技術報文

ジオテキスタイルで補強したセメント安定処理土による道路段差対策工法

鹿島建設株式会社　　三上　大道、吉田　輝

1．はじめに

道路直下に横断構造物が埋設されている場合、地震による基礎地盤の沈下に起因して横断構造物の境界部に段差が発生し、車両走行が不可能となる恐れがある[1]。プラント施設等では、地震後の災害復旧を円滑に進めるため、緊急車両の走行性を確保する必要があり、対策が急がれている。その対策工法の一つとして、セメント安定処理土の上下に高強度ジオテキスタイルを敷設するジオテキスタイル補強固化土工法（**図-1**）が考案されている。この工法はジオテキスタイルの敷設以外に一般の舗装工事と異なる特殊作業は無く、大規模な掘削や基礎工事を必要としないことから、既設道路の補強にも適している。本報では、当工法の設計法の確立を目的として、基礎地盤の沈下と沈下後の車両走行を想定した模型実験を行い、それらの結果に基づき、段差発生時の挙動予測法、及び輪荷重載荷時の破壊荷重予測法を検討した結果について報告する。

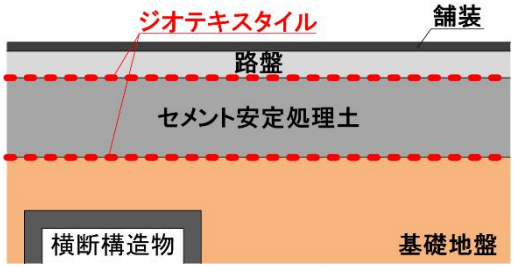

図-1　ジオテキスタイル補強固化土工法

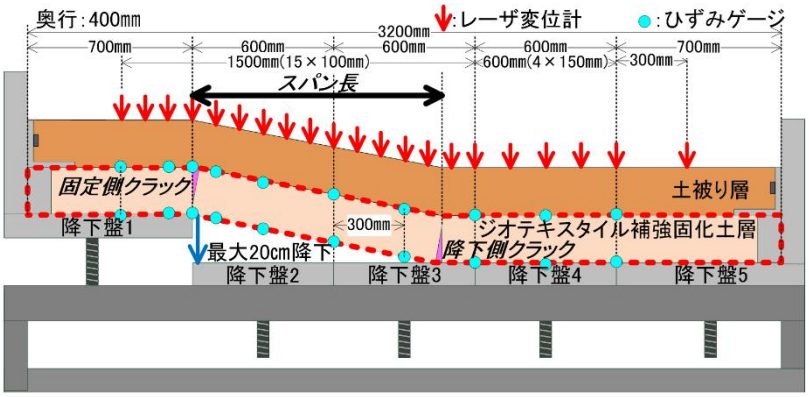

図-2　実験装置および計測機器設置状況

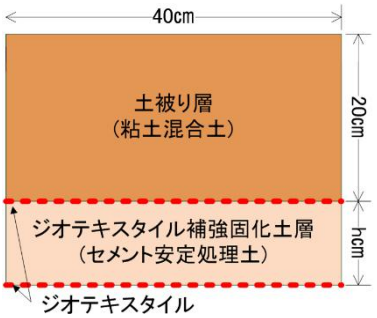

図-3　模型地盤横断面

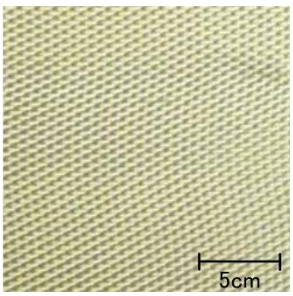

図-4　ジオテキスタイル
（引張強さ：300kN/m）

2．実験条件・実験方法

当実験では、5 枚に分割された任意の降下盤を鉛直に最大 20 ㎝降下させることができる段差発生装置(**図-2**)を使用し、降下盤 1 以外の 4 枚を同時に降下させ、1、2 間に段差を発生させた。

模型地盤の横断面を**図-3** に示す。降下前の盤上にジオテキスタイルを上下に敷設したセメント安定処理土層（ジオテキスタイル補強固化土層）を作製し、その上に舗装(路盤、アスファルト混合物)荷重を想定した層厚 20 ㎝の土被り層を設けた。実験ケースを**表-1** に示す。セメント安定処理

土には、所定の添加率で高炉セメントB種を混合した含水比7%のクラッシャーラン(C-20)を用いた。**表-1**に示す引張強さは、実験模型地盤と同一配合・同一密度の円柱供試体を作製し、同一材齢で圧裂による岩石の引張強さ試験(JGS2551-2009)から求めた値である。ジオテキスタイルにはポリエステル製の織布(**図-4**)を用いた。土被り層にはクラッシャーラン(C-20)と笠岡粘土の混合土を使用した。ジオテキスタイル補強固化土層土被り層ともに、段差発生装置の前面・背面に型枠を設置し、タンピングランマーを用いて締固めた。

表-1 実験ケース

case	補強層厚 cm	段差量 cm	ジオテキスタイル引張強さ kN/m	セメント安定処理土				輪荷重
				母材	セメント添加率 %	材齢 日	引張強さ kN/m2	
1	5	20	300	C-20	3	14	435	無
2					3	7	316	
3					9		886	
4					3		246	
5	10	10			3		356	
6					3		184	
7					9		523	
8			1000		3	7	204	有
9			300		3	7	214	
10					9	14	909	
11	15	15			3	35	448	
12					3	9	256	

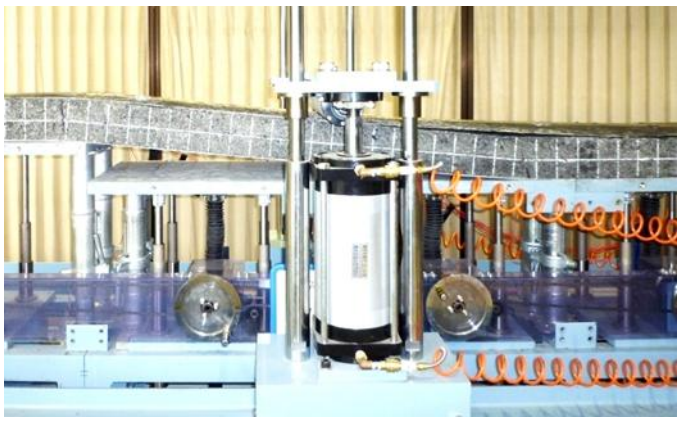

図-5 模擬輪荷重載荷装置

模型地盤作製完了後、型枠を撤去して、**表-1**に示す所定の材齢に達した時点で段差発生実験を行った。段差量毎のクラックの進展等を観察するため、降下盤は1 cmずつ段階的に降下させた。

車両走行を想定した模擬輪荷重の載荷には**図-5**に示す装置を使用した。これは、模型車輪(金属製ローラー)をベロフラムシリンダーで引くことにより、模型地盤に最大10kNまで載荷できる構造となっている。また、ベロフラムシリンダーを模型地盤と平行に設置したレールに沿って移動させることで、車両走行を模擬することができる。模擬輪荷重の載荷は**表-1**に示す段差を発生させた後に実施した。

クラック(**図-1**の降下側クラック)の発生位置はジオテキスタイル補強固化土層、舗装等の自重に左右されるので、段差発生時には土被り層を設けていたが、土被り層は模擬輪荷重を支持し得る強度を有していないため、段差発生後に撤去した。模擬輪荷重は1.5kN程度から0.2kNずつ段階的に増加させ、それぞれの荷重レベルにおいて模型車輪を降下盤1側から1往復させた。ジオテキスタイル補強固化土層が曲げ破壊した段階で実験を終了し、その時の荷重を破壊荷重と定義した。

実験中の路面(段差発生時は土被り層、輪荷重載荷時はジオテキスタイル補強固化土層)のたわみ分布は**図-2**に示すように直上に設置した21台のレーザ変位計により計測した。ジオテキスタイルに作用する引張力は、**図-2**に示す位置で20枚のひずみゲージにより評価した。

3. 実験結果

(1) 段差発生実験 [2)、4)]

a) 変形状況

基礎地盤段差発生時における模型地盤の変形状況の一例を**図-6**に示す。1 cm未満の微小段差が発生した段階で、セメント安定処理土内の二箇所にクラックが発生していることが目視により明

らかとなった。いずれのクラックも沈下が微小な段階で発生しており、一つは降下盤 1、2 境界に発生する（固定側クラック）。もう一方は、後述するように、発生位置がセメント安定処理土の引張強さ、層厚に依存する（降下側クラック）。その後は二つのクラック間の土塊が、段差量の増加に伴い回転するのみであるため、路面勾配は大きくなるものの、斜部の長さは大きく変化しないことを確認した。ただし、さらに段差量を大幅に増加させると、降下側のより後方に第 3、第 4 のクラックが発生することもあり、その場合は斜部の長さの変化も生じうる。

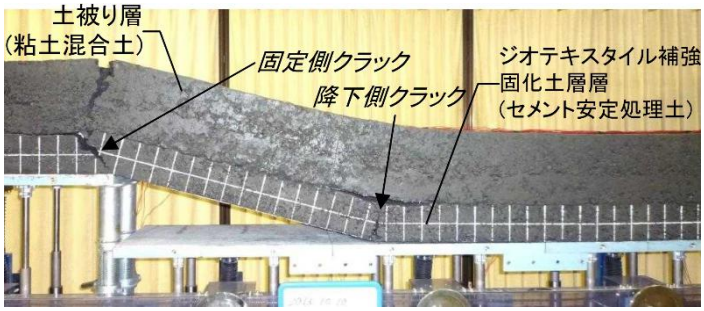

図-6　段差発生時の模型地盤（case6）

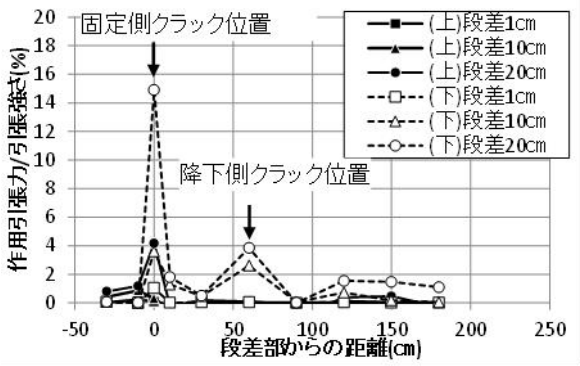

図-7　引張力計測結果の一例（case5）

b) ひずみゲージに発生する引張力

図-7 にジオテキスタイルのひずみから推定した引張力の一例を示す。20 ㎝の段差が発生した場合にも、ジオテキスタイルに大きな引張力は生じておらず、引張強さの 15%程度しか作用していないことが明らかとなった。この傾向はすべての case で同様であった。なお、クラックが発生する 1 ㎝程度の段差では、ジオテキスタイルに作用する引張力は引張強さの僅か 1%程度であった。

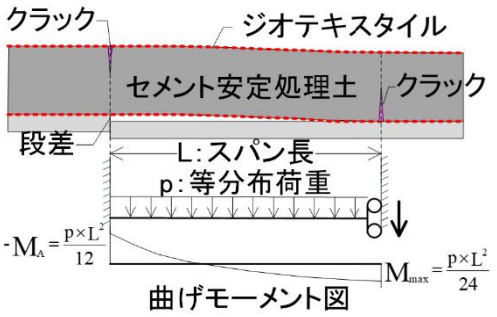

図-8　一端固定・他端回転固定梁モデル

c) 梁モデルとしてのスパン長評価

微小段差段階でジオテキスタイルに引張力が作用していないことから、セメント安定処理土に発生するクラック位置は、ジオテキスタイルの補強効果が発揮される前に、セメント安定処理土の引張強さによって決定されるものと考えられる。また、クラックが発生する前のセメント安定処理土は弾性挙動を呈すると考え、**図-8** に示すとおり、ジオテキスタイル補強固化土層を一端固定・他端回転固定の梁でモデル化すると、降下側クラック位置の引張縁応力は下式で表される。

$$\text{引張縁応力} = \frac{p \times L^2}{b \times h^2} \quad \cdots(1)$$

ここに、p：等分布荷重、L：スパン長、b：安定処理土の幅、h：安定処理土の厚さである。

(1)式において、p、b、h は試験条件により決まる定数であるため、引張縁応力にセメント安定処理土の引張強さを代入することで、スパン長 L の算出が可能となる。なお、一端固定・他端回転固定の梁ではスパン両端に作用する曲げモーメントの値は異なるが、上述したように、二つのクラックは 1 ㎝未満の微小変形によりほぼ同時に発生しているものと推測される。

割裂引張試験結果、(1)式によるスパン長の予測値、及び実測値の一覧を**表-2** に示す。また、スパン長の予測値と、実測値の比較を**図-9** に示す。全体として実測値の方が大きい傾向は示しているが、概ね同程度の数値となっており、(1)式を用いてスパン長 L を予測できることがわかった。

(2) 模擬輪荷重載荷実験 [3)4)]

a) 輪荷重による破壊荷重

図-10 にセメント安定処理土の引張強さと載荷実験により得られた破壊荷重の関係を示す。セメント安定処理土の引張強さが大きいほど、また補強層厚が厚いほどジオテキスタイル補強固化土層は大きな輪荷重に耐え得るが、後者の効果が支配的といえる。

一方、ジオテキスタイルの引張強さを変化させても、破壊荷重が大きくなる傾向は見られなかった。これは、今回の実験では土被り圧が作用しておらず、ジオテキスタイルの補強効果が発揮されにくい条件であったことによると考えられる。実地盤においては土被り圧による拘束効果によってジオテキスタイルの補強効果も顕著となるため、破壊荷重は増大すると推測される。

b) 破壊荷重予測式の検討

3.(1)にて述べたとおり、初期の微小段差発生によりセメント安定処理土内には 2 箇所のクラックが発生し、両クラック間のセメント安定処理土は一つの土塊として挙動することが明らかとなっている。また、上述したように破壊荷重がジオテキスタイルの引張強さに依存しない今回の実験では、輪荷重載荷時のジオテキスタイル補強固化土層の挙動を、セメント安定処理土塊の梁としてモデル化できると考えられる。

そこで、(1)式で求められるスパン長 L の土塊に対して、図-11 に示すような一端固定・他端単純支持梁と仮定して、破壊荷重の予測を試みた。この仮定に基づく破壊荷重は (2)式で表される。なお、等分布荷重(死荷重)と集中荷重(輪荷重)の最大曲げモーメントの発生位置は固定側クラックからそれぞれ 0.625L と 0.634L であり、その差は大きくないことから、簡単のため等分布荷重の最大曲げモーメント発生位置において破壊が生じるものと仮定した。

$$\text{破壊荷重 } P = \frac{8192}{1425 \times L} \times \left(\frac{b \times h^2}{6} \times ft - \frac{9 \times p \times L^2}{128} \right) \quad \cdots(2)$$

ここに、L：スパン長、b：安定処理土の幅、h：安定処理土の高さ、ft：セメント安定処理土の引張強さ、p：等分布荷重(死荷重)である。

表-2 引張強さおよびスパン長の予測値・実測値一覧

case	引張強さ (kN/m²)	スパン長(cm) 予測値	実測値
1	435	44	51
2	316	38	46
3	886	61	71
4	246	36	60
5	356	73	73
6	184	52	51
7	523	89	72
8	204	55	66
9	214	56	65
10	909	118	109
11	448	114	80
12	256	90	82

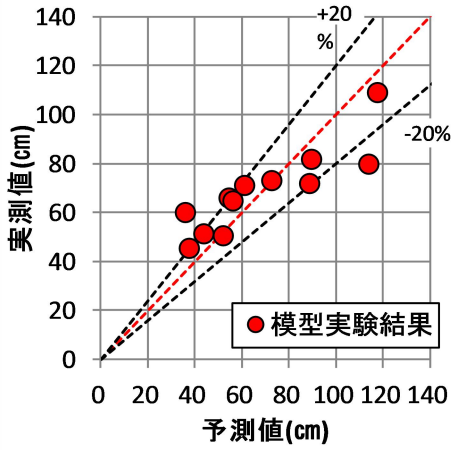

図-9 スパン長の予測値と実測値の比較

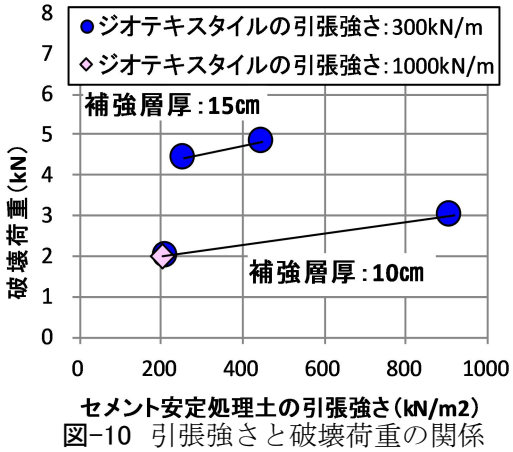

図-10 引張強さと破壊荷重の関係

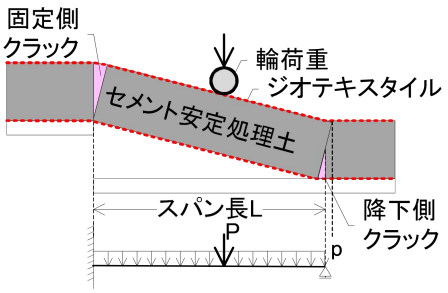

図-11 一端固定・多端単純支持梁モデル

(2)式に基づく破壊荷重の予測値と、模型実験により得られた実測値の比較を**図-12** に示す(●印)。バラツキはあるものの、予測値と実測値で近い数値を示しており、(2)式により破壊荷重の予測が可能であることが確認された。

なお、端部の支持条件について、単純梁、両端固定梁と仮定した場合の比較も行い、**図-12** に併記した。単純梁では実測値が予測値の 2 倍程度になるが、両端固定梁では両者が近い数値を示した。しかし、両端固定梁では実測値が予測値を下回る結果も得られているので、安全側を考慮して一端固定・他端単純支持梁とする方が実用上適していると考えられる。また、このような支持条件となったのは、上に凸な変形状態となる固定側クラック部では上側ジオテキスタイルに引張力が作用し、回転を拘束するものの、下に凸な変形状態の降下側クラック部では上側ジオテキスタイルに張力が作用しにくく、回転を固定できないことによると考えられる。

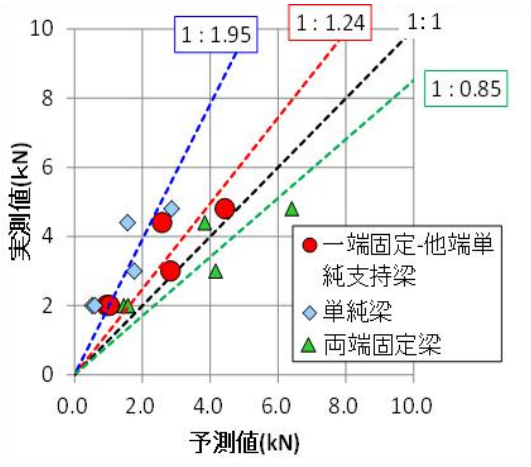

図-12 破壊荷重の予測値と実測値の比較

4. ジオテキスタイル補強固化土工法の設計フロー

以上の実験・検討結果から、**図-13** に示すフローに従いジオテキスタイル補強固化土工法を設計することが可能である。ここで、**図-13** で使用した用語の定義を**図-14** に示す。

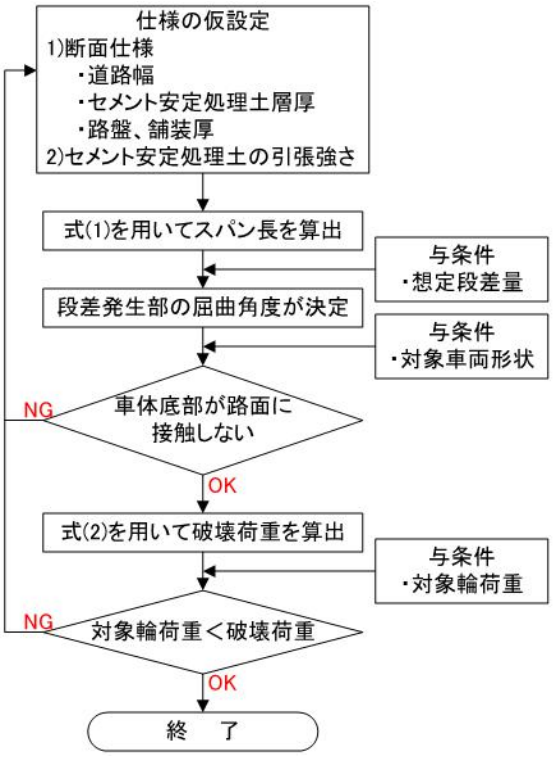

図-13 ジオテキスタイル補強固化土工法の設計フロー

まず、断面仕様、セメント安定処理土の引張強さを設定することで、(1)式を用いてスパン長が算出可能である。そこに想定段差量が与えられると、段差発生部の屈曲角度が決定される。この屈曲角度を有する路面形状と、与えられた対象車両形状を CAD に入力し、CAD 上で車両走行を再現することで、車体底部と路面の接触の有無を判断できる。このとき、当工法は応急対策であるため、安全率は考慮していない。

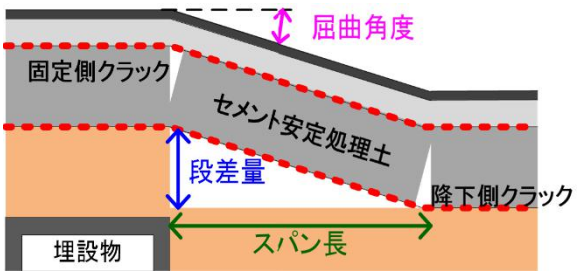

図-14 設計フローに用いた用語の定義

次に(2)式を用いて破壊荷重を算出し、対象車両の輪荷重がそれを下回れば、ジオテキスタイル補強固化土層が破壊することなく対象車両は走行可能であると判断できる。

車両底部が接触する、もしくはジオテキスタイル補強固化土層が破壊すると判断された場合は、セメント安定処理土層厚を厚くする、セメント安定処理土の引張強さを高めるなどの対応により、

与条件に応じた対策仕様の選定が可能となる。

５．おわりに

基礎地盤の段差を模擬した模型実験を実施し、段差発生時におけるジオテキスタイル補強固化土層の挙動を検討した。その結果、セメント安定処理土には微小段差が生じることで 2 箇所にほぼ同時にクラックが発生し、その後は両クラック間の土塊が回転するように挙動することが明らかとなった。クラック発生位置については、一端固定・他端回転固定梁でモデル化し、セメント安定処理土の引張強さを用いることで予測可能であることを示した。

また、基礎地盤の段差発生後の車両走行を模擬した模型実験を実施し、輪荷重による破壊荷重を検討した。その結果、ジオテキスタイル補強固化土層は、セメント安定処理土の引張強さが大きいほど、また層厚が厚いほど大きな輪荷重に耐え得るが、後者の方が支配的であることが明らかとなった。輪荷重による破壊荷重はセメント安定処理土の一端固定・他端単純支持梁でモデル化することで概ね予測可能であることを示した。

土被りを設けていない今回の実験では、破壊荷重はジオテキスタイルの引張強さに依存しなかったものの、実地盤においては土被りによってジオテキスタイルの補強効果が顕著となるため、破壊荷重も増大する可能性がある。また、段差部においてセメント安定処理土塊を落下させない固定部材としての役割もジオテキスタイルは果たしており、当工法においては重要な構成要素の一つといえる。

以上の実験結果を取り纏めた設計フローにより、車体底部が路面に接触せず、かつ対象輪荷重によりジオテキスタイル補強固化土層が破壊しない仕様の選定が可能となった。

参考文献

1) 常田ら：縦断線形円滑化の視点による道路盛土・横断構造物の段差対策の実験的検証，土木学会地震工学論文集，2007
2) 三上ら：ジオテキスタイル補強地盤の段差発生時における挙動評価，第 49 回地盤工学研究発表会，2014
3) 三上ら：ジオテキスタイル補強固化土層による道路段差対策工法の耐荷重，第 50 回地盤工学研究発表会，2015
4) Mikami et al. : Application of cement-treated soil supported by a geotextile to prevent differential settlement on road surfaces, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, pp. 1399-1402, 2017