

越流による盛土の侵食特性および津波対策としての耐侵食性の向上策について

谷本 隆介¹・常田 賢一²

¹大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)

²大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1)

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波により防潮堤などが甚大な被害を受けたが、その復興および危惧されている南海トラフによる津波に対する防災・減災のための取り組みが必要である。本研究は、被害事例に基づいて、現在、曖昧な防潮堤の“粘り強い”の定義および防潮堤の計画、設計に必要な8つの評価項目を提示する。また、現地の被害調査から明らかになった盛土の耐侵食性を解明するために、盛土の越流実験を実施するとともに、盛土を津波防潮堤として活用するための盛土の耐侵食性、難浸透性の向上方法の技術的な可能性を提示する。

キーワード 津波、防潮、粘り強い、盛土

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震（以下、本地震）では、津波により防潮堤などが甚大な被害を受けた。将来の南海トラフによる津波が危惧されている現在、本地震の類似被害に対する防災・減災のための早期の取り組みが必要とされている。その際、中央防災会議¹⁾からは、レベル2津波に対する“粘り強い”防潮堤が課題として提起されているが、本研究は、現在、曖昧な防潮堤の“粘り強い”の定義を考察、提言するとともに、防潮堤の計画、設計に必要とされる8つの評価項目を提示する。また、本地震の現地被害調査から明らかになった盛土の耐侵食性を、さらに詳細に解明するために、盛土の越流実験を実施し、その侵食特性を明らかにするとともに、盛土を津波防潮堤として活用するための盛土の耐侵食性の向上方法の技術的可能性を提示する。

2. “粘り強い”とは

防潮堤などの被害における被害レベルの差異を知るとともに、被害レベルによる“粘り強い”および防潮構造の評価の考え方を提示する²⁾。

(1) 津波被害による被害レベルの区分

本地震の津波による防潮堤などの被害は、基本的な構造機能の保持の状態により異なる。ここで、基本的な構造機能とは、後述する“粘り強い”に関わる構造機能であ

るが、被害事例から被害レベルは、以下のレベルS、レベルA、レベルB、レベルCおよびレベルDの5つに区分できる。

a) レベルS：致命的な被害

レベルSは致命的な被害であり、破堤あるいは基本的な構造（表法、天端、パラペット）が激しく欠損し、高さが喪失するあるいは高さの保持が困難な状態となり、基本的な構造機能は完全に、あるいはほぼ喪失する被害レベルとする。**写真-1**は防潮堤が決壊し、全断面が喪失し、水面化している状況である。なお、矢印は押し波の方向を示す（以下、同じ）。

b) レベルA：背面部の大規模な被害

レベルAは表法および天端は被害が軽微であり、防潮堤などの裏法あるいは裏法先の地盤の一部あるいは全部が侵食あるいは流出した状態にあるが、基本的な構造機能は最低限、確保される被害レベルとする。**写真-2**は越流後の河川堤防である。表法はほとんど侵食が無く、天端は舗装が一部剥離しているが軽微な被害であり、裏法は大規模な侵食と欠落があるものの、天端高は保持されており、基本構造は確保されている。

c) レベルB：背面部の中規模な被害

レベルBは表法および天端の被害が軽微であり、裏法の表面に侵食、ブロックの飛散、一部欠損が発生するが、基本的な構造機能は確保される被害レベルとする。**写真-3**は法枠工の法尻が侵食し、落堀が形成されているが、裏法枠はほぼ残留し、高さも保持されている。

d) レベルC：背面部の小規模な被害

レベルCは表法および天端は被害が軽微であり、裏

法先の地盤の侵食が発生するが、基本的な構造機能は十分に確保される被害レベルとする。写真4はコンクリートブロック張構造の防潮堤であるが、裏法先の地盤は侵食されているものの、裏法、天端、表法は残留しているので、小規模な被害である。

e) レベルD：無被害

レベルDは津波の越流があっても、防潮堤などの基本的構造の損傷および裏法先の地盤の侵食は皆無であり、基本的な構造機能は通常通り確保される被害レベルとする。写真5は裏法が無く、背後が平坦地である緩傾斜堤であるが、コンクリート張りの表法の損傷は皆無である。



写真1 決壊・流出(山元町坂元)：レベルS



写真2 天端の軽微な剥離(仙台市井土浦)：レベルA



写真3 裏法尻の侵食による落堀(岩沼市寺島)：レベルB



写真4 裏法先の侵食(巨理町荒浜)：レベルC



写真5 無被害の緩傾斜堤(旭市下永井)：レベルD

以上、実被害から被害レベルを区分したが、要求される性能レベルはレベルSが低く、レベルDに近づくほど、高く、厳しくなる。

(2) 粘り強い構造的な許容限界の概念²⁾

設計の対象は、防潮堤などの構造体の基本的な構造機能とし、構造機能における“粘り強い”は“壊れるまでには至らない”と考える。ここで、“壊れる”とは基本的な構造機能の喪失であり、それに影響しない変状・損傷は容認する。なお、基本的な構造機能の要件は、“壊れにくい”ではなく、時間経過によっても“破堤しない”であり、言い換えると、津波の場合は“高さの保持”と考える。従って、目指す“粘り強い”は、“基本構造は壊れない”、言い換えると“所定（設計時）の高さが安定的に保持される”と考える。

さて、防潮堤などの変状レベルと損傷レベル（以下、変状・損傷レベル）および地震動レベルと津波レベル（以下、地震動・津波レベル）の関係を図-1の概念で表わす。同図の構造機能許容限界は、レベル1で想定される構造機能（非変状・損傷）との連続性およびレベル2における規模の違いに応じた取り扱いの差異（大規模なほど緩和）を考慮して設定しており、設計目標とする“粘り強い”の許容限界である。そして、“粘り強い”を実現する対策レベルと許容する被害レベルを以下のように対応させる。

- ・対策レベルⅠ：被害レベルDを設計目標とする
- ・対策レベルⅡ：被害レベルC～Bを設計目標とする
- ・対策レベルⅢ：被害レベルAを設計目標とする

以上により、許容する被害レベルに応じて、対策レベルが変わることになるが、許容される被害レベルが小さい対策レベルⅠは、要求性能のレベルが厳しく、同Ⅱ、同Ⅲになるに伴い緩和する。

ここで、“粘り強い”を実現する対策レベルは3つの対策レベルのいずれでもよく、対象とする対策工法がどの対策レベルにあるかを明示すればよい。

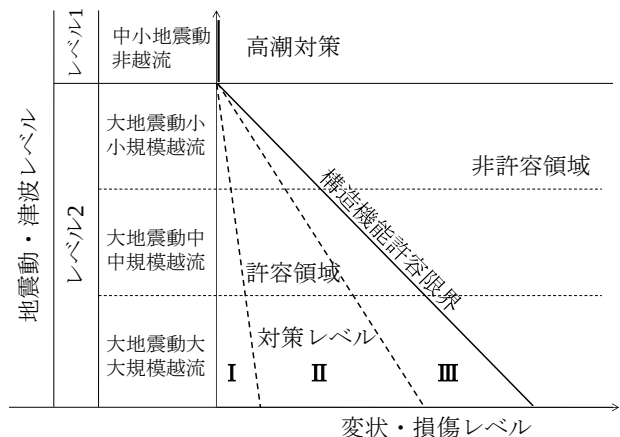


図-1 変状・損傷レベルと地震動・津波レベルの関係概念

(3) 防潮堤の要求性能の評価項目

防潮堤などでは構造機能以外に、取り巻く自然環境あるいは社会的環境を考慮した評価が必要である。構造機能を含め、評価項目として、以下の 8 つが提示できる²⁾。

- 1) 構造機能：構造が、外力（高潮、地震動および津波）に対して所要の安定性および機能性を保有すること。
- 2) 耐久性：経年による構造の変状・損傷、安定性の低下が、外力の発生に際して、所要の構造機能の安定性に影響しないこと。
- 3) 点検性・補修性：日常的な管理が容易であるとともに、経年による構造の変状・損傷、安定性の低下が容易に検知でき、補修・補強により容易に回復できること。
- 4) 津波減勢性：防潮堤などが単に構造体として安定しているだけでなく、背後地などの外部に対して及ぼす影響、効果まで考慮津波の影響が低減できること。
- 5) 海陸交流性：防潮堤などは海岸線に沿って設置され、内陸部と海浜部の境界部にあることから、海や海浜の利用あるいはそれらからの退避を阻害しないこと。
- 6) 景観性・自然性：防潮堤が置かれた場所の景観や生態を阻害しないで、さらに向上し、創出し、自然化が図れること。
- 7) 空間利用性：堤体およびその上空などの空間の多機能化、多目的利用が図れること。
- 8) 経済性：将来的にはメンテナンスフリーといった視点が必要であるが、経年レベルに応じた LCC（ライフサイクルコスト）が考慮されていること。

以上の 8 つの評価項目は定量的な評価が難しいが、評価方法の具体は今後の課題である。

(4) 洗堰から学ぶ

津波の越流は、洪水時の河川堤防の越流に類似しているため、越流を考慮した設計が実施されている河川堤防の洗堰および調整池の越流堤の構造が参考になる。

大垣市内の大谷川下流部の左岸には、右岸堤防の破堤被害の防止を目的とした洗堰が設置されている。写真-6 は 2 度の嵩上げ後の洗堰（延長 110m）であり、一般部の天端高 TP10.88m に対して越流部は TP8.85m である。現在の洗堰の構造は、表法がコンクリート護岸、天端と裏法がコンクリート張である。HWL9.80m に対する越流深は 0.95m であり、裏法先にある幅 3.5m、深さ 1.0m の水叩きによるウォータークッションの落差は 3.95m である。また、天端の両端には写真-6 の排気管および裏法面にゴム弁が付いた排気あるいは排水用の孔がある。さらに、天端には洗堰内の盛土の沈下に伴う空洞充填用の注入孔がある。既に 50 年余が経過し、コンクリート張には補修されたクラックの痕があり、経年劣化を示す。

なお、庄内川・新川の洗堰は平成 23 年 9 月の台風 15 号の洪水による越流（設計上の越流水深 1.85m、越流時間は 7 時間程度）により、裏法下部のコンクリート版が迫り出したが、跳水に伴って発生する堤体内外水位差に



写真-6 洗堰の全景(左)と裏法コンクリート張(右)

起因する揚圧力が原因とされている。

以上のように、三面張り構造では水叩き、排気・排水や空洞の対策、コンクリート部材を含めた経年劣化に対する耐久性および点検性・補修性に留意が必要である。

3. 事例から知る盛土の津波抑制性と耐侵食性

本地震では、津波に対する盛土の“粘り強さ”，言い換えると耐侵食性，補強による侵食抑制性，津波抑制性を示す盛土の事例があり，以下に示す³⁾。

(1) 耐侵食性の事例

仙台市若林区井土浦地先には、貞山堀の山側に隣接する幅約 200m の湿地を囲むように嵩上げされた高さ 3.9m、延長約 1.5km の堤防がある。堤防天端の越流深は 3.95m（推定）である。前述の写真-2 の通り、津波の越流後の表法の侵食は皆無、天端の舗装の剥離も軽微である。また、裏法は写真-7 のように侵食し、法先で落堀が形成されて、一部の裏法が欠落しているものの、天端に至るような致命的な破壊はしていない。この原因は、洪水時の河川堤防と異なり、堤体は地下水位より上部にあり、堤体が不飽和状態にあり、かつ 30 分程度の短時間の越流では堤内への浸透が僅かであったことから、盛土の不安定化には至らなかったと推察される。従って、本例は裏法の表層的な侵食、一部の欠落はあるが、天端は保持され、破堤といった致命的な被害には至っていない盛土であり、津波に対する耐侵食性、難浸透性を示す。

(2) ジオテキスタイルによる侵食抑制性の事例

津波により侵食された盛土では、ジオテキスタイルにより補強されていた事例がある。写真-8 は写真-9 の人工盛土の隣接部であり、津波集中して越流したと思われる低盛土（高さ 1.6m）の状況である。写真から分か



写真-7 堤防の裏法および落堀の侵食状況



写真8 低盛土の覆土流出後のジオテキ補強部



写真9 盛土による津波抑制性：名取市関上

るように、厚さ 0.6m 程度の覆土が流出しているが、ジオテキスタイルで被覆された堤体は残留している。本例は、津波を意識したものではなかったが、ジオテキスタイルによる補強が津波の越流による侵食を抑制、言い換えると侵食を限定化できることを示す。

(3)津波抑制性の事例

名取市の関上漁港では海側に砂浜があるが、津波前から高さ 5.6m、天端幅 24m、表法勾配 1:2.7、延長 150m 程度の盛土が置かれていた。写真9は当該盛土付近の津波の襲来時の様子⁴⁾であるが、上記の盛土により津波の進入が抑制されており、盛土背後の保安林が残留している。この盛土の越流深は僅か(0.5m：推定)であり、表法に顕著な侵食は見られず、裏法の一部に窪みなどの越流痕があるが、盛土全体は軽微な侵食に止まっている。従って、本例は高さがある盛土は、背後地に対する津波の進入の抑制性があることを示す。

4. 盛土の耐越流性の向上の検証実験

被害事例から盛土の耐侵食性および補強による耐侵食性の向上が分かったが、2章の被害レベル A を要求性能とした対策レベルⅢを盛土により実現することを目的として、盛土モデルの越流実験を実施し、耐侵食性および難浸透性の向上策の技術的な可能性を検証した^{5) 6)}。

(1)実験方法

実験水路(延長 55m、幅 1.0m)に盛土モデルを設置し、ピストン造波板による波を盛土モデルに越流させた。盛土モデルの諸元を図-2に示す。耐侵食性の向上法に関する盛土モデルは以下の4ケースである。

- ・基本形 2 割 (Dry)：基本寸法(天端幅 14cm、底面幅

- 46cm、表法・裏法勾配 1:2、高さ 8cm)で Dry の盛土
- ・全面補強 (Wet)：基本形の法と天端の下 1cm に全面にジオテキスタイルを敷設し、覆土した Wet の盛土
- ・部分補強 (Dry)：基本形の天端の下部を包み込むようにジオテキスタイルを敷設した Dry の盛土
- ・天端補強 (Dry)：基本形の天端に不透水のアクリル板を設置した Dry の盛土

盛土材は桐生砂の購入土であるが、模型の寸法を考慮して、フルイ分けにより 2mm 以下の粒度とした。平均粒径は 0.55mm であり、最適含水比は 11.4%、最大乾燥密度は 1.98g/cm³である。ここで、盛土モデルは Wet あるいは Dry の含水状態で行い、前者は最適含水比付近(12.0~13.0%)で締め固め、後者は最適含水比より低い含水比(4.6~6.7%)で締め固めている。なお、盛土モデルの裏法先地盤の侵食は無い固定床の実験である。

なお、ジオテキスタイルは 30g/m²、透水係数は概ね 4.25×10⁻¹cm/s、引張強力はタテ 54kN/5cm、ヨコ 39kN/5cm である。アクリル板は両法肩から 1cm を覆土部とした幅 120mm で板厚 2mm であるが、表法側の幅 20mm は浸透防止のため板厚 5mm とした。さらに、剥離防止のために 8 本のプラ棒(φ3mm、長さ 40mm)で固定した。

(2)耐侵食性

沖波の波高 6.96~7.16cm、盛土前の水深 11.1~11.6cm である。第1波とその約30後の第2波が盛土を越流したが、盛土の表法肩の水深：第1波 2.0~2.9cm/第2波 1.5~2.2cm、裏法肩同 1.1~1.4cm/同 1.1~1.4cm、越流時間同

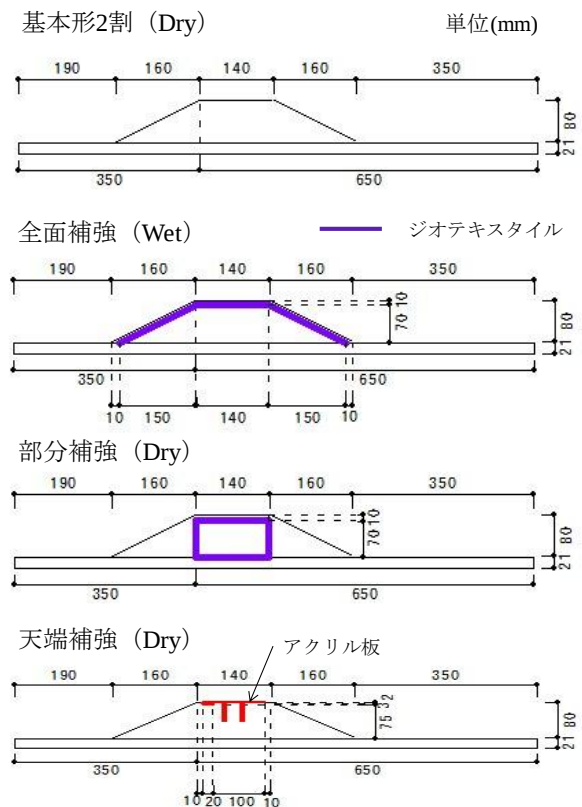


図-2 耐侵食性の向上の検証実験の盛土モデル

12.13～13.00 秒/同 4.60～7.98 秒であり、2 波を合わせた越流時間は 17.20～20.31 秒である。

レーザにより越流の前後の盛土の断面積を計測して、断面積の低減率、つまり侵食率を算出した結果が表-1 である。同表から、いずれの盛土模型でも表法の侵食は僅かであるが、写真-2 の河川堤防でも同様である。よって、侵食は天端あるいは裏法が主たる部位である。また、基本形では天端の侵食が顕著である（写真-10）が、ジオテキスタイルの全面補強、部分補強およびアクリル板の天端補強のいずれも、天端の侵食は限定的であり、侵食率は無補強の基本形 2 割（Dry）の半分強以下である。

まず、ジオテキスタイルを全面設置した場合、ジオテキスタイルから下の盛土体は侵食されていない（写真-11）。そのため、侵食は表層 1cm だけであり、侵食率は無補強の 1/3 程度（12.7%）である。被害レベルは、天端の一部で 1cm の侵食があり、盛土高は 7cm になったが、補強部の盛土高は保持されている。

次に、天端下部をジオテキスタイルで部分補強した場合、ジオテキスタイル内部の盛土体は侵食されていない（写真-12）。そのため、侵食は裏法と天端の覆土の一

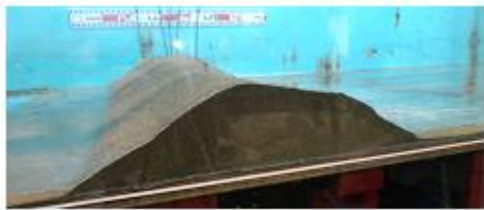


写真-10 基本形 2割(Dry)の越流後

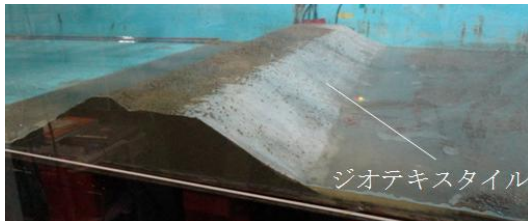


写真-11 全面補強(Wet)の越流後



写真-12 部分補強(Dry)の越流後

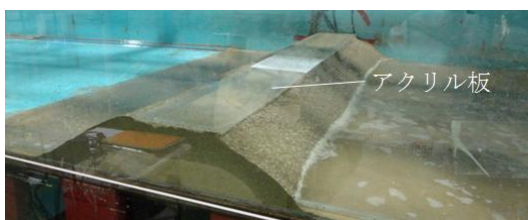


写真-13 天端補強(Dry)の越流後

部であり、侵食率は無補強の 1/2 強（20.6%）である。ここで、侵食率が全面補強より大きいのは、部分補強では裏法の侵食の進行が許容されるためであるが、補強部の高さは保持されている。

さらに、天端をアクリル板により天端補強した場合、侵食は裏法肩止まり、侵食率は無補強の 1/2 程度（17.5%）に止まり、特に天端の高さは完全に保持されている（写真-13）。ここで、部分補強よりも天端補強の方で侵食率が小さいのは、後者の場合、天端の侵食が裏法の肩部だけに限定され、裏法の侵食が拡大しないためである。

(3) 難浸透性

写真-8 など、堤防における難浸透性が示唆されたが、盛土模型の越流実験においては、盛土内に土壌水分計を設置し、体積含水率の経時変化から浸透状況を把握した。図-3 は部分補強（Dry）について、盛土内の 5 箇所を設置した土壌水分計による体積含水率から算出した飽和度の時刻歴例である。なお、図示のように、いずれのケースも 2 波が越流している。ここで、盛土模型毎の飽和度の経時変化は、以下の通りである。

- ・全面補強（Wet）：ジオテキスタイルの下に設置された土壌水分計は、第 1 波では変化が無く、第 2 波までに天端下上部の 1 箇所だけ上昇を始め、第 2 波で増加しているが、他の 4 箇所は変化せず、浸透していない。
- ・部分補強（Dry）：第 1 波および第 2 波によっても、ジオテキスタイルの内部のいずれの箇所でも変化は無く、浸透はしていない。（図-3 参照）
- ・天端補強（Dry）：第 1 波および第 2 波によっても、いずれの箇所でも変化は無く、浸透はしていない。

以上から、越流時の盛土内部への浸透は、無補強の場合も少ないが、ジオテキスタイルの補強により補強領域内への浸透はさらに抑制され、アクリル板の天端補強では盛土中央部への浸透は全く見られない。

表-1 越流による盛土断面の侵食率

盛土模型	全断面 (cm ²)			侵食率 (%)		
	設計	越流前	越流後	全断面	表法 △	天端 □
基本形2割Dry	240.0	244.2	155.1	36.5	1.7	14.7
全面補強Wet	240.0	246.7	215.3	12.7	0.9	6.1
部分補強Dry	240.0	240.8	191.3	20.6	1.2	4.1
天端補強Dry	240.0	245.2	202.4	17.5	1.4	0.7

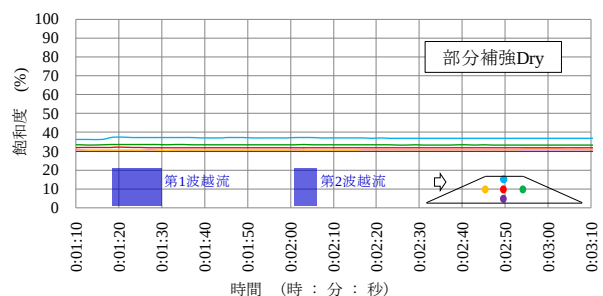


図-3 盛土内の飽和度の経時変化例：部分補強(Dry)

5. 防潮構造としての盛土の活用

実験で想定した盛土の補強構造は、図-1の対策レベルⅢに相当する。その構造的な“粘り強い”に関して、例えば、写真-2の堤防では、津波による越流深は3.95m（推定）であったが、前述の通り、被害は致命的ではなく、越流に対する盛土の耐越流性を示唆する。

ここで、前述の8つの評価項目に関して、盛土の場合、1) 排気管・排水孔は必要なく、“粘り強い”構造機能があり、2) コンクリート構造のような劣化の恐れがなく、耐久性があり、3) 変状が容易に把握できる点検性および手直しが容易である補修性に優れ、4) 水叩きなどにより津波減勢性が可能であり、5) オーバーパスによる横断路の設置の容易性により海陸交流性の障害が少なく、6) 設置が可能な緑地帯形成により景観性の向上、防潮性の向上、自然化が図れ、7) 緑地・避難地・道路などの併置による空間利用性が多様であり、8) 初期投資および維持管理費が少なく経済性に優れている。

さらに、越流実験によれば、“粘り強い”構造としての一層の補強が可能かつ容易であり、その効果が期待できるので、優れた防潮構造と位置付けられる。ここで、防潮堤としての盛土の活用法については、図-4の概念で例示するように、本堤あるいは二線堤が考えられる。

6. まとめ

本研究による知見は以下の通りであるが、津波特性と津波に対する盛土の耐侵食性、難浸透性を考慮することが、合理的、経済的かつ永年に渡る津波対策に繋がる。

- 1) 津波に対する防潮堤などの基本構造は高さであり、“粘り強い”は“壊れにくい”ではなく、高さに影響しない変状・損傷は容認して、所定の高さが安定的に保持されることである。
- 2) 防潮堤などの津波被害は規模の違いを理解することが必要であるが、レベルS、レベルA、レベルB、レベルCおよびレベルDの5つに区分できる。
- 3) “粘り強い”を具現する構造機能は、構造機能許容限界以下の変状・損傷レベルにあるレベルAからレベルDの許容領域にあればよく、“粘り強い”構造には取り扱いの幅があることの理解が必要かつ有効である。
- 4) 防潮堤などの評価は、構造機能に加えて、耐久性、点検性・補修性、津波減勢性、海陸交流性、景観性、空間利用性および経済性の8つの視点が必要である。なお、盛土はこれらの8つの視点で優れている。
- 5) 河川堤防の洗堰、越流堤は、津波の越流に対するコンクリート防潮構造の設計の参考にするのがよい。
- 6) 盛土は被害レベルAの“粘り強い”が発揮できる防潮構造として有用性が高く、ジオテキスタイルおよび天端

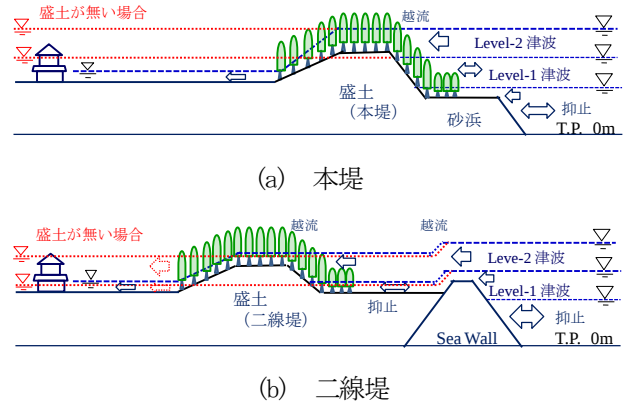


図-4 防潮構造としての盛土の活用法

の補強により耐越流性、難浸透性の向上が可能である。7) 津波の越流事例および水路越流実験によれば、洪水時の河川堤防とは異なり、締め固め管理された盛土は難浸透性があるため、津波とは要求機能が異なるフィルダムのコアのような遮水構造は不要であるとともに、被害レベルSに至る安定性の喪失の恐れは小さい。

謝辞：本研究の実施において、盛土模型の水路越流実験では東洋建設（株）鳴尾研究所の藤原隆一氏、小竹康夫氏および前田工織（株）、（社）近畿建設協会、洗堰の現地調査では国土交通省中部地方整備局庄内川河川事務所、岐阜県河川課・大垣土木事務所、（社）先端建設技術研究センターの木全俊雄氏の御協力、御支援を頂いており、ここに、関係各位に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，2012。
- 2) 常田賢一：津波における”粘り強い”に関する考察，第48回地盤工学研究発表会，No.184，2013。
- 3) 常田賢一・谷本隆介：津波に対する土盛構造の抑制効果と耐侵食性の事例，第47回地盤工学研究発表会，No.931，2012。
- 4) 海上保安庁：第二管区海上保安本部仙台航空基地の提供（MH906撮影），2011。
- 5) 竜田尚希・常田賢一・鈴木啓祐・谷本隆介：津波に対する盛土の耐越流性の向上に関する実験，第48回地盤工学研究発表会，No.212，2013。
- 6) 常田賢一・谷本隆介：2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，P0014，2013。