

展 望

自然災害を防ぐジオシンセティックス

埼玉大学 桑野 二郎

1. はじめに

IGS 技術情報編集委員会から技術情報の展望について執筆依頼があった。60 年以上もさしたる展望も持たずに過ごしてきた身には、正直少々辛い依頼であったが、日本支部長という立場上、お断りするの難しい。色々と考えてみたが、展望にふさわしい内容などなかなか思いつかなかった。どうしたものかと頭を抱えていた時にふと思いついたのは、2018 年のソウル IGS 世界大会で行った Keynote Lecture “Geosynthetics for natural disaster prevention and mitigation -Japanese challenge-”¹⁾ のことである。IGS 会長で世界大会を主催した韓国の Prof. Yoo から「このような題で」と依頼された。「ジオシンセティックスを用いた自然災害に強い土構造物ならば補強土壁の耐震性が高いことなどを示せば良いが、『ジオシンセティックスを用いた自然災害の軽減』となると構造物が強だけでなく災害の軽減に役立つことを示さなければならず、ハードルがさらに高くなる。補強土壁の耐震性くらいしか研究していない自分には、正直手に負えないな。」と思いつくとした。しかし、どうしてもと言われ、断れなくなってしまった。自分の手に負えなければ人に頼るしかないと思いつき、多くの皆様に助けをいただいで、何とか論文を作成し、講演を無事に行うことができた。従って、依頼された題名に「-Japanese challenge-」を追加した。講演では、提出した論文の内容にいくつかの追加を行った。本稿は概ねその講演に沿ったものであるが、さらに若干の追加も行っている。日本では、特に近年においては、水が関係する災害が多いため、そのような内容が多くなっている。地球温暖化に伴う豪雨災害の多い昨今の状況において、多少なりとも参考になれば幸いである。

2. 自然災害を防ぐジオシンセティックス

(1) はじめに

日本はしばしば激甚な自然災害に襲われる。多数の島からなる国で長い海岸線を有し、国土の多くが山地であり、火山も多数ある。4 枚のプレート境界にあり、数々の活断層が存在し、多くの自然斜面が不安定な状態となり、しばしば地震が発生する。2011 年東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) は 1900 年以降に世界で記録された中で 4 番目の大きさであった²⁾。2000gal を超える加速度が記録された場所もあった。大きな沈下、すべり、補強されていない土構造物の従来式擁壁の崩壊、道路や鉄道の盛り土、宅地地盤などに様々な被害が見られた。この地震において津波は浸水深・遡上高が 40m にも及び³⁾甚大な被害をもたらした。多数の人命が失われたのみならず、多くの防潮堤や河川堤防が津波により洗い流された。一方で、補強土壁は時には完全に津波に浸かってしまう場合もあったが、多くの場合、その被害は限定的であった。津波関連以外も含め、地震後に補強土壁の被災状況の調査結果を取りまとめたものを図-1、表-1 に示す^{4),5)}。終局限界に至る重い損傷を受けた補強土壁は 1%未未満で、90%以上は無被害であった。設計時に想定した大きな地震動が作用したにもかかわらず、補強土壁はかなり高い耐震性を示した。地震に対して強

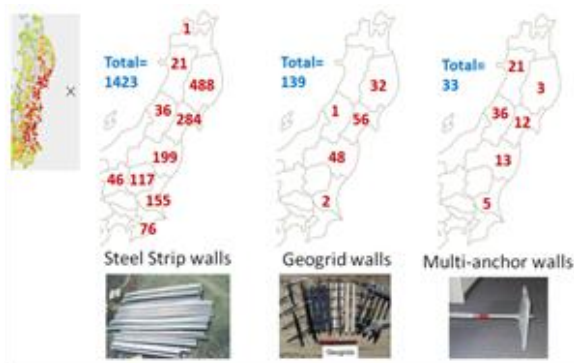


表-1 東日本大震災における補強土壁損傷概要

	テールアルメ壁	ジオグリッド壁	多数アンカー壁
終局限界	0.3%	0.7%	0%
修復限界	1.0%	4.3%	0%
使用限界	7.0%	0.7%	3.0%
無被害	91.7%	94.3%	97.0%

図-1 2011年東日本大震災による補強土壁損傷調査^{4),5)}

いことが「自然災害を防ぐ」ことでは必ずしもないが、少なくとも構造物被害など災害の原因となる危険性は大きく減らすことができる。一方で防潮堤、河川堤防などが破堤すると大きな災害につながるため、本稿では水の作用に対する補強土構造物の安定性についてこの後述べる。

日本はしばしば前線や台風に伴う豪雨に襲われる。恐らくは地球温暖化に伴う現象として、集中豪雨の頻度は年とともに高まっている。年平均約10個の台風の影響を受けるが、降雨のみならず高潮も海岸部の災害の要因となる。高い強度や耐久性からジオシンセティックスの適用が日本でも増えているが、本稿では「自然災害を防ぐジオシンセティックス技術」に焦点を当て、津波や洪水による越流対策、海岸保全、落石防護など、日本で行われてきた試みを紹介する。

(2) 水災害を防ぎ軽減するジオシンセティックス技術

a) 東日本大震災における補強土壁に対する津波の影響

東日本大震災において、津波は40mにも達し甚大な被害をもたらし、多くの防潮堤や河川堤防が破壊された。しかし水害を考慮せず建設されたにもかかわらず、補強土壁は、津波に襲われたものも含め、全体的に見れば被害は極めて限定的であった。ここでは、津波に襲われ大きな被害を受けた補強土壁と殆ど損傷しなかった補強土壁の例を紹介する。

岩手県南端に位置する陸前高田市は、市の中心部がほぼ5階建ての高さに相当する15mもの津波に襲われた。図-2に示す3つの補強土壁RSW1~3について紹介する^{4),5)}。



図-2 高陸前高田市の補強土壁



図-3 RSW1 補強土壁全容

RSW1 は壁高 6m のテールアルメ壁で急斜面上の道路と干拓堤防が交わる箇所に建設された。この地域は約 14m の津波に襲われ、長さ約 500m の干拓堤防は RSW1 寄りの排水門付近を残しそのほとんどが流失した。図-3 は被災部を正面から見たものであるが、補強土壁はその全長にわたり津波に浸かったが、干拓堤防に近い付近のみが著しく損傷した。上部の壁面パネルが落下し、また洗堀により基礎部も損傷した。補強土壁断面自体は普通のものであったが、根入れ深さが 40~50cm と海岸部の構造物としては少々浅かった。しかし最も問題であったのは、干拓堤防部で補強土壁が途切れていたことであった。堤防があればそこに補強土壁が不要と考えるのはある意味適切な工学的判断であったといえよう。津波により堤防が流失してしまうのは、まさしく想定外であったと思う。しかし堤防が失われたことにより、補強土壁が途切れた部分がむき出しとなり、図-4 に示すようにそこから津波が補強土壁部まで侵入して裏込め土を侵食してしまった。土を失った補強土壁は、壁面パネルが補強材により保持されず崩落してしまった。もし補強土壁が途切れていなければ、裏込め土の流失は少なくなり、補強土壁の被害も小さかった可能性がある。



図-4 RSW1 補強土壁壁体切れ目と裏込め流失

RSW2 はやはりテールアルメ壁で、図-2 に示すように RSW1 とは半島の反対側に位置する。海岸部に位置し壁高 10.5m を超える津波に襲われたにもかかわらず、ほぼ無被害であった。RSW1 とは異なり、壁が途切れることなく盛土を囲っていたこと、根入れ深さが 1.5m と大きかったことが功を奏したものと思われる。

RSW3 は陸前高田市の市街地にあり、国道 340 号線の JR 大船渡線奈々切跨線橋は気仙川の近くに位置していたが、海岸線から市街地を超えてきた津波と気仙川に沿って遡上してきた津波の両方に襲われた、完全に水没し手すりが押し曲げられていた。跨線橋の両方の橋台部には約 7.7m の補強土壁が構築されていた。橋台基礎部は洗堀を受け津波の威力がうかがえる。補強土壁の詳細は不明であるが図-5 のようにワイヤメッシュと植生シートで覆われた簡易な壁面構造であったにもかかわらず、損傷は軽微であった。薄い植生シートであってもきちんと覆うことで裏込め土の流出を防ぎ、結果として補強土壁全体の損傷も軽微であったと思われる。同様な事例は他にも見られた。



図-5 RSW3 補強土壁植生シートの軽微な損傷

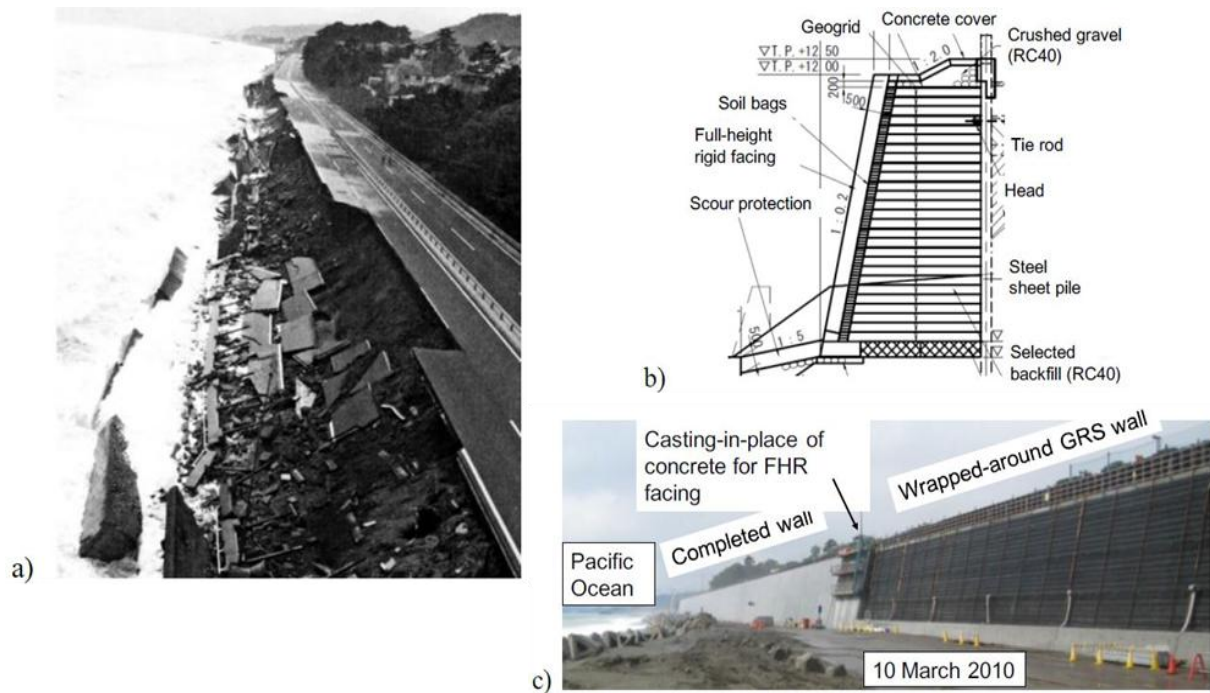


図-6 2007年8月台風9号による基礎洗堀に伴う西湘バイパス崩壊とRRR工法による復旧⁸⁾

b) 水の作用に耐える補強土壁

全高の巻き込み補強土壁を構築後に場所打ちの剛な一体型コンクリート壁面を有するRRR工法は、1995年阪神大震災や2011年東日本大震災において非常に高い耐震性を示したことから、新幹線を含む鉄道盛土に広く使われている。また、洪水や津波にも強い構造物としての適用も報告されている⁶⁾⁷⁾。河川や海岸といった水辺に建設された従来型の片持ち梁形式の擁壁は基礎の一点で支持されているため、洪水や嵐により基礎地盤が洗掘され転倒して崩壊する事例が多い。擁壁が倒壊すると背面土が大きく侵食され、鉄道や道路が通行できなくなってしまう。一方RRR工法では、支持地盤の侵食に対し、壁面が裏込め土と多数点でつながっており転倒は起きにくく、基礎地盤が相当程度洗掘されない限り裏込めも簡単には失われない。図-6は国道1号線西湘バイパスの海岸沿いの1.5kmが2007年8月29日の台風9号による高波によって基礎が洗掘され崩壊した様子と、RRR工法による復旧の様子を示す。その後の嵐に対して特に問題は生じていない。

JR豊肥線の阿蘇山のトンネル間の狭い谷に位置する鉄道盛土は、1989年7月2日の豪雨（ピーク時67mm/1時間、総雨量650mm）による洪水で多数が流失した⁶⁾。多くの場合、盛土の横断排水管が詰まり、盛土の上流側に水が溜まってしまい、その越流により盛土は崩壊した。下流側では土石流が発生し民家を襲った。6か所の鉄道盛土が、安定性は確保したうえで土工量を減らすためジオシンセティックス補強盛土で再建された。法尻には径3mのコルゲート排水管を通すため、ほぼ垂直なRRR擁壁が建設された。これらの盛土は、2012年7月12～14日に23年前よりもさらに激しい豪雨に見舞われた。降水量はピーク時に106mm/1時間、500mm/5時間、3日間総雨量は816.5mmであった。1989年の豪雨では崩壊しなかった多くの盛土が2012年の豪雨では越流や浸透による浸食により損傷し崩壊した。1991年に再建されたジオシンセティックス補強盛土のうち3か所は、上流側からの土石流により径3mのコルゲート排水管が詰まり越流に襲われた。しかしこれらの補強盛土は越流を想定していなかったにもかかわらず、部分的に侵食を受け

たのみで生き延びた。
 図-7 に示す例では
 1989年の洪水にも生
 き延びた無補強の盛
 土が残っていたが、
 2012年豪雨では越流
 により著しく侵食さ
 れてしまった。一方
 で右側の熊本寄りでは、
 1989年に完全に流
 失した後に補強盛土
 で再建されたが、下
 流側法面の表層が多
 少の侵食を受けたの
 のみであった。



図-7 盛土再建後、再度の豪雨で流失した通常盛土と残った補強盛土⁸⁾

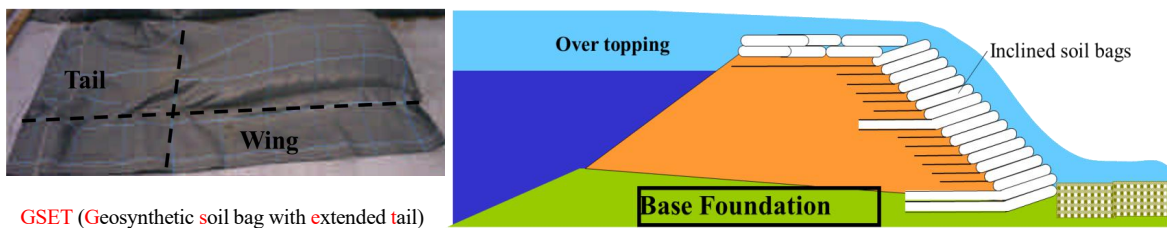


図-8 GSET(ハネ付土のう)とそれを斜めに積んだ越流に強い溜池土堰堤の提案⁹⁾⁻¹¹⁾

c) 農業用ため池の小規模アースダム（土堰堤）

日本には210,000を超える灌漑用の小規模アースダム（土堰堤）があり、その多くが人家の近くにある⁹⁾。それらは出水や地震に耐えなければならない。これらの溜池の多くは地元の管理組合により長い間維持されてきたが、それらの多くは年とともに漏水やすべりなどを伴う損傷が生じている。土堰堤であるため、降雨による法面の侵食が大きな崩壊につながることや地震による損傷・崩壊もある。1976年から2004年にかけての小規模なアースダムの毎年と累積の損傷数を見ると、年間数百から数千の土堰堤が損傷している⁹⁾。これら地震や豪雨などで損傷した土堰堤は、多くの場合元と同じような状態で再建されている。しかし100mm/時間や500mm/日を超えるような集中豪雨が増えている状況では、高い耐性を有する土堰堤の開発が必要となる。農研機構農村工学研究所では、地震と越流に強い土堰堤の開発に取り組んだ⁹⁾。

豪雨に起因する土堰堤の破壊には越流、滑動、内部侵食、の主に3つのパターンがある。既存の古い土堰堤の多くでは耐震設計はなされていない。さらにそれらの多くで洪水吐の容量が十分ではなく、多数の土堰堤が激しい豪雨による越流で著しく損傷しあるいは完全に崩壊し、時には下流の町が破壊された。例えば2011年東日本大震災において、福島県の灌漑用ダムであった高さ18mの藤沼ダムは完全に決壊し、鉄砲水により5件の家を洗い流し8人が死亡した。このようなことから洪水や地震に起因する越流に耐えるような小規模土堰堤の新しい建設法が必要とされた。一方で、200年に1度の設計洪水量を排水できるだけのRC造洪水吐を造ることは大きな建設費

を要するし、小さな土堰堤に大きな洪水吐を建設するには堤体自体の補強が必要となる。そこで洪水吐の容量増加をせず、現実的で経済的な古い土堰堤の対策法として、**図-8**に示すように下流側法面をジオシンセティックスの羽根と尻尾を有する土のうを多少の逆勾配を持たせて積んで補強する GSET という工法が提案された^{10),11)}。羽根により土のう相互の一体化が向上し、また尻尾により広い範囲が壁体として挙動する。さらに土のうを使用するため現地発生土でも使用可能となる。農工研では GSET を用いた実大の土堰堤を建造し、越流試験などを実施し性能を確認した。

d) ジオシンセティックス補強土防潮堤や河川堤防

2011 年東日本大震災により各地の防潮堤に多大な被害が生じたことを受け、国際ジオシンセティックス学会日本支部 (JC-IGS) では「ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤開発委員会」を設け、その成果として「ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤設計・施工マニュアル(案)」を作成した¹²⁾。津波による従来型のコンクリート版で覆われた防潮堤の破壊メカニズムを検討し、防潮堤を超えた津波により陸側法尻部が著しく洗堀され落堀（押堀）が形成され、あるいはコンクリート版が引きはがされ、さらに堤体へと侵食が進み、最終的に堤体のほぼ全てを失った可能性を示した。コンクリート版の不連続面からの水の侵入が、このような破壊を促進したと考えられる。このマニュアルでは、**図-9**に示すような構造を提案している。津波に対する弱点となりうるコンクリート版の裂け目や分離を防ぐため、ジオテキスタイル補強により強震動に対しても盛土変形を抑止する。ジオテキスタイル補強の利点として、法面を急傾斜とすることができることも挙げられる。またコンクリート版は、引き剥がされにくくするためにも、法面・堤頂部を隙間なく覆いしっかりと連結されている必要がある。裏法の安定性を確保するために、底部からの盛土材流失の原因となる陸側法尻の洗堀を軽減する必要がある。法尻の洗堀により、基礎ブロックへの受動土圧が低下し、結果的に法面コンクリート版を含む滑動を引き起こし、上部で出来た隙間への水の侵入が堤体の侵食を引き起こす危険性が高まるからである。

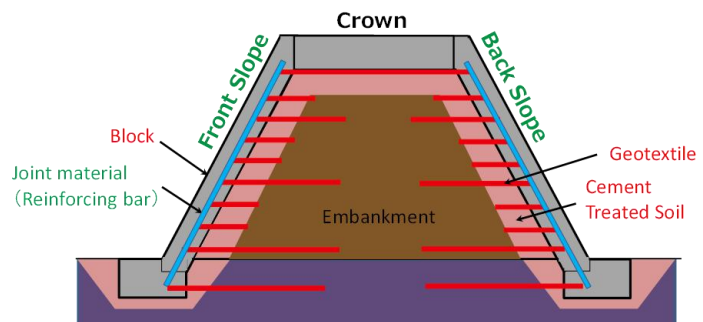


図-9 津波の越流に強い防潮堤構造の提案¹²⁾

自然災害で水が作用する構造物は防潮堤だけではなく、河川堤防も何度

も被災している。例えば 2015 年 9 月の台風 18 号による 500mm/日を超える豪雨による洪水で茨城県常総市の鬼怒川堤防が決壊したが、同様な堤防の決壊はこの数年でも度々見られる、河川堤防に関しては、洗堀や浸透、計画高水位以下の水位における地震、などについての検討はされてきたが、越流するような状況は想定されてこなかった。三面コンクリート張り（アーマレビー）による対策も一部ではなされてきたが、津波による防潮堤の破壊と同様、越流対策としては十分とは言えない。そこで表裏法面のコンクリート版をジオシンセティックスで繋いだ補強土構造を用いた堤防が提案され、水路実験により長時間の越流に耐えることが示されている¹³⁾。

河川堤防の場合、2011 年東日本大震災の津波のように数 10m もの高さに達することは考えにくい。先述した強化型防潮堤をやや簡易にしたそのような構造でも十分に効果的であると思われる。一方で、ジオシンセティックスを内部に配置する構造は、堤防を新規構築するのではな

れば適用できない。また堤防に土以外の異物を入れることに対する抵抗感もあろう。そういう意味では、c)で紹介した GSET 工法には可能性を感じる。ただ、河川堤防は全国に多数存在し、その延長も相当なものである。基礎地盤や堤体の状況がはっきりしていない場合も多くあると思われる。それらを全てきちんと調査し、高度な対策を行うには、相当な費用と時間を要するであろう。完璧ではなくても相応にリスク

(被害の程度×発生確率)を低下させる簡易迅速な対策が必要とされる。例えば2021年ジオシンセティックスシンポジウムにおいて、図-10に示すような2層の砕石を充填したジオセルに不織布を挟み込む構造で主に雨水浸透の抑制を目的とした法面保護工に関する発表¹⁴⁾があったが、越流対策においても、このように既存の堤防に被せるような簡易な工法の開発が期待される。

海岸侵食も水に関係する自然災害と言えよう。ジオチューブが侵食防止に使われており¹⁶⁾、日本でも宮崎県の海岸で適用され、台風の高波により保護されていない箇所では著しく侵食が生じたのに対し、保護された個所では軽微な侵食にとどまった事例が報告されている^{15), 16), 17)}。

(3) 水災害以外の自然災害を防ぎ軽減するジオシンセティックス技術

日本では水に直接関係する災害が多いため、そのような例を多く述べてきたが、ここではそれ以外の事例についてもいくつか紹介する。

a) 耐候性大型土のうを用いた土石流の再流下に備える緊急砂防堰堤

容量約1m³の耐候性大型土のうは、仮設土留め工や仮締切工などの仮設工に広く用いられるのみならず、災害時の応急仮工事への適用も多く、「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアルが作られている¹⁸⁾。土石流は最初の発生後も堆積した土砂が残り、その後の降雨により再流下して被害を繰り返したらす場合があ

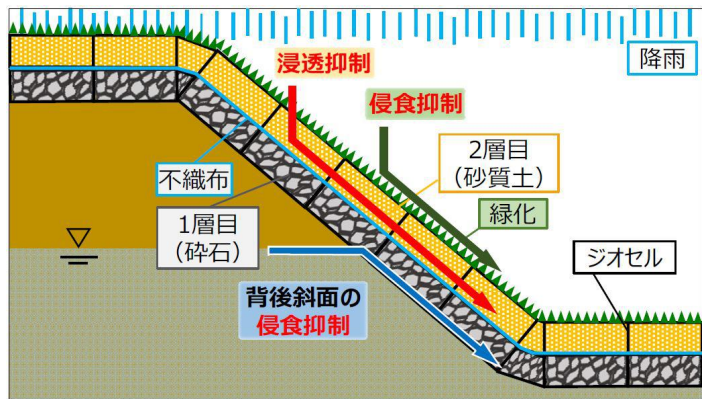


図-10 2層のジオセルで構成される法面保護工¹⁴⁾

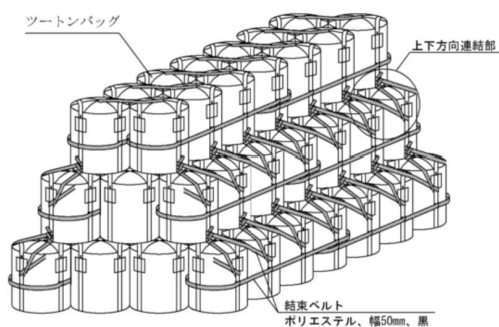
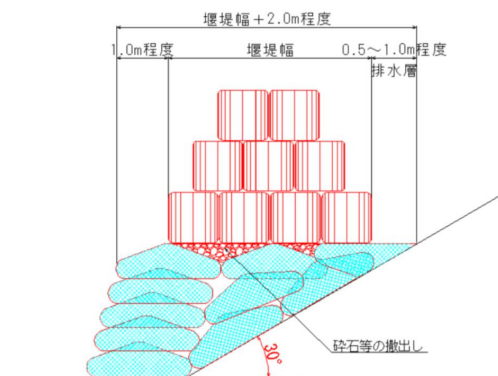


図-11 大型土のうを用いた緊急砂防堰堤 (元前田工織横田氏提供)

る。本格的な砂防ダムの構築には時間が掛かるため、例えば広島土石流への緊急対策として、**図-11**に示すような緊急砂防堰堤が構築された。これは袋型根固め工の上に大型土のうを積み上げたもので、大型土のう同士を結束ベルトにより連結することで、全体的な安定性と耐衝撃性を向上させている。

b) 補強土壁構造を用いた落石防護工

急峻な地形の多い日本では、落石対策も重要な課題である。落石対策工は発生源対策の落石予防工と落ちてくる落石の動きを食い止め被害を軽減する落石防護工があるが、落石防護補強土壁工はある程度の設置スペースは必要なものの、土の塑性変形特性から高いエネルギー吸収能がある。アメリカでは既にかんがりの実績があり¹⁹⁾、日本においても開発が進められている²⁰⁾。**図-12**は提案断面の例で、約40mの高さから落石を実際に衝突させ、あるいは振り子式に重錘を衝突させることで耐衝撃性能の確認を行っている。土は塑性変形によりエネルギー吸収能が高いだけでなく、防護壁が損傷しても、コンクリートなどとは異なり、土自体はその場での再利用が可能であり、環境に優しい対策工とも考えられる。

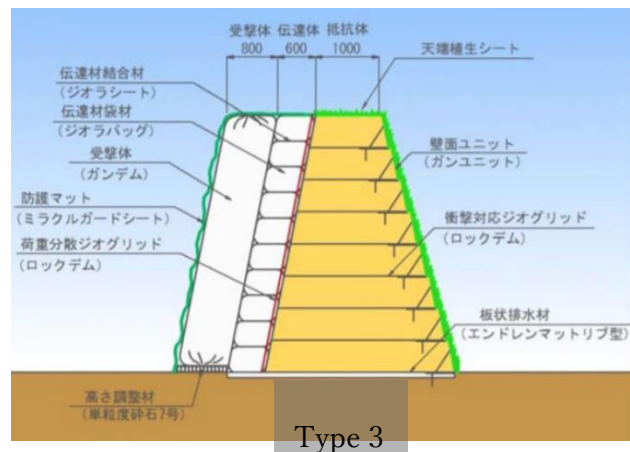


図-12 補強土壁構造を用いた落石防護工の例
(元前田工織横田氏提供)

日本には多数の火山があり、時には噴火に襲われる。2014年9月27日には御岳山が突然噴火し、多くの登山客が巻き込まれ死者行方不明者は63人にもなった。多数の火山弾が噴出し、これも死傷者を増やした原因と考えられている。2018年1月23日には草津白根山でもスキー場隣接地で突然の噴火が起き、1名が死亡した。このような火山災害においては、突然の噴火に備えて火口周辺にシェルターが設置されることも多い。しかし御岳山の場合、コンクリート製シェルターは設置されておらず、山小屋や避難小屋の多くは木造であったため、火山弾が屋根や壁を突き抜けた。5年後に再開した山小屋では対策として屋根や壁を防弾チョッキに使われるアラミド繊維で二重化して建て替えられた²¹⁾。ジオシンセティックスを用いた落石防護工とは必ずしも言えないかもしれないが、柔軟な発想でジオシンセティックスの適用範囲を広げる際の参考にならう。

3. おわりに

本稿では「自然災害を防ぐジオシンセティックス」ということで、自然災害に対して強いジオシンセティックスを用いた構造物だけでなく、その存在が自然災害を防ぐことにも貢献する例を紹介した。日本は地震や豪雨などの自然災害が非常に多く、構造物が強いことで交通網の維持につながるなど、災害を軽減できる。しかし、それ自体が壊れないだけでなく、強い防潮堤や堤防、あるいは落石防護工のように、自然災害を軽減することに貢献できることで、ジオシンセティックスの適用範囲が広がることを期待している。以前は地震に強い構造物の研究が盛んであったが、2011年東日本大震災の津波や近年の豪雨災害の頻発を受け、水に強い補強土構造物の研究が進んでいる。本稿でもいくつか紹介をしたが、越流による破壊のメカニズムに対する理解が進み、強

靱な構造の提案がされている。海岸部、数十 m の大津波、というキーワードに対してはそのような構造が必要となろう。一方で、河川堤防、せいぜい数 m の越流、に対しては、その延長や掛けられる予算などを考えると、完璧ではなくとも既存の堤防に付加するような形の対策が期待される。土粒子を失わず越流をやり過ぎ、破堤を何とかしのげれば十分という割り切りである。本稿で紹介した溜池の土堰堤に対する工法などは大いに参考になると考える。

本稿で「自然災害を防ぐジオシンセティックス」について紹介したのには、ジオシンセティックスが防災に役立ち広く利用されるようになって欲しいという以外に、実はもう一つ理由がある。ジオシンセティックスが日本に導入され、それを災害の多い日本の環境に適合させるべく、強い構造物を作るために様々な研究や技術開発が行われてきた。新しい技術は、それだけで魅力的な存在で多くの人を引き付ける。新しい技術に出会い、それをどう使いこなすか、どう新しい展開を図るか、そこに面白さがあり、気分も高揚する。しかし、かつての新技術は既にかかなり成熟し、日常的な存在となっている。それはそれで意義のあることではあるが、わくわくする存在では段々なくなってくる。また、一通り行き渡ると、むしろ尻すぼみになる場合もあろう。導入時に活躍された世代が一線を退かれつつある昨今、次の「わくわく」がなかなか見えない状況にあると思われる。今までにない新しい適用が出てこなければ、この分野に明日は無いという危機感がある。必要は発明の母などと言うが、「自然災害を防ぐジオシンセティックス」に限らず、実務の立場からこんなことが出来ればいいなという大胆な「必要」をぜひ共有し、皆でわくわくしたいものである。

参考文献

- 1) Kuwano, J., Mohri, Y., Kikuchi, Y., Nihei, Y., Koseki, J. and Watanabe, K.: Geosynthetics for natural disaster prevention and mitigation -Japanese challenge-, *Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics (IIICG)*, Seoul, Korea, Keynote Lecture, 19p, 2018.
- 2) US Geological Survey: Magnitude 8 and Greater Earthquakes Since 1900, [http:// earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_mag.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/mag8/magnitude8_1900_mag.php), viewed on September 11, 2012.
- 3) Tsunami Joint Survey Group: Tohoku Earthquake Tsunami Information, <http://www.coastal.jp/ttjt/>, viewed on September 11, 2012.
- 4) Kuwano, J., Koseki, J. and Miyata, Y.: Performance of reinforced soil walls in the 2011 Tohoku Earth-quake, *Proc. 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics (GeosyntheticsAsia2012)*, Bangkok, Thailand, pp.85-94, 2012.
- 5) Kuwano, J., Miyata, Y. and Koseki, J.: Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku Earthquake, *Geosynthetics International*, Vol.21, No.3, pp. 179-196, 2014.
- 6) Tatsuoka, F., Tateyama, M., Koseki, J. and Yonezawa, T.: Recent geosynthetic-reinforced soil structures for railways in Japan. *Proc. 15th Conference on Current Researches in Geotechnical Engineering in Taiwan*, Yunlin, Taiwan, 2013.
- 7) Watanabe, K., Nakajima, S., Fujii, K., Matsuura, K., Kudo, A. and Nonaka, T.: Development of railway embankment resistant to sever earthquakes and prolonged overflows caused by Tsunami, *Proc. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul, Korea, pp.2937-2940, 2017.

- 8) Tatsuoka, F., Tateyama, M., Mohri, Y. and Matsushima, K.: Remedial treatment of soil structures using geosynthetic-reinforcing technology. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, pp. 204-220, 2007.
- 9) Mohri, Y., Matsushima, K., Yamazaki, S., Lohani, T.N., Goran, A. and Aqil, U.: New direction of earth reinforcement - disaster prevention. *Proc. 5th Int. Symposium on Earth Reinforcement (IS-Kyushu 2007)* (Otani, J., Miyata, Y. and Mukunoki, T. Eds.), Fukuoka, Japan, pp. 85-101, 2007.
- 10) 毛利栄征, 松島健一, 堀俊和, 谷茂: ため池の被害と復旧の考え方: 基礎工, Vol.33, No.10, pp.62-65, 2005.
- 11) 松島健一, Aqil.Umair, 毛利栄征, 龍岡文夫, 山崎真司: 水平および傾斜積層した土囊のせん断特性, ジオシンセティックス論文集, Vol.21, pp.145-152, 2006.
- 12) ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤開発委員会: ジオテキスタイルによる粘り強い強化防潮堤設計・施工マニュアル (案), 国際ジオシンセティックス学会日本支部, 2014.
- 13) Kurakami, Y., Nihei, Y., Ooyama, M., Morita, Kikuchi, Y. and Tatsuoka, F.: Laboratory experiments on resistance of river levee with geosynthetic-reinforced soil against overflow erosion. *Proc. 6th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, New Delhi, India, 2016.
- 14) 古矢達也, 中川一真, 川口貴之, 中村大, 川尻峻三, 原田道幸: 2層のジオセルで構成されるのり面保護工の浸透抑制機能に及ぼす不織布の影響, ジオシンセティックス論文集, Vol.36, pp.53-60, 2021.
- 15) Lawson, C.R.: Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, Vol. 15, No. 6, pp. 384-427, 2008.
- 16) 村上啓介, 佐藤慎司ら: 宮崎海岸におけるサンドバック埋設護岸の浜崖後退抑止効果, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1135-1140, 2015.
- 17) 三井化学産資: ジオチューブ DS, <http://www.mitsui-sanshi.co.jp/syubetsu/s21-1.html>, viewed on August 12, 2018.
- 18) 堀内晴生, 辰井俊美, 了戒公俊: 「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル, 土木技術資料 Vol.55, No.5, pp.56-59, 2013.
- 19) FHWA (Federal Highway Administration), Fig. 66, 6. Rockfall Protection, CONTEXT SENSITIVE ROCK SLOPE DESIGN SOLUTIONS, https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/context_sensitive_rock_slope_design/ch_6_2.aspx#6_1_2_1, viewed on March 3, 2022.
- 20) 例えば前田工織: ジオロックウォール, <https://www.maedakosen.jp/products/500/>, viewed on March 3, 2022.
- 21) Wikipedia: 2014年の御嶽山噴火, <https://ja.wikipedia.org/wiki/2014年の御嶽山噴火>, viewed on March 4, 2022.