

図 2.2-15 地震のみの場合の破壊メカニズム

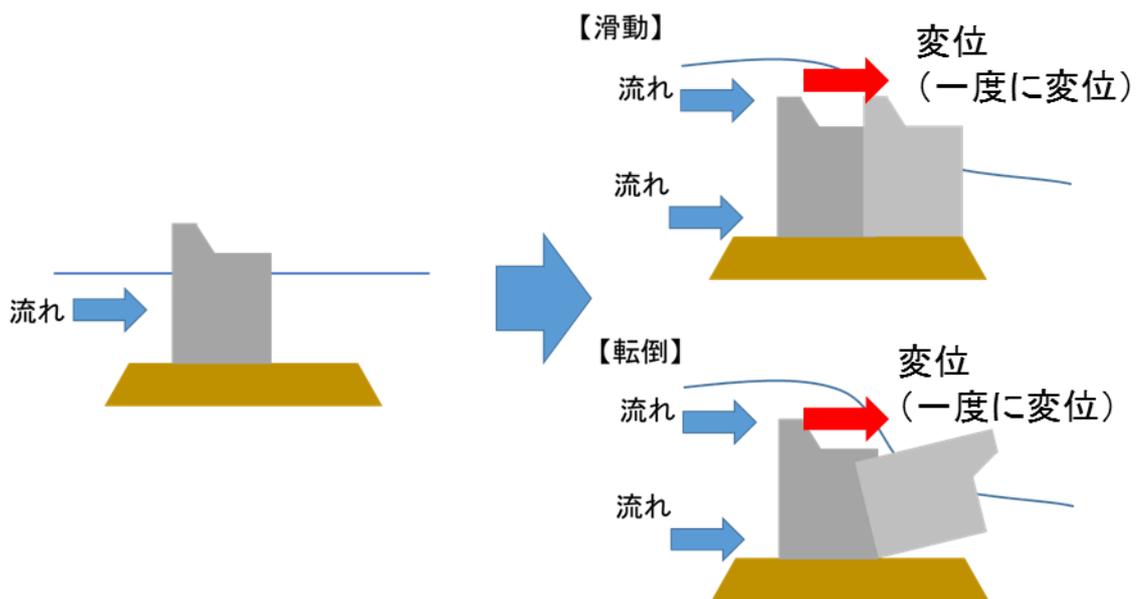


図 2.2-16 津波のみの場合の破壊メカニズム

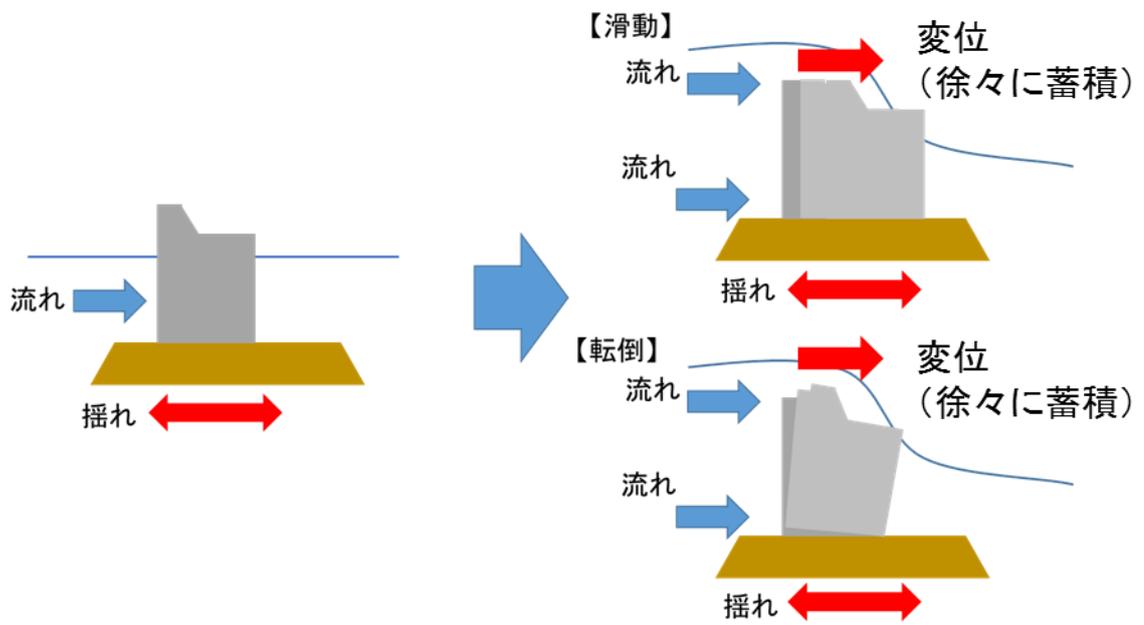


図 2.2-17 地震と津波重畳時の破壊メカニズム⁵⁾



(a) 転倒状況



(b) マウンドにめり込み傾いている状況

図 2.2-18 地震と津波重畳時の実験時における破壊状況

2.2.3 加振周波数の違いによる検討

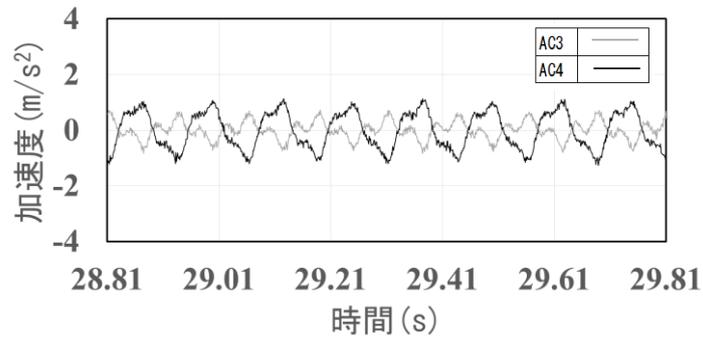
(1) 加振周波数の違いによる防波堤への影響

地震の周波数によって、防波堤に与える影響が異なる事から、地震と津波の重畳時においても、どのように影響が異なるかを確認するため、周波数を変えて、実験を行った。加振強度を 50Gal, 加振周波数を 20Hz から 2Hz まで変えて実験を行った。実験ケースを表 2.2-2 に示す。例として、加速度の時刻歴について、加振周波数が 4Hz と 8Hz のケースについて示す。加速度計は岸側方向が(+)で、沖側方向が(-)である。図 2.2-19(a), (b)は 8Hz における地震のみと、地震と津波を重畳させたケースの、模型下側加速度(AC3)の時刻を示す。どちらも同様な挙動を示しており、地震と津波の重畳現象の影響が小さいことがわかる。一方で、模型上側加速度(AC4)は、模型下側加速度(AC3)同様、ほぼ同様な挙動を示しているが、若干、地震と津波が重畳したケースの方が、地震のみのケースと比較して、ピークの最大値が小さく、ピーク値の時間がはっきりしない。また、模型上側加速度(AC4)と模型下側加速度(AC3)の位相が反対になっていることが確認できた。これは、加振周期が短く、加速度の応答が模型上側に伝わる前に、逆向きの加速度が模型下側に作用しているためであると考えられる。

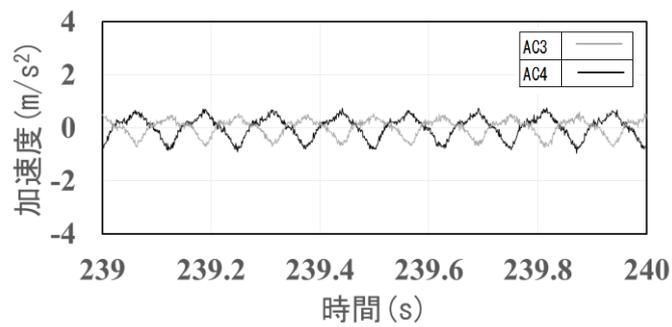
次に、4Hz における地震のみと、地震と津波を重畳させたケースについて図 2.2-20(a), (b)に示す。地震のみのケースは、模型上側加速度(AC4)と模型下側加速度(AC3)のどちらも加振周期に短周期成分がのっている状況であった。これは、8Hz のケースと異なり、模型

表 2.2-2 実験ケース

	実験条件	加振(Hz)	水位差(m)
case-2.1	地震と津波(加振と越流)	20	0.37
case-2.2	地震と津波(加振と越流)	15	0.37
case-2.3	地震と津波(加振と越流)	12	0.37
case-2.4	地震と津波(加振と越流)	8	0.36
case-2.5	地震と津波(加振と越流)	7	0.37
case-2.6	地震と津波(加振と越流)	6	0.37
case-2.7	地震と津波(加振と越流)	5	0.37
case-2.8	地震と津波(加振と越流)	4	0.37
case-2.9	地震と津波(加振と越流)	2	0.37
case-2.10	地震のみ(加振のみ)	20	-
case-2.11	地震のみ(加振のみ)	15	-
case-2.12	地震のみ(加振のみ)	12	-
case-2.13	地震のみ(加振のみ)	8	-
case-2.14	地震のみ(加振のみ)	7	-
case-2.15	地震のみ(加振のみ)	6	-
case-2.16	地震のみ(加振のみ)	5	-
case-2.17	地震のみ(加振のみ)	4	-
case-2.18	地震のみ(加振のみ)	2	-

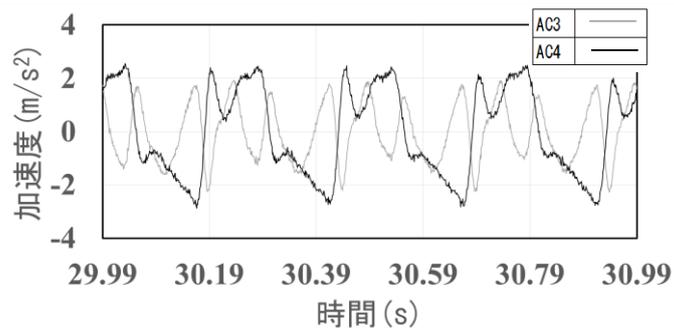


(a) 8Hz,50Gal,加振のみ

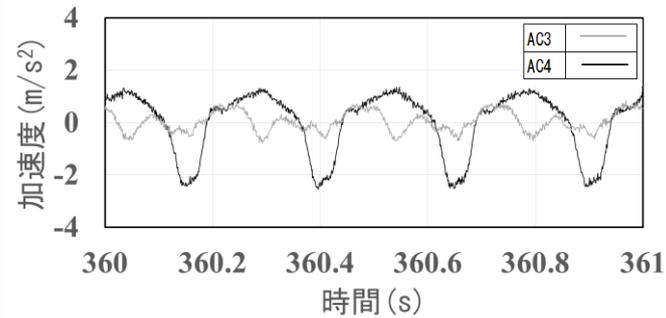


(b) 8Hz,50Gal,加振と越流の重畳

図 2.2-19 加振時加速度時刻歴(マウンド変形あり)⁶⁾



(a) 4Hz,50Gal,加振のみ



(b) 4Hz,50Gal,加振と越流の重畳

図 2.2-20 加振時加速度時刻歴(マウンド変形あり)⁶⁾

上側と下側の応答のずれによって、模型下側の加速度応答が、模型上側に作用している加速度の影響を受け、高周波数成分が現れたものであると考えられる。

一方で、4Hzにおける地震と津波が重畳したケースにおいては、模型下側加速度(AC3)については、短周期成分がのっているものの、模型上側加速度(AC4)では周期が明確に確認できる。4Hzで加振した地震と津波が重畳したケースにおいては、8Hzで加振したケースと比較して、加振周期が長い影響で、越流による影響が大きく出ており、越流方向と同様な方向に働く加速度(+方向)の継続時間が長く、逆向きに働く加速度(-)が短く、加速度の最大値については、加振のみのケースと比較して0.5~0.6倍程度小さくなっている。

各実験ケースについて、波圧の最大値と加振周波数の関係を図 2.2-21、加速度の最大値と加振周波数の関係を図 2.2-22 に示す。PG1~PG5 は防波堤模型前面の波圧計で PG1 が模

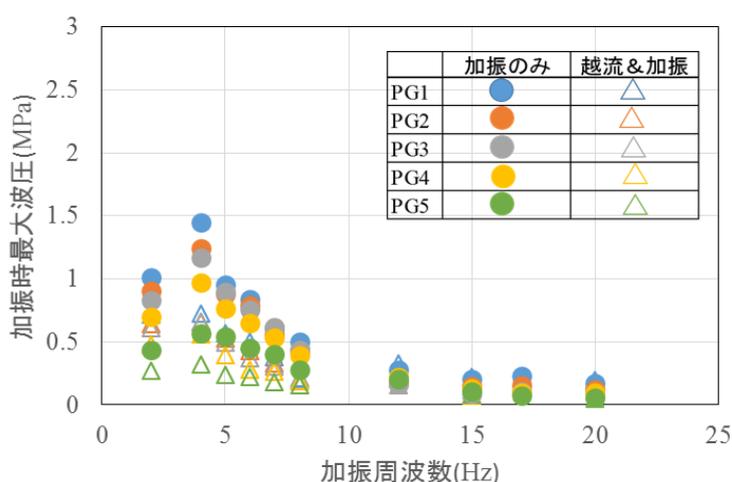


図 2.2-21 加振時最大波圧と加振周波数の関係 (マウンド変形あり)⁶⁾

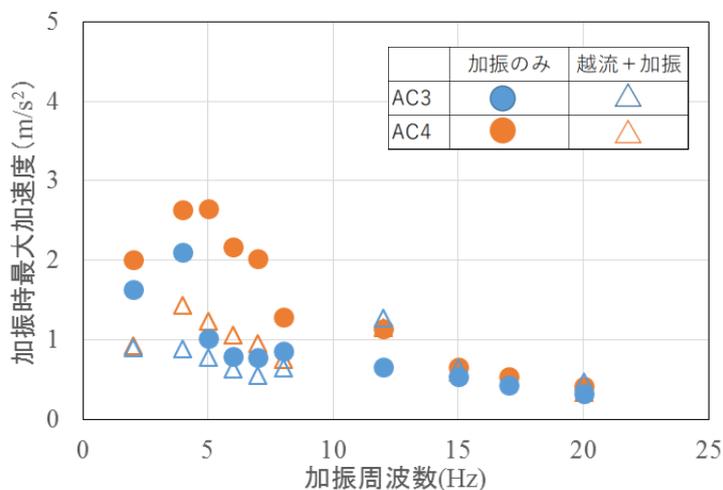


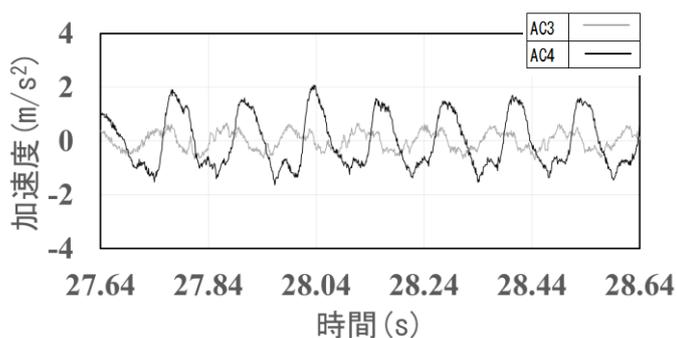
図 2.2-22 加振時最大加速度と加振周波数の関係(マウンド変形あり)⁶⁾

型下側で PG5 が模型上側である。加振のみの実験について、各地点の波圧と加速度の最大値を確認すると、加振周波数が 4Hz の時各波圧計の値がピークとなることが確認できる。地震と津波が重畳したケースで確認すると、こちらも同様に 4Hz 付近にピークが確認できる。加速度の大きさについては、地震と津波重畳時においては、加振のみの場合と比較して小さいことが明らかとなった。

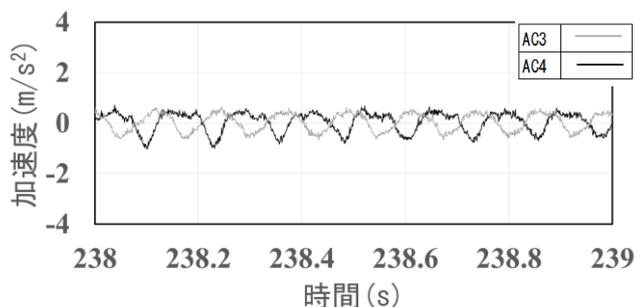
(2) 加振周波数の違いにおけるマウンドの変形の有無の影響

(1)の実験同様、加振強度を 50Gal、加振周波数を 20Hz から 2Hz まで変えて実験を行った。マウンドを固めて、変形を抑制したケースについて、一例として、加振周波数が 8Hz の加速度時刻歴を図 2.2-23 に、4Hz の加速度時刻歴を図 2.2-24 に示す。

8Hz における地震のみと、地震と津波を重畳させたケースの、模型上側加速度(AC4)については、加振のみの場合と比較して、地震と津波が重畳したケースにおいては、加速度の最大値が 0.3 倍程度と小さく、マウンドが変形するケース同様、ピークの最大値がはっきりしない傾向が確認できた。また、模型下側加速度(AC3)と模型上側加速度(AC4)の位相の差については、マウンドが変形するケースと比較すると小さいものの、位相差があることは確認できる。



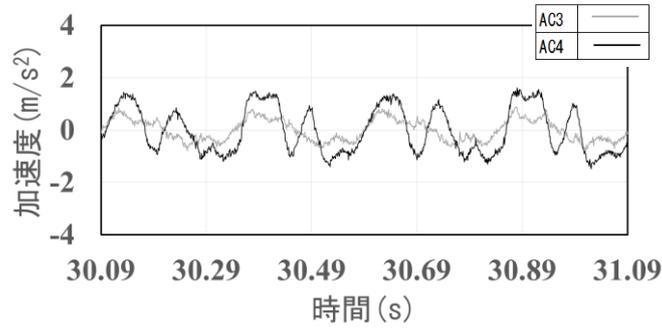
(a) 8Hz,50Gal,加振のみ



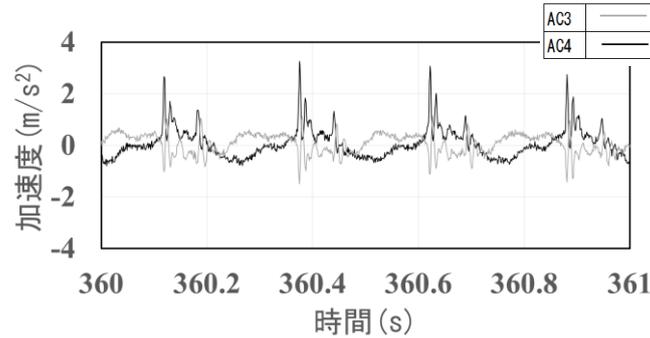
(b) 8Hz,50Gal,加振と越流の重畳

図 2.2-23 加振時加速度時刻歴(マウンド変形なし)⁶⁾

次に、4Hzにおける地震のみと、地震と津波を重畳させたケースについて確認した。模型上側加速度(AC4)の最大値の出現時刻は、加振のみの場合は模型下側加速度(AC3)が最大値を示した直後に最大値を示すのに対して、地震と津波が重畳したケースは、模型下側



(a) 4Hz,50Gal,加振のみ



(b) 4Hz,50Gal,加振と越流の重畳

図 2.2-24 加振時加速度時刻歴(マウンド変形なし)⁶⁾

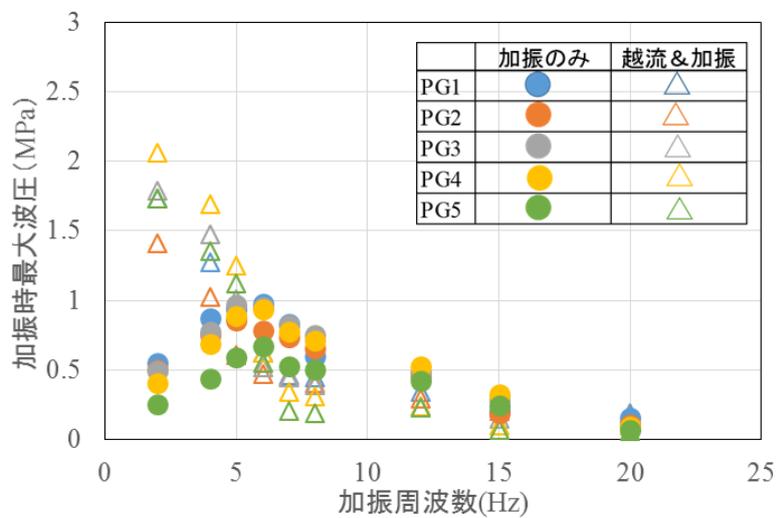


図 2.2-25 加振時最大波圧と加振周波数の関係(マウンド変形なし)⁶⁾

加速度(AC3)が低下し始めた際に最大値を示している。これは、地震と津波が重畳した場合においては、越流の影響により、模型上側の挙動が制限されていることが要因であると考えられる。

各実験ケースについて、波圧の最大値と加振周波数の関係を図 2.2-25、加速度の最大値と加振周波数の関係を図 2.2-26 に示す。加振のみの実験について、各地点の波圧と加速度を確認すると、加振周波数が 5Hz から 6Hz の時ピークとなることが確認できる。次に、地震と津波が重畳したケースで確認すると、こちらは、マウンドが変形するケースと異なり、5Hz から 6Hz 付近でのピークは確認できず、加振周波数が小さいほど、加振時最大波圧と加振時最大加速度が増大している傾向が確認できた。

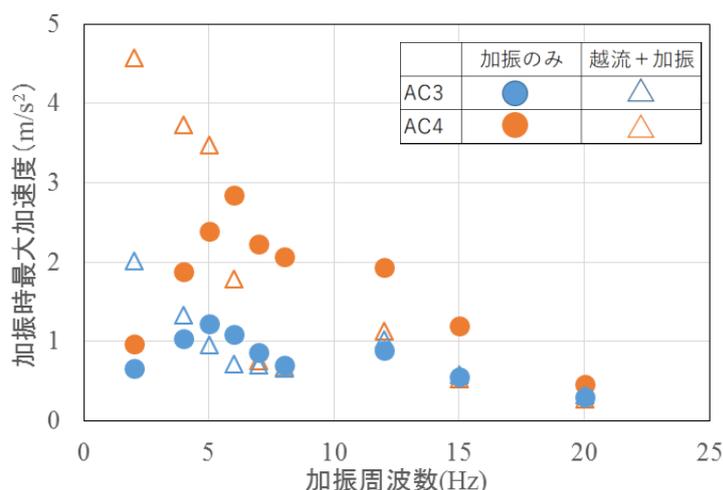


図 2.2-26 加振時最大波圧と加振周波数の関係(マウンド変形なし)⁶⁾

(3) マウンドの変形の有無による地震と津波の重畳が構造物に与える影響

地震と津波の重畳がマウンドの変形の有無による構造物に与える影響の違いについて検討した。検討は、8Hz と 4Hz のケースについて、マウンド内に設置した加速度計(AC0)と模型下側加速度(AC3)および模型上側加速度(AC4)を比較して行った。

マウンドが変形する場合の 8Hz の加速度時刻歴を図 2.2-27、4Hz の加速度時刻歴を図 2.2-28 に示す。8Hz では、マウンド加速度(AC2)と模型下側加速度(AC3)は、ほぼ同様な挙動を示している。一方で、4Hz では、マウンド加速度(AC2)の増加開始時刻が模型下側加速度(AC1)の増加開始時刻と比較して、若干早い。また、模型上側加速度(AC4)が最小となる時に、マウンド加速度(AC2)は最大となっており、その時の模型下側加速度(AC3)はほぼ 0 である。マウンドが変形することにより、マウンドと構造物の挙動に時間差を生み出し、加速度が同じ方向に働く時間が、ずらされているものと考えられる。

次に、マウンドが変形しない場合の 8Hz の加速度時刻歴を図 2.2-29、4Hz の加速度時刻歴を図 2.2-30 に示す。マウンドが変形しない場合は、8Hz で地震と津波が重畳したケース

では、マウンドが変形するケース同様、マウンド加速度(AC2)と模型下側加速度(AC3)は、ほぼ同様な挙動を示している。一方で、4Hzでも、8Hzで地震と津波が重畳したケース同様、マウンド加速度(AC2)と模型下側加速度(AC3)は、ほぼ同様な挙動を示している。また、マウンドが変形するケースとは異なり、マウンド加速度(AC2)と模型下側加速度(AC3)が越流と同一方向(+)に働く際に、模型上側加速度(AC4)も同一方向に作用している。

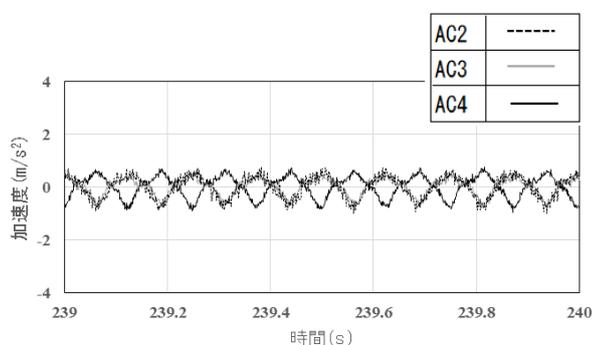


図 2.2-27 8Hz,50Gal 加振時加速度時刻歴(マウンド変形あり)⁶⁾

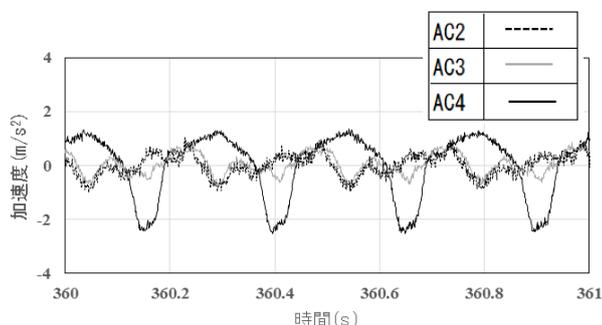


図 2.2-28 4Hz,50Gal 加振時加速度時刻歴(マウンド変形あり)⁶⁾

以上のことから、地震と津波の重畳時におけるマウンドの変形の有無による、構造物に与える影響の違いは、マウンドが変形する場合は、岸側加振開始時に図 2.2-31(a)のように、マウンドに伝わった加速度が構造物に伝わる時に、マウンドの変形により若干の時間差が発生する。その、時間差の影響で模型下側と模型上側の加速度の応答が異なり、結果、図 2.2-31(b)のように、同じ方向に加速度が作用する時間が短くなり、地震と津波が重畳した際の構造物に与える加速度の影響を抑制していると考えられる。一方で、マウンドが変形しないケースにおいては、岸側加振開始時に図 2.2-32(a)のように、マウンドと構造物下端においては同様な挙動を示す。そのため、模型下側から模型上側へ加速度が伝わる時間差が短くなる。よって、図 2.2-32(b)のように、加速度が全体的に同一方向に働く時間が長くなり、構造物全体に働く加速度は大きくなる。その結果、構造物に大きな慣性力が発生し、残留変位を蓄積しているものと考えられる。

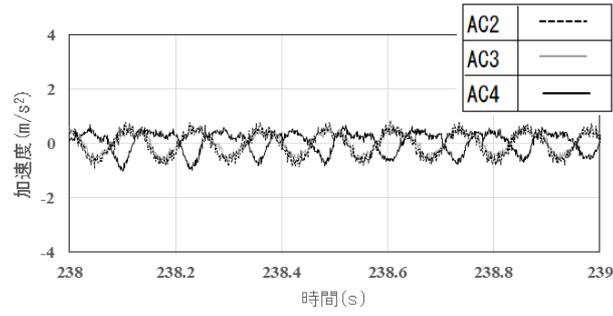


図 2.2-29 8Hz,50Gal 加振時加速度時刻歴(マウンド変形なし)⁶⁾

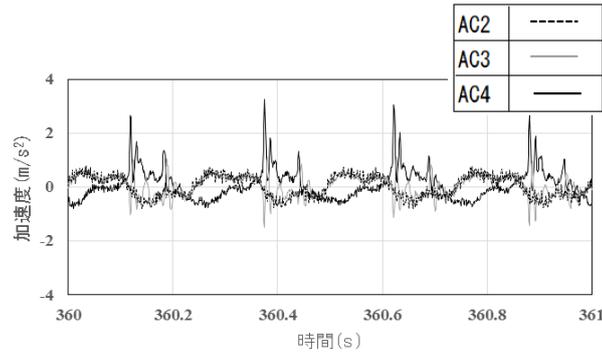
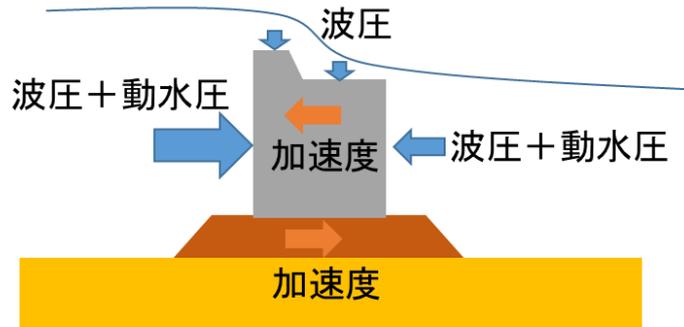
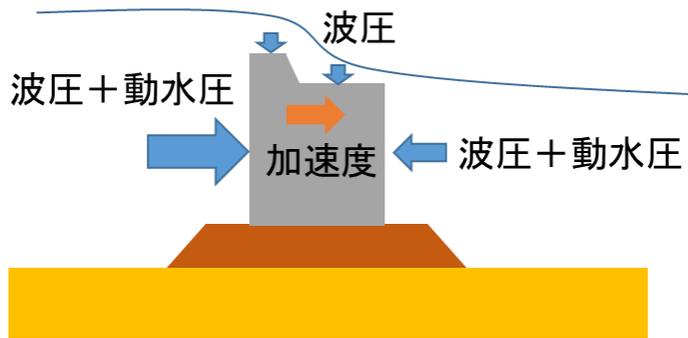


図 2.2-30 4Hz,50Gal 加振時加速度時刻歴(マウンド変形なし)⁶⁾

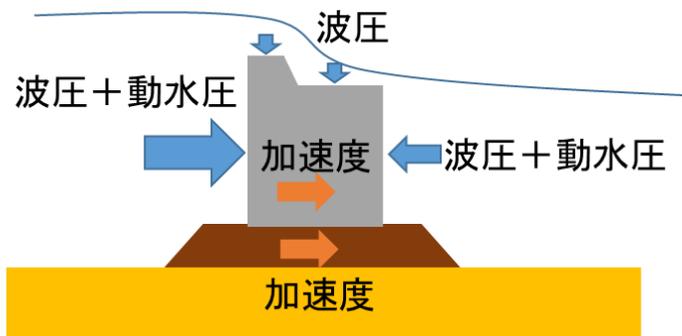


(a) 岸側加振開始

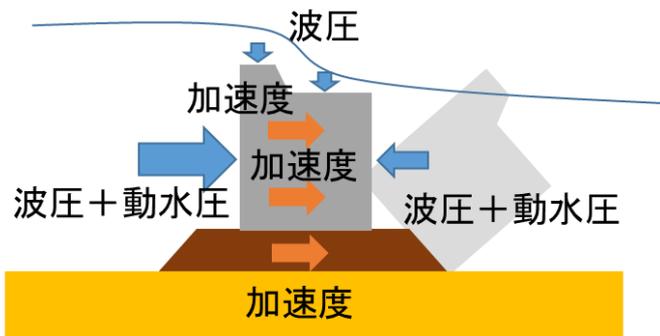


(b) 岸側加振後加速度 0

図 2.2-31 マウンド変形ありの場合の地震と津波重畳時における構造物の挙動



(a) 岸側加振開始



(b) 岸側加振後加速度 0

図 2.2-32 マウンド変形なしの場合の地震と津波重畳時における構造物の挙動⁶⁾

また、マウンドの変形の有無による模型の変形角度について、変位計の時刻歴データを用いて算出し、最大の角度を求めて周波数と比較した。結果を図 2.2-33 に示す。マウンドが変形するケースにおいては、7Hz 程度で若干、角度が増大し、周波数が小さくなるほど角度が増大し、2Hz では 1.2° が確認できる。一方で、マウンドの変形が無いケースでは、4Hz で 1.0° の最大の角度となり、周波数が小さくなると、角度が減少している傾向が確認できる。これは、マウンドが変形する事により、模型の上下に働く加速度の応答が異なる事により、全体的な加速度による動水圧や慣性力は低減されているが、模型全体に傾きが発生しやすい状況となる。そのため、全体的な滑動に対する影響は低減されるが、転倒に対しては危険側であると考えられるため、大きな加速度が発生する場合は注意が必要であることが考えられる。

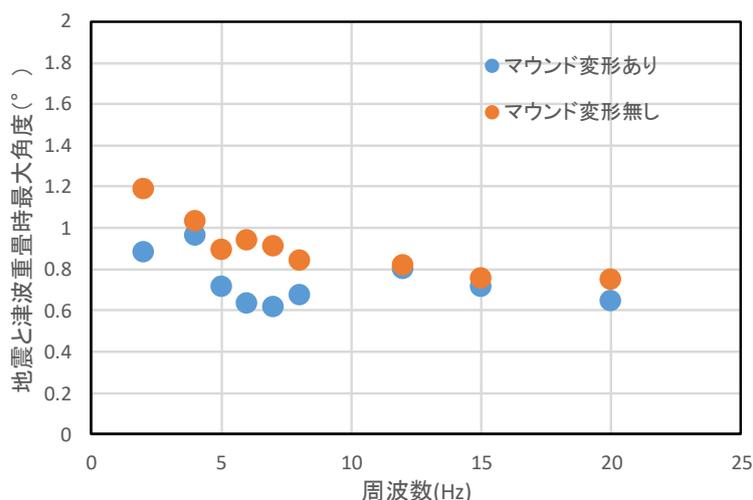


図 2.2-33 加振時最大変位と加振周波数の関係

(4) 低周波数加振における防波堤への影響

マウンドの変形の有無における低周波数加振時の影響について、ワイヤー式変位計のデータで確認した。図 2.2-34, 図 2.2-35 に示す。データは 1000Hz でサンプリングしたものを 10 データ毎に移動平均をとったものである。2Hz で加振し、地震と津波を重畳させたケースについて、模型下側の変位(DT2)と模型上側の変位(DT1)の加振時における時刻歴について、マウンドの変形の有無における違いを確認した。模型上側と下側の変位の差について着目すると、図 2.2-34 に示すマウンドが変形する場合は、岸側変位時の最大変位は、模型上側の変位(DT1)の方が大きいものの、沖側変位時に同様な挙動になり、大きな残留変位が発生していない。一方で、図 2.2-35 に示すマウンドが変形しない場合は、岸側変位時の最大変位の時間が模型下側(DT2)と模型上側(DT1)で異なる。この結果、沖側変位時に模型上側の変位(DT1)が戻りきらず、残留変位として蓄積しているものと考えられる。この現象は、これまでの検討結果から、加振一波の継続時間が長いほど、影響が大きいため、低周波数加振においては、地震と津波の重畳時においても変位が増大する可能性が大きい事が明らかと

なった.

加振時最大変位について加振周波数との関係を図 2.2-36 に示す. マウンドの変形が無い場合は, 防波堤の変位は下側(DT2)と上側(DT1)であまり差が無く同様に変位している. 一方で, マウンドの変形がある場合は, 5Hz より低周波数では, 防波堤の下側(DT2)と上側

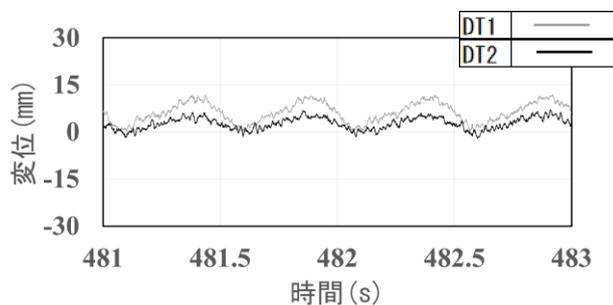


図 2.2-34 変位時刻歴(マウンド変形あり,2Hz,50Gal)

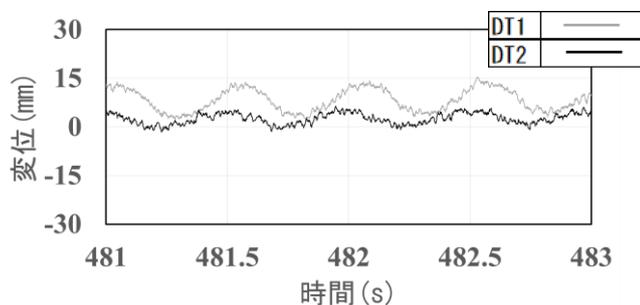


図 2.2-35 変位時刻歴(マウンド変形なし,2Hz,50Gal)

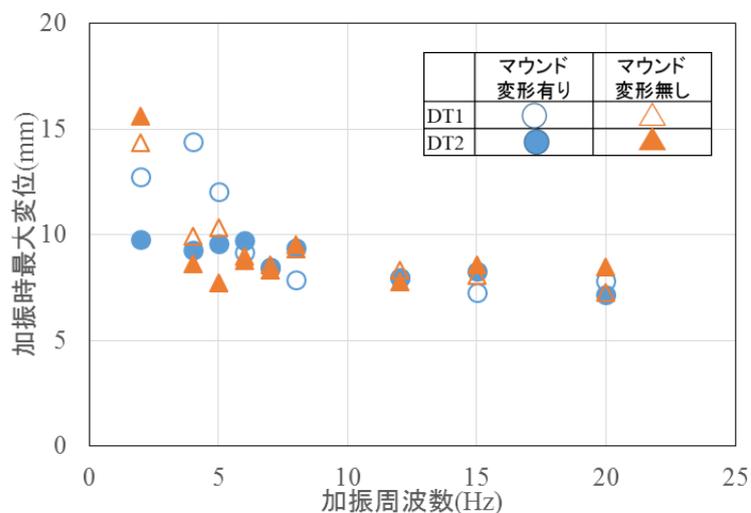


図 2.2-36 加振時最大変位と加振周波数の関係

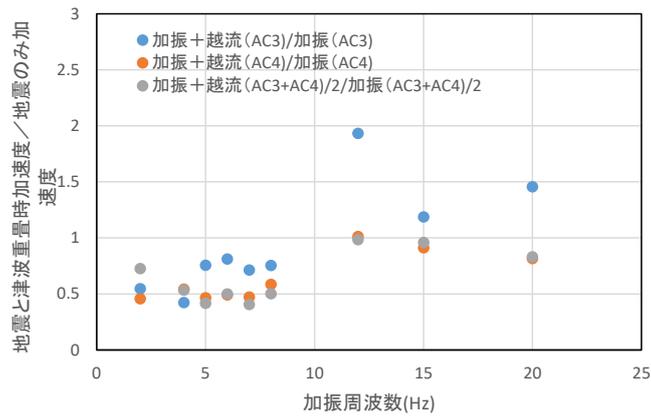
(DT1)での変位の差が大きくなっている。この結果より、防波堤のマウンドは地震と津波重畳時において、ケーソンの加速度を抑制する効果があり、マウンドが変形しない状態の検討をすることにより、安全側の評価が可能であることが明らかとなった。

(5) 地震と津波の重畳現象における水位差と加速度の関係

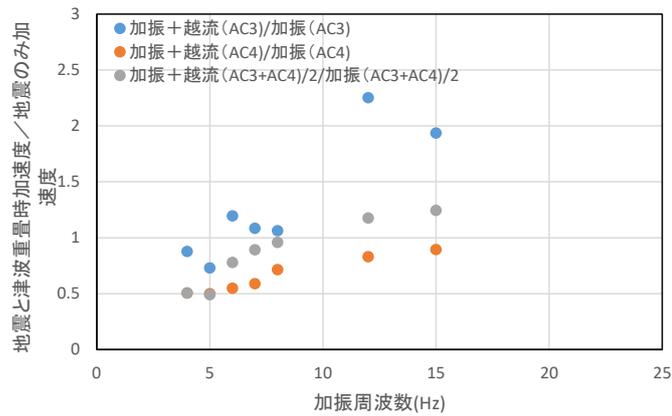
地震と津波の重畳時においては、越流によって、防波堤の上側の変位が抑えられ、結果、防波堤全体に作用する加速度が減少する現象が確認されている。この現象について、周波数、水位差の違いについて確認した。加振 50Gal と加振 75Gal の周波数と加速度の関係を図 2.2-37 に示す。なお、縦軸は、地震と津波重畳時の加速度と地震のみの加速度の比をとったものである。周波数との関係について見ると、模型上側加速度(AC4)については、ほとんどのケースで地震と津波の重畳時の最大加速度と地震のみの最大加速度の比が 1.0 以下となり、地震と津波重畳時における、模型上側加速度が低減されていることがわかる。また、加振周波数が短いほど、低減率は大きく、5Hz で 0.5 程度である。一方で、模型下側加速度(AC3)については、10Hz 以上の高周波数側では、地震と津波の重畳時の最大加速度と地震のみの最大加速度の比が 1.0 以上となっている。また、50Gal で加振したケースにおいては 10Hz 以下のケースでは地震と津波の重畳時の最大加速度と地震のみの最大加速度の比が 1.0 以下であるのに対して、75Gal で加振したケースは、5Hz 以下の低周波数側では 1.0 以下となっている。

以上の結果から、地震と津波の加速度の低減効果については、主に越流の影響で、模型上側の変位が抑制され、模型上側の加速度が低減されることにより、模型全体に与える加速度が低減しているものと考えられる。一方で、模型下側加速度(AC3)については、加振により模型底面に作用する加速度と、模型上側の変位によって作用する加速度の両方が作用し、越流による直接的な低減効果は作用していないものと考えられる。そのため、10Hz 以上の高周波数のケースにおいては、加振の影響が模型上側まで伝わっていないため、越流による低減効果が発揮されず、地震と津波重畳時の加速度と地震のみの加速度の比が 1.0 以上となっているものと考えられる。また、50Gal のケースと 75Gal のケースを比較すると、75Gal で加振したケースの方が、低減効果が大きい。これは、加振の加速度が大きいほど、模型上側に伝わる加速度も大きくなり、低減効果が現れやすいためであると考えられる。

マウンドが変形しない場合のケースについて、加振 50Gal の加速度と周波数の関係を図 2.2-38 に示す。模型上側加速度(AC4)の最大値においては、5Hz 以下の低周波数側において、加速度の越流による低減効果が確認できていない。これは、模型に加速度が発生した際に、マウンドが変形しないため、越流による模型上側の加速度の抑制効果以上の加速度が働き、増大したものと考えられる。このことより、地震と津波の重畳時における加速度の影響については、越流とマウンドの変形の 2 つのパラメータが関係しているものと考えられる。



(a) 50Gal, マウンド変形あり



(b) 75Gal マウンド変形あり

図 2.2-37 防波堤に働く加速度と周波数の関係

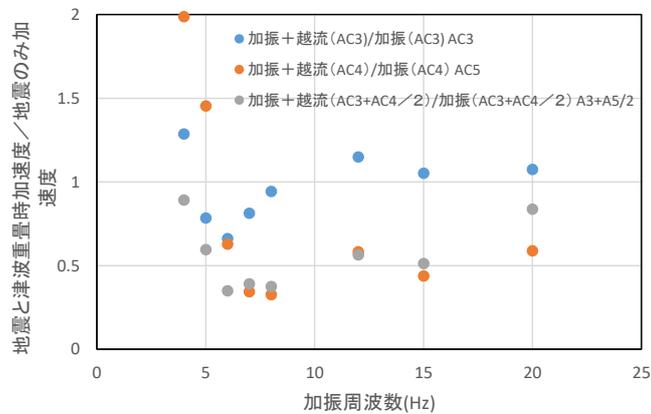


図 2.2-38 防波堤に働く加速度と周波数の関係(50Gal, マウンド変形無し)

次に、2Hz で加振したケースの加速度と水位差の関係を図 2.2-39 に示す。なお、縦軸は、地震と津波重畳時の加速度と地震のみの加速度の比をとったもので、横軸は水位差である。水位差が 0.27m 以上になると、加速度の低減効果が発揮されず、地震のみの加速度より地震と津波が重畳した時の加速度が増大していることがわかる。この原因について、模型前面水位と模型背面水位のそれぞれに着目し、実験ケースを追加し、模型前面水位と加速度の関係について確認した。結果を図 2.2-40 に示す。なお、追加したケースは、初期水位を模型パラペット天端から 10cm 下げて行ったケースで、前面の越流は確認されていないケースである。模型前面水位と加速度の関係については、模型前面の水位が 0.0m 以下となる越流をしていないケースで加速度の増大が見られたものの、50Gal で加振したケースでは、越流している条件でも、加速度が増大していることが確認できる。一方で、模型背面水位について確認すると、模型背面水位が大きく低下しているケースにおいて加速度の低減効果は確認できていない。

また、越流の有無による防波堤に働く加速度の違いについて時刻歴を比較した。2Hz, 50Gal, マウンド変形有りのケースの時刻歴を図 2.2-41, 2Hz, 75Gal, マウンド変形有りのケースの時刻歴を図 2.2-42 に示す。越流の有無による加速度時刻歴の違いについては、模型下側加速度(AC3)では若干の加速度の大きさの違いはあるものの、大きな違いとはなっていない。一方で、模型上側加速度(AC4)については、50Gal, 75Gal のどちらのケースにおいても越流しているケースの加速度と比較して、越流していないケースの加速度が大きい。これは、越流する場合は、越流によって模型上側の変位が抑制され、結果、防波堤に働く加速度が抑制されているためであると考えられる。他方、越流しない場合は、越流による加速度の低減がなく、地震の揺れの影響が防波堤上側で増幅され、動水圧と慣性

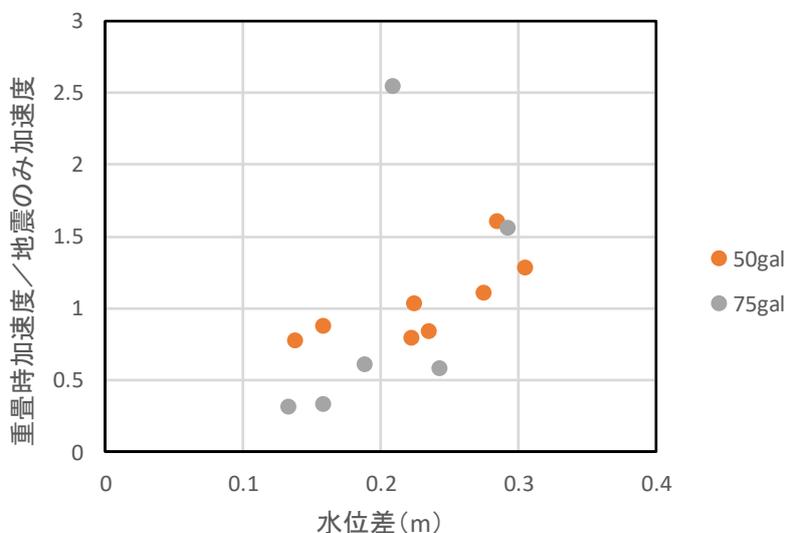
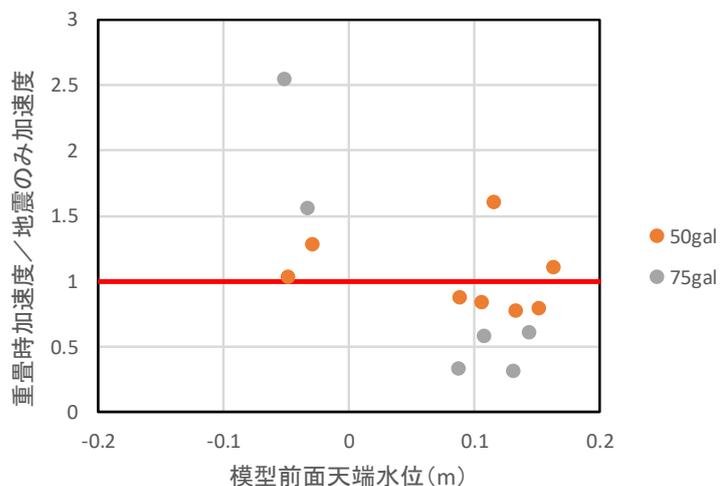


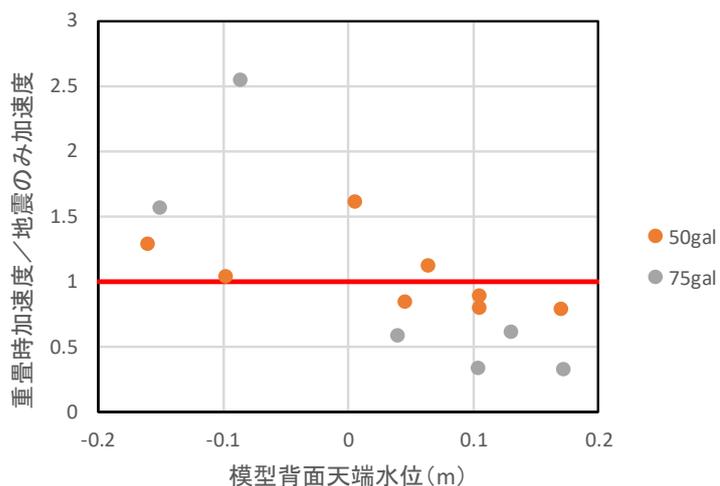
図 2.2-39 防波堤に働く加速度と水位差の関係(2Hz, マウンド変形あり)

力が大きくなると考えられる。

以上の事より、越流による加速度低減効果と水位差の関係については、越流していないケースと模型背面の水位がある一定存在しないと、越流による加速度の低減効果が発揮されない可能性が考えられる。その際は、模型の挙動によっては、地震のみの場合より加速度が増大する可能性が考えられる。

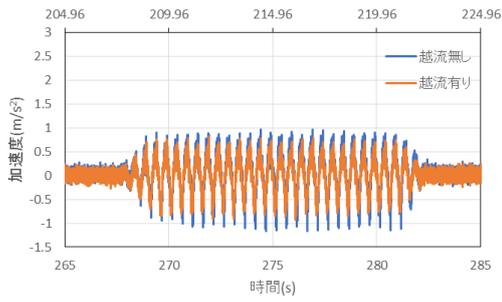


(a) 模型前面水位と加速度の関係

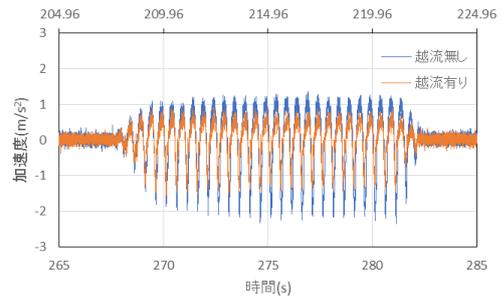


(b) 模型背面水位と加速度の関係

図 2.2-40 防波堤に働く加速度と水位差の関係(2Hz, マウンド変形あり)

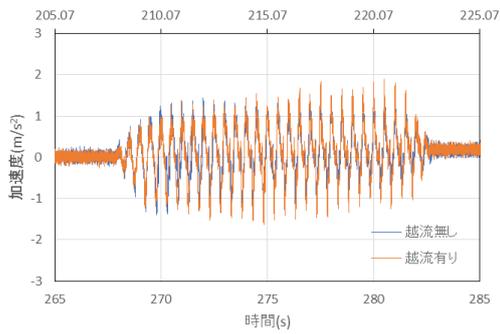


(a) 模型下側加速度(AC3)

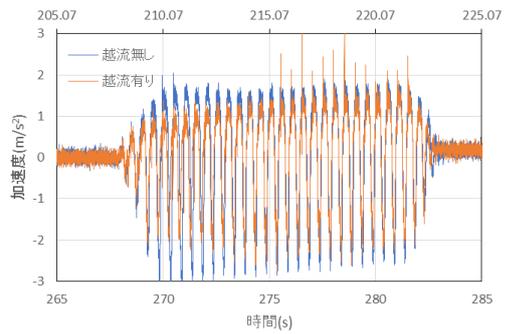


(b) 模型上側加速度(AC4)

図 2.2-41 越流の有無による加速度時刻歴(2Hz, 50Gal, マウンド変形あり)



(a) 模型下側加速度(AC3)



(b) 模型上側加速度(AC4)

図 2.2-42 越流の有無による加速度時刻歴(2Hz, 75Gal, マウンド変形あり)

2.3 地震と津波重畳時における防波堤腹付工の効果

2.3.1 腹付工の有無における波圧特性の違い

腹付工をマウンド天端より 0.275m 設置し、水位差は異なるが、100Gal で加振した腹付工なしと腹付工有りの結果の時刻歴を比較し、腹付工の有無における波圧特性の違いの確認を行った。加振初期の拡大波形および水平変位の時刻歴を図 2.3-1 に示す。水平変位の時刻歴波形をみると、加振 2 波目から腹付工無しのケースは水平方向の残留変位が発生しているのに対し、腹付工が無いケースはほとんど発生していないことが分かる。その時点の、波圧計の波形を確認すると、模型前面(PG3)については、大きな違いは無く、模型背面(PG10)については水平変位の影響で、わずかながら波圧が増大しているものと考えられ、水平変位の直接的な原因では無い。模型底面の波圧(沖側より PG13, PG14, PG15)の時刻歴を確認すると、加振時における波圧増大分が腹付工無しのケースでは、腹付工有りのケースと比べて PG13 で 3.41 倍、PG14 で 1.51 倍、PG15 で 1.03 倍であった。これは、鉛直変位の時刻歴より、腹付工無しのケースは越流時にわずかながら模型前面が浮き上がっていることが原因では無いかと考えられる。この結果より、今回の検討に使用した模型は転倒モードが卓越していると考えられ、腹付工無しのケースにおいては、越流によって模型上面が押され、わずかながら模型前面が浮き上がった状態で、加振の影響を受けることにより、模型に水平変位が生じたものと考えられる。対して、腹付工有りのケースにおいては、越流時の模型前面の浮き上がりを抑えることにより、加振時における模型底面にかかる波圧を低減し、水平変位を抑制できたものとする(図 2.3-2)。

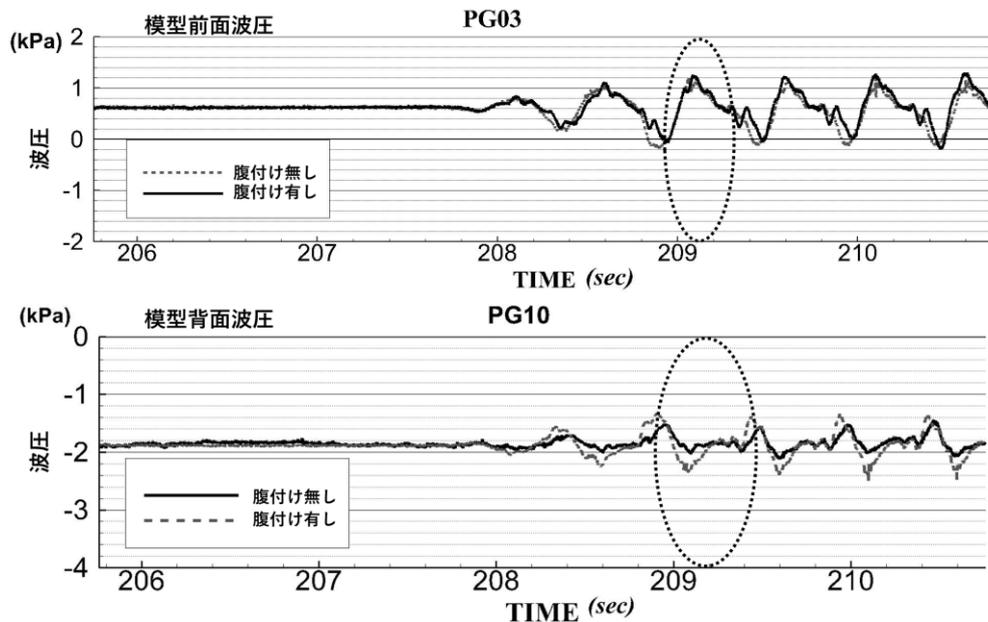


図 2.3-1 加振初期における波圧及び変位の時刻歴 7)

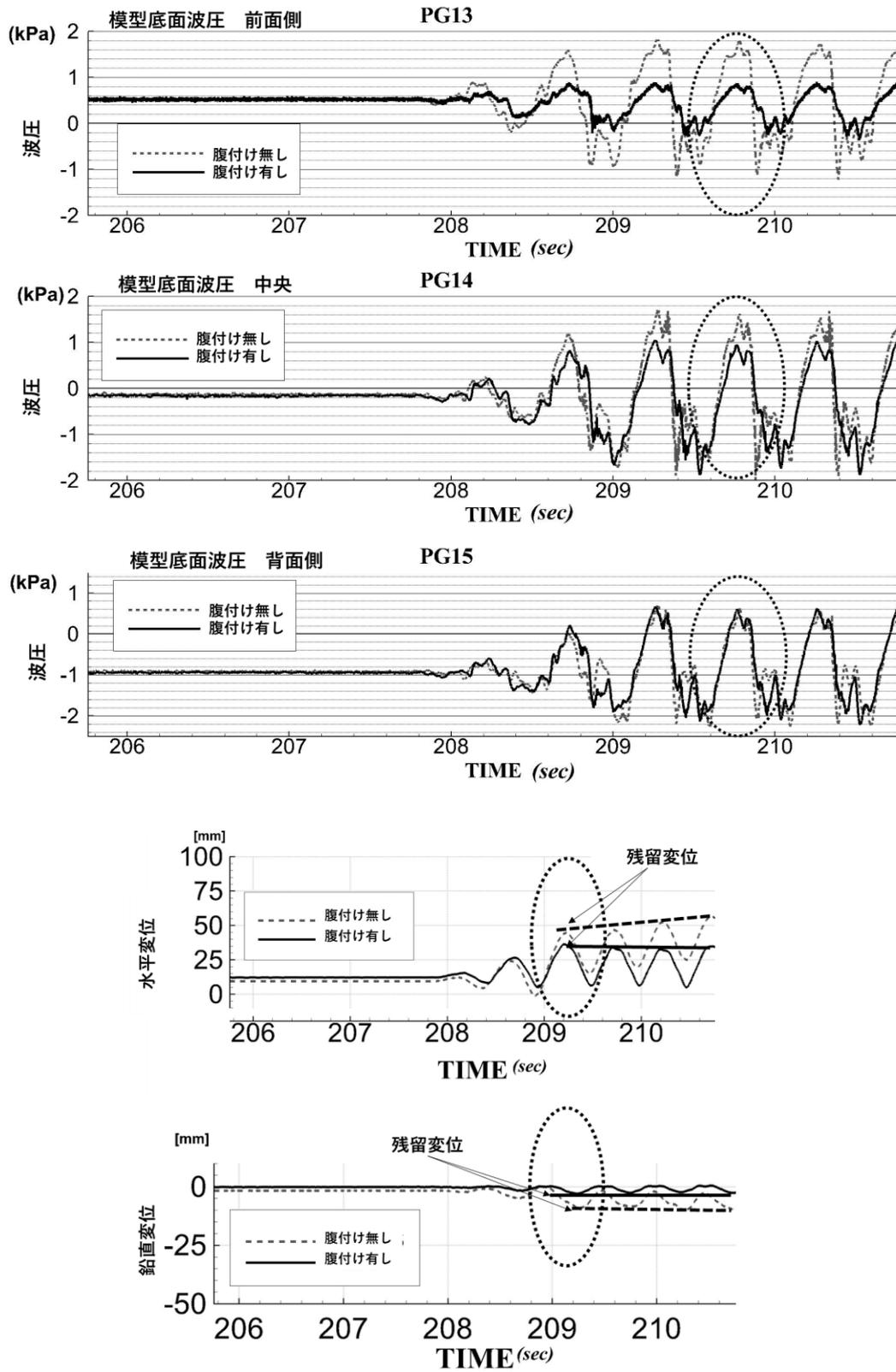
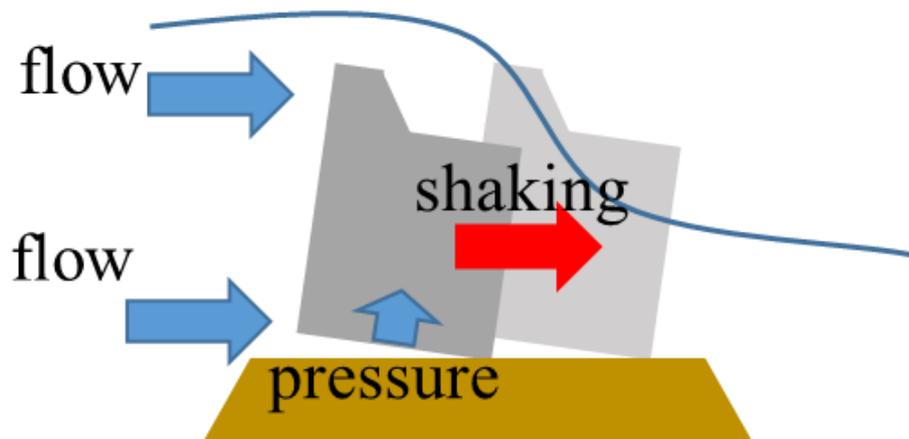
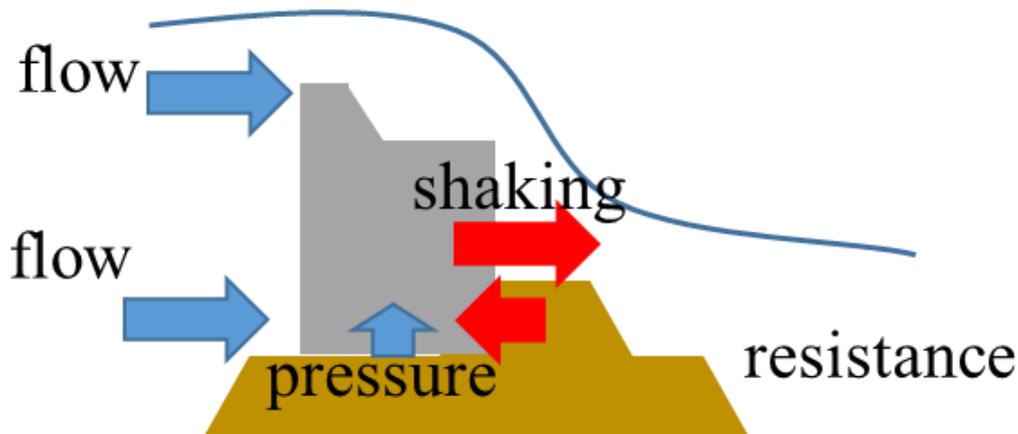


図 2.3-1 加振初期における波圧及び変位の時刻歴 ㊦ (つづき)



(a) 腹付工無し



(b) 腹付工有り

図 2.3-2 腹付工の有無による地震と津波重畳時の破壊メカニズム⁷⁾

2.3.2 腹付工の効果の算定

腹付工の効果について、菊池らは、直線滑りを仮定し、裏込めの受動抵抗力を求めている。そこで本研究においても、菊池ら⁸⁾の式(2.3-1)を用いて腹付工の抵抗力を算定した。ここで、 R は裏込めによる水平抵抗力、 W_s は滑り線より上方の裏込め重量、 θ は滑り線の水平方向とのなす角度、 φ は裏込め材料の摩擦角、 δ は壁面摩擦角である。本件等においては、通常の港湾構造物の設計で用いられる $\delta=-15^\circ$ を用いた。計算して得られた腹付工の抵抗力は3.36kNであった。模型の抵抗力は7.78kNである。腹付工の算定結果を用いて、加振前後における抵抗力を検討した結果を図2.3-3に示す。

抵抗力は、本実験においては、抵抗力は越流によって初期抵抗力から6%~12%程度低下し、さらに加振時には、初期抵抗力から11%~17%低下することを確認した。抵抗力

の時刻歴について 100Gal で実施したケースについて確認した。結果を図 2.3-4 に示す。抵抗力の時刻歴は、越流時に徐々に抵抗力が低下し、加振時においても、加振の影響を受けて変動することが確認できる。

$$R = \frac{W_s \tan(\theta + \varphi)}{1 + \tan \delta \cdot \tan(\theta + \varphi)} \quad (2.3-1)$$

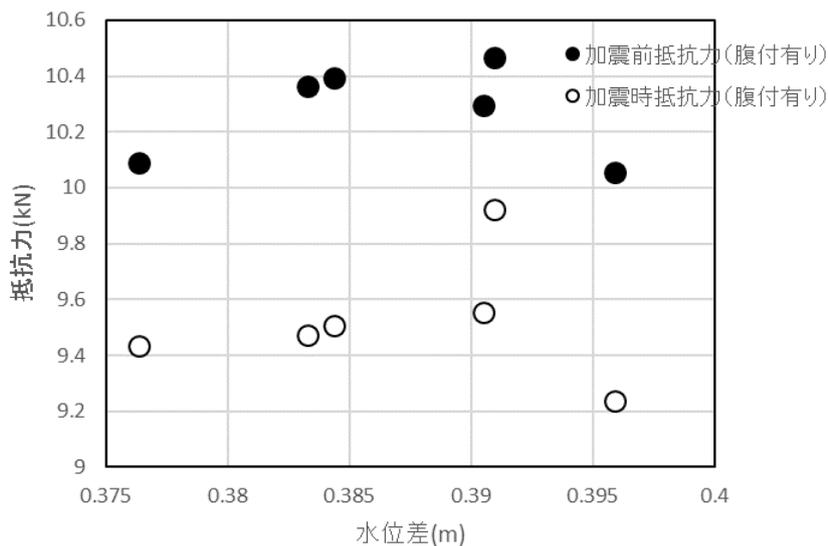


図 2.3-3 加振前後における抵抗力⁷⁾

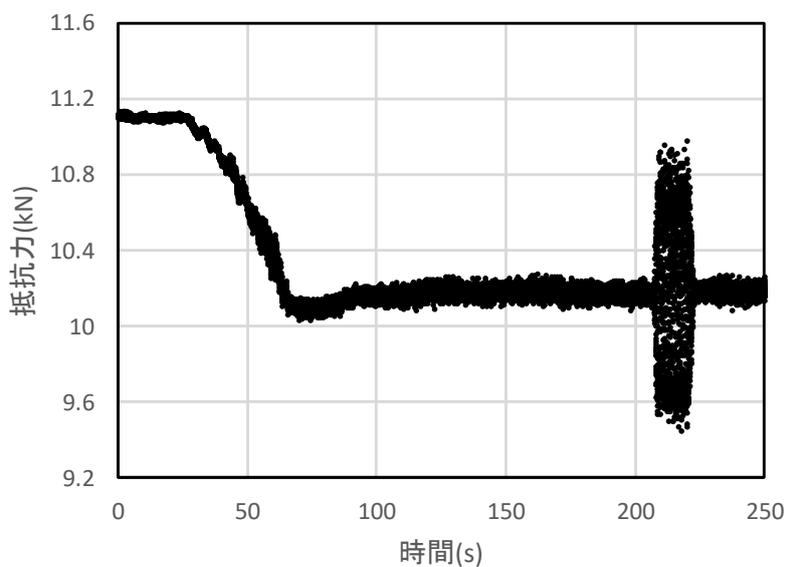
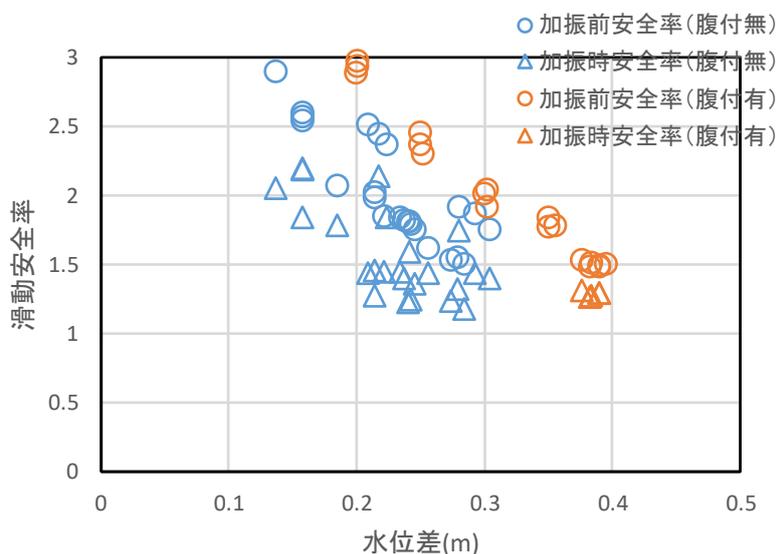


図 2.3-4 100Gal で加振した時の抵抗力の時刻歴⁷⁾

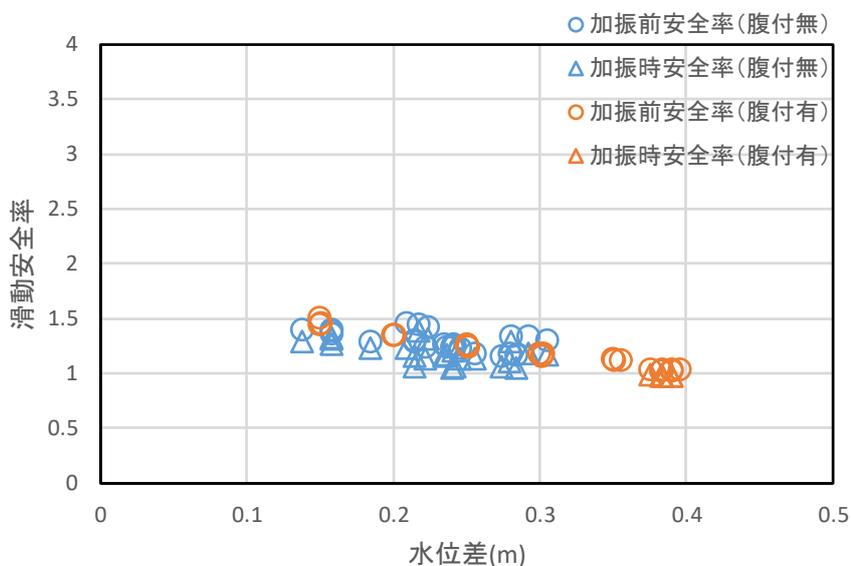
2.3.3 腹付工の有無における安全率の比較

腹付工の有無における安全率の比較を行った。結果を図 2.3-5 に示す。図 2.3-5 の安全率については、加振前の越流状態の最小となる安全率と加振中における最小の安全率を記載している。また、腹付工有りのケースについては、腹付工無しの結果と比較するため、時刻歴より抽出した安全率も同時に記載している。

越流時における安全率については、腹付工がある場合とない場合で水位差が同程度の場



(a) 滑動安全率



(b) 転倒安全率

図 2.3-5 腹付工の有無による転倒安全率の違い⁷⁾

合は、腹付工の抵抗力の効果によって腹付工がある場合の方の安定度が増加している。次に加振時の安全率については、腹付工がないケースは 150Gal で加振した際は、最小滑動安全率 1.39 はあるものの、0.07mの残留変位が確認された。これは、2.3.1 で述べた越流時の変形による加振時の模型底面の波圧増加が原因であると考えられる。

一方、腹付工有りのケースは加振前の越流状態で、概ね最小滑動安全率 1.25、最小転倒安全率 0.97 であったが、破壊が発生したケースは 200Gal で加振したケースのみであった。破壊が発生した後の腹付けの状況について、図 2.3-6 に示す。破壊状況として、腹付工については越流もしくは加振時の振動によって、腹付工天端の沈下が確認できた。そのため、今回の破壊については腹付工の機能が低下したために、破壊に至ったと考えられる。

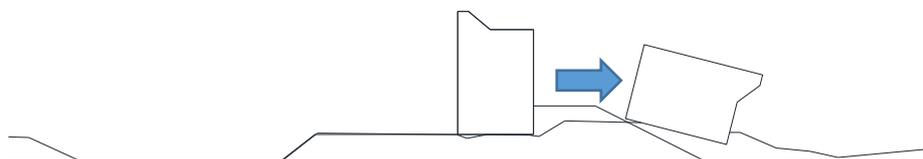
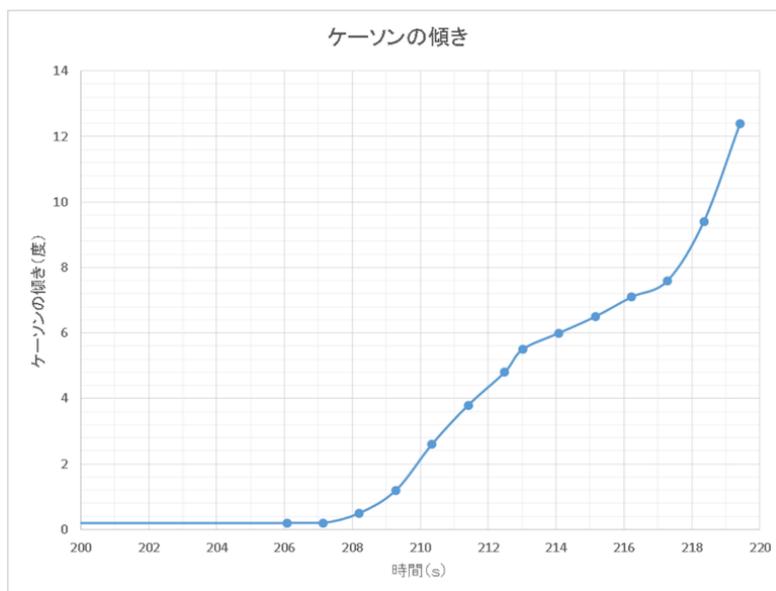


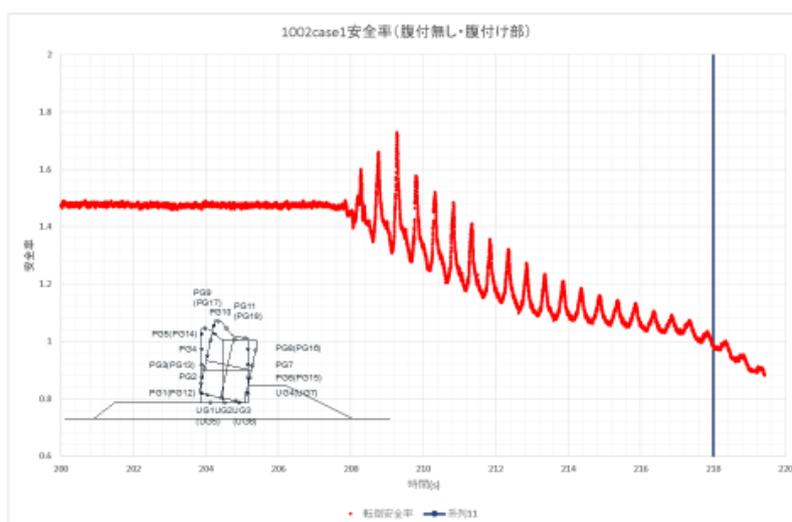
図 2.3-6 実験後状況図 7)

2.3.4 腹付工を有する防波堤における破壊過程の確認

腹付工を有する防波堤における、破壊過程について地震と津波重畳時における模型の傾きを変位計のデータを基に算出し、防波堤の傾きの時刻歴について確認を行った。結果を図2.3-7に示す。防波堤の大きな破壊が確認されたのは、実験映像を確認すると概ね218sである。時刻歴の模型の角度を確認すると、大きな破壊に至るまでは、地震と津波が重畳した時の加速度と波力が重なった際に徐々に残留角度が増加していることがわかる。また、各波圧



(a) ケーソンの傾き



(b) 転倒安全率

図 2.3-7 破壊実験における時刻歴

計の時刻歴データを用いて転倒安全率について時刻歴を確認すると、模型の残留角度が増加するにつれて、徐々に安全率が低下し、安全率が 1.0 を概ね下回っている際に大きな破壊へとつながっている様子が確認できた。

2.4 地震と津波重畳時における構造物への影響要因

ここまで、水理模型実験を用いて、地震と津波の重畳時における防波堤に働く荷重の影響について述べてきた。これまでの検討において、条件によって防波堤に働く加速度に対する影響が異なることが判明した。その加速度に与える影響要因としては、防波堤前面の越流水深、マウンドの変形の有無、重畳する地震の周波数が考えられる。これらの要因が、影響し合い、防波堤に働く加速度を決定し、慣性力と動水圧に影響を与えている。

地震時に発生する外力は、慣性力と動水圧が考えられる。動水圧は Westergaard の近似式より求めることが可能で、Westergaard の近似式は、式(2.4-1)で算定することができる。ここで、 W_0 は水の単位体積重量、 α は地震の水平震度、 h は水深(m)、 y は水面から任意点までの深さ(m)、 P_{dw} は任意深さ y の動水圧(kPa)である。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{hy} \quad (2.4-1)$$

また、慣性力については、式(2.4-2)で算定することができ、ここで F は慣性力、 k_h は震度、 W は重量である。

$$F = k_h W \quad (2.4-2)$$

動水圧と慣性力のどちらも加速度が関係しており、地震と津波重畳時においても、加速度を把握することが重要で、防波堤に働く加速度は、防波堤全体の挙動により変化するため、マウンドの変形の有無や重畳する地震の周波数が関係している。

一方で、静水圧差による算定式は、式(2.4-3)～(2.4-5)で、 p_1 は直立壁前面の底面における波圧強度(kN/m²)、 p_2 は直立壁前面の天端面における波圧強度(kN/m²)、 p_3 は直立壁背面の底面における波圧強度(kN/m²)、 $\rho_0 g$ は海水の単位体積重量(kN/m³)、 h' は直立壁の底面の水深(m)、 h_c は静水面から直立壁天端面までの高さ(m)、 η_f は直立壁前面の静水面からの津波高さ(m)、 η_r は直立壁背面の静水面からの津波高さ(m)、 α_f は直立壁前面の静水圧補正係数、 α_r は直立壁背面の静水圧補正係数である。静水圧式においては水位が関係しており、動水圧を算定する Westergaard の近似式においても、水深が深いほど動水圧が大きくなるため、越流水位の影響が防波堤に働く波力に対しての影響も大きく、防波堤前面の越流水深が重要となってくる。

$$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h') \quad (2.4-3)$$

$$p_2 = \frac{(\eta_f - h_c)}{(\eta_f + h')} p_1 \quad (2.4-4)$$

$$p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h') \quad (2.4-5)$$

これらのことを踏まえ、実験から得られた結果を基に、地震と津波重畳時に防波堤に作用

する力に対して影響するパラメータを整理した。整理した結果を表 2.4-1 に示す。地震と津波の重畳時は、前述のとおり、既往の設計式で考えると、地震の影響に対しては加速度、津波の影響に対しては水位が最も重要である。その最も重要なパラメータの一つの加速度が、地震と津波の重畳時の条件によって変化することが、本研究において明らかとなった。加速度とそれぞれのパラメータの関係を今後、明らかにすることにより地震と津波の重畳時における防波堤への影響が明らかにできると考えられる。

表 2.4-1 地震と津波重畳時に影響するパラメータ

防波堤に作用する力	パラメータ	影響の度合い	考えられる影響
地震時慣性力	加速度	◎	防波堤に作用する力に直接影響する
	残留変位	○	変位が発生することにより、マウンドから伝播する加速度が減少し加速度に影響を与える
地震時動水圧	加速度	◎	防波堤に作用する力に直接影響する
	地震の周波数	○	高周波数帯ではマウンドから防波堤上側まで加速度が伝播しにくい、低周波数側では加速度を増幅させる可能性がある
	水深	○	水深が深いほど動水圧は増加する
	残留変位	○	変位が発生することにより、マウンドから伝播する加速度が減少し加速度に影響を与える
	マウンドの変形の有無	○	マウンドの変形が防波堤上側への加速度の伝播を抑制することに寄与しており、マウンドが変形しない場合は、防波堤上側において加速度が増幅する可能性がある。
越流時の津波波力	防波堤前面水位	◎	防波堤を越流することにより、防波堤上側の挙動を抑え、加速度を抑制する効果があるが、越流しない場合は、抑制効果が発揮されず、加速度が増大する可能性がある。
	防波堤背面水位	○	背面水位の低下により、越流による抵抗は減少するが、地震と津波が重畳した場合の動水圧は低下する。

2.5 まとめ

地震と津波の重畳現象を水理模型実験により再現し、地震と津波の重畳時における防波堤に働く加速度、波圧のデータを取得した。その結果、どのように破壊に至るかのメカニズムの解明を行い、以下の知見を得た。

- ・地震と津波の重畳現象における加速度が防波堤に与える影響については、津波の大きさの関係はあるものの、津波が防波堤を越流することにより、その流れの影響を受けて防波堤上側における加速度の増大を抑制する可能性があることが判明した。

- ・地震と津波重畳時における残留変位については、この実験条件下では、防波堤の重心位置によらず越流と同一方向に残留変位が発生することが確認できた。

- ・地震と津波の重畳における残留変位が発生する過程は、地震による周期的な変動により一度のゆれで発生する残留変位が徐々に蓄積し、また、その大きさについては越流による波力の影響と、地震の揺れによって起こる慣性力と動水圧が大きい程、一度に残留する変位量が大きくなることが判明した。

- ・地震と津波重畳時における地震の周波数については、模型の縮尺の影響があるものの、地震と津波の重畳時においても、地震のみの場合同様、2Hz程度の低周波数の揺れが変位に影響を与えることが明らかとなった。

- ・地震と津波重畳時におけるマウンドの効果については、マウンドが変形することにより、地震による揺れに対して、防波堤の挙動を吸収するような免震効果を発揮することが判明し、マウンドが変形しない場合はその効果が発揮されず、防波堤に与える加速度が増大することが判明した。

- ・腹付工の有無においては、腹付工が地震と津波重畳時においても、抵抗として有効であることが判明した。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 山崎浩之, 下迫健一郎, 姜閔求, 善功企, 高山知司: 大規模波動地盤総合水路の建設とその利用, 海洋開発論文集, 16(2000)421-426.
- 2) 下迫健一郎: 波-地盤系水路における大型水理模型実験の役割, 土木学会論文集, 768/II-68(2004)1-12.
- 3) 有川太郎, 下迫健一郎: 港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路-大規模実験の研究成果と社会的役割について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.49, No.3, pp. 350-355, 2014.
- 4) 井合進: 1g 場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則, 港湾空港技術研究所報告, 027-03-01, 1988.
- 5) 岡田克寛, 鈴木高二朗, 有川太郎: 地震と越流津波の複合作用による防波堤の残留水平変位に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp. I_479-I_486, 2017.
- 6) 岡田克寛, 鈴木高二朗, 有川太郎: 地震と津波重畳時における防波堤への加振周波数の影響に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp. I_1003-I_1008, 2017.
- 7) Okada, K., Suzuki, K. and Arikawa, T. : EFFECT OF BREAKWATER IN THE SUPERPOSITION OF EARTHQUAKE AND TSUNAMI, CIVIL ENGINEERING CONFERENCE IN THE ASIAN REGION, CECAR7, 2016.
- 8) 菊池喜昭, 新舎博, 河村健輔, 江口信也: 裏込めを有するケーソン式混成堤の安定性の検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.4, pp.474-487, 2011.

3. 地震と津波の重畳時の荷重の算定手法の提案

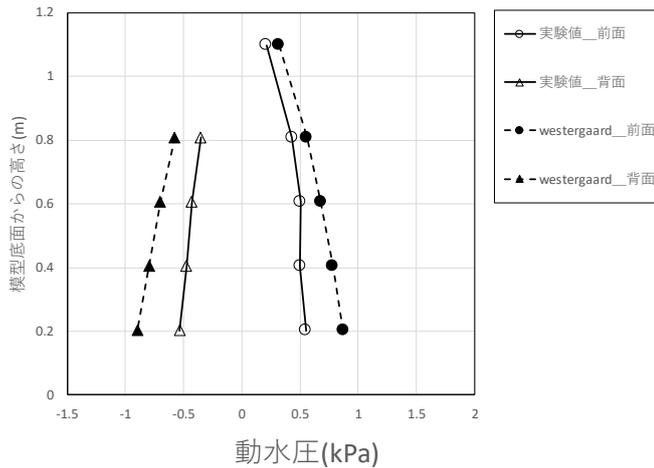
3.1 地震と津波の重畳における既往外力検討手法の適応性の確認

地震と津波のそれぞれの現象について、地震時の動水圧の算出方法は Westergaard の近似式¹⁾、津波越流時の波圧は静水圧式を用いることにより、防波堤に働く波力の算出が可能である。地震と津波の重畳時において、Westergaard の近似式と静水圧式の足し合わせで、実験時の波圧の再現性について検討し、適応性の確認を行った。

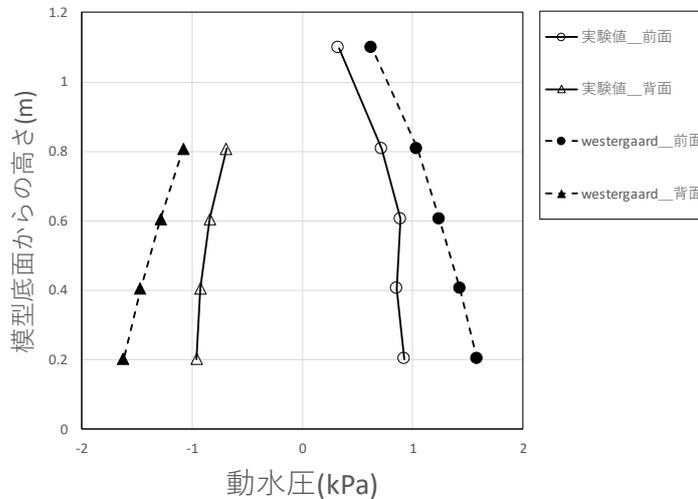
(1) 加振時における Westergaard の近似式の適応性の確認

表 2.2-1 の case9 と case10 の加振のみの実験結果を用い、模型に作用する動水圧と、Westergaard の近似式¹⁾(3.1-1)において、どの程度の整合性があるか確認を行った。ここで、 W_0 は水の単位体積重量、 α は地震の水平震度、 h は水深(m)、 y は水面から任意点までの深さ(m)、 P_{dw} は任意深さ y の動水圧(kPa)である。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{hy} \quad (3.1-1)$$



(a) case1-9(50Gal,加振のみ)



(b) case1-10(75Gal,加振のみ)

図 3.1-1 Westergaard の近似式と実験値による動水圧²⁾

式(3.1-1)における地震の水平震度 α については、模型前面に設置した 2 カ所の加速度計 (AC3, AC4) の値を重力加速度で除して平均したものをを用いた。水面から任意点までの深さ y については、初期水位からそれぞれの波圧計までの深さとして、それぞれの波圧計位置における動水圧を算出し、比較を行った。加振のみの実験において、Westergaard の近似式と実験結果の動水圧の最大をとったものを図 3.1-1 に示す。図 3.1-1 において、横軸は動水圧で縦軸は模型底面からの高さである。加速度が大きくなると実験値および Westergaard の近似式においても、動水圧が大きくなることを確認できる。また、どちらのケースにおいても、実験値より Westergaard の近似式で求めた結果の方が大きい値を示していることが確認できる。これは、過去に上部³⁾が大船渡湾口防波堤で強震観測と動水圧観測を行い、Westergaard の近似式と計測値を確認した結果や、篠沢ら⁴⁾が同様に釜石港湾口防波堤で計測した結果と

同様な結果となっている。

また、Westergaard の近似式と実験値について、どの程度の違いがあるかの比をとって確認した。結果を図 3.1-2 に示す。図 3.1-2 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が Westergaard の近似式で求めたものを実験で得られた模型背後は最小、模型前面は最大値で除したものである。

Westergaard の近似式では、模型前面の水面に近い模型底面から 1.1m の位置では、加速度が大きくなるほど実験値との差が大きくなり、75Gal では 1.13 倍であったが、それ以外の位置は 50Gal で 1.03 倍、75Gal で 1.05 倍程度であった。一方で、模型背面においては、波圧を計測した箇所全てにおいて大きな差は無く、50Gal で 0.95 倍、75Gal で 0.92 倍程度であった。水面に近い位置では実験値の値が小さいため、差が大きくなるが、概ね 1.0 倍程度であることから、加振時における動水圧について Westergaard の近似式により把握が可能であることがわかる。

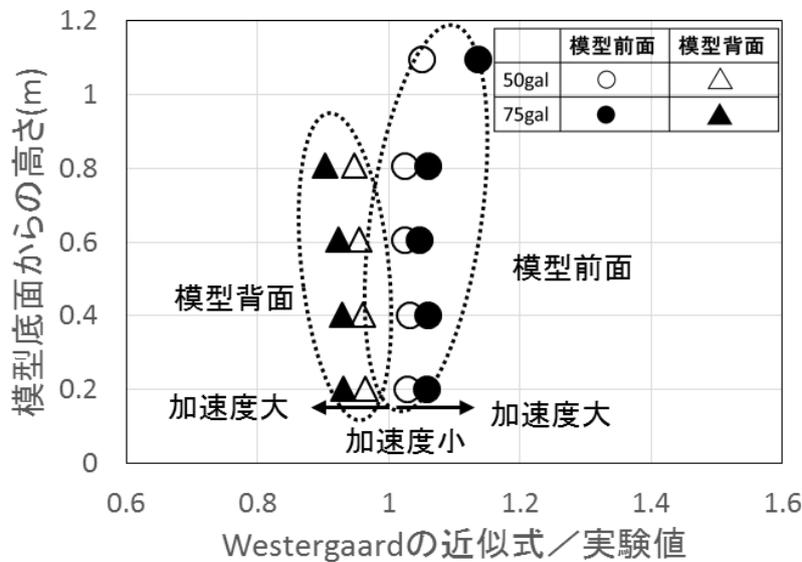
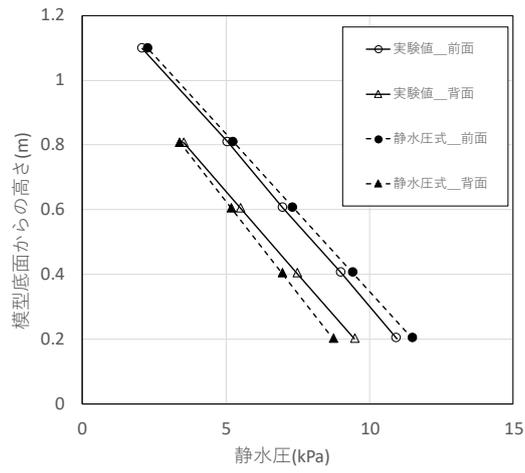


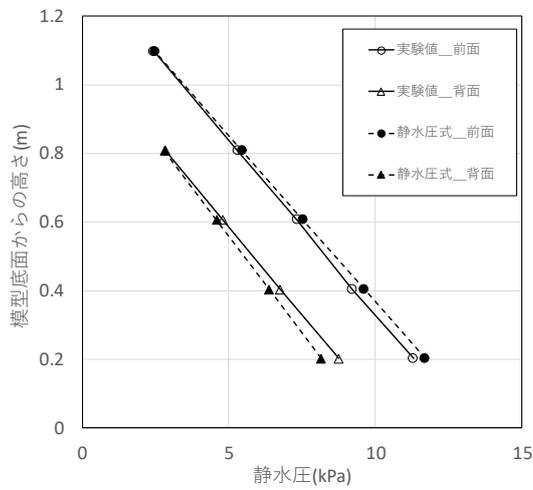
図 3.1-2 Westergaard の近似式と実験値の関係(地震のみ)²⁾

(2) 越流時における静水圧式の適応性の確認

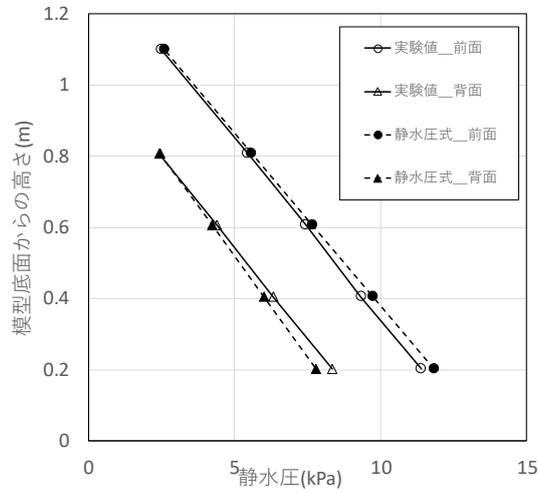
有川ら⁵⁾は混成堤において津波越流に関する水理模型実験を行い、静水圧差による算定を行った。そこでは、防波堤前面の静水圧に $\alpha_f=1.05$ 、背面の静水圧に $\alpha_r=0.9$ 倍した静水圧を用いるのが良いと提案されている。この検討結果をもとに、津波時の越流を再現し、越流時における波圧について、静水圧による検討を行った。検討は表 2.2-1 の case-1.2, case-1.5, case-1.8 を対象とし、越流状態が定常となった際のデータを用いて行った結果を図 3.1-3 に示す。図 3.1-3 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が静水圧式で求めたものと実験で得られた最小もしくは最大の水圧である。水位差が小さい場合は、静水圧係数 α_f および α_r が過大評価となり、実験値より静水圧式で求めた結果の方が若干大きくなっている。これは、有川らが指摘するとおり、



(a) case-1.2(水位差 0.14m,津波のみ)



(b) case-1.5(水位差 0.22m,津波のみ)



(c) case-1.8(水位差 0.27m,津波のみ)

図 3.1-3 静水圧式と実験値による静水圧²⁾

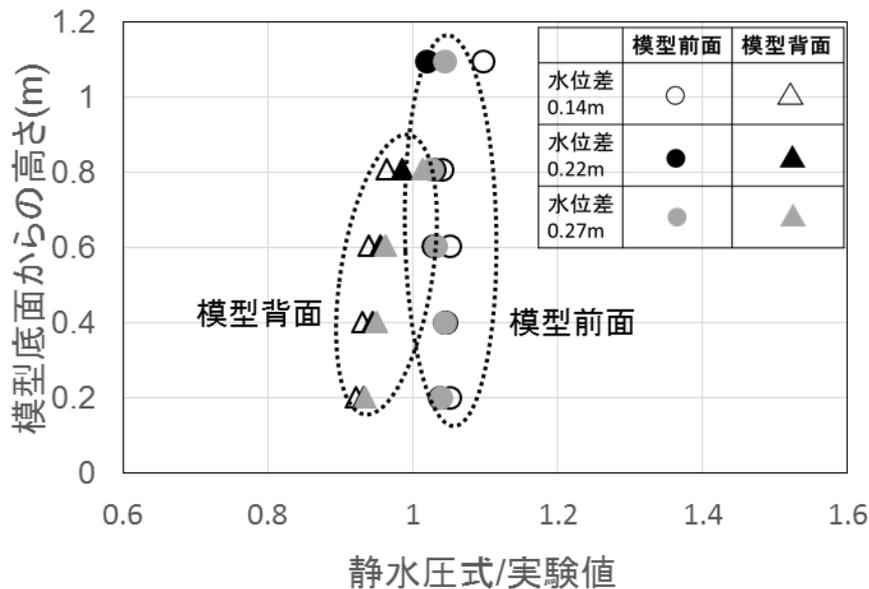


図 3.1-4 津波越流と静水圧式の関係(津波のみ)²⁾

水位差が小さいときには、背面の静水圧からの減少率は 1.0 に近くなっていることもわかる。

図 3.1-4 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が Westergaard の近似式と静水圧式で求めたものを実験で得られた最小もしくは最大値で除したものである。静水圧式では、水面に近い位置においては概ね 1.0 倍程度であった。それ以外の箇所では、水位差によらず模型前面で 1.03 倍、模型背面で 0.95 倍程度であった。

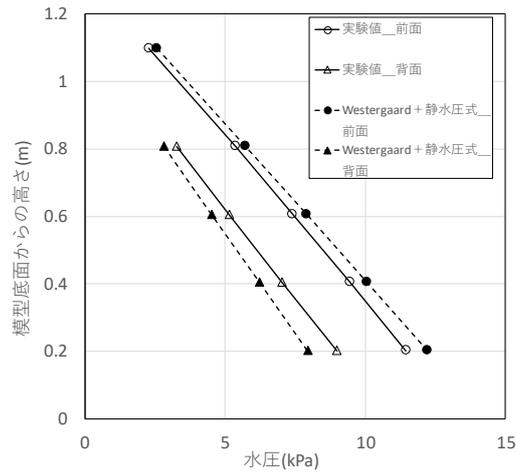
水位差が 0.14m と他のケースと比べて小さいケースにおいては、模型前面上部で 1.10 倍と若干大きな結果となった。水位差が小さい場合は、若干模型上部で異なるが、越流のみの場合においても、実験値に対して計算値はほぼ 1.0 程度となり、適応性が確認された。

(3) 地震と津波の重畳時における波力の確認

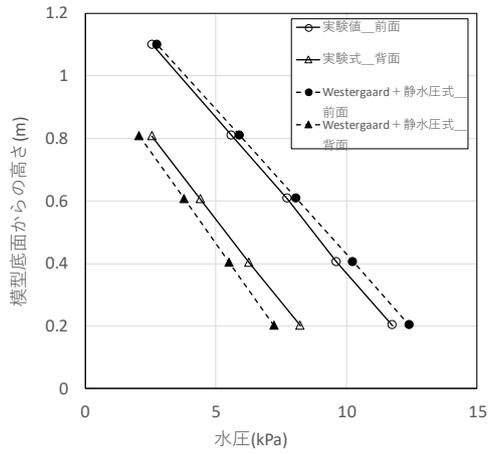
地震と津波が重畳した場合と、Westergaard の近似式と静水圧式を用いた結果の比較を行い、適応性の検討を行った。50Gal で加振し、沖から岸方向への加振時の結果を図 3.1-5 に示す。図 3.1-5 は、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が水圧をとったものである。実験値と計算値において、どのケースも若干差はあるものの、安全側の計算となっていることがわかる。

図 3.1-6 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が静水圧式で求めたものを実験で得られた最小もしくは最大値で除したものである。

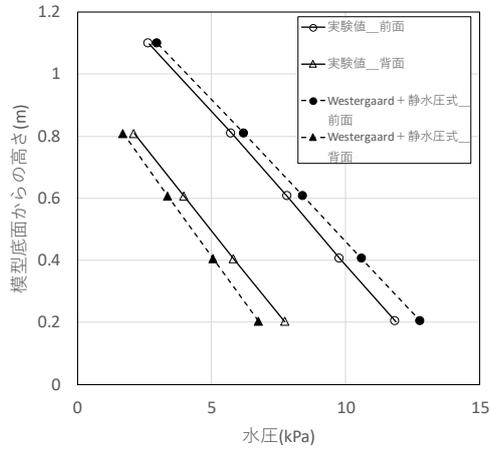
越流がない加振のみの場合においては、模型前面で 1.03 倍、模型背面で 0.95 倍程度であった。越流と加振が重畳した場合は、模型前面においては 1.08 倍、模型背面では 0.87 倍程



(a) case-1.2(水位差 0.14m, 50Gal, 地震と津波重畳時)



(b) case-1.5(水位差 0.22m, 津波のみ)



(c) case 1-8(水位差 0.27m, 津波のみ)

図 3.1-5 静水圧式と実験値による静水圧²⁾

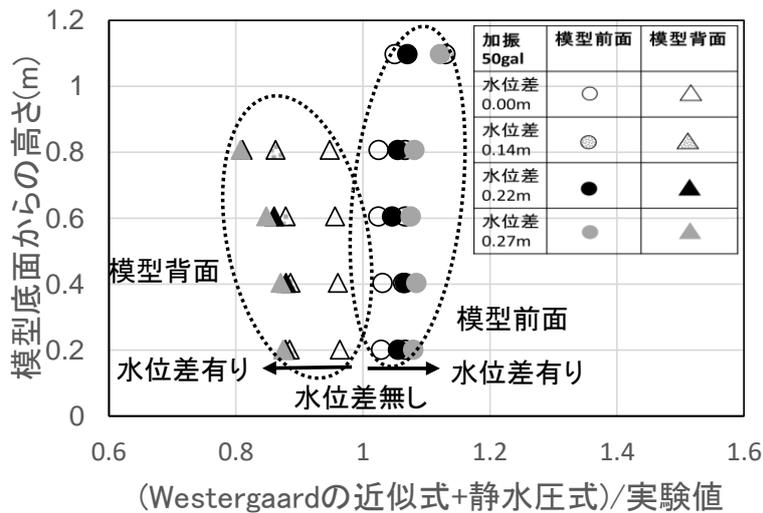


図 3.1-6 Westergaard の近似式と静水圧式の足し合わせと実験値の関係²⁾

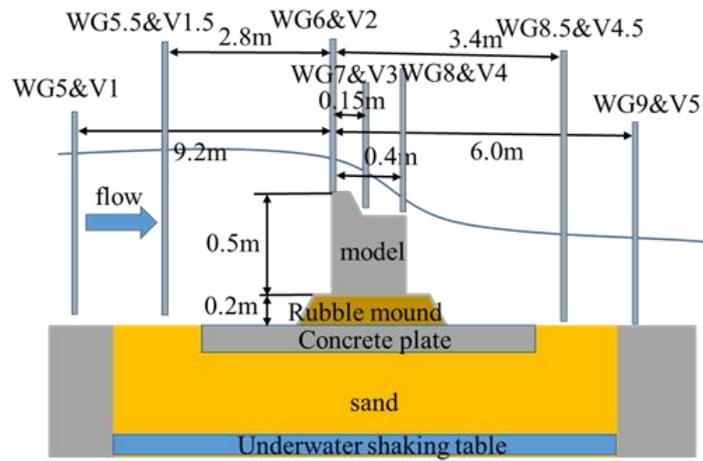
度であった。模型背面においては、越流時の水位差が増大するにつれて、水面に近い模型上面の波圧は計算値と実験値の差が大きくなり、最大で 0.8 倍程度となった。

(4)縮尺の異なる模型による検討

縮尺の異なる模型を用いて同様な実験を行い、加振時における Westergaard の近似式の適応性の確認と、越流時における静水圧式の適応性の確認、地震と津波の重畳時における波力の確認を行った。実験においては、大規模波動地盤総合水路で行った。還流装置を用いて越流状態を再現し、同時に加振を行い、その際における防波堤に与える影響の違いについて波圧等を計測した。なお、模型が小さいため、わずかな加振で破壊する可能性も考えられることから、完全に固定した条件で行った。模型は、固定実験においては高さ 0.50m、幅 0.4m の木製で、エキスパンドメタルで被覆したマウンドと固定し、全体はコンクリート板に固定した状態で行った(図 3.1-7)。計測器の配置は図 3.1-8、模型の設置状況を図 3.1-9、実験のケースを表 3.1-1 に示す。

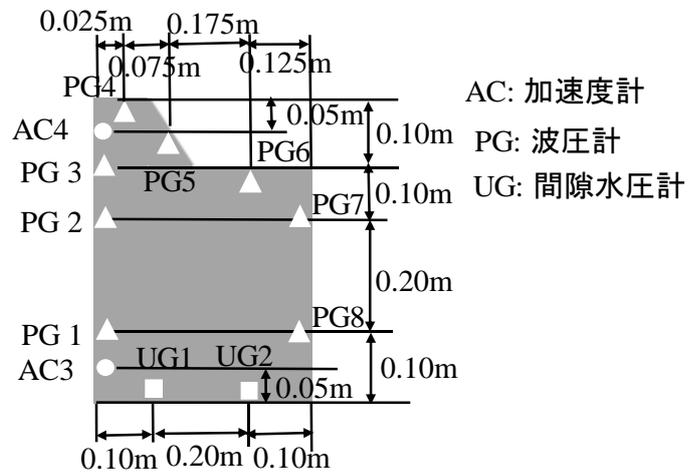
加振時における Westergaard の近似式の適応性についての 50Gal の結果を図 3.1-10 に示す。図 3.1-10 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が Westergaard の近似式で求めたものを実験で得られた模型背後は最小、模型前面は最大値で除したものである。結果は Westergaard の近似式では、模型前面の水面に近い模型底面から 0.4m の位置で、75Gal でも 1.04 倍と図 3.1-1 の結果と比較して、差が小さくなっていることがわかる。

次に、越流時における静水圧式の適応性の確認について確認した。検討は越流状態が定



WG: 波高計
V: 流速計

図 3.1-7 実験断面



AC: 加速度計
PG: 波圧計
UG: 間隙水圧計

図 3.1-8 計測器配置図

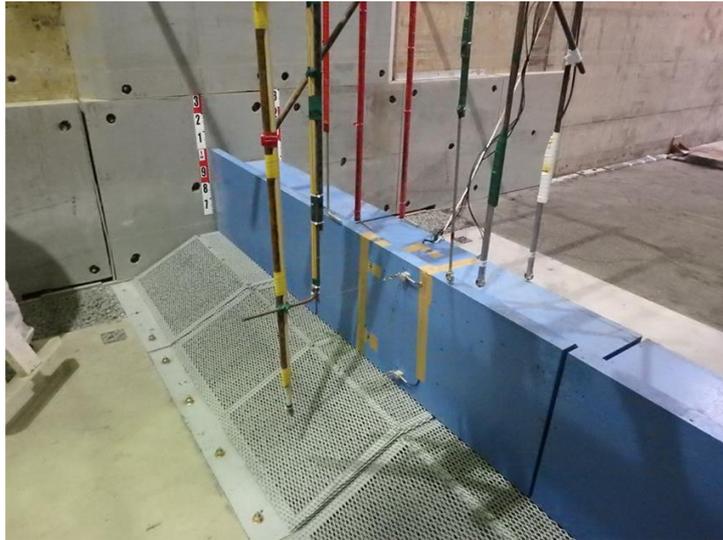


図 3.1-9 模型設置状況

表 3.1-1 実験ケース

	加振強度 (Gal)	水位差 (m)
case3-1	50	0.15
case3-2	75	0.18
case3-3	50	0.21
case3-4	75	0.22
case3-5	50	0.29
case3-6	75	0.30
case3-7	50	0.00
case3-8	75	0.00

常となった際のデータを用いて行った結果を図 3.1-11 に示す。図 3.1-11 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が静水圧式で求めたものを実験で得られた最小もしくは最大値で除したものである。静水圧式では、模型背面の上側波圧(PG7)以外の箇所では、ほぼ差が無い結果となった。模型背面上側では、計算値と実験値の値がほとんど合っていない。これは、模型背面において、模型の縮尺に対して水位差が大きくなりすぎ、背面水位を適切に計測できていなかった事によると考えられる。その影響は、水位差が増大するほど、影響が大きくなったと考えられる。それ以外の箇所については、動水圧同様、図 3.1-3 と比較すると、差が小さくなっていることがわかる。

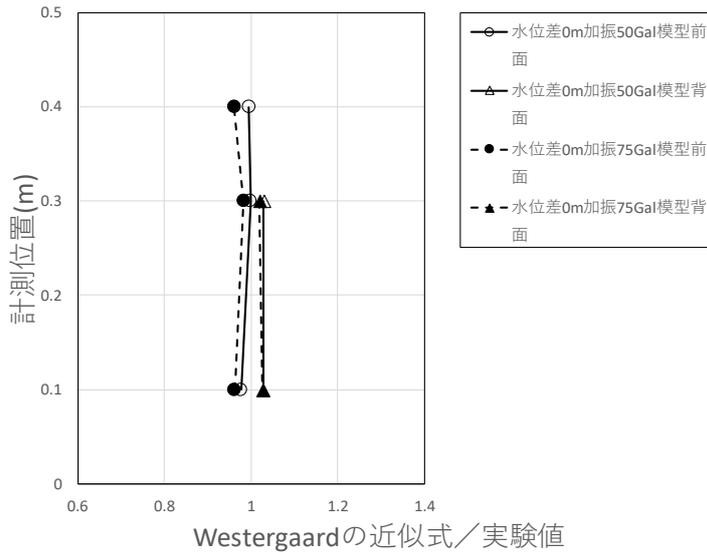


図 3.1-10 Westergaard の近似式と実験値の関係(地震のみ)

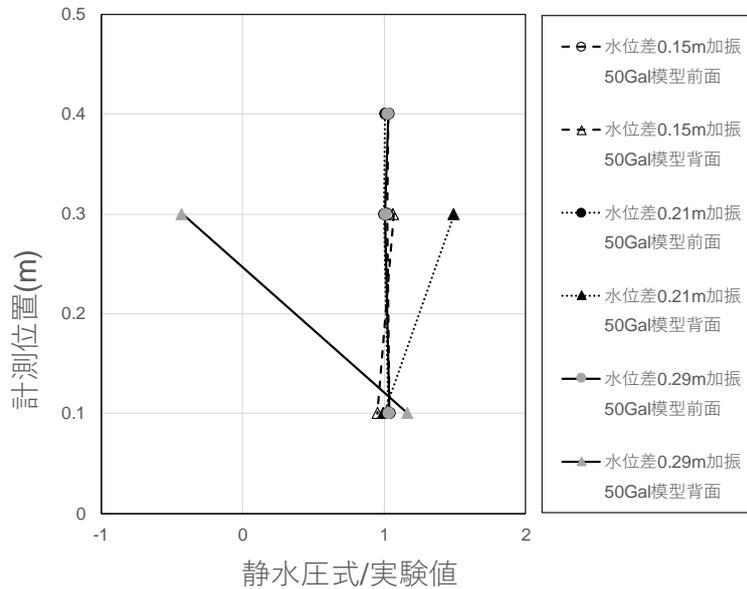


図 3.1-11 静水圧式と実験値の関係(津波のみ)

次に、地震と津波が重畳した場合と、Westergaard の近似式と静水圧式を用いた結果の比較を行い、適応性の検討を行った結果を図 3.1-12 に示す。図 3.1-12 において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が静水圧式で求めたものを実験で得られた最小もしくは最大値で除したものである。3 章 1 節 2 項「越流時における静水圧式の適応性の確認」の際に確認された水圧の差が影響して、模型背面上側(PG7)については差が大きいですが、それ以外の箇所においては、模型前面においては 1.03 倍、模型背面では 0.94 倍程度であった。

以上の事より、縮尺の異なる模型に関しても同様な傾向が確認できたことから、模型の大きさが異なっても、Westergaard の近似式と静水圧式を用いる事により地震と津波の重畳現象は表現できると考えられる。

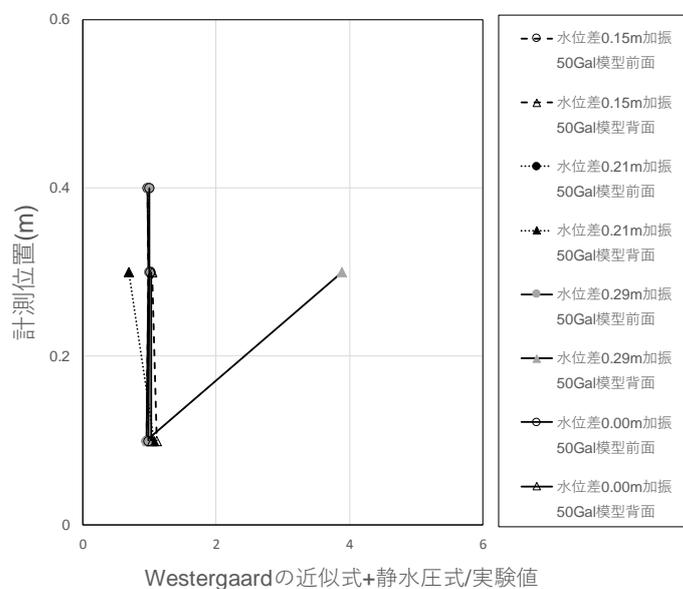


図 3.1-12 Westergaard の近似式と静水圧式の足し合わせと実験値の関係

3.2 地震と津波の重畳時における検討手法の提案

これまでの検討において、防波堤に及ぼす地震と津波の重畳現象においては、それぞれ Westergaard の近似式と静水圧式を用いる事により、計算することが可能であることが確認できている。実験時における波圧の違いについては、越流の水位差が異なる場合は、模型前面の水位が高くなると、それぞれの箇所における波圧も大きくなる(図 3.2-1)。これは、前面水位の上昇の影響が、模型に作用する加速度による動水圧に影響し、動水圧も上昇しているためである。また、加速度の違いにおいては、加速度の増加により、作用する動

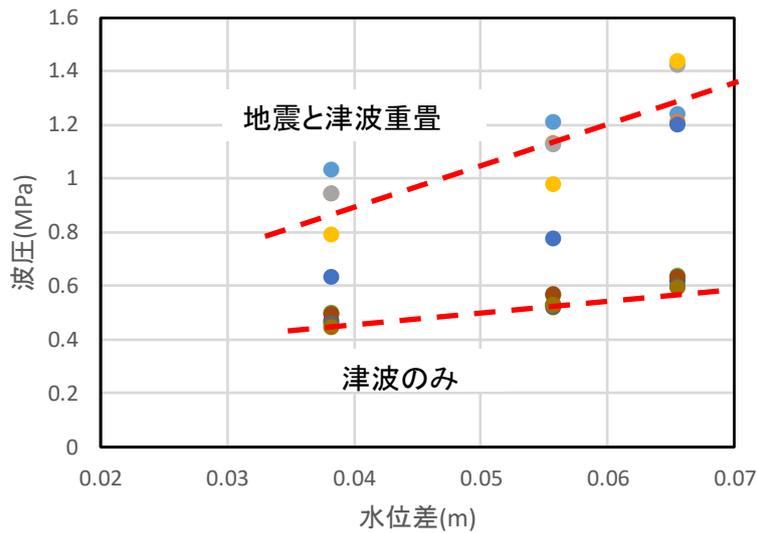


図 3.2-1 波圧と水位差の関係

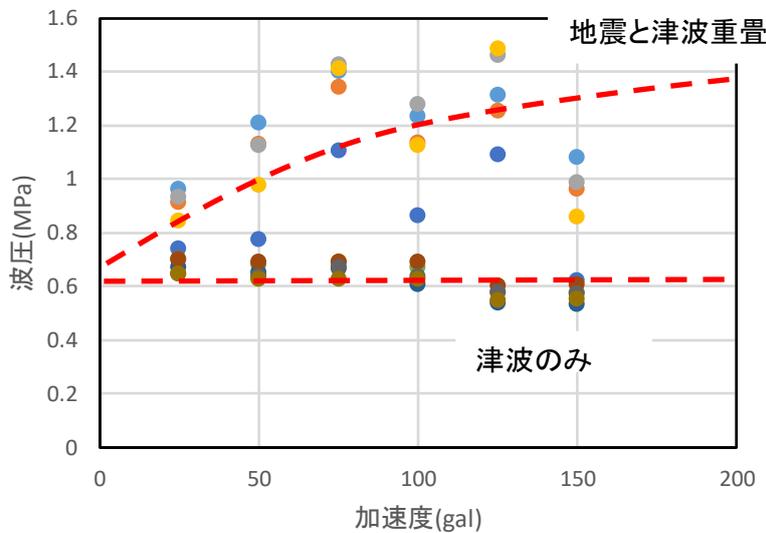


図 3.2-2 波圧と加速度の関係

水圧が増加している傾向が確認できたが、比例関係では無く、ある一定の加速度より大きくなると、増加の傾きが小さくなっている(図 3.2-2)。これは、加速度が大きくなることにより、残留変位が発生し、その結果、加速度に対する動水圧が減少しているためであると考えられる(図 3.2-3)。また、Westergaard の近似式と波圧の関係について比較すると、模型に作用する加速度が増大することにより、動水圧も増加しているが、実験時に作用する波圧が大きくなるほど、計算値との差が大きくなる傾向が確認できた。これは、前述のとおり、模型に作用する波圧が増大することにより、変位が発生し、その影響により、実験

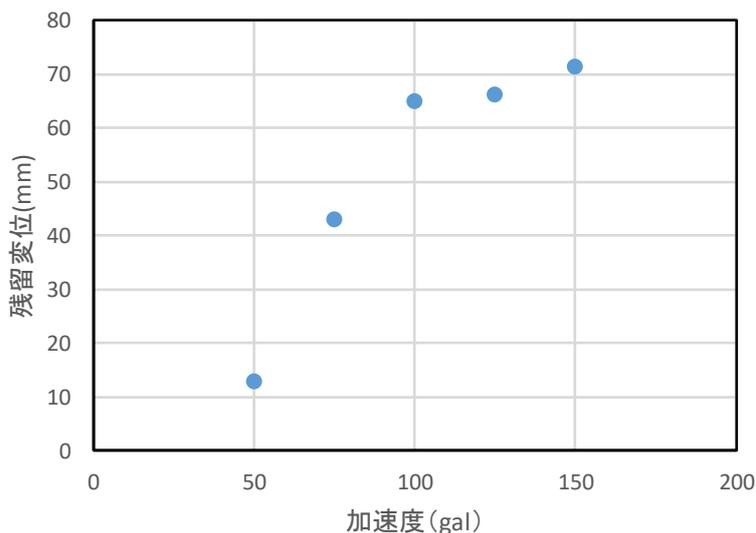


図 3.2-3 残留変位と加速度の関係

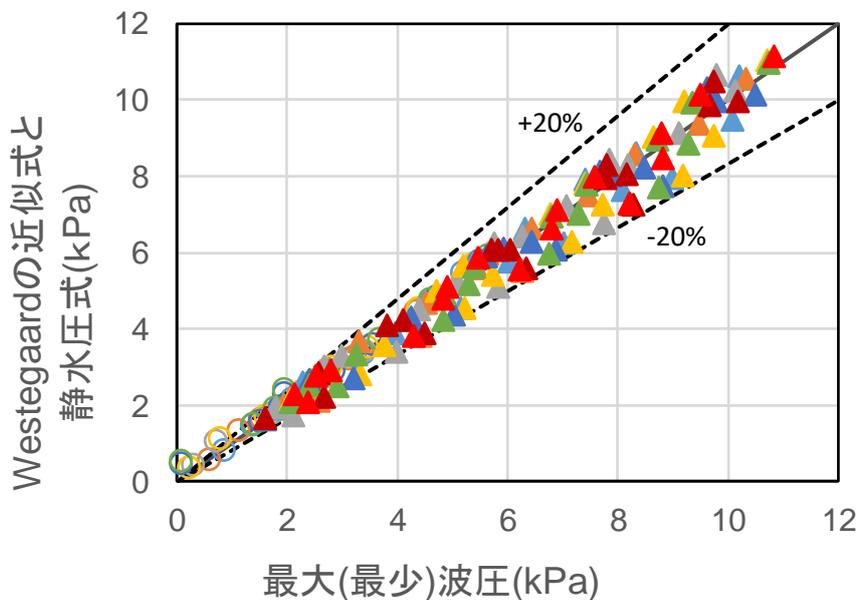


図 3.2-4 計算値と実験値の関係

時においては模型に作用する動水圧が減少しているのに対し、計算値では、変位の影響が考慮できないため、計算値の方が実験値より大きくなっている(図 3.2-3)。また、計算値と実験値の差においては、変位が発生するまでは、概ね 20%程度の範囲であることが確認できている(図 3.2-4)。

また、周波数の違いにおいては、周波数が小さい場合において、構造物全体に加速度が伝播し、外力の影響が大きくなることが確認できている。

以上の結果より、地震と津波重畳時における検討手法について、外力の設定についてのフローを図 3.2-5 に示し、概要を以下のとおり提案する。

3.2.1 防波堤に及ぼす加速度の設定

地震と津波の重畳現象を検討するにあたり、防波堤に与える加速度の設定が重要である。しかし、地震と津波の重畳現象が発生する際は、本震ではなく余震であり、本震の加速度に対する余震の加速度の予測は、現時点では困難である。また、地震の周波数の違いによって、影響も異なるため、初めに「周波数による影響」を確認し、防波堤に与える影響の大小を決定する。次に本震に対して、「余震の加速度の影響」を設定し、周波数によ

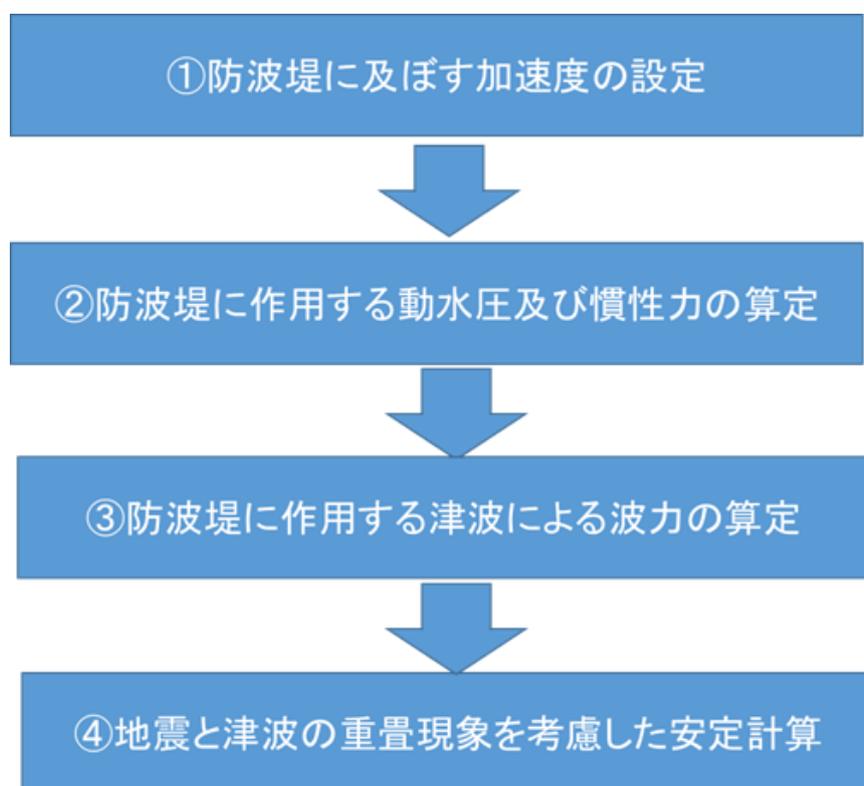


図 3.2-5 地震と津波の重畳時における検討フロー

る影響を考慮して、地震と津波の重畳時における加速度として設定するものとする。

周波数の影響に関しては、2章2節3項「加振周波数の違いによる検討」で述べているとおり、本実験では、低周波数側においては、地震のみのケースと比較して場所によっては2倍程度の加速度となる。そのため、地震と津波の重畳を検討する際は、防波堤の設置位置における卓越周波数が、防波堤の固有周波数より短いことを初めに確認することとする。防波堤の固有周波数より地震の卓越周波数が大きい場合、地震と津波の重畳時においてかかる加速度は余震のみの加速度よりも下回るため、余震の加速度をそのまま考慮すれば安全側の検討となる。一方で、防波堤の固有周波数より地震の卓越周波数が小さい場合は、前述のとおり、防波堤上側で、加速度が2.0倍程度になることも予想されることから、詳細な検討を行い、加速度を設定する必要がある。

次に、余震の加速度の設定方法について述べる。余震の加速度については、東北地方太平洋沖地震の際の、代表地点(八戸, 釜石, 相馬: 図 1.4-4)における本震と余震の加速度について、1章4節「地震と津波の重畳の可能性」で示しているが、その結果から、余震は震源の深さや震源からの距離で加速度も異なるが、確認した3地点において、本震後3時間の余震の加速度の平均は、震源に近い釜石では176Galと大きな加速度となったが、それ以外の地点では50Galから75Gal程度であった。この結果から、東北地方太平洋沖地震のような大きな津波を伴う海溝型の大型地震においては、本震が200Gal程度であれば、全体的には50Galから75Gal程度ではあるが、場所によっては、本震と同程度の加速度の余震が発生する可能性が考えられる。一方で、釜石のように本震で742Gal程度の加速度であっても、余震においては263Galと本震の0.35倍程度である。また、今回対象とした地点の加速度においては、300Gal以上の余震は確認できていない。このことから、本震が300Gal以下の場合には、本震と同程度の余震が発生する可能性もあることから、本震の加速度をそのまま余震の加速度として用いるものとする。一方で、300Galを超える本震が考えられる箇所においては、余震の加速度を300Galと考えても良いものとする。なお、余震の予測方法については、今後の研究の進捗により、適切に見直し、設定する必要があると考えられる。また、本検討においては地震のみと比較して、地震と津波の重畳時においては加速度の影響が低減する可能性が確認されている。しかし、周波数や越流条件等によって、低減率は異なる事が確認されており、本検討では、その解明までには至っていない。そのため、本提案では、地震と津波の重畳現象における加速度の低減については考慮せず、考え得る安全側の条件として外力を設定することとしている。今後の研究により、この現象の詳細なメカニズムが解明されることにより、より現実的な検討の可能性が考えられる。なお、防波堤を越流しない場合は、2章2節3項「加振周波数の違いによる検討」の図 2.2-37に示すとおり、防波堤にかかる加速度が増加することが確認されている。そのため、本手法については、防波堤越流時における地震と津波の重畳時において適応できるものであり、越流しない場合においては、検討の対象外とする。

3.2.2 防波堤に作用する動水圧及び慣性力の算定

3章2節1項「防波堤に及ぼす加速度の設定」で設定した加速度を用いて、動水圧と慣性力を算定する。周波数の影響により、防波堤の挙動が異なる事が考えられるが、加速度を設定する際に周波数の影響については考慮し、安全側で加速度を設定していることから、動水圧と慣性力を算定する際には、周波数は考慮しない。

防波堤に作用する加速度については、3章2節1項で設定した加速度が防波堤全体に作用するものと考え、動水圧を Westergaard の近似式、慣性力は安全側の検討とするため、津波シミュレーション等で検討された越流時の背面水位を基準とした防波堤の水中重量を用いて慣性力を算定するものとする。

3.2.3 防波堤に作用する津波による波力の算定

地震と津波重畳時における津波波力については、越流時には静水圧式を用いて検討することが可能であることが、これまでの検討で確認できている。そのため、津波越流時における波力については、津波シミュレーション等で検討された水位で、静水圧式を用いて検討するものとする。なお、1章4節「地震と津波の重畳の可能性」でも確認されているように、最大高さの津波が確認された時刻においても、余震が発生する可能性も確認されていることから、地震と津波の重畳現象を検討する際にも、防波堤の安定性が一番厳しくなる条件の水位差を、検討する際の越流条件として設定するものとする。

3.2.4 地震と津波の重畳現象を考慮した安定計算

前項までで検討した、防波堤にかかる津波波力、動水圧および慣性力を外力として、地震と津波の重畳時における活動安全率と転倒安全率を計算し、防波堤の安定性について検討するものとする。

3.3 実地形への適用

これまでの検討結果を基に、実際の防波堤への地震と津波重畳時における影響について検討を行った。検討は、東北地方太平洋沖地震津波で倒壊した、釜石港湾口防波堤において実施した。釜石港湾口防波堤は、有川ら⁵⁾によって詳細な津波高等が検討されており、既往の検討結果に対して、地震と津波重畳の影響により、どの程度評価が変わるかを検討した。

3.3.1 条件設定

3章2節「地震と津波重畳時における検討手法の提案」の外力の設定手法を用いて、実地形への適用を行い、検討する。

検討は、2011年の東北地方太平洋沖地震時における釜石港³⁾(図 3.3-1, 図 3.3-2)における影響と、今後、東南海・南海地震が想定されている高知港⁴⁾(図 3.3-3, 図 3.3-4)において検討する。

釜石港においては、津波の条件は、有川ら⁵⁾によって検討されている津波高を用いて検討を行う(図 3.3-5, 表 3.3-1)。また、余震の影響については、釜石港においては本震で742Galが確認されているが、重畳の影響がどの程度あるかを確認するために、50Gal, 100Gal, 150Gal, 200Gal, 250Gal, 300Galの6ケースについて動水圧と慣性力を算出し、検討を行った。

高知港においては、津波条件は設計で検討されている津波高を用いて検討を行う。また、余震の影響については、釜石港の検討同様、重畳の影響がどの程度あるかを確認するために、50Gal, 100Gal, 150Gal, 200Gal, 250Gal, 300Galの6ケースについて動水圧と慣性力を算出し、検討を行った。

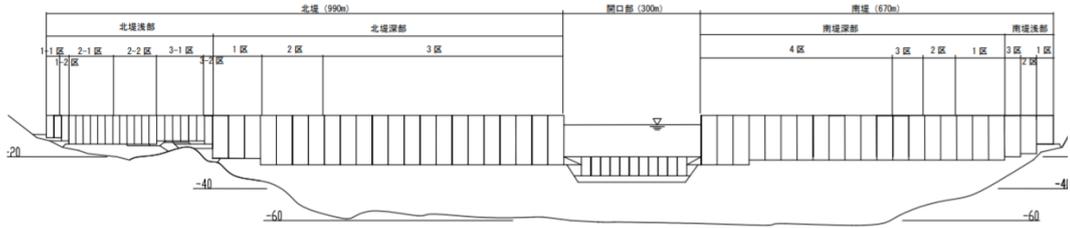
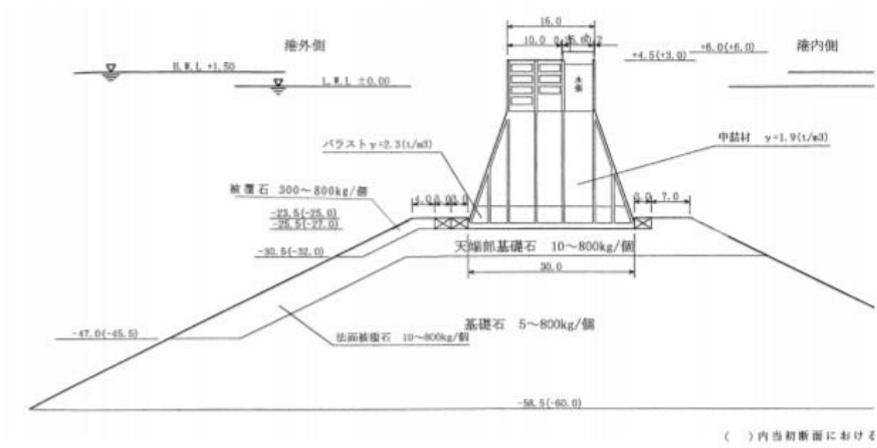
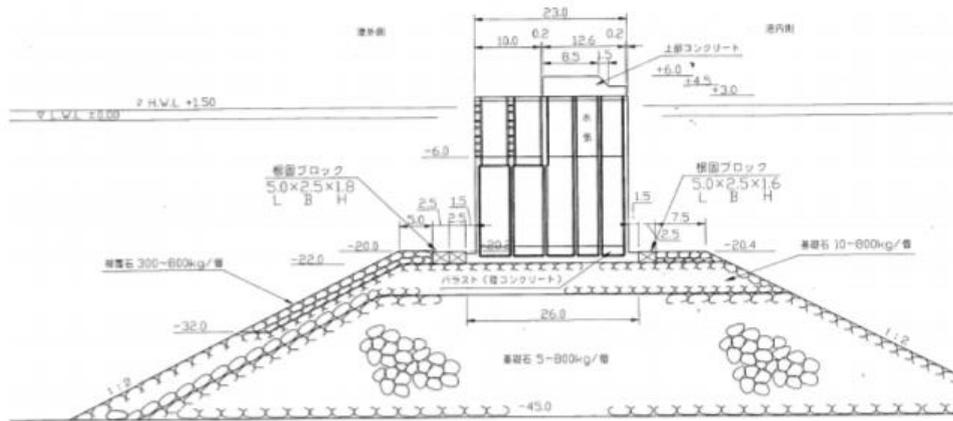


図 3.3-1 釜石港湾口防波堤の配置図



(a) 北堤深部 3 区



(b) 南堤深部 1 区

図 3.3-2 現地防波堤標準断面図 6)

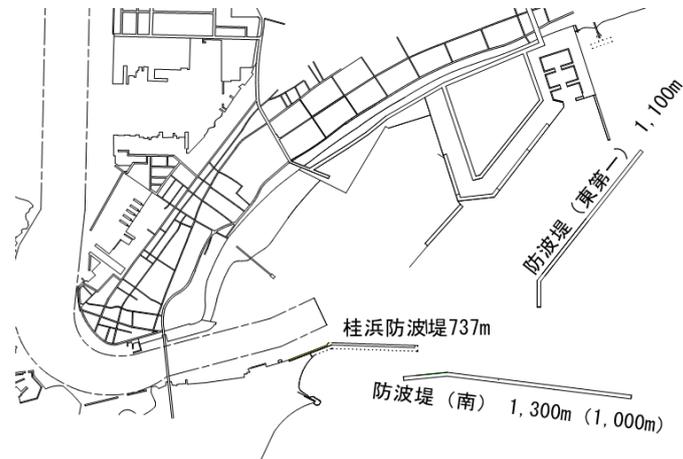
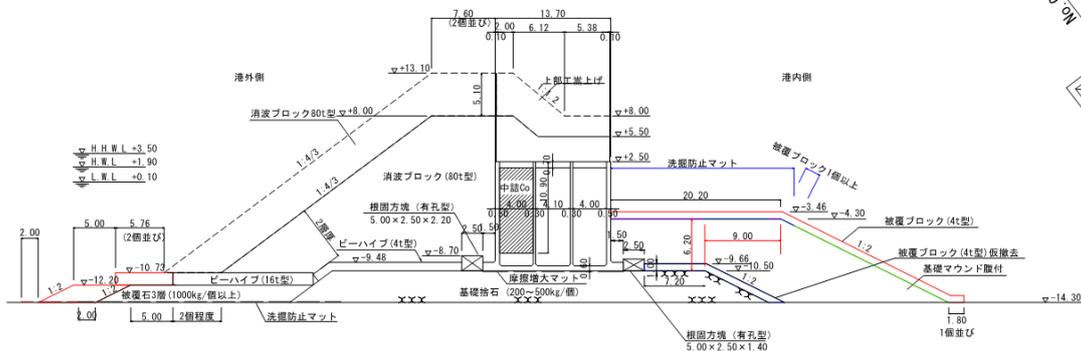
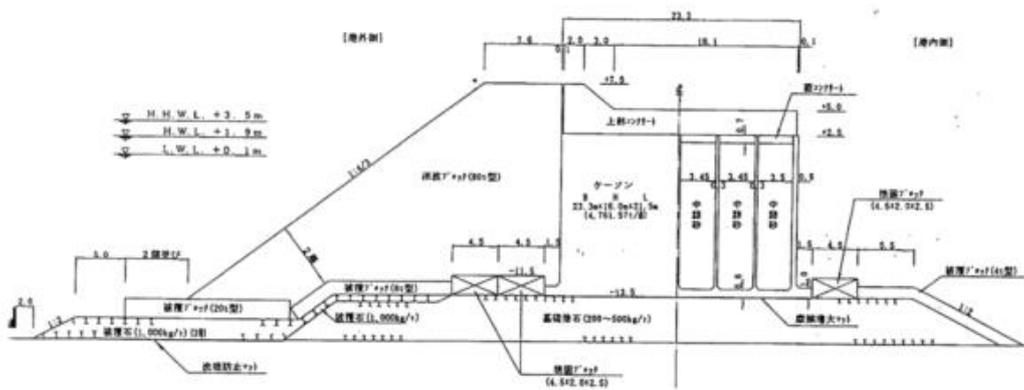


図 3.3-3 高知港の防波堤配置図



(a) 東第一 No.650.0~992.6



(b) 南 No.550~700

図 3.3-4 現地防波堤標準断面図

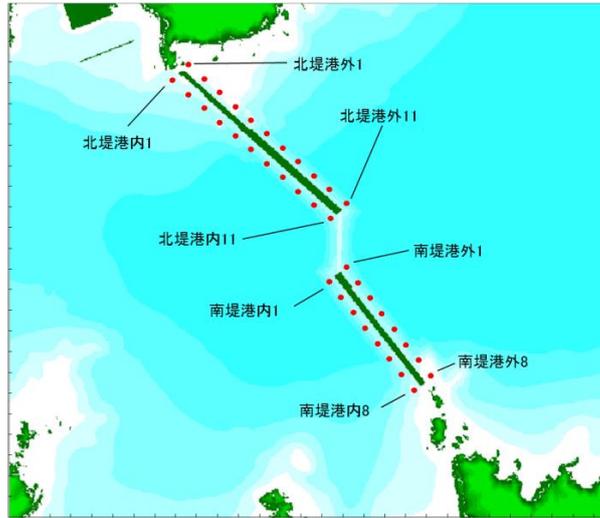


図 3.3-5 津波水位設定箇所⁴⁾

表 3.3-1 検討に用いた津波水位⁴⁾

(a) 最大水位差(北堤)

	港外(m)	港内(m)	最大水位差(m)
N01	12.24	4.35	7.9
N02	12.77	3.65	9.12
N03	12.41	2.93	9.48
N04	11.83	2.37	9.47
N05	12.23	2.87	9.36
N06	11.94	3.08	8.86
N07	12.26	3.69	8.57
N08	12.19	3.64	8.55
N09	11.66	2.81	8.86
N10	11.96	3.3	8.66
N11	11.27	3.62	7.65

(b) 最大水位差(南堤)

	港外(m)	港内(m)	最大水位差(m)
S01	8.64	3.58	5.06
S02	11.24	3.48	7.75
S03	11.12	2.99	8.12
S04	11.46	3.2	8.26
S05	11.43	3.13	8.3
S06	10.99	2.75	8.23
S07	11.4	3.08	8.32
S08	10.68	3.12	7.55