

# 液状化地盤上道路の変状防止対策

## タフロード<sup>®</sup>

光 本 純・伊 藤 浩 二・古 屋 弘

近年の大規模地震の頻発を受け、BCP（事業継続計画）への関心が高まってきている。

人間の移動や物流の要である道路は、常時でも機能保全是重要であるが、液状化が予想される地盤上の道路では、地震時の機能確保や緊急車両の通行確保の観点から、一般にサンドコンパクションパイル（SCP）工法等の液状化対策により道路変状（残留沈下，残留傾斜等）を防止する。しかし、これらの方法は、液状化層すべてを改良するなどのため大規模で工期がかかる，周辺環境に与える影響が大きい，対策費が高くなるといった課題がある。

そこで、筆者らは、性能設計の考え方にもとづいた道路本体の変状防止構造により、地震時に原地盤の液状化の発生は許容するが道路の性能を確保する経済的な道路補強技術（タフロード，以下「本工法」という）を考案した。本工法は、液状化地盤で生じる初期せん断応力を低減することを目的としてジオグリッドと軽量土を併用する道路変状対策である。

本稿では、本工法の概要，特長，原理について整理するとともに、道路機能の補強効果検証結果などについて報告する。

キーワード：液状化，道路補強，性能設計，軽量土，ジオグリッド

### 1. はじめに

近年の大規模地震の頻発を受け、BCP（事業継続計画）への関心が高まってきている。

地震被害の例として、事業所内の構内道路においては、液状化によって段差が発生し、大型消防車等の緊急車両が通行不能になるといった事例が発生した。このため、地震直後の交通を確保する緊急時の道路機能維持が課題と考えられる。

また、海岸沿いや埋立地盤上に立地する事業所では、地震のたびに道路面に不同沈下が発生し、それにより降雨時に水溜りが生じ、走行性が低下する現象も見受けられる。このため、路面排水機能の確保も課題と考えられる。

従来、液状化が予想される地盤上の道路では、一般的な対策として地盤の一部もしくは全部を置換する方

法、砂杭を造成することで地盤の密度を増大させる方法などにより、地震時の道路変状（残留沈下，残留傾斜）を防止する対策がとられてきた。しかし、これらの方法には地盤の掘削，削孔に多大な手間や時間がかかる，周辺環境に与える影響が大きい，対策費が高くなるといった課題がある。

そこで、性能設計の考え方にもとづいた道路本体の変状防止構造により、地震時に原地盤の液状化の発生は許容するが道路の性能を確保する経済的な道路補強技術<sup>1)~5)</sup>を考案した。本稿では、本技術の概要と検証結果等を示す。

### 2. 工法の概要

工法の概要を図-1に示す。

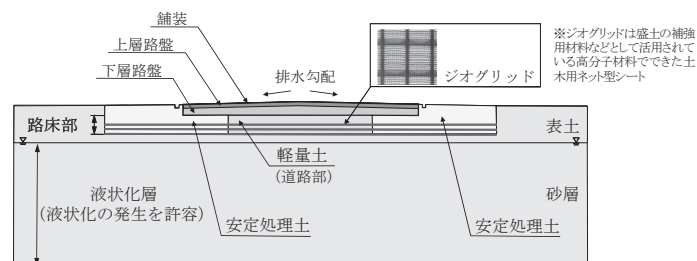


図-1 本工法概要図

本工法では、道路下の路床部に対して、路床底部にジオグリッドを敷設するとともに、路床部の埋戻しを軽量土と安定処理土の複合とすることで、構造的な道路変状対策を実現する。性能設計の考え方を導入することで、路床部で深い液状化層は無処理とし、液状化の発生を許容することに特色がある。

### 3. 工法の特長

本工法には以下のような特長がある。

- ・地震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）を確保できる。このため、地震発生直後でも、大型消防車などの緊急車両が走行でき、迅速な災害対応が可能となる。
- ・液状化の発生を許容し、液状化層への対策を行わないため、例えば従来の液状化対策（サンドコンパクションパイル工法）と比較して約50%まで経済化を図れる。
- ・道路路床部までの浅層部での施工となることから、工期を短縮でき、早期に導入できる。
- ・通常の道路工事事用施工機械で施工でき、大きな騒音や振動が発生しないので、周辺環境に配慮した施工が可能である。
- ・石炭火力発電所で発生するクリンカアッシュや製鉄所（高炉）で発生する水砕スラグなどの軽量の副産物を軽量土として有効利用できる。

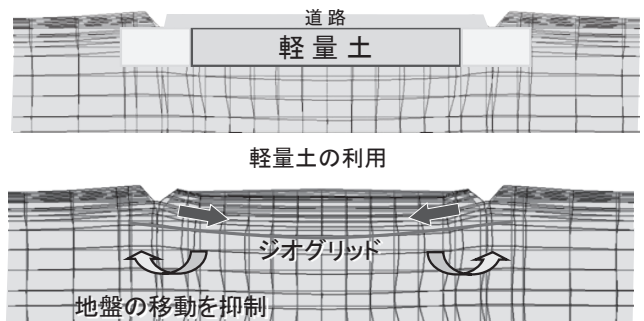
### 4. 変状抑制原理

本工法の変状抑制原理を表一1に示す。通常の道

路（対策なし）の場合、道路部（舗装部分）の荷重は、舗装や路盤の重量により道路外（周辺地盤）と比較して大きく、道路部と周辺地盤との荷重差が大きい状態である。このため、液状化地盤で生じる初期せん断応力が大きくなり、地震時には液状化地盤が側方へ広がり、大きな残留変位を生じやすいと考えられる。

これに対し、本工法は路床部に軽量土を用いるため、道路部と周辺地盤との荷重差が小さくなる。このため、液状化地盤で生じる初期せん断応力が小さくなり、液状化地盤の地震による残留変位を抑制できる。

なお、路床底部に敷設するジオグリッドは、図一2に示すように、路床部における変状抑制のための引張補強材の効果を発揮する。



図一2 本工法使用材料

### 5. 道路機能の補強効果検証

本工法の設計では、道路部の残留変位を変状抑制効果の指標としている。このため、地震時の残留変位に着目した対策効果を有効応力解析および遠心力模型実験により確認した。

地震時の過剰間隙水圧の発生を考慮した有効応力解

表一1 本工法の変状抑制原理

工法	対策なし	本工法
原理	<p>道路外の荷重に比べて道路部(舗装部分)の荷重が大きい状態である。 地盤(砂層)が液状化すると、道路外と道路部との荷重差の影響で道路部直下の地盤が道路外の方向に移動し、道路部に大きな沈下変状が発生する。</p> <p style="text-align: center;">道路部と道路外との荷重差大 ↓ 初期せん断応力大 ↓ 地震による残留変形大</p>	<p>道路部に軽量土を用いるため、道路外の荷重と道路部(舗装部分)の荷重がほぼ等しい状態である。 地盤(砂層)が液状化しても、道路外と道路部との荷重差が小さいことから、地盤の移動がほとんど発生せず、道路部の沈下変状も抑制される。</p> <p style="text-align: center;">道路部と道路外との荷重差小 ↓ 初期せん断応力低減 ↓ 地震による残留変形小</p>
液状化後の状況 (有効応力解析結果)	<p>沈下:大</p> <p style="text-align: center;">移動:大</p>	<p>沈下:小</p> <p style="text-align: center;">移動:小</p>

析では、道路横断方向を対象に対策なしと本工法の2ケースを行い本工法の効果を検証した。

道路横断方向の遠心力模型実験では、アルミ製剛土槽(2000 mm × 700 mm × 650 mm, 側面:アクリル)に仕切り板を設け、対策なしと本工法の模型を同時に加振した。

道路縦断方向の遠心力模型実験では、同じアルミ製剛土槽に対策なしの模型(半断面)のみ、本工法の模型(半断面)のみをそれぞれ製作し加振した。

遠心力模型実験では、遠心加速度20G、模型縮尺1/20とし本工法の効果を検証した。

以下に、主な設定条件と得られた結果の概要を示す。

(1) 主な設定条件

① ジオグリッドおよび軽量土幅の設定

ジオグリッドの諸元は、地震時安定解析(等分布荷重  $q = 10 \text{ kN/m}^2$ , 水平震度  $kh = 0.35$ )より得られる不足する抑止力を3段のジオグリッド(設計引張強さ  $TA = 44 \text{ kN/m}$ , 敷設長  $21.6 \text{ m}$ )で分担した。埋戻土の諸元は軽量土をクリンカアッシュ、安定処理土をクリンカアッシュより重量のある現地発生土とした。道路幅  $13.0 \text{ m}$  に対し、本工法では、軽量土幅を道路部と遠方地盤の有効土被り圧が概ね等価となる  $7.8 \text{ m}$  とした。

② 地震動

地震動は、有効応力解析、遠心力模型実験ともに海溝型地震を想定し、建設省告示スペクトルの極めて稀に発生する地震動に適合する模擬地震動のうち、図-3に示す乱数位相、継続時間が長い地震動を用いた。

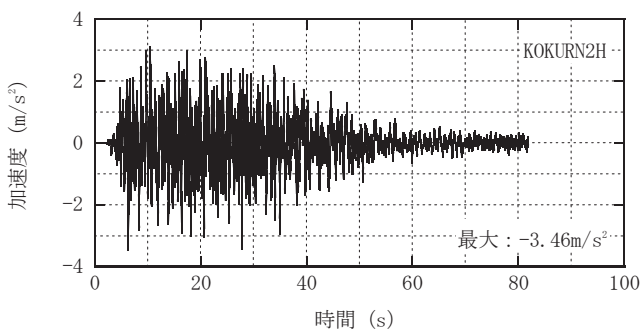


図-3 地震動(入力波)

③ 加振方向

加振方向は、道路横断方向および道路縦断方向の2ケースとした。

(2) 結果の概要

以下に、各ケースで得られた結果の概要を示す。

① 加振方向：道路横断方向

遠心力模型実験の断面と計器を図-4に示す。また、得られた道路部の横断方向の形状を写真-1に示す。

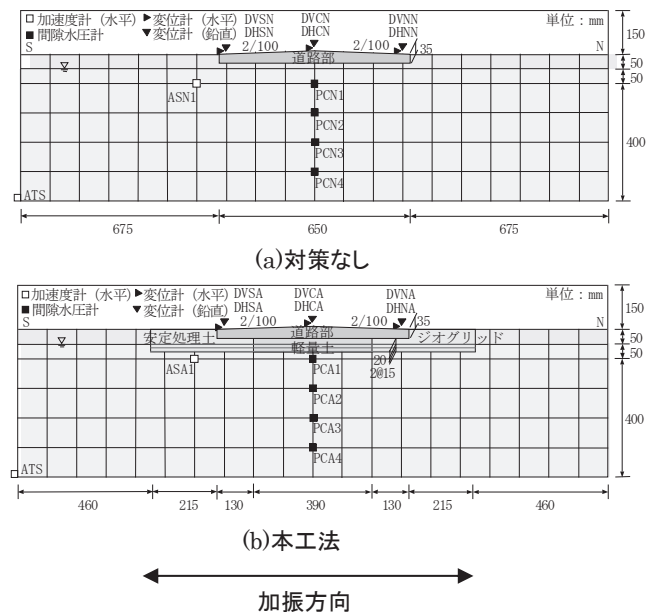


図-4 遠心力模型実験での断面と計器配置(加振方向：道路横断方向)

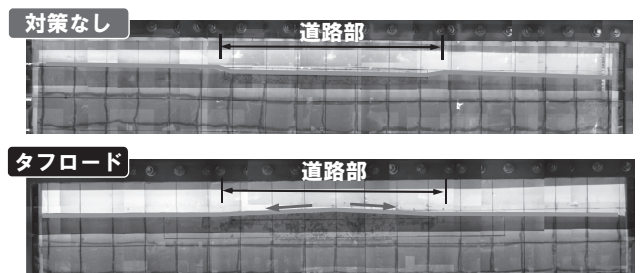


写真-1 加振後の状況(遠心力模型実験結果)

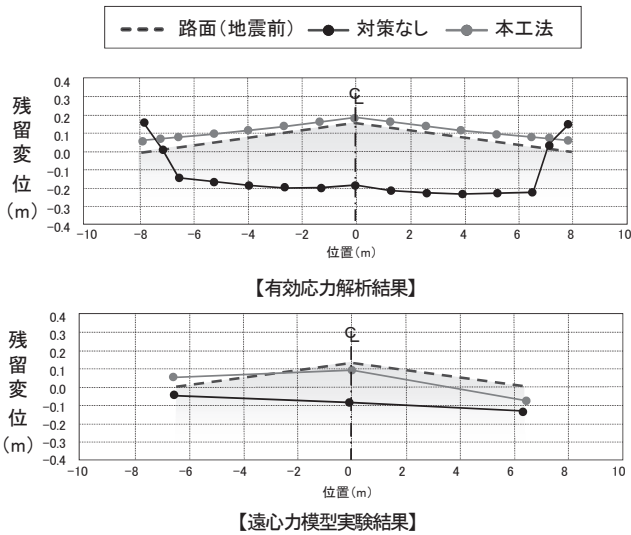
「対策なし」の道路部では、表-1に示した理由により、残留沈下が発生するとともに、横断勾配を確保できていない。これに対し、本工法では、道路部の残留沈下は小さく、路面の排水勾配を概ね維持できている。

有効応力解析および遠心力模型実験の結果より、道路部の横断方向の残留変位分布図を図-5に示す。解析および実験ともに、「対策なし」の道路部で大きな残留変位が発生し、路面の横断方向の排水勾配を確保できていない。これに対し、本工法では、残留沈下は小さく、路面の排水勾配を概ね維持できていることが確認できる。

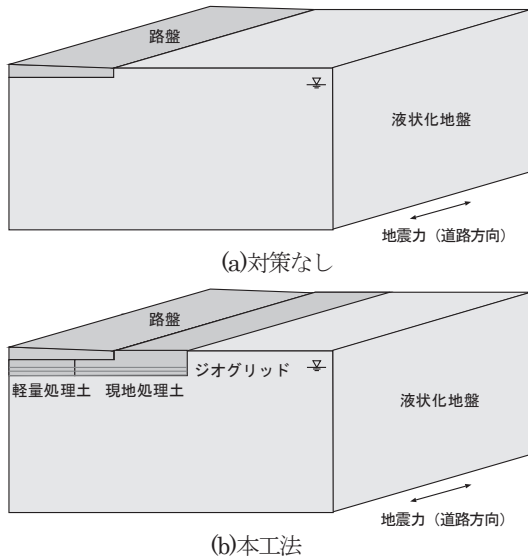
② 加振方向：道路縦断方向

縦断方向の遠心力模型実験の概要を図-6に示す。実験結果より、道路部の横断方向の残留変位を整理して図-7に示す。

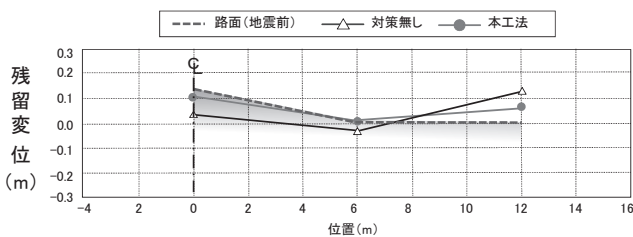
本工法では地盤の初期せん断応力をできるだけ小さくするように軽量土を配置するものの、道路横断方向



図一5 残留変位の検証結果 (地震時)



図一6 遠心力模型実験でのモデル概要図 (加振方向：道路縦断方向)



図一7 残留変位の検証結果 (地震時)

の残存する初期せん断応力に依存して 液状化地盤が道路面外へ少なからず移動し沈下するものと想定される。

実験結果によると、「対策なし」では、液状化地盤の道路面外への移動が大きいため、道路部の沈下が大きくなるとともに、道路外側の地盤は隆起している。

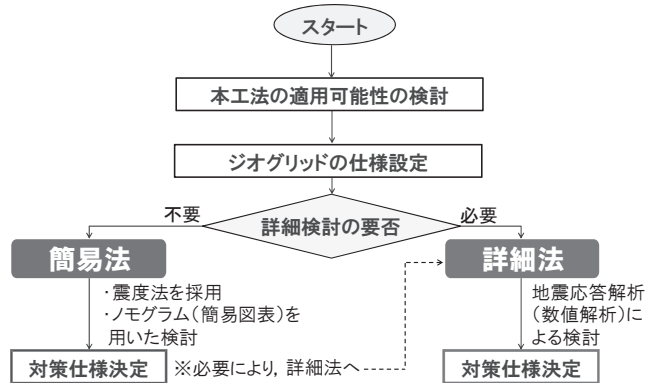
一方、本工法では液状化地盤の道路面外への移動が小さく、道路部の沈下が小さくなっており、また、道路外側の地盤の隆起も小さくなっている。

このように、道路縦断方向でも、本工法により道路部の沈下を低減できることが確認できた。

以上より、本工法では、地震の加振方向にかかわらず、道路部の沈下を低減できるものと考えられる。

## 6. 設計方法の概要

図一8に概略の設計フローを示す。



図一8 概略設計フロー

ジオグリッドの仕様は、円弧すべりを用いた地震時安定解析より得られる必要最大抑止力に対して設定するものとした。

埋戻材の仕様は、舗装、路盤等の自重により生じる液状化地盤の初期せん断応力、道路下の平均有効土被り圧をもとに設定するものとした。

道路変状防止効果の指標である道路部の残留変位では、震度法を援用した簡易法（ノモグラム：簡易図表を使用）、あるいは有効応力解析にもとづく詳細法により推定するものとした。

ここに、詳細検討の要否は、対象の地盤条件が複雑な場合、高精度の道路変状防止効果の必要性を基に判断するものとしている。設計方法の詳細は参考文献<sup>6)</sup>を参照されたい。

## 7. 工事費、工期の削減効果

工事費および工期の試算例を表一2に示す。本工法は、路床部までの浅層部を対象とした対策であり、液状化層には対策を施さないことから、液状化対策技術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も、工事費は50～70%、工期は40～60%と試算され、大幅に工事費を削減できるとともに工期を短縮できる。

表一 2 工事費・工期の比較例

工法	対策なし	本工法
断面図	<p>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</p>	<p>安定処理土 軽量土 ジオグリッド</p>
主要数量	・道路延長：L=600m、 ・SCP平均打設長：Have=6.0m ・SCP平均打設幅：B'=25.9m	道路幅：B=15.6m ・ジオグリッド敷設幅：B'=21.6m
コスト	100%	<b>50~70%</b>
工期	100%	<b>40~60%</b>

- 2) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘: 液状化地盤上道路のジオグリッドによる変状防止効果に関する遠心力模型振動実験, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1003-1004, 2010
- 3) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘: 軽量土とジオグリッドを併用した道路変状防止対策の評価方法, 第65回年次学術講演会講演概要集, pp.383-384, 2010
- 4) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘: 軽量土とジオグリッドを併用した道路変状防止の地震後残留変位に基づく対策効果, 第66回年次学術講演会講演概要集, pp.371-372, 2011
- 5) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘: 軽量土とジオグリッドを併用した道路変状防止対策の地震時残留変位予測, 第46回地盤工学研究発表会, pp.1125-1126, 2011
- 6) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘: 液状化地盤上の地震時変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」, 大林組技術研究所報, No.75, 2011

## 8. おわりに

地震国であるわが国では、近年多くの震災被害が発生し、それらを技術的に検討して耐震性能の強化が実施されつつある。しかし、施設のインフラは、生産や流通を長期間止めて対策を実施することは困難である。

このような背景から、道路補強性能や経済性に加え、工期面でも優れているタフロードは、震災復旧における「強化復旧」や、今後想定される東海地震などに備えた「対策工」として有効な技術と考えている。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘, 熊谷祐一: 液状化地盤上道路のジオグリッドによる変状防止効果, 第63回年次学術講演会講演概要集, pp.75-76, 2008

### 【筆者紹介】



光本 純 (みつもと じゅん)  
 (株)大林組  
 生産技術本部 技術第二部  
 課長



伊藤 浩二 (いとう こうじ)  
 (株)大林組  
 技術研究所 構造技術研究部  
 担当課長



古屋 弘 (ふるや ひろし)  
 (株)大林組  
 技術研究所 生産技術研究部  
 主任技師