津波の越流による海岸堤防の破壊メカニズムに関する研究

Laboratory Study on Destruction Mechanisms of Coastal Dyke due to Overflowing Tsunami

中尾秀之¹・佐藤慎司²・Harry YEH³

Hideyuki NAKAO, Shinji SATO and Harry YEH

Laboratory experiments on the collapse of coastal dykes due to overflowing tsunami were performed in a wave channel. In addition to the destruction caused by local scour, two mechanisms were found to be essential. One is the compression of air layer inside the dyke due to the transmission of water pressure suddenly increased by the incident tsunami at the seaside toe of the dyke. The air compression results in the increase in buoyancy force of the structure. The other is the lift force exerted at the top of the landside slope generated by the centrifugal force due to the convex streamline of the overflowing tsunami. Effectiveness of countermeasures against the destruction was also examined in the experiments.

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災において、津波の被害は甚大であった。特に、海岸堤防や防潮堤などの海岸構造物が岩手県の北部から福島県の南部までの海岸線で延長190kmに渡って破壊された(内閣府, 2011)。海岸構造物が破壊されることで、陸域の氾濫被害がさらに拡大されたと考えられる。今回の津波では海岸堤防部で大規模な越流が生じた地点が多かったが、このような大規模な越流は設計条件に含まれておらず、洗掘や漂流物の衝突などさまざまな要因が複合的に作用して構造物の破壊が進んだものと考えられる。

大規模な越流が生じる条件における海岸構造物の破壊メカニズムを解明することは、最大クラスの津波来襲時の被害の軽減に不可欠であるが、越流の際に生じる連鎖的なプロセスの実態や構造物の破壊形態についての知見が不足している。河川堤防としての越流堤に関する研究例はあるものの、海岸堤防を津波が大規模に越流する場合の研究はほとんど行われていない。震災後に実施した調査では、構造物周辺の洗掘が特徴的であり、鶴住居では破壊された堤防付近で6mの洗掘が確認されている(例えば、長坂ら, 2012)。すなわち、押し波や引き波で法先が洗掘されることによって、法先部の基礎地盤が洗掘され、支持力を失った堤防が転倒に至るという被災形態である。

その一方で、洗掘を伴わずに天端や裏法面が破壊された事例も岩手県田老町や福島県いわき市などで数多く観察された(例えば、佐藤ら, 2011)。これらの破壊機構については、破壊後の状況調査のみで分析することは困難であり、数

値解析や実験を併用した分析により総合的に検討することが重要である。設計条件を越えた外力に対しても粘り強い堤防を設計するためにも、また、他地域で想定されている巨大地震に備える意味でも、津波が越流する際の海岸堤防の破壊メカニズムを解明することは、喫緊の課題である。

これらの背景のもとで、本研究の目的は、津波が大規模に越流する際の海岸堤防の破壊メカニズムを明らかにすることとした。孤立波が堤防模型を越流する条件での断面水路実験を通して、越流時の流れと堤防模型の挙動を観察し、堤防破壊の物理的なメカニズムを抽出するとともに堤防を不安定化させる外力の測定実験を行う。さらに、堤防の破壊に対して有効な対策を検討することも目的とする。

2. 破壊メカニズムの検討

(1) 検討方法

実験に使用した二次元水槽の模式図を図-1に示す。水路端部に反射波吸収制御付きのピストン型造波装置が設置されており、造波ストロークは±30cmである。この造波板から岸側に10m離れたところから約6mの1/30勾配斜面を設けた。水路は仕切り板で分割し、幅15cmとした。現地条件に近い移動床条件にするために、その斜面上に約2cmの厚さで粒径0.15mmの細砂を敷き詰め、砂地盤上に海岸堤防模型を置いた。堤防模型の被覆材の材料は、比重が 2.7t/m^3 であり、コンクリートの比重 2.3t/m^3 と近い値の厚さ1mmのアルミニウム板を用い、表法面、天端面、裏法面の3枚をテープで貼り合わせて水密構造とした。模型は高さ4cm、法勾配は表裏法面ともに1:1.5、天端の幅は2.5cmとした。実験スケールは現地の1/150を想定することとした。

堤防模型が水路壁によって束縛されることを避けるため、模型と水路側壁の間には5mm程度の隙間を設けた。越流と同時にこの隙間には水が流入するが、この流れによる水平・鉛直方向への流体力は小さいと考えられる。越流時に

1 学生会員	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
2 フェロー 工博	東京大学教授 工学系研究科社会基盤学専攻
3 Ph. D.	Professor, Oregon State University

図-1 実験装置

図-2 Type 2, 3の詳細

写真-1 裏法が浮き上がる様子 (Type 1, 孤立波の波高7cm)

は、模型と水路壁との隙間から堤防模型内部に水が急激に浸入し、堤防の不安定化に影響することが観察された。線上の堤防が連続する現地の条件では、堤防内部への水の急激な浸入は限定的であると考えられるので、堤防模型の側面をアクリル板で密閉し、より現地に近い条件で実験した。

実験では、波高7cm～9cmの孤立波を発生させ、一様水深部および堤防模型前面で容量式波高計により水位を計測するとともに、水槽側面にビデオカメラを設置し、碎波した孤立波が堤防模型を越流する様子を撮影した。側方は透明なアクリル板で密閉したため、可能な場合は模型内部の様子も観察した。孤立波は堤防模型前面で碎波しボアを形成し、そのまま堤防に到達する。堤防模型は傾斜堤なので、表法面をボアがそのまま這い上がり、陸側へ遡上していく。表法面を遡上した津波は、最初は裏法面に沿っては流れずに岸側上方に飛び出していく。その後、しばらくしてから、越流した流れが裏法面に沿って流れ始める。

(2) 堤体内の空気層の存在を考慮した堤防模型

海岸堤防の破壊過程を観察するために、様々な条件で予備実験を行った。海岸堤防は築堤から年数が経過しているものが多く、剛性の高い被覆材と変形が容易な中詰砂との一体性は基本的には保証されておらず、空隙や空洞が生じている場合がある。また津波に先行する地震によって中詰砂が沈下することも想定されるので、本実験では被覆材と中詰砂の間には空気層が存在するという想定で実験を進めることにした。この場合、津波による急激な水位上昇が堤防基部などから内部の空気層に伝達され、内部空気層の圧力が増加し、これが浮力を発生させて堤体を不安定にすると考えられる。そこでまず、極端な条件として、堤体が完全に空洞な場合を考え、これをType 1とした。次に、堤体内に部分的に空隙が存在する条件として、堤内を直径1～3cmの礫により空隙率約50%程度で充填したものをType 2とした(図-2)。さらに、空気層を極力排除した条件として、十分な重量の堤防模型を固定し、その上に3枚の被覆材を被せたものをType 3とした。(図-2)。Type 3では、内側の模型を水路に固定し、その上に3枚の板をそれぞれの交線で回転可能なように貼り合わせたものとなるべく隙間ができないよ

うに被せることで、被覆材部材の不安定な箇所をより鮮明に可視化できた。これら三つのTypeの模型に孤立波を入射させた様子を撮影したビデオから、津波越流時の海岸堤防の不安定性の特徴について観察した。

(3) 予備実験における破壊過程の観察

Type 1, 2ではともに写真-1の様に模型が裏法側から浮き上がり、表法先を中心として回転するように不安定化することが観察された。Type 3では、天端と裏法の接合部付近がまずわずかに浮き上がり、その後、裏法面が浮き上がる様子が観察された。以上から、津波が海岸堤防を越流する際には、裏法部材が特に不安定化するということが分かる。また、堤防が不安定化する際の様子を注意深く観察すると、それは表法先位置での水位が最大になる時と、越流が裏法を流れ始めた時であることが確認できた。これらのことから、海岸堤防を津波が越流する際の堤防の不安定化に寄与するメカニズムとして、以下の二点を抽出できる。

一点目は、中詰砂の沈下等によって被覆コンクリートと中詰砂の間にできた空気層に、表法先位置で津波により急激に上昇した水圧が砂地盤を介して伝わることで、図-3に示した様に空気層が圧縮され、その圧縮圧が被覆コンクリートに作用して浮力が発生するというものである。二点目は、越流した流れが天端から裏法面上を流れ始める時、上に凸の円弧状の流れが発達し、天端と裏法の接合部付近の流れに遠心力が作用して底面の水圧が低下し、結果として被覆材に揚力が発生するというものである。以下では、これら二つの破壊メカニズムについて定量的に検討する。

3. 空気層を介した浮力の作用

(1) 圧力測定条件

模型内側の天端面にSSK製の小型圧力計(P310AV)を取り付け、模型内部の空気圧をサンプリング周波数100Hzで

図-3 圧力上昇の模式図

表-1 圧力測定の実験条件

	入射波高	模型の条件
Case1	7cm	Type 1 (中空模型)
Case2	9cm	Type 1 (中空模型)
Case3	7cm	Type 2 (礫充填)
Case4	7cm	天端から空気を解放
Case5	9cm	天端から空気を解放
Case6	7cm	前面・側面に根入れ

図-4 圧力測定の実験条件

測定する。圧力計のキャリブレーションは静水中で実施した。また、波高計を用いて表法先位置での水位も計測する。裏法先における圧力が表法先に比べて小さいので、表法先から伝わった圧力が裏法先から抜け、空気圧が上昇しないということが考えられるが、ビデオ観察すると瞬時に空気が抜ける様子が見られなかった。これは押し波が入射したことによって堤体が岸側に押し込まれ、裏法先から抜けにくくなるからであると考えられる。よって、空気圧の測定は、表-1に示す6ケースについて行った。Case1, 2では、Type 1の中空模型を用いて波高7cmと9cmの孤立波を入射させた。Case3では、模型内部に礫を詰めたType 2の模型を用いた。Case4～6は、圧縮空気の発生を抑える対策の有効性を検討したものである。Case4, 5では天端に穴を開けてそこに直径6mmのチューブを差し込んで、模型内部の空気を大気に解放した。Case6では、模型の前面と側面を2cm程度砂層に根入れした。Case4～6の概略を図-4に示す。

(2) 空気圧測定結果

a) 空気圧の最大値

表法先位置での水頭を p_0 、模型内の空気圧の水頭換算値を p_1 とする。空気層に伝達するまでに砂地盤を通過する際や、空気のクッション効果によって圧力が減衰することが考えられるので、伝達係数を k として $p_1 = k p_0$ と表すこととする。Case 1 の p_0 と p_1 の時間変化の一例を図-5に示す。横軸は

図-5 水位と圧力の経時変化

図-6 最大圧力水頭と最大水位の関係

時間(s)を表し、縦軸は水頭である。表法先の水位が上昇するとほぼ同時に、模型内部の空気圧も上昇し始め、水位のピークと空気圧のピークもほぼ同時に迎える。したがって、表法先の水圧が砂地盤を介して模型内部の空気を圧縮しているということが確認された。本実験においては、非定常性の強い孤立波を用いて検討しているため空気圧の最大値の継続時間が短い、実際の津波ではより長い時間、大きな浮力が作用すると考えられる。

全てのケースにおける最大圧力と表法先の最大水位の関係を図-6に示す。表法先での最大水位は、ばらつきが大きいので伝達係数の平均値 k_m の値を用いて議論する。Case 1とCase 2における k_m はそれぞれ、0.63, 0.73であった。伝達係数の値が1より小さくなるのは、空気層のクッション効果などによる（例えば、谷本ら, 1980）。また、Case 1よりもCase 2の方が入射する波高が大きいので圧力上昇が大きくなるのは当然であるが、 k_m の値もCase 2の方が大きくなっている。これは同じ体積の空気の場合、外圧の大きさによって空気のクッション効果が変化するからであると考えられる。また、圧力の伝達機構には、表法先の砂地盤の介在の影響も考えられる。そこで実験において、表法先の砂を1cmほど取り除いて内部の空気層が直接海側の環境に触れやすくしCase 1と同じ条件で計測したところ、 k_m の値が0.74と

なり、砂が十分に存在する場合に比べて大きな値となることが確認できた。したがって、堤防内部の圧力上昇を抑えるためには法先部の根入れが重要であると言える。

図-6においてCase 1とCase 3を比較すると、模型中に礫を詰めた場合の方が空気圧の上昇量が大きいが分かる。これは、模型内部に礫を詰めることで、空気の体積が減少したからであると考えられる。現地では被覆コンクリートの中に中詰砂が入っているので、空隙はわずかであることが想定され、大きな浮力が作用するものと推察される。

b) 浮力を減少させる対策

内部の空気層の圧力上昇を抑えるための対策の有効性について検討する。1つ目の対策として、天端に穴を開け、これにチューブを差し込んで内部圧力を大気へ解放するCase 4とCase 5について考える。両ケースの結果を見ると、いずれにおいても圧力の上昇が著しく抑えられていることが分かる。 k_m の値はCase 4, 5でそれぞれ、0.20, 0.21であり、Case 1, 2の0.63, 0.73に比べて顕著に減圧することに成功していることが分かる。しかしながら、現地の堤防にこれを導入するためにはチューブ上端部を想定津波水位以上に設ける必要があるうえ、津波の流体力がチューブ部にも作用することが想定され、施工が困難である。さらに、ビデオ観察によると、チューブを介して空気が流出すると同時に堤体内部には水が進入する様子が確認された。模型内部に水が侵入すると、中詰砂が吸い出され堤防が破壊されてしまう新たな破壊を引き起こすことも懸念される。

Case 6では、模型の前面と側面に高さ2cmの部材を追加し、根入れを施して圧力を測定した。側面にも根入れを施したのは、二次元模型実験の制約による。Case 1とCase 6の結果を比較すると、Case 6ではCase 1に比べて圧力の上昇が抑えられていることが分かる。伝達係数の値で比較すると、Case 1では0.63、Case 6では0.48となり、本来、洗掘対策として用いられている根入れの、堤防内の圧力上昇の対策への有効性が確認された。さらに、先ほども述べたように、本来の機能である洗掘対策も堤防内部の圧力上昇の対策として重要である。今回の実験では、砂地盤が2cmであったので2cm以上の根入れ効果を確認することは出来なかったが、根入れ長と減圧効果についてはさらなる検討が必要である。また、現地条件への適用を検討するためには、谷本ら(1980)が指摘する様に、圧力伝達機構における大気圧による縮尺効果についても考える必要がある。

4. 弧状越流流れによる揚圧力の発生

次に、越流した流れが海岸堤防に及ぼす力について考える。越流した流れが天端から裏法に流れ始める時、上に凸な弧状の強い流れとなり、遠心力が働くと考えられる。このような現象については、古くからダムを越流する流れで検討されている(例えば、荒木・椿, 1961)。図-8の天端と裏法

図-7 越流時の天端裏法肩部の様子

の接合部分(以下、裏法肩部)付近について考える。ここでは、流れが定常であり、堤防から十分離れた上流では速度水頭が十分に小さいとして、比エネルギー E が上流側の水位に等しいと仮定して検討する。流速を v 、裏法肩部における曲率半径、水深をそれぞれ R_0 、 H_c 天端から流速を検討する点までの距離を y とする。また、単位幅あたりの流量を Q 、裏法肩部における圧力を P_c とする。これらを用いて、表面流速、流速分布、流量、圧力分布を求めると以下ようになる。

$$v = \frac{R_0 + H_c}{R_0 + y} \sqrt{2g(E - H_c)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Q = \sqrt{2g(E - H_c)} (R_0 + H_c) \log_e \frac{R_0 + H_c}{R_0} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$p_c = H_c + (E - H_c) \left[1 - \left(\frac{R_0 + H_c}{R_0} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots(3)$$

H_c が限界水深という仮定を置くと、 E = 一定のもとで、 $\partial Q / \partial H = 0$ を満たすので、それを整理すると

$$E = \frac{2H_c + (R_0 + 3H_c) \log_e \frac{R_0 + H_c}{R_0}}{2(1 + \log_e \frac{R_0 + H_c}{R_0})} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここで、越流水深 H_c はビデオ画像から求められるので、 R_0 を定めると、(4) 式から E が求められる。 E が求められると、(1) 式から裏法肩での流速、(3) 式から裏法肩での圧力が算出できる。Case 1 の孤立波高 7cm の条件におけるビデオ画像から、 $H_c = 0.025\text{m}$ と求められ、曲率半径 $R_0 = 0.04\text{m}$ と仮定すると、 $E = 0.0356\text{m}$ と算出された。堤防模型の高さが 0.04m、表法先における水位の最大値が 7cm 程度であることを考えると、限界水深の前提条件が妥当であるといえる。

まず、流速について考える。 $H_c = 0.025\text{m}$ であるので、後ほど PIV でも検討する点である $y = 0.005\text{m}$ とともに (1) 式に代入して、天端と裏法の接合部での流速は $v = 0.65\text{m/s}$ と推定できる。次に求められた流速と実際の流速を比較するために、PIV 手法を用いて天端と裏法の接合部における流速を求める。水路側方から 240fps のハイスピードカメラを用いて、孤立波の入射波高が 7cm の条件で動画を撮影した。流れて輸送される砂粒子の画像から、PIV 手法で斜面流下方向の流速を求め図-8を得た。流速は斜面下向きを正に取っているのでノイズ値を除いて処理すると、流速が一定となっ

図-8 天端と裏法の接合部における流速

図-9 R_0 を変化させた時の P_c の変化

ている時間帯の平均流速は0.46m/sとなる。すなわち、定常流を仮定して求めた流速はPIVで算出した流速に比べて約1.4倍の流速が算出されたことになる。これは流れの非定常性によると考えられる。すなわち、孤立波を用いた実験では大きい越流水深が持続しないため、定常状態を仮定して推定した流速に比べて小さくなると考えられる。

次に、裏法肩部における圧力低下について考える。天端と裏法の接合部における圧力分布は、(4)式より $p_c = 0.0076$ mとなる。したがって、津波が海岸堤防を越流する際には、 p_c と H_c を比較することにより、天端と裏法の接合部における圧力が静水圧の約3割に低下することが分かる。弧状流れの曲率半径 R_0 の値は計測が困難であったため、圧力低下量の計算では、曲率半径 R_0 が堤防模型の高さに等しいとして計算した。しかし、 R_0 の値は実際はそれよりも小さい可能性が高い。そのような場合、 P_c の値が負になる可能性が十分にあるので、 R_0 の値を変化させた時の P_c の値を算出すると、図-9のようになり $R_0 = 0.02$ mの場合、現地での水頭換算で2.39mの負圧が生じる。裏法肩部で圧力が低下する現象は、前述の予備実験のType 3の模型の天端後部が浮き上がった現象と整合するが、負圧の発生機構の検討には実際に圧力を測定するなどの検討が必要である。また、揚圧力は浮力とは違い、重力が支配的なのでフルード則に従うと

考えられる。裏法肩部における圧力低下は越流した流れの曲率の大きさが引き起こしており、曲率は裏法勾配に依存する。したがって、二線堤構造にし、一線目と二線目の間に越流水を貯留することで越流流れの流線を変化させる対策によって、裏法肩部における流れの曲率を小さくすることが可能である。二線堤の有効性については、定性的ではあるが本実験による堤防挙動の観察により確かめられた。

5. 結論

本研究では、海岸堤防の洗掘以外の破壊メカニズムを明らかにするために模型実験を行い、堤防を不安定化させるメカニズムを抽出するとともに、その対策について検討した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 津波が海岸堤防を越流する時、表法先の水圧が砂地盤を通して堤防内部の空気層を圧縮することで空気層の圧力が上昇する。これにより被覆材に大きな浮力が働き、堤体が不安定化する。
- (2) 中詰砂と被覆コンクリートの間の空気層を大気に解放する対策は、堤防内部の空気圧の上昇に対しては有効であるが、その他の破壊メカニズムを考慮しなければならない。
- (3) もう1つの対策として、従来は洗掘対策として用いられている根入れが有効であるということが分かった。ただし、根入れ深さと減圧効果の関係についてはさらなる検討が必要である。
- (4) 越流が天端から裏法にかけて上に凸の弧状の強い流れとなることで、天端と裏法の接合部付近の圧力が低下し、この部分が構造的弱点となる可能性を指摘するとともに、二線堤構造の対策の有効性を定性的に示した。

謝辞：大阪市立大学の山田卓先生（前東京大学）には、圧力測定の実験においてご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。また、本研究の成果はJST平成23年度J-RAPIDプログラムによる研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 荒木正夫・椿東一郎（1961）：水理学演習 上巻，森北出版，pp.233-235。
- 佐藤慎司・武若 聡・劉 海江・信岡尚道（2011）：2011年東北地方太平洋沖地震津波による福島県勿来海岸における被害，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 67, No. 2, pp. I_1296-I_1300, 2011。
- 谷本勝利・高橋重雄・村永 努（1980）：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力－空気圧縮モデルによる検討－，港湾技術研究所報告19巻 第1号，pp.3-31。
- 内閣府（2011）：防災白書，2012年 6月 26日 閲覧 <http://www.bousai.go.jp/hakusho/hakusho.html>
- 長坂陽介・Harry Yeh・中尾秀之・佐藤慎司・田島芳満・山中悠資（2012）：津波による堤防および盛土の侵食機構に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 68.（印刷中）