシート (本実験では 70cm) がシート上流部の振動特性におよぼす影響は大きいと考えられる。

図 102 にベントナイトシートの上流側およびシート底部に設置した加速度の応答 (14 秒～17 秒) を示す。上述したように、天端にクラックが発生した時間はおよそ 13.2 秒である。図 101 より、基盤からの高さが 120cm と 180cm のシート上流側の加速度 (A-20, A-25) が正の方向 (上流側) に増加していることがわかる。また、シート上流部の加速度応答は、天端にクラックが発生した後も、同位相である。このことは、シート上流部の土塊が上流側に変位することを示唆するものである。クラックが発生した後も、図 100 のとおり、シートを境に異なる振動特性を有することが推察される。

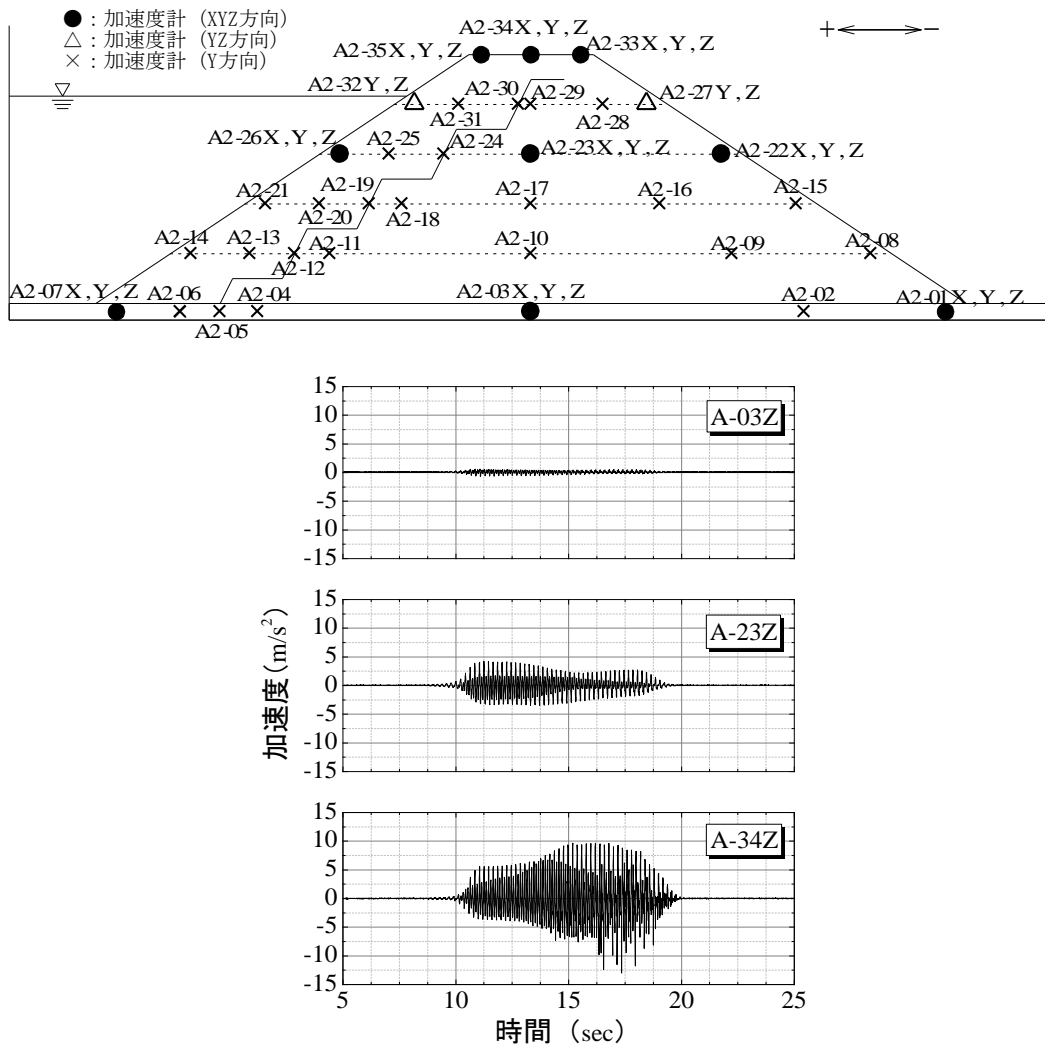


図 99 遮水シート工法堤軸 (A-03, A-23, A-34) における鉛直方向応答加速度¹⁸⁾

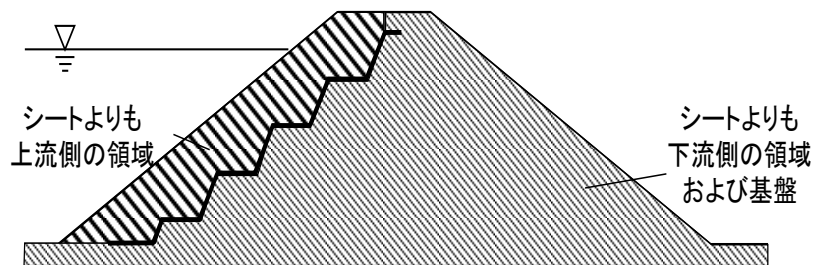


図 100 振動特性の異なる領域¹⁸⁾

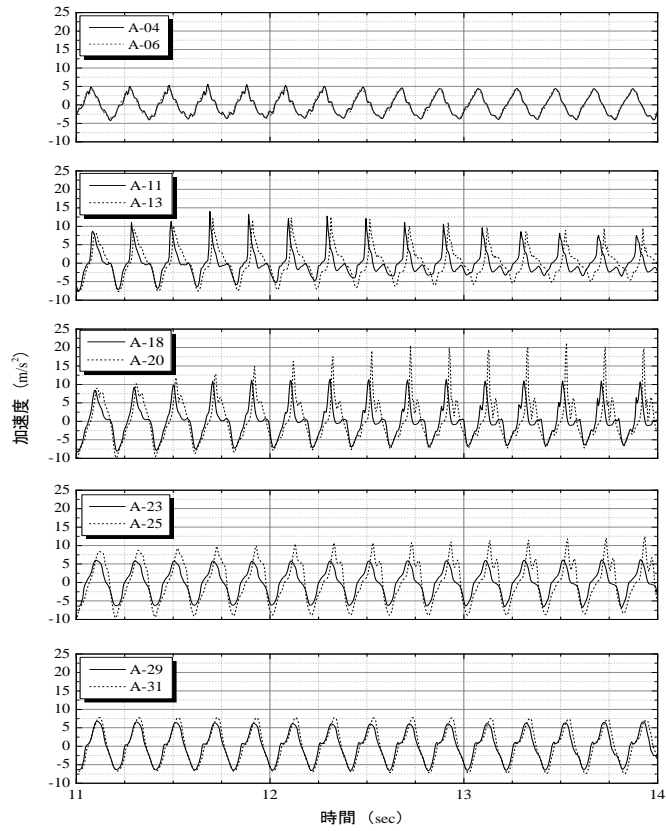


図 101 遮水シート周辺の応答加速度（11 秒～14 秒）¹⁸⁾

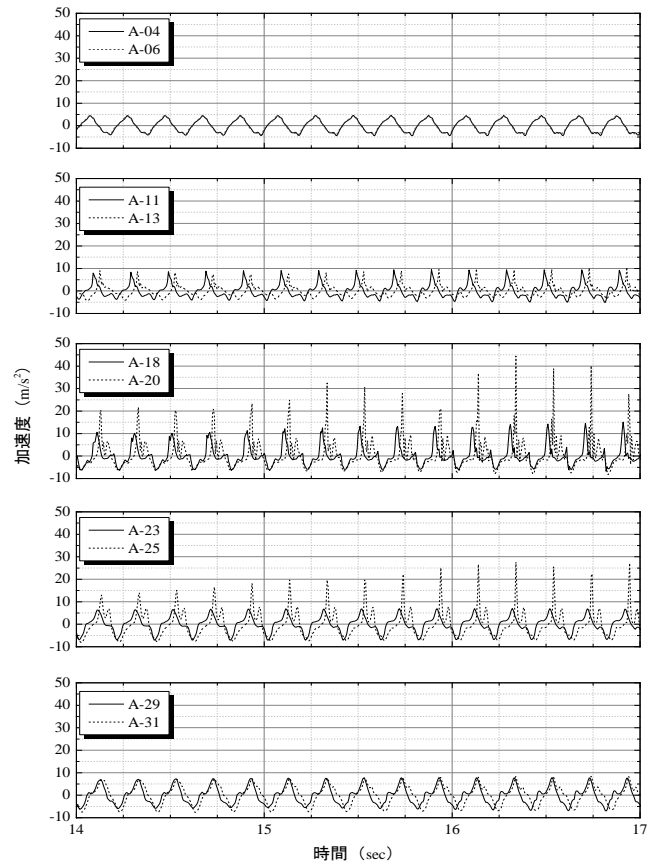


図 102 遮水シート周辺の応答加速度（14 秒～17 秒）¹⁸⁾

第 6 章 堤体の損傷および残留変形調査

レベル 2 加振終了後の排水後において、ため池堤体造成後の加振前に引き続き、簡易軽量動的コーン貫入試験を行い、また、目視による詳細な損傷調査および掘削調査を実施した。以下に、これらの調査結果について述べる。

6.1 加振前後のコーン貫入抵抗値の比較

図 103 に加振前後で実施した簡易軽量動的コーン貫入試験結果を示す。前刃金工法および遮水シート工法における加振前後の q_d の傾向に著しい相違は見られないものの、局所的に傾向の異なる深度が認められる。

前刃金工法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 1m 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。一方、遮水シート工法では、堤体高さ 250~300cm 間である天端から概ね 0.5m 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 100~150cm 区間である盛土内部において、加振後の q_d が増加している様子が見られる。

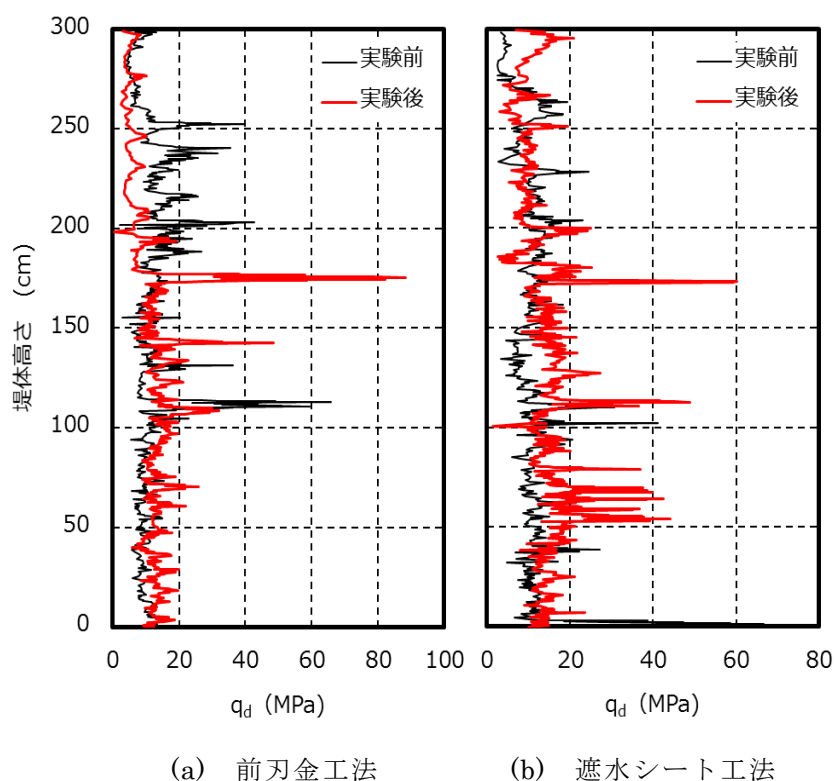


図 103 加振前後におけるコーン貫入抵抗値の比較

6.2 損傷状況の確認調査

加振後、堤体表面におけるクラックの発生状況を目視により観察した。また、幅が比較的大きなクラックについては、水に溶いた石灰をクラックに流し込み、掘削によりその到達深さを調べた。

レベル 2 加振後の 堤体クラックの発生状況を表 13 に示す。幅が比較的大きなクラックについては、石灰をクラックに流し込み、その到達深さを調べた（写真 20）。また、前刃金工法の堤体中央および遮水シート工法の堤体中央におけるクラックの発生状況を図 104 にそれぞれ示す。

一連の観察・調査結果から、前刃金工法では上流および 下流法面に深さ 10cm 程度で幅 1mm 程度の小さなクラックが生じ、遮水シート工法では、堤体天端に幅 10mm 程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数発生したことを確認した

表 13 堤体クラックの発生状況に関するとりまとめ

堤体	発生位置	詳細な発生位置	長さ	深さ
前刃金工法	上流法面 (写真 21)	法肩から 75～100cm	40cm 程度 130cm 程度	-
		法肩から 170～200cm	105cm 程度 90cm 程度	10cm 程度 (写真 22)
	天端	クラック無し	-	-
	下流法面 (写真 23)	法肩から 135～150cm	170cm 程度	15cm 程度 (写真 24)
遮水シート 工法	上流法面 (写真 25)	法肩から 105～120cm	55cm 程度	-
		法肩から 205～230cm	45cm 程度	-
	天端 (写真 26)	中央から上流法肩に かけて	最大 250cm	20～80cm (写真 27～写真 31)
	下流法面	クラック無し	-	-



写真 20 石灰の流し込み状況



写真 21 前刃金上流法面クラック発生状況



写真 22 前刃金上流法面クラック深さ測定状況



写真 23 前刃金下流法面クラック発生状況



写真 24 前刃金下流法面クラック深さ測定状況



写真 25 シート側上流法面クラック発生状況



写真 26 シート側天端クラック発生状況



写真 27 シート側天端北側石灰到達状況(1)



写真 28 シート側天端石灰到達状況(2)



写真 29 シート側天端中央石灰到達状況



写真 30 シート側天端南側石灰到達状況

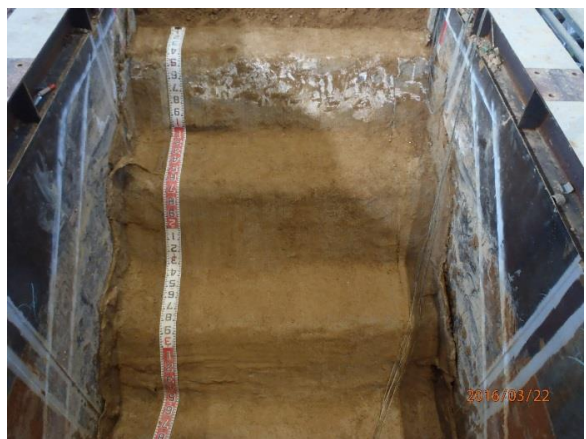
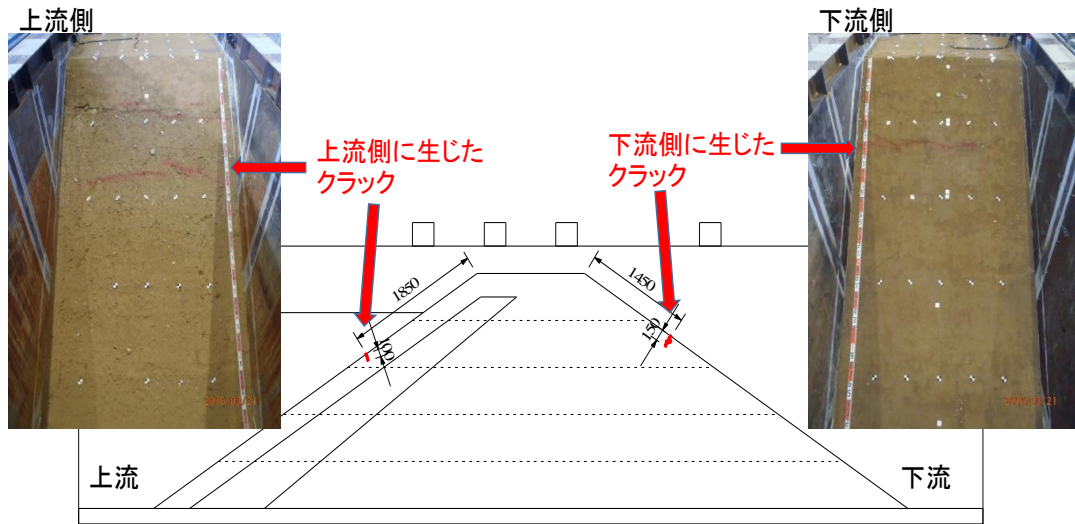
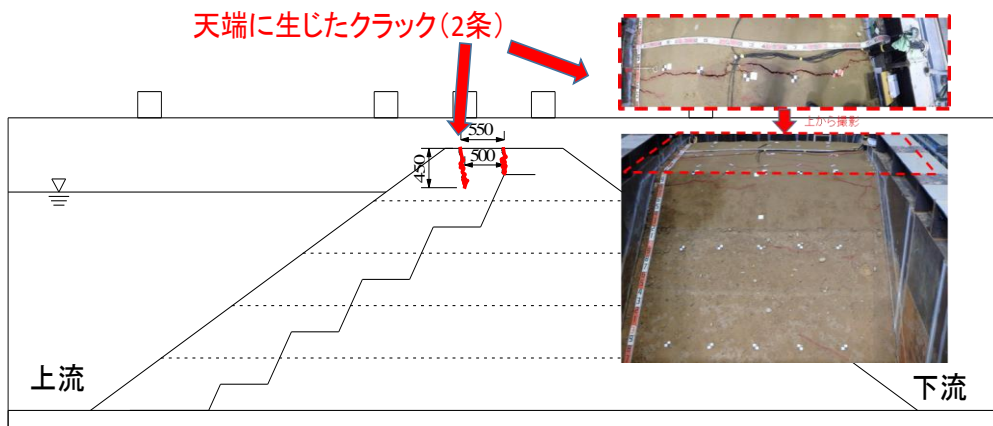


写真 31 シート側段切り部石灰到達状況



(a) 前刃金工法法面



(b) 遮水シート工法堤体中央

図 104 クラック発生状況の比較

6.3 残留変形の計測

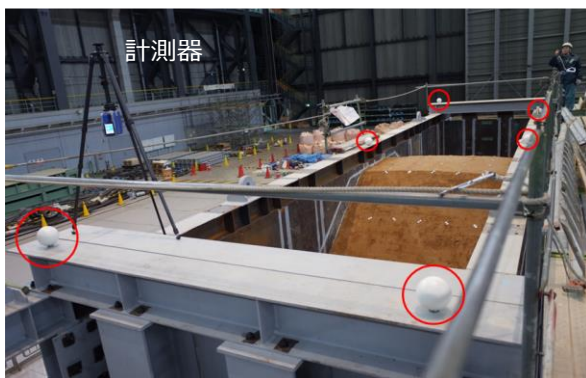
堤体全体の残留変形について、3D レーザー計測を実施し、前刃金工法および遮水シート工法の損傷状況の傾向を把握した。併せて実施した光波測量により、3D レーザー計測との比較と検証を実施した。

ため池堤体造成後の湛水部への注水前とレベル 2 地震動による最終的な加振後における排水後、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、検討外とした。

写真 32 に示すように、計測に先立ち、データ合成のための固定用マグネット付きの球形ターゲット（直径サイズ 14.5 mm）を 6 箇所ほど設置した。設置はすべて土槽上とし、実験の計測器の配置による作業場の制約を加味し、計測器を上下逆向きに三脚に設置した。なお、計測器の主な性能は、測定範囲が 0.6~330 m、レーザークラス 1（波長 1550nm）により、測定速度が 976000 点/s および測定誤差が $\pm 2\text{mm}$ である。測定箇所は、土槽四隅、長辺方向中央および盛土中心の 7 箇所から複数回の計測を実施し、合成処理により点群を取得することを基本とした。計測箇所を写真 33 に示す。



写真 32 固定用マグネット付きのターゲット



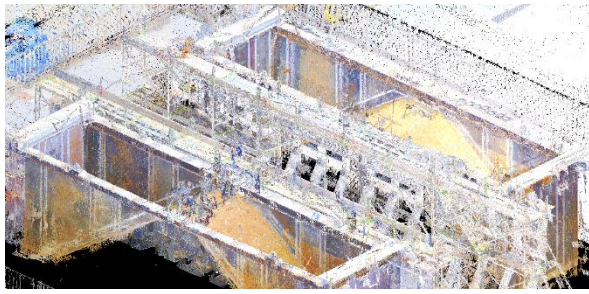
(a) ターゲット配置状況（土槽上）



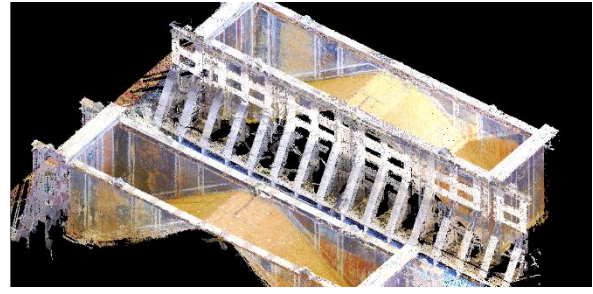
(b) 全体（手前土槽は遮水シート工法）

写真 33 ターゲット（赤丸部）配置状況

加振前後に実施した 2 時期のデータについて、各土槽の 7 地点から計測したデータに合成処理を施し、各種データを作製した。合成にあたり、前処理として、ターゲットの算出および計測器内蔵カメラで撮影した写真から点群への色付けを行った後、測量座標を基準に合成を行った。色付け前後のデータについて、図 105 に示す。編集用データには、計測機



(a) データ編集前の色付き点群データ



(b) データ編集後の色付き点群データ

図 105 データの編集

材（三脚，ターゲット），計測作業員，建屋，計測対象外の足場等の不要点やノイズを含むため，これらを除き，色付き点群データを作製した．

加振前後における前刃金工法および遮水シート工法の堤体部分のみの切り出し図，堤体表面の計測結果（点群データ）および同図を基に，点群を 5mm グリッドデータに調整し作製した等高線図を図 106 に示す．切り出し図から，下流側に比べ上流側において，実験前後での湛水部による地表面の乱れの差が大きい様子が捉えられている．なお，等高線図の作製にあたり，高さは震動台床面を基準（ $Z=0$ ）としたため，ため池堤体天端の標高は，加振前に概ね 3.6m となっている．

先に示した加振実験結果から，両工法ともに，天端で約 20mm の沈下，法肩の変形から全体的に上流側へ変形していたことが示されている．図 106 を見ると，加振前後での堤体形状の変化までは微かに確認できるが，残留変形の傾向までは確認するまでに至っていない．そこで，定性的ではあるが，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，加振後は赤色に着色した加振前後の堤体の重ね図を図 107 に示す．両工法ともに加振により沈下したことから，天端を見ると，加振前の青色着色部は見ており，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 付近からやや孕み出し見られ，下流側の状況と比較すると，堤体が全体的に上級側に変形していることがわかる．また，法尻には流出した土砂が堆積した状況もとらえている．この変形傾向は，前刃金工法よりも遮水シート工法の方がやや顕著である様子がわかる．

ため池堤体の残留変形の特徴として，前刃金工法と遮水シート工法で差はあるものの，両工法で堤体が全体的に上流側に変形していることを 3D レーザー計測より確認した．図 106 に図示したように，堤体軸直交方向に 3 断面の側線を設けたが，図 108 にセンターラインを通る断面 2 の加振前後の堤体形状を示す．同図には，別途実施された光波測量結果も併記し，加振後の変形量は 10 倍に引き延ばした．なお，図の縦軸の基準面は，震動台上の表面高さを意味する．

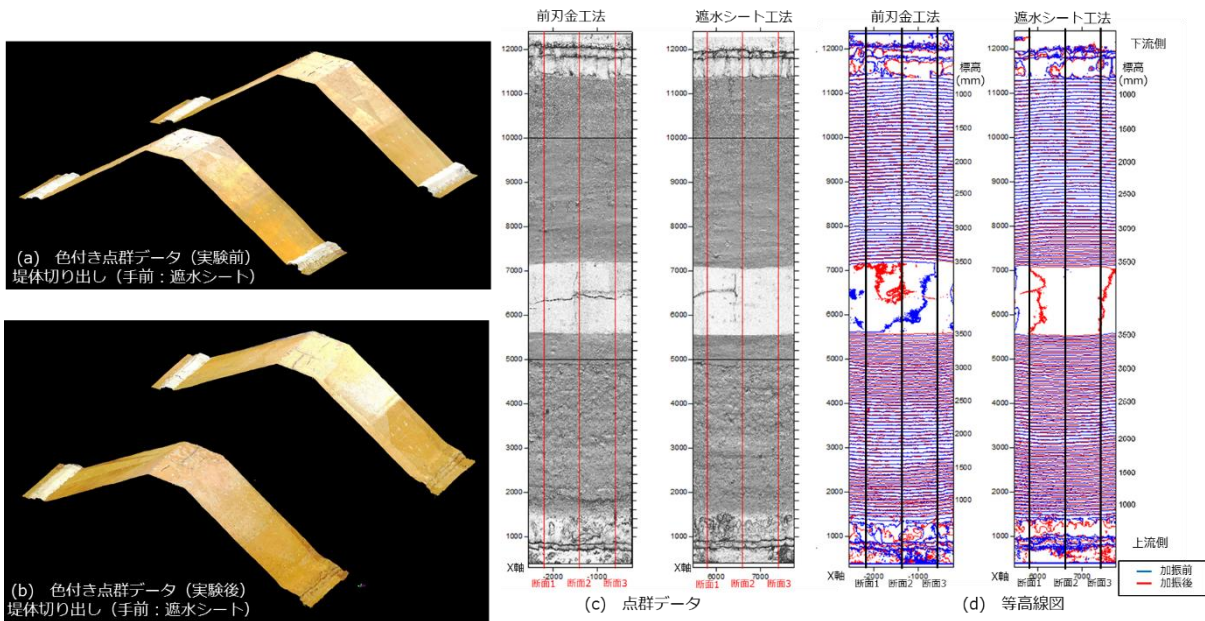


図 106 3D レーザー測量による計測結果

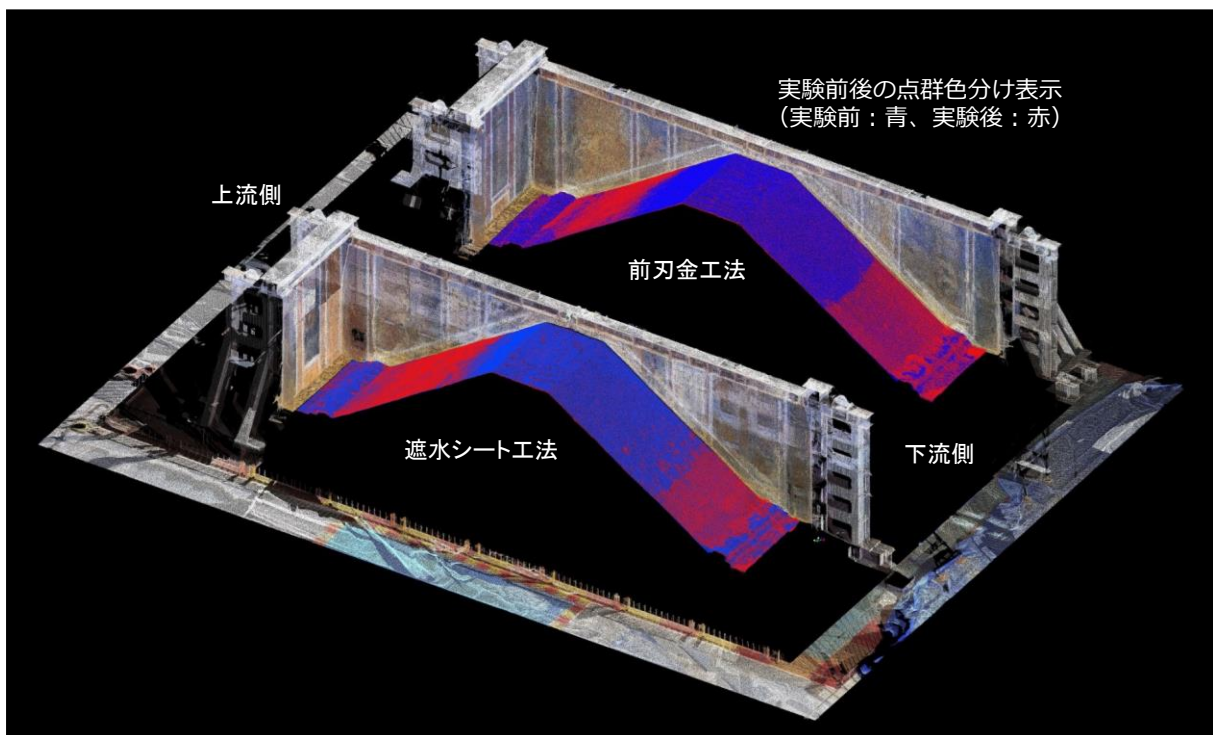
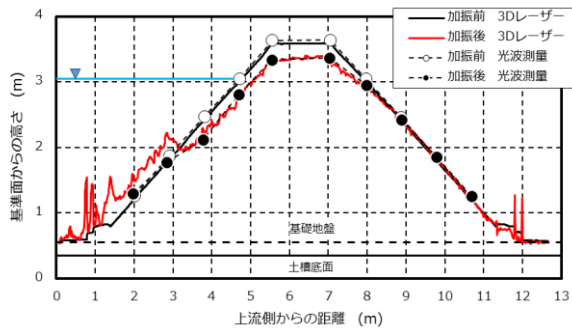
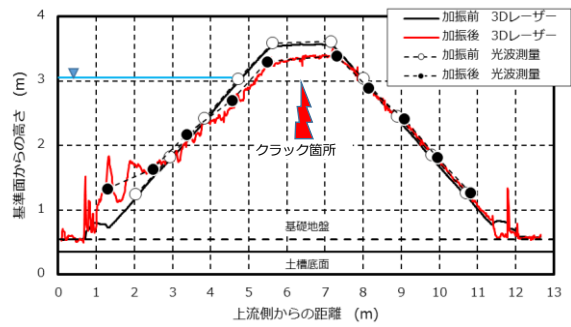


図 107 加振前後における堤体形状の比較

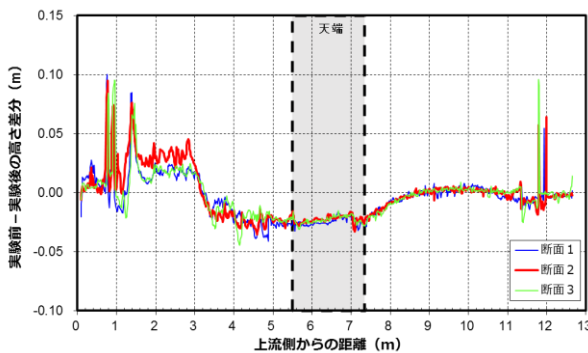


(a) 前刃金工法

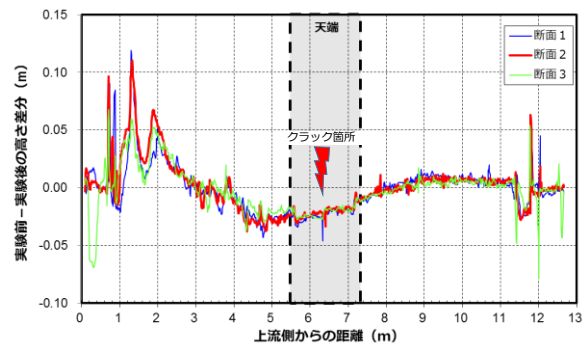


(b) 遮水シート工法

図 108 堤体の残留変形 (変形量を 10 倍)



(a) 前刃金工法



(b) 遮水シート工法

図 109 ため池堤体の変形量分布

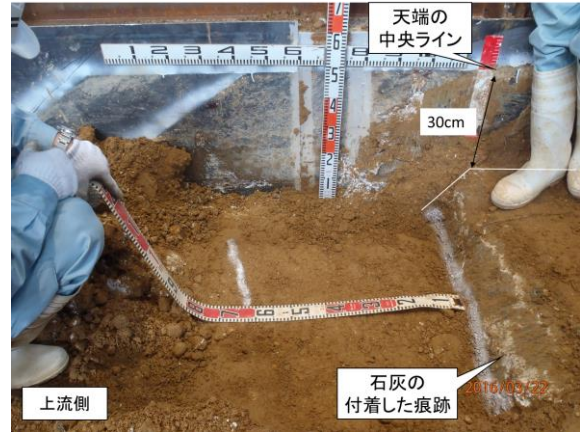
今回実施した 3D レーザー計測結果は、連続的に堤体形状を捉えているが、水平 1m ピッチで法面に据えた光波測量結果と比較すると、変状が大きかった上流側法尻付近以外では概ね一致している。なお、加振時に計測した鉛直変位は、前刃金・遮水シート両工法において、それぞれ 9 箇所ずつ測定しているが、残留変位の平均は前刃金工法で 22mm、一方遮水シート工法のケースで 19mm であった。また、天端沈下量の平均値は、前刃金および遮水シート工法のそれぞれに対し、3D レーザー計測では 22.6mm、21.6mm、また、光波測量では 28.0mm および 25.5mm であり、それぞれ手法の異なる計測結果で概ね整合しているものと考えられる。

図 109 に加振前後の堤体高さの差分の分布を示すが、残留変形の特徴としては、上流側の沈下が中央および下流側の沈下よりも大きく発生し、前刃金工法よりも遮水シート工法の方がやや顕著な変形を示している。この変形傾向は、前述の加振時挙動での説明の通り、法面の水平変位とともに、沈下が徐々に増大したことから、上流側の堤体中央部から下部における領域において、繰返しせん断に伴うせん断剛性低下による変形が残留したものと推察される。

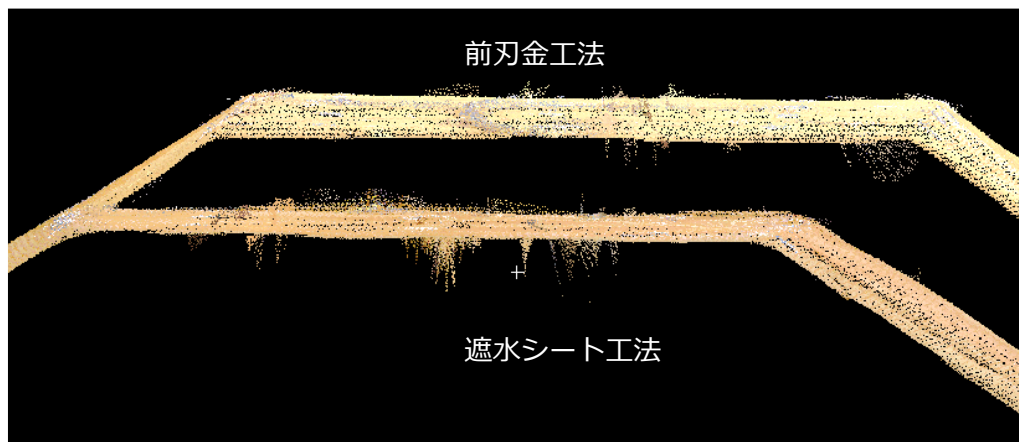
次に、遮水シート工法における天端クラックについて述べる。図 108(b)に示す遮水シート工法天端に比較的大きな凹部が見られ、図 109 では、上流側からの距離が 6.4m 付近の断面 1 および 2 において、最大深度 25cm 程度のクラックとして確認できる。ここで、デ



(a) 遮水シート工法の堤体天端



(b) 遮水シート側天端中央石灰到達状況



(c) 計測画像の引き延ばし

図 110 天端における計測結果

一タ処理段階における加振後のレーザー計測結果を引き延ばし，図 110 に図示すると，大小含め，部分的に凹みが認められる．これらのすべてが実験で堤体天端に見られた亀裂に該当するかについて，図中の(a)と照合すると，堤体天端の堤体軸方向に生じた幅 10mm 程度の大きなクラックに相当することが確認できる．

先にも述べたように，クラック幅が比較的大きなものについて，水に溶いた石灰をクラックに流し込み，掘削調査によりその到達深さが調べられた．上述のクラックについて，(b)に示す掘削調査における天端中央石灰到達状況を確認すると，クラックに注ぎ込んだ石灰は，鉛直方向に深さ 30cm まで達したのち，遮水シートの表面前法側全体的に付着し，遮水シートと上流側盛土間で最大 1cm の空隙が発生していることが確認された．上記の観察より，加振時により大きな空隙が発生していたことが容易に推察でき，また，表面からの確認では分かり得ない内部損傷が生じていたことが分かった．しかし，少なくとも，堤体天端の堤体軸方向に生じた幅 10mm 程度の大きなクラックであれば，その位置や表面形状が明確に特定できることが確かめられた．

第7章 まとめ

本研究では、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の耐震安全性を検証するため、締固め度 95%以上で造成された堤高 3m の実大規模ため池堤体を対象に、加振実験を実施した。また、堤体内の浸潤線を検討するため、事前解析として不飽和一飽和浸透流解析を実施した。さらに、堤体の損傷状態や残留変形を詳しく調べるため、加振前後に 3D レーザー測量や加振後にクラックの状況把握のための掘削調査を実施した。得られた知見の概要は以下に示す通りである。

- (a) 数値解析と実験における浸潤線を比較した結果、遮水シート工法において、下流法面付近の浸潤線は両者で異なるものの、シート付近の水位低下は、解析と実験で類似しており、本解析で用いられたシートのモデル化およびパラメータの妥当性が示された。
- (b) レベル 1 地震動を想定した最大 177gal の加振を行った結果、両ケースともに、漏水は全く発生せず、堤体の変形は極めて小さかった。基盤の応答加速度に対する天端の応答は両ケースとも 1.3 倍程度に増幅した。
- (c) レベル 2 地震動を想定した最大 471gal の加振を行った結果、両ケースとも、漏水は全く発生しなかった。しかしながら、遮水シート工法のケースでは、天端に幅 10mm 程度の比較的大きなクラックが堤体軸方向に複数発生した。また、両ケースともに天端で沈下が生じ、底部ではらみ出しが生じた。上流側天端の沈下は、中央や下流側天端よりも大きく、上・下流法面の挙動特性に違いが確認された。基盤の加速度に対する天端の応答加速度の増幅率は、前刃金工法で 1.4 倍、遮水シート工法のクラック発生前で 2.1 倍、クラック発生後で 3.3 倍であった。

また、本実験研究最大の目的の一つである、ベントナイト系遮水シート工法により改修されたため池の耐震安全性については、以下の通りであった。

- (d) レベル 2 地震動を想定した加振実験の結果、天端に比較的大きなクラックが堤体軸方向に発生した。クラック発生箇所の付近では、鉛直方向成分の加速度が大きくなっていることが確認された。また、堤体の応答加速度から、シートの上流側と下流側で、位相差が確認されたことから、振動特性が異なることが明らかになった。
- (e) 発生クラック深さの調査や加速度応答特性からシートを境界にシートと土の剥離などの破壊現象が発生したことが示唆されたが、決壊や漏水には至らなかった。
- (f) 3D レーザー測量結果から、幅 10mm 程度の大きなクラックであれば、その位置が明確に把握可能であることが示され、地震後に堤体機能を維持する上で十分な判断材料となる可能性が示唆された。

最後に、ベントナイト系遮水シートは、経験的に階段状に設置されることが多いが、この場合、設計水平震度を加味する通常の円弧すべり計算では再現できない現象が、本実験から確認された。したがって、遮水シートの影響を考慮した設計手法を構築するため、更に詳細な変形メカニズムについて、検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 小田哲也, 森脇馨, 谷垣和彦, 野村純数, 澤田豊, 河端俊典(2015.12): 兵庫県におけるため池の耐震調査と保全・管理について, 農業農村工学会誌, Vol.83, No.12, pp.7-10
- 2) 兵庫県農林水産部農地整備課: 兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌平成 7 年 1 月 17 日発生, 1996
- 3) 兵庫県農林水産部農地整備課: 兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌平成 7 年 1 月 17 日発生, p.11, p.22-24, p.29, p.51, p.66-67, pp.84-85, p.87, 1996
- 4) 谷茂, 長谷川高士: 日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害, 農業土木学会誌, 第 55 巻, 第 10 号, pp.17-25, 1987.
- 5) 堀俊和, 上野和広, 松下健一: 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, 第 213 号, pp.175-199, 2012.
- 6) 農林水産省: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の農林水産業関係被害の状況, <http://www.maff.go.jp/j/saigai/zisin/160414/kumamoto/taiou.html> (平成 28 年 8 月 9 日閲覧)
- 7) 佐藤純一, Seda Sendir, 本多剛, 東畑郁生: アースダムの耐震性能設計の高度化へ向けての振動台実験と数値解析, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp.346-353, 2007.
- 8) Ge, L., Bao, Y., Ni, C. K. and Ko, H. Y.: Seismic centrifuge modelling of earth dams, Geomechanics and Geoengineering, Vol.5, Issue 4, pp.247-257, 2010.
- 9) Kim, M., Lee, S., Choo, Y., and Kim, D.: Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.31, pp.1579-1593, 2011.
- 10) Yuan, L., Liu, X., Wang, X., Yang, Y. and Yang, Z.: Seismic performance of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by large-scale shaking table tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.56, pp.1-12, 2014.
- 11) 神山惇, 鈴木素之, 河内義文, 浦部朋子, 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, 第 32 号, pp.137-141, 2014.
- 12) 丁経凡, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 白濟民, 河端俊典, 澤田豊: ベントナイトシートを敷設した小型ため池堤体モデルの振動台実験, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1007-1008, 2016.
- 13) 農林水産省農村振興局: 土地改良事業設計指針「ため池整備」, 農業農村工学会, 2015.
- 14) 小竹 望, 山崎 智弘, 北浦 良樹, 近藤 三樹郎: せん断力を受けるジオシンセティックス多層ライナーの荷重伝達特性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 17, pp 79-86, 2002.
- 15) 勝見 武, 石森 洋行, 深川 良一: ジオシンセティッククレイライナーの遮水性能に及ぼす諸要因, ジオシンセティックス論文集, Vol. 21, pp.307-314, 2006.
- 16) 佐々木貴, 川口貴之, 川尻俊三, 澁谷啓: ベントナイト系遮水シートと土の摩擦特性

- に関する実験的検討ジオシンセティックス論文集, Vol.30, pp.133-140, 2015.
- 17) 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, 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, Vol.31, pp.167-174, 2016.
 - 18) 小田哲也, 澤田豊, 中澤博志, 小林成太, 澁谷啓, 河端俊典, 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, Vol.31, pp.175-182, 2016.
 - 19) Langton, D.D.: The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, Ground Engineering Septemer, pp.33-34, 1999.
 - 20) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き, 2012.
 - 21) Housner, G.W.: The Dynamic Behavior of Water Tank, 1963. Bulletin of the Seismological Society of America, 53(2), 381-387.

