

堤防越流直後の流れに対して杭群が与える変化とエネルギー減少メカニズム

埼玉大学 学生会員 ○座波 健仁

埼玉大学大学院 学生会員 五十嵐 善哉

埼玉大学大学院（兼）埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター 正会員 田中 規夫

1. 背景及び目的

2011 年の東北地方太平洋沖地震津波災害を受けて、レベル 2 津波に対しては、減災を目標として多重防御が推進されるようになり、多重防御に関する研究が始められた。また、2015 年関東東北豪雨による鬼怒川破堤点近くの堤防沿い道路は流れのエネルギー減衰に少なからず貢献していたと考えられる。

五十嵐・田中(2015)は 2 つの堤防を設置することにより津波に対するエネルギー減勢効果が高い事を示した。しかしこの場合、内陸側の堤防（第二堤防）に水の流れによる多大な負荷がかかり、第二堤防が土堤だった場合は洗掘により破壊され、流失する恐れがある。そのような場合においても、第二堤防内部に杭を設置することで、海岸堤防越流後の津波に対して、初めは第二堤防により減勢し、第二堤防流失後は杭により減勢するという二段階の多重防御が期待でき、粘り強さという観点で有効な可能性がある。

そこで、本研究では堤防背後（堤内側）に杭群を設置し、その間隔・高さ・列数を変化させ、流況とエネルギー減勢特性を調べ、有効な多重防御構造を確立することを目的として、水理模型実験を行った。

2. 実験方法

(1) 水路・実験模型の概要

幅 50 cm の可変勾配水路に堤防模型および杭群模型を設置し、定常流で実験を行った。

堤防模型は岩手県にある町の計画を参考とし、堤防模型高さ(EH)14.5 cm、天端長さ 6 cm、法面勾配は 2 割勾配の堤防模型を使用した。これは想定している津波規模の 1/100 スケールである。

杭群模型について、杭直径(D)は 4 mm、杭高さ(H_p)は 1, 2, 4 cm の 3 ケース、杭群の流下方向列数は 1, 2 列の 2 ケースを考慮した（以下、それぞれ 1 列杭、2

列杭と呼ぶ）。横断方向の杭間隔(d)は、1 列杭の場合 3, 6, 9 mm、2 列杭の場合 6, 9 mm とした。ここで、2 列杭の配置は正三角形千鳥配列とした。以上 15 ケースにおいて、堤防の裏法尻から杭までの距離は 33 cm に固定して実験を行った。また、比較のため堤防模型のみを設置したケース(Case 0)を実施した。

各実験ケースに対して限界水深 h_c は、1.0 ~ 5.5 cm の間で 7 ケース変化させ測定した。ここで、 h_c , H_p を EH で除し無次元化したものをそれぞれ h_c' （無次元越流水深）, H_p' （無次元杭高さ）とし、 d を D で除し無次元化したものを d' （無次元杭間隔）とした。

(2) 計測内容

可変勾配水路の下流端に設置されている三角堰による流量の計測と、堤防模型の天端上の水深測定により、限界水深 h_c の値とその位置（断面 1）を確認した。次に杭後方（陸側）において、ある程度水深が安定した位置（堤防裏法尻から 137.3 cm）を断面 2 とし、ポイントゲージにより水深を測定した。

(3) エネルギー減衰率の定義

断面 1, 2 の水深計測とベルヌーイ式、連続式を用いて、エネルギー減衰率 ΔE を算出した(式(1))。

$$\Delta E[\%] = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 E_1 と E_2 はそれぞれ断面 1, 2 における全水頭である。2 断面の全水頭(E_1, E_2)の差をとっているため、 ΔE の値が大きい方が、津波減勢効果が高い。

3. 実験の結果と考察

(1) 流況分類と流況名規則

実験により、流況を 7 種類(Type A1, A2, A3, A4, B1, B2, AB1)に分類した(図-1)。杭が密（パターン A ; 1 列杭で $d' = 0.75$, 2 列杭で $d' = 1.5$ ）な場合、 h_c' の増加に伴い流況は Type A1, A2, A3, A4, AB1 と変化し、杭が疎（パタ

キーワード 多重防御 杭群 津波エネルギー減衰 杭間隔

連絡先〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学 TEL048-858-3564 E-mail: tanaka01@mail.saitama-u.ac.jp

ーン B ; 1 列杭で $d'=1.5, 2.25$) 場合は Type B1, B2, AB1 と変化することが観察された. そのため, 杭が沈水状態(Type AB1)に至るまでの流況変化をパターン A, B に分類し, 考察する. ただし, 2 列杭の $d'=2.25$ ではパターン A, B が混在した流況変化となった.

流況名規則について, パターン A(B)で発生した流況には A(B)を, A, B でともに発生した流況には AB を付し, さらに h_c' が小さいケースから順に番号を付した.

(2) 流況変化 (パターン A)

Type A1 では杭前面まで射流条件で流れ, 杭の直背後から常流となる. Type A2 では杭の反射により, 前面または上部で跳水が生じた. Type A3 では Type A2 で杭前面に貯留されていた流体が押し出され, 杭通過時に自由放流される. この流れが底面にたたきつけられた後, 跳水が発生する. ただし, h_c' が大きくなると跳水の位置はより後方で発生する. Type A4 では杭が沈水状態となり, 杭を射流のまま通過する. ここで, d' が小さいため, 杭の間を通る流れと杭の上部の流れの流速差から杭背後で渦が発生し, 空気を巻き込む現象が観察された. Type AB1 では, 杭上部を流れる水深が杭高と比べて大きいいため, 杭背後で空気を巻き込む現象は見られなくなり, 射流のまま杭を通過する沈水状態となる.

(3) 流況変化 (パターン B)

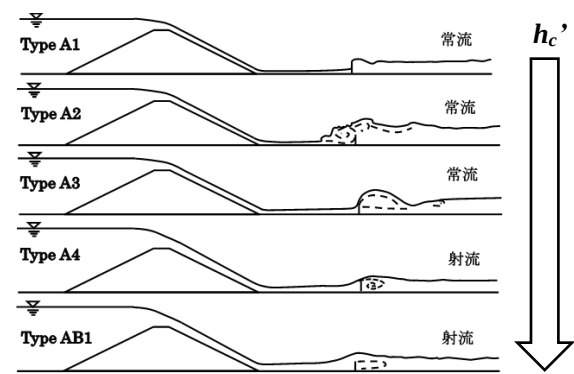
Type B1 では杭を射流条件で通過し, 杭の背後で跳水が生じる. Type B2 では杭背後で衝撃波が生じ, その波の重ねあわせにより水位の高い位置と低い位置がひし形状に明確に分かれた (図-2). 沈水状態になった場合, d' が大きいいため, 杭の間を通る流れと杭の上部の流れの流速差は小さく, 杭背後で渦は見られなかった (Type AB1).

(4) 1 列杭実験の結果と考察

縦軸に h_c' , 横軸に H_p' をとり実験時に撮影した動画から各流況ごとに色分けし, 境界線を引いた図を流況分類図とし, 縦軸に ΔE , 横軸に h_c' をとった図を ΔE - h_c' 図とする. あるケースにおいて, h_c' が一定であるにもかかわらず, 水位が時間または局所的に変化し ΔE に幅が生じた. そのため, ΔE - h_c' 図には ΔE の幅を上下の横棒で範囲を示している. $d'=0.75, 1.5, 2.25$ における流況分類図と ΔE - h_c' 図をそれぞれ図-3, 4, 5 に示す.

図-3 に示すケース($d'=0.75, H_p'=0.07, 0.14, 0.28$)において, $h_c'=0.21$ までは H_p' に関係なく ΔE は高い値を示

(a) 流況変化(パターン A)



(b) 流況変化(パターン B)

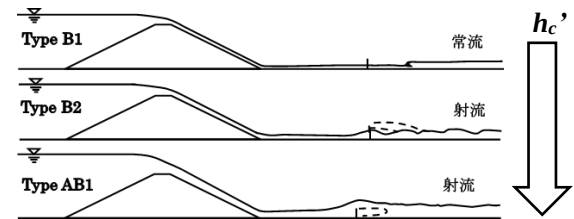


図-1 : 流況図 (a) パターン A, (b) パターン B



図-2 : 衝撃波によるひし形写真

した. これより h_c' を大きくすると, $H_p'=0.14, 0.28$ の場合, $h_c'=0.36$ の時においても ΔE は高く Case 0 より 22 %程度向上したが, $H_p'=0.07$ の場合, 流況が Type AB1 になると ΔE は徐々に Case 0 に近づき, $h_c'=0.36$ では Case 0 より ΔE は 9 %程度しか向上しなかった.

図-4 に示すケース($d'=1.5, H_p'=0.07, 0.14, 0.28$)では, $h_c'=0.16$ 程度までは, H_p' に関係なく ΔE は高い値を示した. $H_p'=0.14, 0.28$ では, $h_c'=0.36$ の場合であっても ΔE は Case 0 より 18 %程度向上したが, 流況が Type B2 の時においては, 衝撃波が交差したひし形状の水位差により横棒で示した ΔE の幅が h_c' の上昇と共に大きくなり, 最大で約 13 %にも昇った. 流況が Type AB1 になると, ΔE の幅は 5 %程度に収まった.

$H_p'=0.07$ のケースでは, 流況が Type AB1 になると ΔE は $H_p'=0.14, 0.28$ と比べ徐々に低下し, $h_c'=0.32$ では Case 0 とほとんど変わらない ΔE となった. 流況 Type AB1 であっても $H_p'=0.14$ の場合, ΔE は Case 0 より最

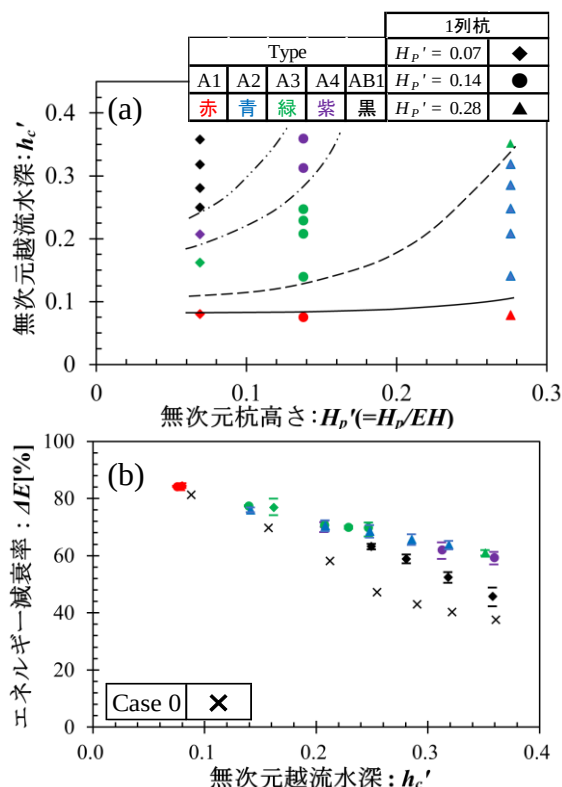


図-3：1列杭群 $d' = 0.75$ (a) 流況分類図, (b) ΔE - h_c' 図

大 19 %高い値を示した。その理由として、杭高さによる杭群の抗力の差が考えられる。例えば $h_c' = 0.32$, $H_p' = 0.07$ のケースでは、杭地点の水深に対して杭高さが低く、杭群の抗力が流れに与える影響は小さいため ΔE が低くなり、 $H_p' = 0.14$ では杭群の抗力が流れに与える影響が大きかったため ΔE は高い値のままであった。

図-5 に示すケース($d' = 2.25$, $H_p' = 0.07, 0.14, 0.28$)と図-4 を比較すると、流況分類図は同様の結果となり、 $H_p' = 0.07$ の Type AB1 で ΔE が低下する等、 ΔE の変化においても同様の傾向が見られたが、杭間隔が広い方($d' = 2.25$)が ΔE の平均値は全体的に減少した。 $d' = 2.25$, $H_p' = 0.28$ のケースでは ΔE の幅が非常に大きく、最大で約 26 %となり、これは $d' = 1.5$ の同様のケースと比較すると最大で 15 %程度大きい値となり、局所的な水位差による ΔE の幅は杭間隔が広いほど大きくなった。

(5) 1列杭と2列杭の比較

図-6, 7 は2列杭に関する流況分類図と、1,2列杭を比較した ΔE - h_c' 図を示した。 ΔE - h_c' 図は、プロットの塗りつぶしの有無で列数を分類した(1列杭：塗りつぶし, 2列杭：白抜き)。また2列杭の ΔE の幅は上下の横棒で範囲を示し、1列杭は示していない。

図-6 に示す $d' = 1.5$ のケースでは、流況において大きな変化が見られた。1列杭の $H_p' = 0.14$ の場合、流況

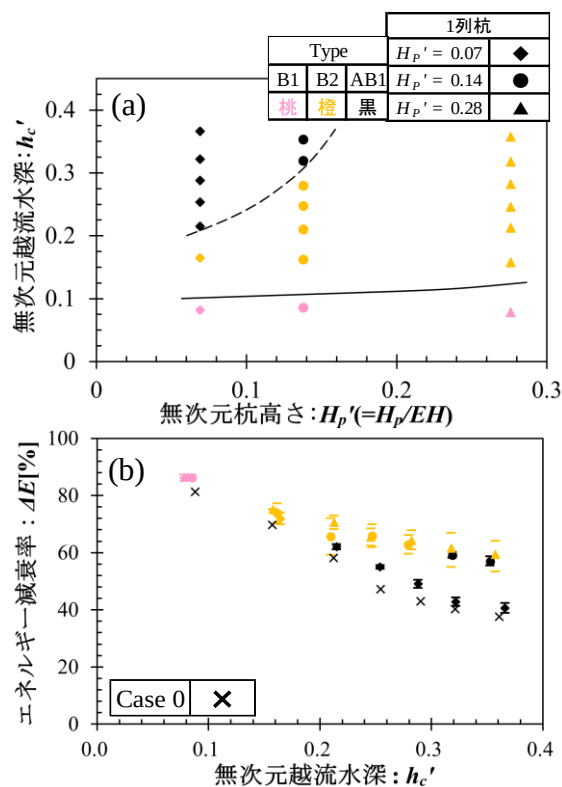


図-4：1列杭群 $d' = 1.5$ (a) 流況分類図, (b) ΔE - h_c' 図

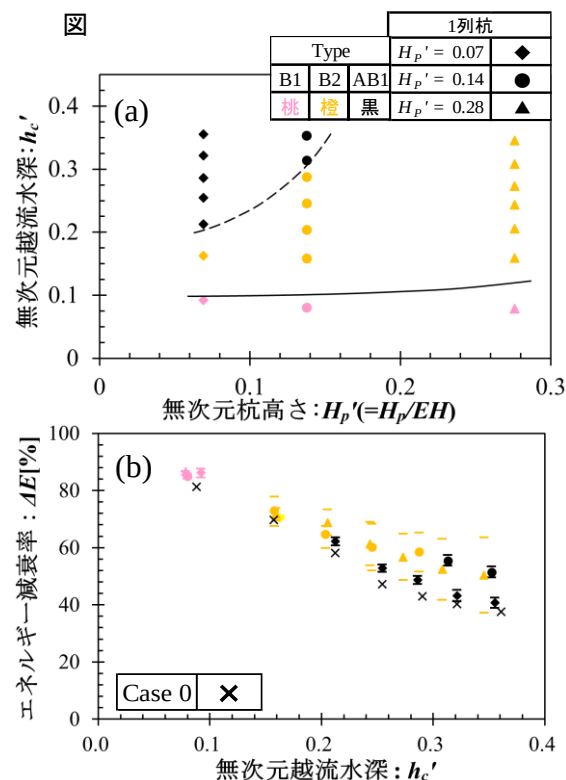


図-5：1列杭群 $d' = 2.25$ (a) 流況分類図, (b) ΔE - h_c' 図

変化がパターン B であったのに対して、2列杭の場合は流況が Type A2, A3, AB1 となり流況変化パターン A となった。しかし、流況 Type A4 は確認されなかった。流況が変化した理由として2列目の杭が1列目の杭により生じた衝撃波を抑えたと考えられ、これにより ΔE の幅は最大 4 ~ 5 %程度に収まった。また ΔE の

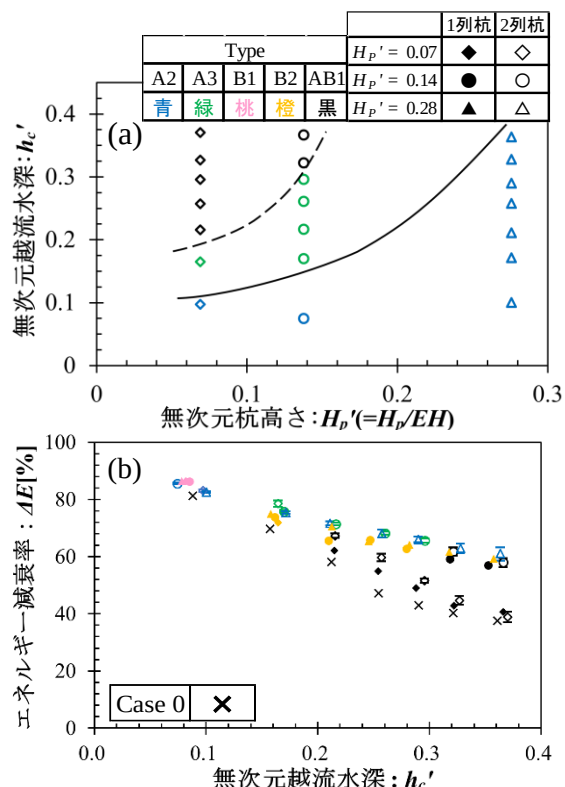


図-6: $d' = 1.5$ (a) 2列杭群流況分類図[1列杭群は図-4(a)参照], (b) 1, 2列杭群 $\Delta E-h_c'$ 図

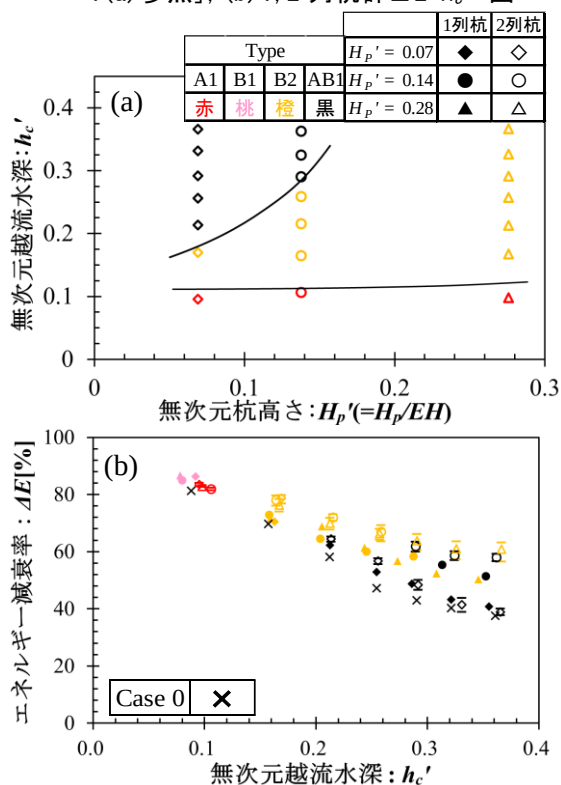


図-7: $d' = 2.25$ (a) 2列杭群流況分類図[1列杭群は図-5(a)参照], (b) 1, 2列杭群 $\Delta E-h_c'$ 図

平均値は、全体として2列杭の方が1列杭よりわずかに高いものの、あまり差は見られなかった。

図-7に示す $d' = 2.25$ のケースでは、流況において1列杭では流況変化パターンBであるのに対して、2列杭の場合Type A1, B2, AB1となり、流況変化パターン

AとBが混在している様な流況となった。また2列杭では流況がType B2であっても ΔE の幅が最大7%と1列杭と比べて減少した。この理由として2列杭の場合、1列杭と比べ水深が上昇し、また水位差は低下した。水深が上昇したことによってFrが1に近づき、1列杭と比べ水位差が ΔE に反映されず、 ΔE の幅は減少した。 $\Delta E-h_c'$ 図については $H_p' = 0.07$ の場合、1, 2列杭に ΔE の変化はあまり見られなかったが、 $H_p' = 0.14, 0.28$ の場合、 h_c' が大きくなるにつれて2列杭の ΔE は1列杭より大きくなり、 $H_p' = 0.28$ では ΔE の平均値が最大で11%向上した。

以上より、2列杭は、 ΔE を多少増加させかつ ΔE の変動幅を少なくするといえる。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 流況は7種類(Type A1, A2, A3, A4, B1, B2, AB1)に分類され、Type A1, A2, A3, A4は堤内地のエネルギー低減に有効である。
- (2) 杭が沈水状態(Type AB1)であっても、杭の抗力が働くため、杭高さと杭地点の水深が同程度であれば ΔE はCase 0より最大で19%向上する。ただし、杭高さに対して水深が大きくなると ΔE は徐々に低下し、最終的にCase 0と同程度になる。
- (3) 流況Type B2では、特に1列で杭群の間隔が大きい場合、杭背後で衝撃波が交差したひし形状の水位差が定定的に生じ、局所的に ΔE が大きく低下するため避けた方がよい。2列杭にすると ΔE は多少向上し、定定的かつ局所的な ΔE の低下も抑えられるため、杭間隔を大きくする場合、2列杭にするのが有効な減勢構造となる。

謝辞 本研究の一部に、科学研究費補助金基盤研究B (No. 15H02987, 代表: 田中規夫), 科学研究費補助金特別研究促進費 (代表: 田中茂信)を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 五十嵐善哉, 田中規夫: レベル2津波の堤防越流に対する減勢に適した裏法側堤防構造の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_325-I_330, 2015.