

地震時道路変状防止対策「タフロード[®]」と発電所構内道路への適用

—石狩湾新港発電所1号機土木工事のうち（第2工区）工事報告—

Countermeasure to Prevent Road Deformation on Liquefiable Ground: Tough-Road[®] and its Application to Power Station

(株)大林組 正会員 ○伊波宏樹 (Hiroki Inami)
 正会員 伊藤浩二 (Koji Ito)
 正会員 稲川雄宣 (Yusen Inagawa)
 北海道電力(株) 正会員 齋藤寿秋 (Toshiaki Saito)
 樋口浩之 (Hiroyuki Higuchi)

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震では、柏崎発電所構内で路面の亀裂、沈下、隆起、路面沈下による地中配管ダクトとの段差等の道路変状のため、地震後の緊急時の道路機能を確保できなくなった¹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震においても、各地で路面の沈下、埋設管の浮き上がり等による道路変状等が確認された。このような大規模地震の経験から、近年では、エネルギー、生産インフラ施設のBCP（事業継続計画）における緊急時の道路機能の維持、走行性の確保が課題となっている。

液状化が予想される地盤上の道路では、一般に道路機能を確保するために、サンドコンパクションパイルによる密度増大工法、深層混合処理、浸透注入固化等の固結工法の液状化対策により液状化の発生を防止する。液状化対策による道路機能の確保では、改良範囲が深度方向に大規模となり高価である。

一方で、液状化対策と異なり、液状化の発生を許容するものの道路本体の変状を抑制し道路機能を確保できれば、対策範囲が小規模となり液状化対策と比較して経済化を図れる。例えば、液状化地盤上の堤防の耐震対策では、堤防底部のジオグリッドの敷設により堤防沈下を低減できることが確認されている^{2)、3)、4)}。構造的な変状対策では、土構造物の機能維持を図りつつ多少の変状を許容するため、土構造物の性能に応じた設計方法も必要となっている。

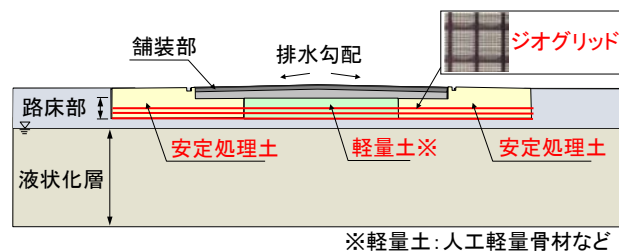
このような課題に対して、地震時の液状化の発生を許容するものの道路本体の性能を確保する経済的な道路変状対策であるタフロードを考案した⁵⁾。

本報では、地震時（地震終了後）および地震後（地震終了後の液状化地盤の発生過剰間隙水圧の消散完了時）のタフロードを想定した遠心力模型振動実験、有効応力解析に基づく数値解析で得られた道路部の残留変位を基にその有用性を示すとともに、エネルギーインフラ施設である新設発電所構内道路への適用事例を報告する。

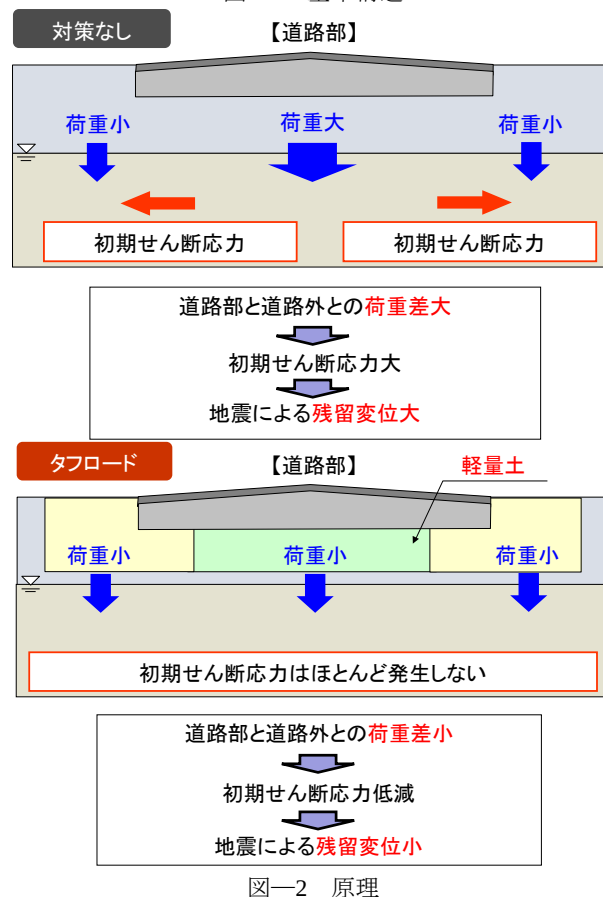
2. タフロード

2.1 概要

図—1はタフロードの基本構造である。液状化地盤上の道路下の路床部に対して、路床底部のジオグリッドの敷設、路床部の埋戻土を軽量土と安定処理土の複合とする構造的な道路変状対策である。タフロードでは、地震



図—1 基本構造



図—2 原理

時に発生する道路変状（残留沈下、残留傾斜）を抑制し、地震後の道路機能（段差、排水勾配）の確保を実現する。液状化層では液状化の発生を許容するため、従来の液状化対策（例えばサンドコンパクションパイル工法）と比較して経済化を図れる。路床部までの浅層の施工のため、対策深度が浅く早期の導入が可能である。

図—2 はタフロードの道路変状を抑制する原理である。対策なしの道路部では、舗装、路盤の重量、路面の排水勾配により一般部（遠方地盤）と比較して重量があるため荷重差が大きい。その結果、液状化地盤で生じる初期せん断応力が大きいので、地震時において液状化地盤が側方へ広がり大きな残留変位が生じ易い。一方で、タフロードでは、路床部を軽量土と安定処理土の複合とするため道路部と一般部との荷重差を小さくできる。その結果、液状化地盤で生じる初期せん断応力が小さいため、液状化地盤の地震時の残留変位を抑制できる。路床底部のジオグリッドは、路床部における引張補強材の効果を発揮するために敷設する。

図—3 はタフロードによる液状化地盤上の道路変状を抑制する模式図である。対策なしでは、地震時に液状化地盤が側方へ広がり、大きな残留沈下が生じることになる。タフロードでは、液状化地盤の初期せん断応力が小さいことから地震時に液状化地盤の側方への広がりを小さくでき、残留沈下を抑制できることになる。さらに、路床底部のジオグリッドにより、道路直下地盤を一体化し側方への広がりを抑制できる。

2.2 模型実験に基づく道路変状防止効果

図—4 は、模型縮尺 1/20 の遠心模型振動実験で、対策なしの道路部、タフロードの道路部を含む液状化地盤を同時に加振して得られた地震時（地震終了後）および地震後（発生過剰間隙水圧の消散完了時）の路面の残留変位である。

図—5 は、遠心模型振動実験で得られた地震後の道路部を含む液状化地盤の残留変形である。

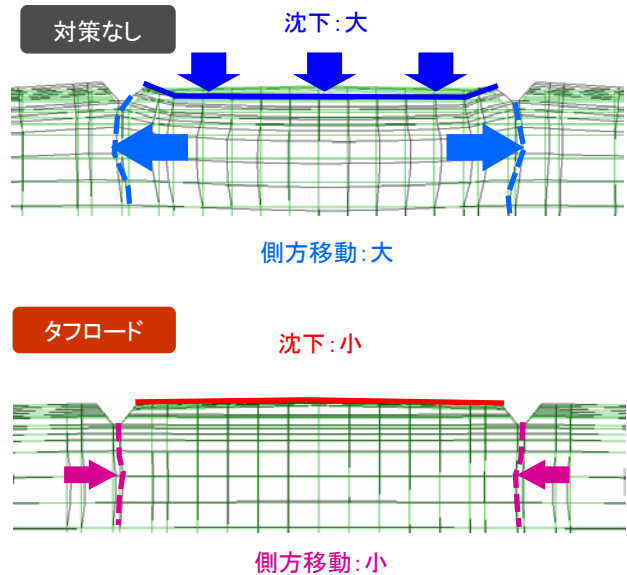
図—6 は模型実験で用いた地震波であり、海溝型地震を想定して、極めて稀に発生する地震動の国交省告示スペクトルに適合する模擬地震動とした。

地震時には、対策なしの道路部で大きな残留沈下が生じるが、タフロードでは、道路部の残留沈下は小さく、路面の排水勾配を概ね維持できるレベルである。

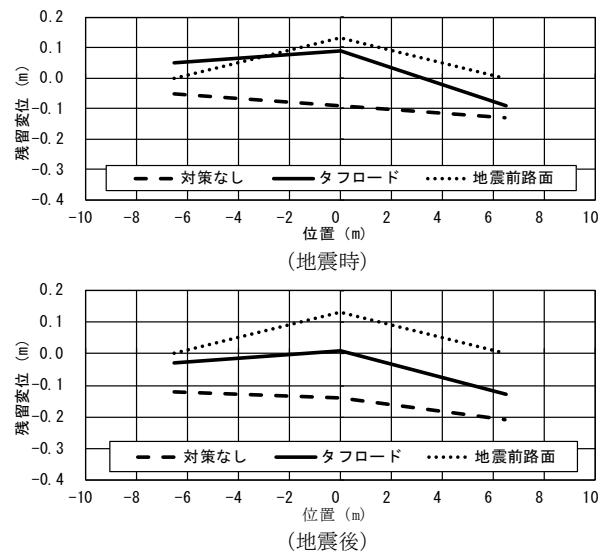
地震後では、対策なし、タフロードで同様に発生過剰間隙水圧の消散に伴う沈下が地震時の残留沈下に付加されるが、タフロードで生じる残留変位は、道路機能を確保するレベルに抑えられる。

2.3 数値解析に基づく道路変状防止効果

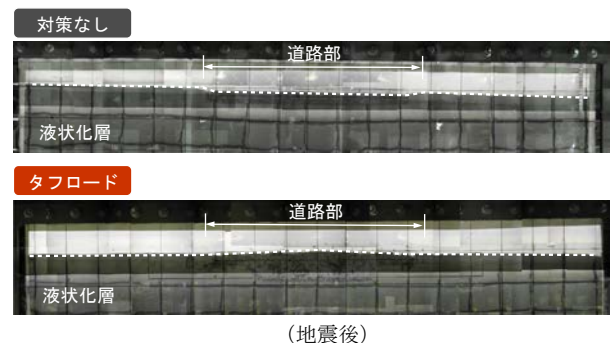
図—7 は、対策なしの道路部、タフロードの道路部を含む液状化地盤の有効応力解析で得られた地震時および地震後の路面の残留変位である。地震波は、模型実験と同じ模擬地震動を用いた。地震時には、対策なしで液状化地盤の側方へのはらみだし、隆起に伴う道路部の残留沈下が生じる。タフロードでは液状化地盤の側方へのはらみだし、隆起が小さいため道路部の変状（残留沈下、残留傾斜）が抑制され、道路機能を確保できる。地震後では、対策なしで道路部と遠方地盤で同程度の残留沈下が生じるが、道路部脇で側方へのはらみだし、隆起が進行し道路機能を確保できない。タフロードでは遠方地盤で対策なしと同程度の残留沈下が生じるものの道路部の変状が抑制され、道路機能を確保できる。



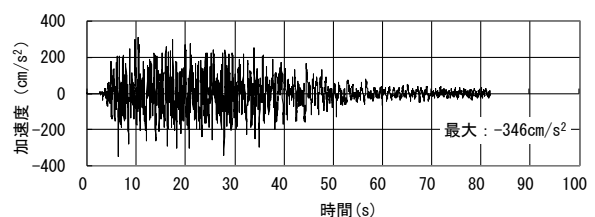
図—3 液状化地盤上の道路変状



図—4 残留変位（遠心模型振動実験）



図—5 残留変形（遠心模型振動実験）



図—6 地震波

2.4 工費および工期

表—1 は、従来の液状化対策とタフロードの工費、工期の比較の一例である。タフロードは、路床部までの浅層部を対象としており、液状化層には対策を施さない。したがって、従来の液状化対策より工費の削減や工期の短縮が可能であり、液状化対策の中で最も安価と言われているサンドコンパクションパイル工法と比較して、工費で50～70%、工期で40～60%と試算される。

3. 発電所構内道路への適用

3.1 対象

図—8 は、石狩湾新港発電所におけるサンドコンパクションパイル工法等の地盤改良計画である。朱色で示した区間では、当初設計においてサンドコンパクションパイル工法による液状化対策が計画されていた。一方で、工事開始時より当該区間は主要な工事用道路として常時利用されていたため、施工に伴う通行規制による他の発電所建設工事への影響および周辺で実施される埋設物工事との工程の兼ね合い等により、施工方法の見直しが必要となった。そこで、当該発電所の施工条件、道路使用状況、余分な置換材料の使用を抑えられる現地発生土の有効利用等を考慮した結果、液状化地盤上の地震時道路変状防止対策であるタフロードを当該工事へ適用できると判断した。

3.2 設計断面

図—9 はタフロードの設計で用いた設計断面、表—2、3 は原地盤、道路部で設定した定数である。路床（安定処理土）の下端深度は $G.L.-0.8m$ 、地下水位は B_f 層と $As1$ 層との境界 $G.L.-4.19m$ とした。

3.3 設計方法

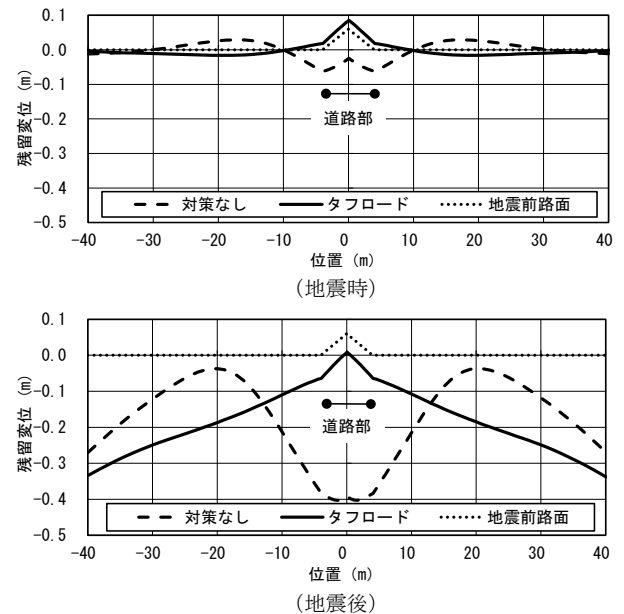
タフロードの設計方法では、2.3 節の有効応力解析に基づく詳細法の他に震度法に基づく簡易法があり、当該工事の設計では簡易法を採用した。

軽量土の仕様は、道路部の帯荷重（ただし、遠方地盤との荷重差）、一様地盤を仮定して得られる道路下の液状化地盤の応力解を用いて、道路端部の初期せん断応力比（初期せん断応力／初期平均有効応力）ができるだけ小さくなるように、単位体積重量（材料）と軽量土幅、埋戻厚を設定した。ジオグリッドの仕様は、円弧すべり法による地震時安定解析で得られる必要最大抑止力を用いて、既往指針に準拠して設定した^{6)、7)、8)}。

3.4 仕様

図—10 は、軽量土で火山灰（単位体積重量 $14.86kN/m^3$ ）を用い、改良厚 $0.8m$ 、軽量土幅を変数として得られた道路端部の初期せん断応力比の分布である。原地盤では $G.L.-4.19m$ 以深の液状化地盤の初期せん断応力比が大きいが、軽量土幅 $6.50m$ で初期せん断応力比を小さくできることから、軽量土幅を $7m$ と設定した。

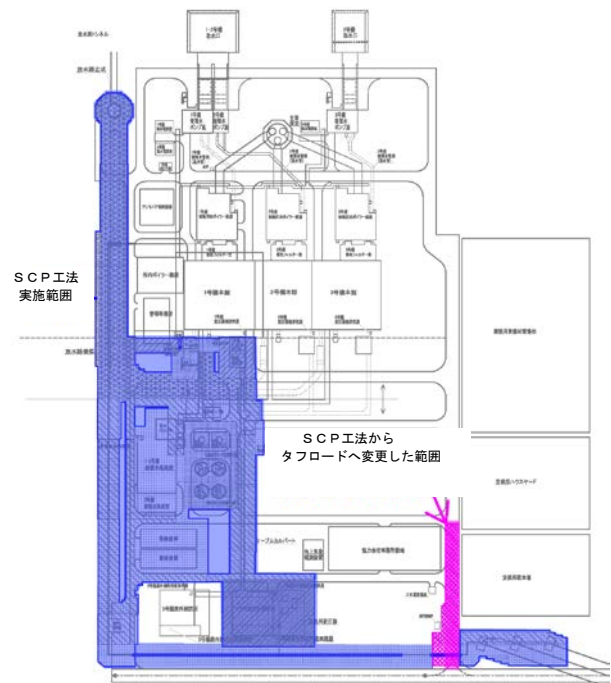
ジオグリッドの仕様は、円弧すべり法を用いた地震時安定解析（等分布荷重 $q = 10kN/m^2$ 、水平震度 $k_h = 0.2$ 、路床厚 $0.2m$ 、安定処理土の一軸圧縮強度 $q_u =$



図—7 残留変位（有効応力解析）

表—1 工費、工期

工法	サンドコンパクションパイル工法	タフロード
断面	切込砕石 路盤 サンドマット サンドコンパクションパイル	安定処理土 軽量土 ジオグリッド
主要数量	道路延長 $L = 600m$ 、道路幅 $B = 15.6m$ SCP 平均打設長 $H = 6.0m$ SCP 平均打設幅 $B = 25.9m$	ジオグリッド敷設幅 $B = 21.6m$
工費	100%	50～70%
工期	100%	40～60%



図—8 地盤改良計画

$400kN/m^2$ ）で得られる必要最大抑止力に対して、2 段のジオグリッド（設計引張強度 $T_A = 110kN/m$ 、敷設長 $17.0m$ ）で分担した。

図—11 は簡易法で設定したタフロードの仕様、写真—1 は施工状況である。当該工事では、掘削深度の低減、

軽量土で火山灰の使用、ジオグリッドの敷設数を減らしており、特に、図—1 の基本構造にある軽量土の人工軽量骨材を火山灰で代替したことによりタフロードの経済化を図った。タフロードによる液状化対策工事では、道路延長 140m (約 2380m²) について 20 日程度で施工を実施する予定である。

4. おわりに

地震国である我が国では、近年多くの震災を経験し、それらの調査、分析から技術的課題を解決してエネルギーインフラ施設の耐震性能の強化が図られつつある。一方で、生産や流通を長期間停止して対策を実施することは極めて困難である。

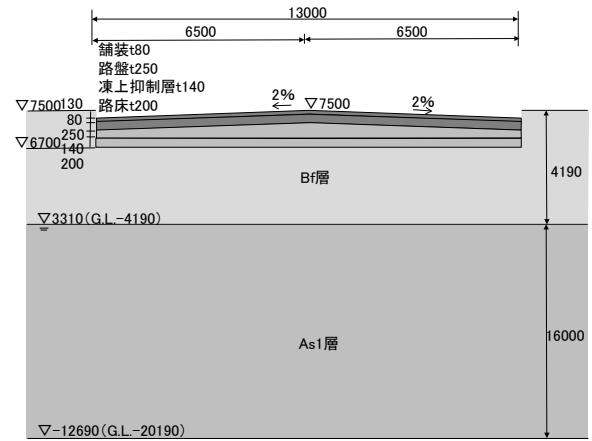
このような背景より、ジオグリッドと軽量土、安定処理土を併用した液状化地盤上の道路変状対策であるタフロードは、補強性能、経済性、工期面において、今後想定される大規模地震などに備えた道路補強、震災後の道路の強化復旧として有用な技術と考えている。

参考文献

- 1) 原子力土木委員会：新潟県中越沖地震被害の緊急報告会、土木学会 URL、2007.
- 2) 金山義延、他：ジオテキスタイルによる堤防耐震対策とその効果確認計測 技術・研究ノート、地盤と建設、Vol.15、 No.1、 pp.47-52、1997.
- 3) 佐々木康、他：鳥取県西部地震の液状化に対するジオテキスタイル工法の有効性、ジオシンセティックス論文集、第 16 巻、 pp.119-125、2001.
- 4) 佐々木康、他：鳥取県西部地震時のジオグリッド敷設堤防の挙動に関する検討、ジオシンセティックス論文集、第 17 巻、 pp.207-214、2002.
- 5) 伊藤浩二、疋田喜彦、古屋弘：液状化地盤上の地震時道路変状防止対策「タフロード®」、大林組技術研究所報、No.75、2011.
- 6) (財)土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル改訂版、平成 12 年.
- 7) (社)日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針、平成 24 年.
- 8) (社)日本道路協会：道路土工 盛土工指針、平成 22 年.



写真—1 施工詳細 (ジオグリッド、軽量土、安定処理土)



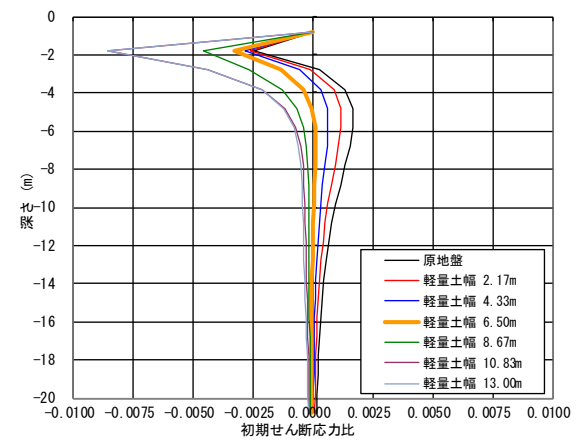
図—9 設計断面

表—2 原地盤の土質定数

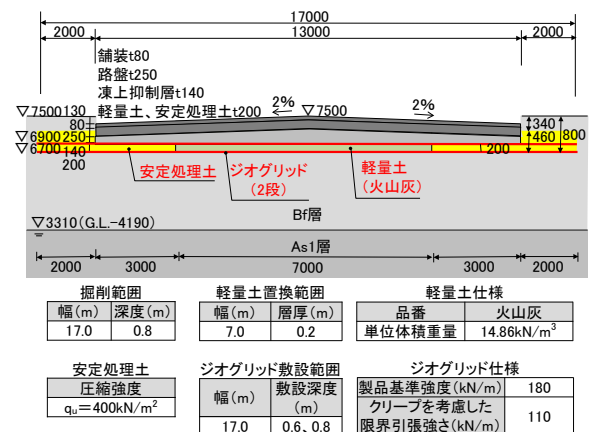
	層	N 値	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_t (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	C (kN/m^2)
原地盤	Bf	8	18.9	17.9	38	0
	As1	17	19.1	18.1	37	0

表—3 舗装、路盤、安定処理土の土質定数

	記号	記号	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_t (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	C (kN/m^2)
表層 ($t=8\text{cm}$)	密粒度アスコン 粗粒度アスコン	AS20	22.5	22.5	0	0
路盤 ($t=25\text{cm}$)	切込碎石 クラッシャーラン	C40	20.0	20.0	35	0
凍上抑制層 ($t=14\text{cm}$)	スラグ	—	20.0	20.0	35	0
路床 ($t=20\text{cm}$)	安定処理土 (現地発生土)	—	18.9	17.9	0	200



図—10 初期せん断応力比



図—11 仕様