

## 設計超過津波への対応策

## ～粘り強い海岸堤防と自然・地域インフラの活用～

加藤史訓・渡辺国広・姫野一樹・諏訪義雄

## 1. 背景と概要

東日本大震災を受けて、津波対策を構築するにあたっては、二つのレベルの津波を想定することとされた。一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で想定する最大クラスの津波（レベル2津波）である。もう一つは、海岸保全施設等の建設を行う上で想定する発生頻度が高い津波（レベル1津波）であり、その頻度は原則として数十年から百数十年に一度程度とされている。

海岸堤防は、このレベル1津波に対して設計されるが、これを越える津波が海岸堤防の天端を越流した場合でも、海岸堤防の効果が粘り強く発揮されるように構造上の工夫を施すことも求められることになった。

そのため、国土技術政策総合研究所海岸研究室では、レベル1～2相当の津波を対象に、海岸堤防の粘り強い構造に関する研究を実施している。また、堤防だけでなく地域全体の粘り強さを向上させるための取り組みとして、自然・地域インフラによる減災についての研究も始めており、本稿ではこれらの研究の進捗状況について紹介する。

## 2. 海岸堤防の粘り強い構造に関する研究

## 2.1 粘り強い構造の基本的な考え方

粘り強い構造とは、設計対象の津波高を超える津波が海岸堤防等の天端を越流することに対し、以下のいずれかの減災効果を目指した構造上の工夫が施されたものとされている<sup>1)</sup>。

- ・施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする。
- ・施設が完全に流失した状態である全壊に至る可能性を少しでも減らす。

当研究室では、海岸堤防の中でも代表的な構造の一つである、盛土により築造された台形断面の表面（表法、天端、裏法）を被覆した三面張り構

造を主な対象として、海岸堤防の粘り強い構造について模型実験等により検討を進め、その成果を国総研技術速報<sup>2)</sup>として公表してきた。これまでに分かった留意点を次節に示す。

## 2.2 粘り強い構造の留意点

## (1) 堤防周りでの高流速と圧力変化

津波が海岸堤防を越流する際には、裏法および裏法尻では速い流れが発生する。図-1は、固定床実験（堤防高は現地スケールで6m、裏法勾配1:2）で得られた堤防模型周辺の水位と断面平均流速の分布を示している。各越流水深（2m、6m、10m）での断面平均流速 $q/h$ は裏法から堤防陸側の平坦部にかけて8～14m/s程度（現地換算値）となっている。

このような高流速によって、裏法肩や裏法尻の底面では圧力変化が生じる。図-2は、図-1と同様の堤防模型を対象に、堤防周辺の底面におけるピエゾ水頭と水位を測定した結果を示している。ピエゾ水頭とは、大気圧基準の圧力水頭と標高0mを基準とした位置水頭との和であり、ピエゾ水頭が水位より高い場合には圧力上昇を、逆に低い場合には圧力低下を意味しており、ピエゾ水頭が底面より下がると圧力水頭が負の状態、すなわち負圧が発生している状態であることを表している。図中において、ピエゾ水頭は水位に比較して法肩で局所的に低下、法尻で局所的に上昇している。このことから、圧力が法肩で低下、法尻で上昇が生じていることがわかる。また、越流水深が大きくなると、ピエゾ水頭が局所的に低下または上昇する範囲やその大きさが増加している。

粘り強い構造を考える上では、このような速い流れや圧力変化に留意する必要がある。

## (2) 裏法尻での洗掘とその対応

東日本大震災で見られたように、津波の越流により堤防陸側では洗掘が生じる。図-3は、堤防模型とその陸側に平坦な移動床（中央粒径0.25mm）を設置し、2分間（現地スケールで10分間）の越流の後に地形を測量した結果である。越

Researches on countermeasures to tsunamis larger than the design tsunami; resilient structures for coastal dike, and utilizing natural and/or community infrastructures

流水深は現地スケールで1m、2m、3m、6m、10mに設定した。その結果、裏法尻での洗掘の深さが越流水深とともに大きくなる傾向が確認された。

このような裏法尻での洗掘に対処するためには、裏法尻の保護により越流水の方向を背後地盤に突っ込まない向き（水平方向など）に変えることが重要である。これにより裏法尻の洗掘を堤防本体からなるべく遠ざけることで、裏法尻での洗掘が堤体破壊につながるというプロセスを遮断もしくは遅らせ、堤防全体の裏法尻洗掘に対する抵抗性を増し、堤体が被災するまでの時間を延ばすこ

とができると考えられる。

(3) 流れの中に置かれた構造物の不陸による構造物の不安定化

裏法被覆工に凹凸が生じると、流体力を大きく受け、被覆工が不安定になる。このことから、被覆工に不陸を作らないことが重要である。また、不陸ができて、流れによる作用をまともに受ける面が生じない構造とすることも有効である。

裏法被覆工の不陸が生じる原因としては、裏法被覆工の下にある土砂の吸い出し、地震動、圧密等の経年変化が考えられる。広大な裏法において不陸の存在を越流発生時に最小限に押さえ込むの

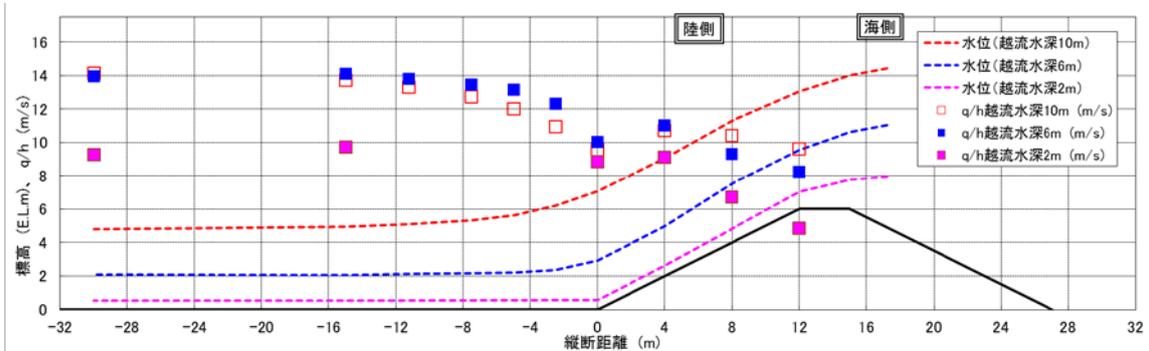


図-1 堤防模型周辺の水位と断面平均流速(q/h)の分布

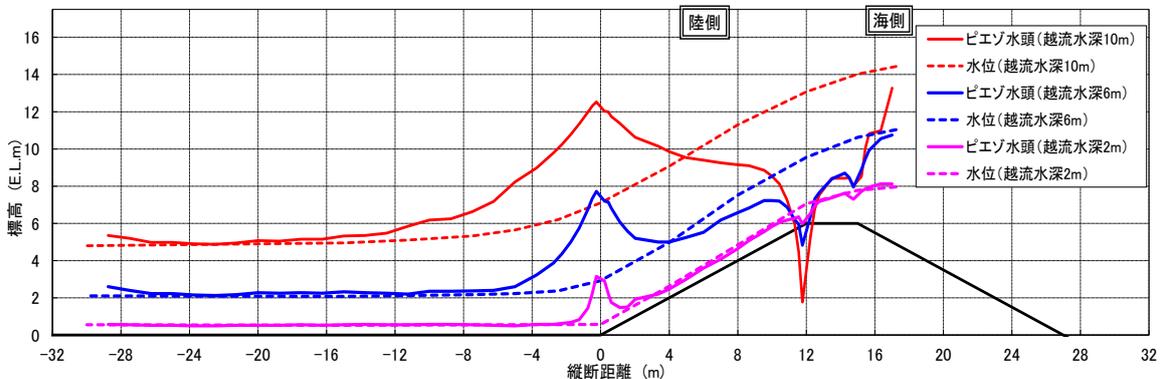


図-2 堤防模型周辺の水位とピエゾ水頭の分布 (数値は現地換算値)

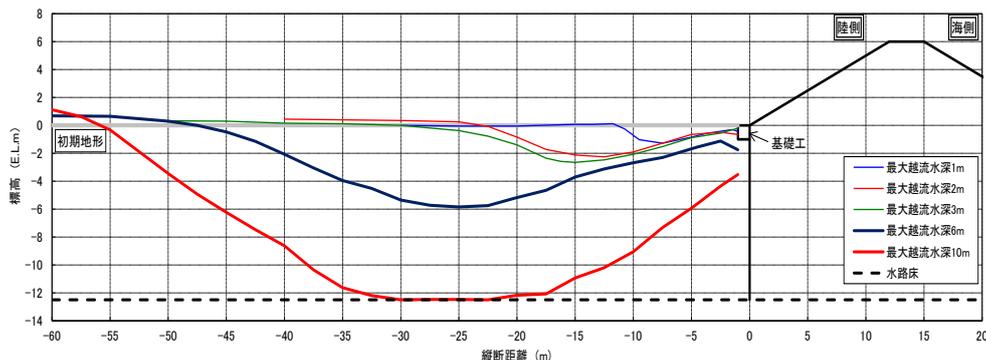


図-3 越流後における裏法尻の地形 (数値は現地換算値)

は難しい可能性があることから、堤体が多少の変形を起こしても、不陸が起きにくい、あるいは少なくとも不陸が起っても流れをまともに受ける面を露出させないように構造を工夫することが考えられる。そのような工夫の一例として、図-4のように、上端と下端に切り欠きを設けたブロックをかみ合わせることで、下のブロックが上のブロックより突出しにくくすることが考えられる。

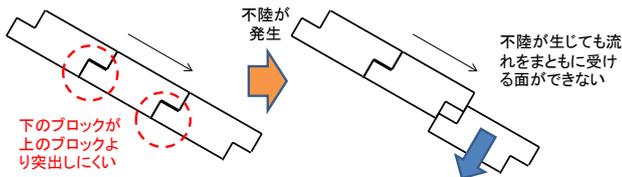


図-4 ブロック形状の工夫の一例

(4) 揚圧力と吸い出しへの対処

図-5のように、津波が襲来して、海側の水位が上昇すると、その水位上昇に連動して堤体下の浸潤面が上昇を始める。元の浸潤面が地盤内で高かった場合などには、浸潤面が比較的早く堤体下部に達することになる。たとえば吸い出し防止などの理由から、被覆工を不透透・不透気構造にしていたとすると、その被覆工と浸潤面とに囲まれたところに空気が残留する一方、浸潤面は海側の津波水位に応じて、ある速度で上昇しようとするので、たとえ浸潤面自体は低くても、封入された空気の圧力が上昇する。また、浸潤面より下では、被覆工の下面に水圧が作用する。これに対し、孔があるブロックを裏法被覆工に用いると、10m/s級の高流速によって堤体土の吸い出しが発生する。

このような揚圧力と吸い出しへの対処として、孔のないブロックを用いて、過剰な空気圧はブロック同士の隙間から逃がす工夫が考えられる。

(5) 浸透水に対する堤防裏法尻での対応

堤体や基盤の土質条件によっては、津波の越流水位が堤防天端まで降下した時点において（高水位を経験した直後）、裏法尻付近の堤体内の浸潤面が高いため、浸透水が裏法尻付近から浸出する状況が起こりえる。このような状況になると、裏法尻付近が泥状になり、裏法被覆工が被災することも考えられる。こうした現象が起こる可能性を踏まえ、良質な盛土材料を使うなどの対策を検討することが必要である。

(6) 負圧への対応

図-2に見られたように、津波が堤防を越流する

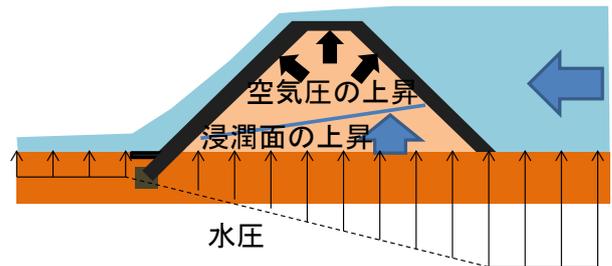


図-5 越流に伴う空気圧の上昇

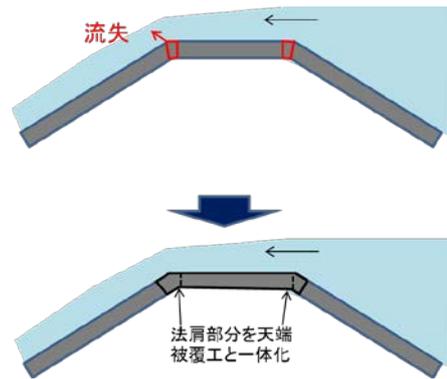


図-6 負圧に対する法肩部分の工夫案

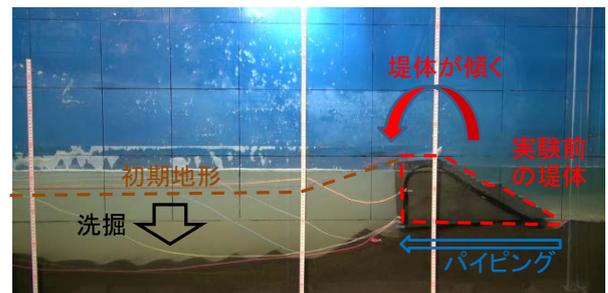


図-7 パイピングと洗掘による堤体の傾き

ときには、天端被覆工と裏法被覆工との接合部にあたる裏法尻付近で、負圧（大気圧を下回る圧力）が発生することがある。このような裏法尻での負圧は被覆工の安定性に影響することから、対策が必要である。図-6はそのような対策の一例であり、法肩部分を天端被覆工と一体化することで安定性を高めるものである。

(7) パイピングへの対応

海岸堤防の海側と陸側との間で生じる水位差が大きくなると、パイピングによって漏水や堤体の破壊が生じる恐れがある（図-7）。浸透路長は法勾配が急な断面では比較的短く、裏法尻での洗掘によってさらに短くなる可能性がある。洗掘を考慮してパイピングに対する照査を行う必要がある。

2.3 現場への適用に向けて

南海トラフの巨大地震の発生が切迫している中で、既存堤防の補強が緊急の課題となっている。



図-8 砂丘による津波遡上の阻止（青森県三沢海岸）

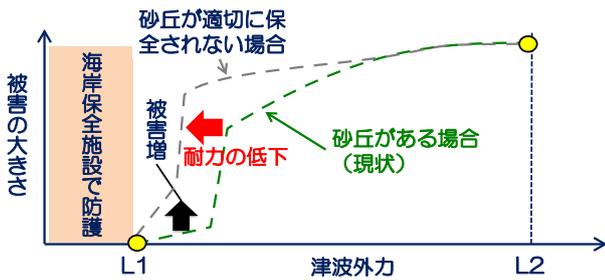


図-9 砂丘の保全状態による減災効果変化の模式図

補強に際しては、上述した様々な被災機構に対し弱点を作らないようにバランス良く構造の工夫を進めていく必要がある。また、各被災機構どうしは互いに関連していることから、その関係性についても留意せねばならない。

### 3. 自然・地域インフラによる減災

#### 3.1 堤防の背後地でも減災をはかる

東日本大震災では、堤防背後の砂丘が津波遡上を阻止した例（図-8）や、地域で大事にされてきた鎮守の森が減災効果を発揮した例も報告された。背後に控える地域全体を見渡せば、砂丘・湿地等の自然地形や水路・塚等の歴史的地物なども何らかの減災効果を有することが期待される。設計超過津波に対しては、海岸堤防だけでなく、こうした地物も活用して地域全体で減災をはかることも重要である。これらが今後の開発や維持管理不良によって消失することを防ぐためにも、減災効果を

有する「自然・地域インフラ」と位置づけて、積極的に保全していくことも考えている。

#### 3.2 減災効果と効果発揮限界の定量化

自然・地域インフラについては、津波防災地域づくりに組み込めるだけの知見の蓄積がないのが現状である。また流木の発生などにより、かえって被害を増大させることも懸念される。例えば図-9に示すように、どの程度の津波にまで減災効果が期待できるか、適切に保全されなかった場合にどれだけ被害が増大するかの評価が必要となる。

当研究室では、現地調査や模型実験、計算によって、自然・地域インフラが有する減災効果と効果の発揮限界等を明らかにするとともに、モデル地域におけるケーススタディーを実施することで、減災効果を向上させるための改良方法や継続的な保全方法についても研究を進めている。

### 4. まとめ

本研究では津波越流時の堤防周りでの高流速と圧力変化を模型実験によって把握し、海岸堤防を粘り強い構造とするためには、裏法尻での洗掘、裏法被覆工に働く揚圧力と不陸、裏法被覆工からの吸い出し、裏法肩における負圧、堤防陸側へのパイピングへの対策が重要であることがわかった。

自然・地域インフラによる減災については、基本的な概念の紹介に留めたが、成果についてはまた別の機会に報告したい。

#### 参考文献

- 1) 海岸における津波対策検討委員会：平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方、2011.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部：粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討、国総研技術速報、2012. (<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/sokuhou/index.html>)

加藤史訓



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 主任研究官  
Fuminori KATO

渡辺国広



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 研究官、博士(農学)  
Dr. Kunihiko WATANABE

姫野一樹



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 研究官  
Kazuki HIMENO

諏訪義雄



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室長  
Yoshio SUWA