

模型実験による橋台裏込め部段差対策工法の評価

地盤工学研究室 板倉 菜央
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

東日本大震災をはじめ、日本は地震大国であり、各地で多くの地震が発生する。これらの地震によって橋台裏込め部の土工部は、沈下が発生して大きな段差を生じさせる場合がある。それに伴って道路通行機能に支障きたすことも多い。本研究は、模型実験により効果的な段差対策工法の提案を行うことである。本研究では、現在段差対策工法として使用されているコンクリート製の踏み掛け版と、新たな段差対策工法として模索した「クロスウェーブ」を利用した段差対策工法について評価を行った。評価方法は、模型試験により得られた地表面沈下量を用いて、車両通行性の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験条件

表 - 1 に予備実験結果、図 - 1 に模型実験装置の平面図を、図 - 2 に模型実験装置の断面図を示す。今回の模型は、 $S=1:20$ の縮尺で作製し、主材料は木製材料を用いた。ただし、1面は地盤の挙動を観察するために透明の亚克力板を使用している。亚克力板には、1層5cm、10層分の線を引きメッシュにする。模型に水密性が無いため、試料は乾燥砂である5号珪砂を用いている。試料は、40cmの高さを保ちながらふるい落下させることで、密詰め（予備実験より $Dr=88\%$ を目標）にして実験を行う。模型の盛土エリアを3等分し、各エリア2.5cmずつ、1層につき計6回ふるい5cmの平坦な盛土を行う。1層完了毎にスクレーパーを使用し、整地を行う。対策工を設置する際には、盛土量の加減を行う。最後に盛土総重量を確認し、相対密度の計算を行う。

2.2 実験方法

盛土の沈下量を測るには、4つのジャッキを下げ、盛土を沈下させる。ジャッキは1回転させることで、2.0mm~3.0mm沈下させることができる。水平を保つために、沈下板に設置したレーザー変位計の読みを確認しながら、半回転ずつジャッキダウンを行う。沈下量10mm毎に定点撮影し、40mmまで沈下させる。ジャッキダウンの速度は、約20分で40mm沈下を行う。

2.3 変位計について

図 - 3 にレーザー変位計設置位置の平面図、図 - 4

表 - 1 予備実験の結果

1~8層目	225.6kg	最小密度	1.270g/cm ³
9~10層目	58.8kg	最大密度	1.545g/cm ³
模型内の砂重量	284.4kg	模型内の砂地盤の密度	1.505g/cm ³
模型の容積	0.189m ³	相対密度(Dr)	88%

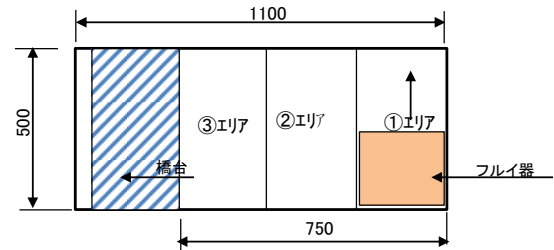


図 - 1 模型実験装置の平面図

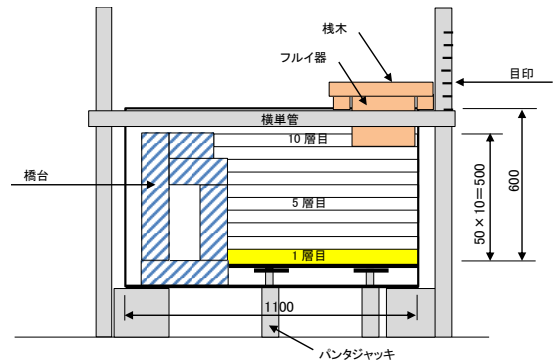


図 - 2 模型実験装置の断面図

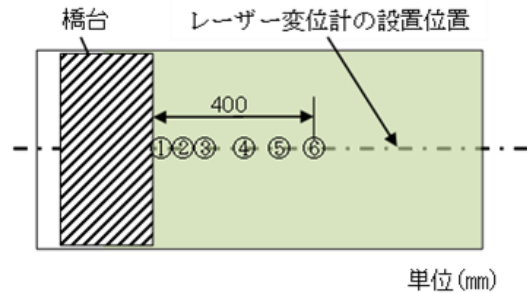


図 - 3 レーザー変位計の位置（平面図）

単位(mm)

にレーザー変位計設置位置の断面図を示した。本実験では、地表面の変位を計測するため6個、沈下板の変位測定を行うため2個、計8個のレーザー変位計を用いた。まずは、基準点を定め、基準点からの距離を計測し、正確にレーザー変位計を設置した。橋台と砂地盤の境界面にレーザー変位計①を置き、①から③までの設置距離は50 mm毎、③から⑥までの設置区間は100 mm毎に設置した。レーザー変位計は模型の上部に測定架台を設置し、マグネットスタンドによって設置した。そして、レーザー変位計のレーザーが地表面に垂直に照射できるように、レーザー変位計には、丸形水準器を取り付けた。

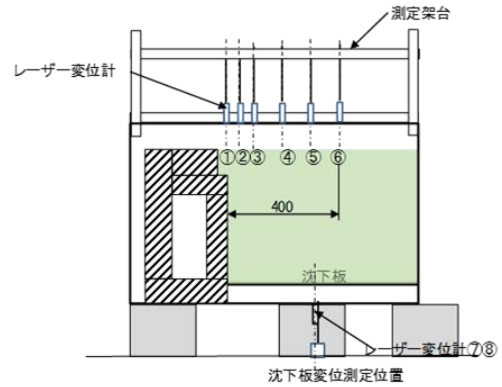


図 - 4 レーザー変位計の設置位置 (断面図)

2.4 定点撮影

本実験では、1面がアクリル板になっているため、沈下させた時の挙動が視察できるようになっている。挙動をわかりやすくするため、本実験では6層目から9層目に青色の砂をアクリル板から見える位置に幅10 mm、厚さ2 mmで振り撒いた。全体が映るように定点を決め、デジタルカメラで撮影を行う。撮影は沈下前、10 mm刻みで40 mmまでの沈下後を撮影する。

2.5 試験結果

図 - 5 に無対策の表面沈下量の結果を示す。表示した二回の実験結果は概ね同量の沈下量であり、再現性があると考えられる。この結果より作製した模型装置で実験を進めていく。

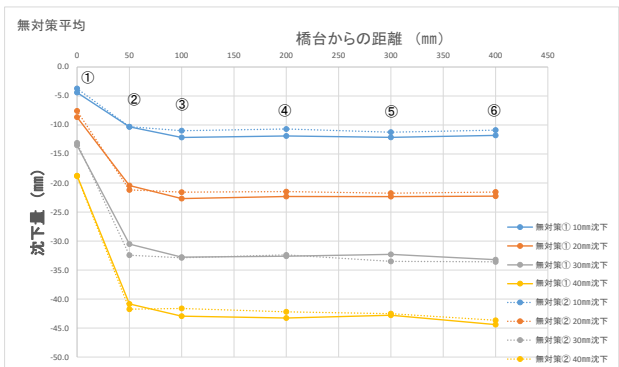


図 - 5 無対策の表面沈下量 (結果)



図 - 6 クロスウェーブ施工の様子

3. 新たな段差対策工法

3.1 新たな段差対策工法の模索理由

現在使用されている段差対策工法の踏み掛け版は、既往の研究・調査より、沈下で亀裂が生じることや液状化・側方流動の発生、踏み掛け版下部の空洞発生等の弱点がわかった。そこで、これらの弱点を克服する新たな段差対策工法として、「クロスウェーブ」の使用を検討した。



図 - 7 40 mm沈下後の定点撮影

3.2 クロスウェーブとは

クロスウェーブはプラスチック貯留材であり、公園下や道路下に施工するものである。排水機能を有しており、軽量で施工が容易である。実際のクロスウェーブの施工の様子を図-6に示す。

3.3 要素試験

クロスウェーブを模型装置に設置するにあたって、模型装置は実物大の1/20サイズである。相似則を検討して、クロスウェーブのヤング率の1/20になる素材を模索することとした。まず、実物のクロスウェーブを用いて、载荷たわみ試験を行った。その様子を図-7に示す。この結果、クロスウェーブのヤング率は $E_p=1011$ (kN/m²)となった。そこで、模型試験で用いる材料のヤング率は $E_m=51$ (kN/m²)を目標とする。材料の模索を行った結果、発泡ウレタン(黄色)のヤング率が $E_m=61$ (kN/m²)であったため、模型実験には発泡ウレタン(黄色)をクロスウェーブ想定とし、使用していく。

4. 実験結果

4.1 実験条件

実験条件を表-2に示す。今回行う実験は無対策と踏み掛け版、クロスウェーブを想定した発泡ウレタン(黄色)、発泡ウレタン(黄色)の約2倍のヤング率をもつ発泡ウレタン(黒色)を使用して行う。踏み掛け版と発泡ウレタン(黄色)、発泡ウレタン(黒色)は長さを400mm、300mm、200mmと変えたものを用意した。そして、発泡ウレタン(黄色)は厚さを20mm、40mmと変えたものを用意した。

4.2 空洞量比較

踏み掛け版は空洞が大きく発生することが問題点の一つとして挙げられる。そこで、模型装置を用いて検証を行った。図-8に踏み掛け版の模型実験の定点撮影、図-9に発泡ウレタン(黄色)の模型実験の定点撮影を示す。この二

表-2 模型装置を用いた実験条件

Case	地盤材料	材料		長さ (mm)		備考
		厚さ (mm)	層	層	層	
1.1	五号珪砂	無対策	15	400		アルミ板
2.1		踏み掛け版	15	300		
2.2		踏み掛け版	15	200		
2.3						
3.1		発泡ウレタン(黄色)		40	400	ヤング率=61 (kN/m ²)
3.2				30	400	
3.3				20	400	
3.4				40	300	
3.5				20	300	
3.6				40	200	
3.7		20	200			
4.1	発泡ウレタン(黒色)		20	400	ヤング率=61 (kN/m ²)	
4.2			20	300		
4.3			20	200		
4.4	発泡ウレタン(黄色)		20	400	ヤング率=61 (kN/m ²) 湧り止め装置	
5.1			20	400		

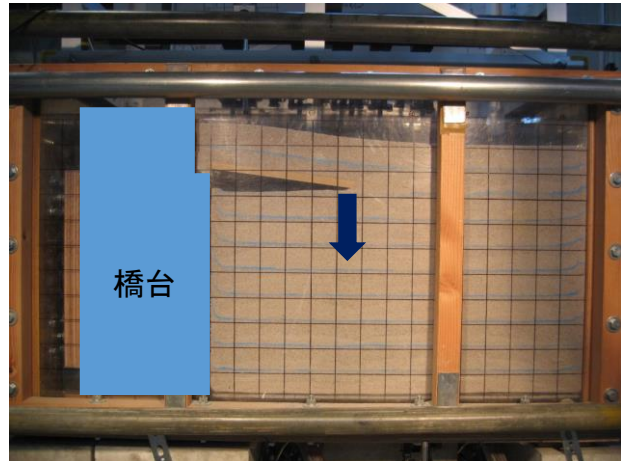


図-8 空洞量比較(踏み掛け版)

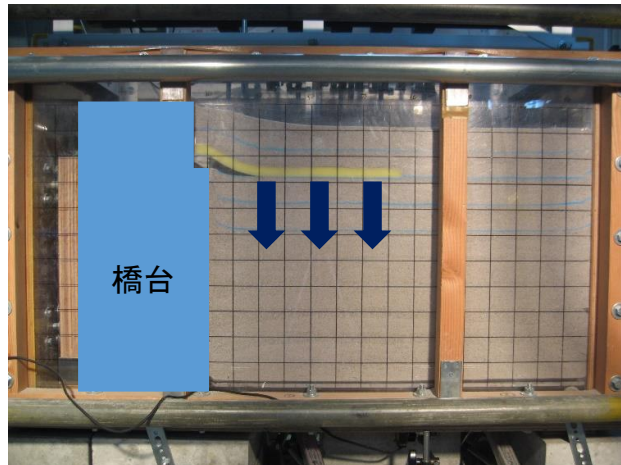


図-9 空洞量比較(発泡ウレタン黄色)

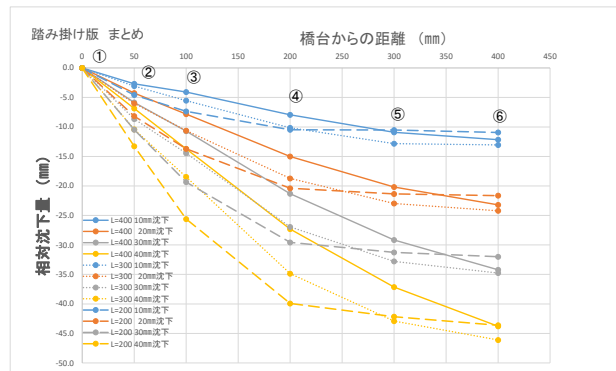


図-10 踏み掛け版まとめ

つとも 40 mm沈下時の定点撮影である。踏み掛け版は厚さ 15 mm, 長さ 400 mm, 発泡ウレタン (黄色) は厚さ 20 mm, 長さ 400 mmである。この二つを比較してわかるように, 踏み掛け版は空洞量が大きく, 端部に荷重が集中しやすくなっていることがわかる。それに比べ, クロスウェーブを想定した発泡ウレタン (黄色) では, 空洞量が少なく, 荷重を面で受けていることがわかる。これにより, 踏み掛け版のように, 時間経過とともに端部の沈下が発生しにくいと考えることができる。ただし, 空洞が小さくなった分, 沈下抑制効果は減ることとなる。次から, この沈下抑制効果でも車両の通行に支障をきたさないか検討していく。

4.3 表面沈下量の比較検討

図-10 から図-14 は, 模型実験より得られた地表面沈下量を示したグラフである。縦軸は初期からの相対沈下量, 横軸は橋台からの距離とする。なお, レーザー変位計①の場所は, 実際には地盤沈下が認められたが, 橋台高さは変化しないためゼロとした。青色線は 10 mm沈下時, オレンジ色線は 20 mm沈下時, 灰色線は 30 mm沈下時, 黄色線は 40 mm沈下時である。

4.3.1 踏み掛け版まとめ

図-10 に踏み掛け版の長さを変えたときの地表面沈下量を示す。実線は長さ 400 mm, 点線は長さ 300 mm, 破線は長さ 200 mmである。結果を見てわかるように踏み掛け版の長さが短くなるにつれ, 沈下量が大きくなる傾向がある。

4.3.2 発泡ウレタン (黄色) まとめ

図-11 に発泡ウレタン (黄色) 厚さ 20 mmの長さを変えたときの地表面沈下量を示す。実線は長さ 400 mm, 点線は長さ 300 mm, 破線は長さ 200 mmである。結果を見てわかるように踏み掛け版とは異なり, 発泡ウレタン (黄色) では, 長さを変えても沈下量は同量である。よって発泡ウレタン (黄色) は長さを 200 mm以上にしても沈下抑制効果は上がらないことがわかる。

4.3.3 無対策・踏み掛け版・発泡ウレタン比較

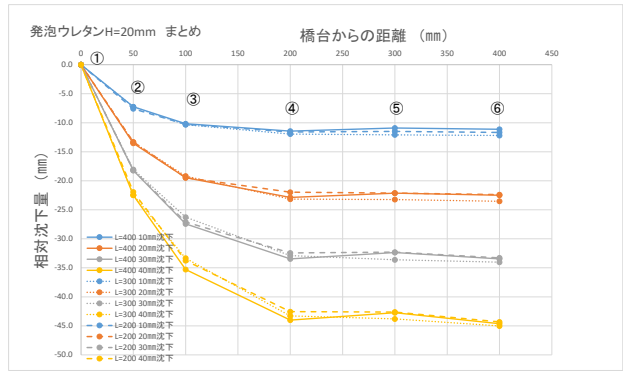


図 - 11 発泡ウレタン (黄色) H=20mm まとめ

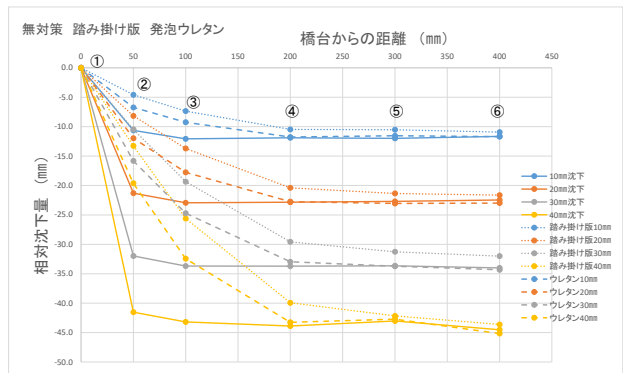


図 - 12 無対策・踏み掛け版・発泡ウレタンの比較

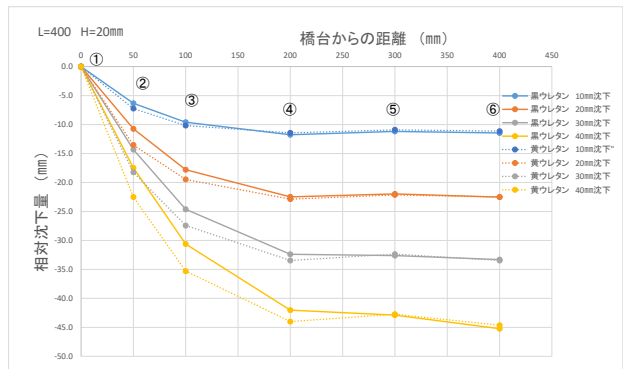


図 - 13 発泡ウレタン (黄色) (黒色) の比較

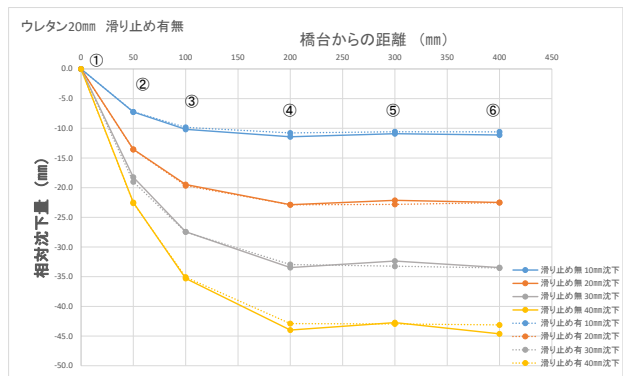


図 - 14 発泡ウレタン (黄色) 滑り止め有無の比較

図-12に無対策・踏み掛け版・発泡ウレタン（黄色）の沈下量比較を行ったものを示す。実線は無対策，点線は踏み掛け版長さ 200 mm，破線は発泡ウレタン（黄色）長さ 200 mmである。結果を見てわかるように，踏み掛け版が一番沈下量を抑制できていることがわかる。しかし，クロスウェーブを想定した発泡ウレタン（黄色）も沈下量を抑制できていることがわかる。

4.3.4 発泡ウレタン（黄色）と（黒色）の比較

図-13に発泡ウレタン（黄色）と発泡ウレタン（黒色）の沈下量比較を行ったものを示す。発泡ウレタン（黒色）は，発泡ウレタン（黄色）と比べヤング率が2倍となっている。実線は発泡ウレタン（黒色），点線は発泡ウレタン（黄色）である。結果を見てわかるように発泡ウレタン（黒色）の方が沈下量を抑制できていることがわかる。

4.3.5 発泡ウレタン（黄色）滑り止めの比較

地盤に定着させる目的で，発泡ウレタン（黄色）にアルミアングルを取り付けた。これを滑り止め有と称す。図-14に発泡ウレタン（黄色）の滑り止め有と無での沈下量比較を行ったものを示す。実線は滑り止め無，点線は滑り止め有である。結果を見てわかるようにどちらも同様の沈下量であることがわかる。地盤と定着させても，発泡ウレタン（黄色）は容易に伸びるため，定着効果が得られなかったと考える。ワイヤーを張るなどして，発泡ウレタン（黄色）の伸びを防ぐことで，沈下抑制効果が上がることを期待できる。

4.4 地表面傾斜角の比較検討

車両の通行性についての検討を行う。橋台起点からレーザー変位計②の場所の地表面傾斜角を $\theta 1$ ，橋台起点からレーザー変位計③の地表面傾斜角を $\theta 2$ とする。評価基準として通行可能・通行配慮・通行不可の三段階で評価する。車体と路面のクリアランスが10 cm以上確保できる場合は通行可能，車体と路面のクリアランスが10 cm未満である場合は通行配慮，車体と路面のクリアランスが無く，車底部を擦る場合は通行不可とする。今回，車両通行性を検討するにあたってトヨタのラウンドクルーザーを車両モデルとして使用した。図-16に地表面傾斜角の評価を示す。○が通行可能，△が通行配慮，×が通行不可である。結果より，踏み掛け版が一番有効に働いていることがわかる。既往の研究・調査より中越・中越沖地震での段差被害が多かった段差量は50 cm程度であったと報告されており，クロスウェーブを想定した発泡ウレタン（黄色）では，実物大60 cm相当の沈下では通行配慮が必要ではあるが，通行可能範囲にあるといえる。発泡ウレタン（黄色）と発泡ウレタン（黒色）の比較を行った結果，ヤング率を2倍にすることで，通行可能範囲が広がることをわかる。

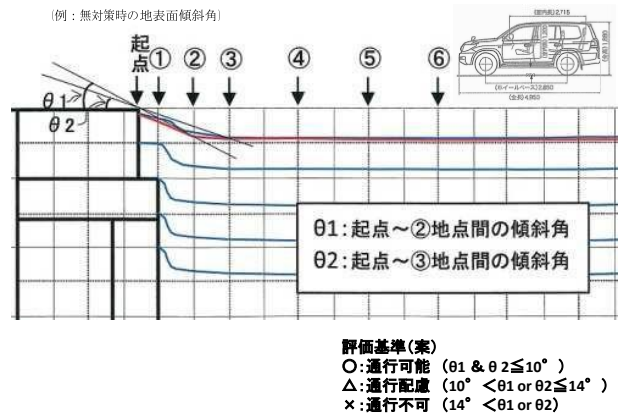


図 - 15 地表面傾斜角の説明

Case	材料	厚さ (mm)	長さ (mm)	20cm 沈下	40cm 沈下	60cm 沈下	80cm 沈下
1.1	無対策	無	無	○	×	×	×
2.1	踏み掛け版	15	400	○	○	○	○
2.2		15	300	○	○	○	○
2.3		15	200	○	○	○	△
3.1	発泡ウレタン(黄色)	40	400	○	○	△	△
3.2		30	400	○	○	△	×
3.3		20	400	○	○	△	×
3.4		40	300	○	○	△	△
3.5		20	300	○	○	△	×
3.6		40	200	○	○	△	△
3.7	20	200	○	○	△	×	
4.1	発泡ウレタン(黒色)	20	400	○	○	△	△
4.2		20	300	○	○	△	△
4.3		20	200	○	○	△	△

図 - 16 無対策・踏み掛け版・発泡ウレタンの比較

5. 結論

今回の模型試験より、橋台裏込め部の段差対策工法の沈下量の抑制には、踏み掛け版が一番有効であった。しかし、既往の研究や調査で踏み掛け版に亀裂が入ったり、橋台裏込め部の盛土が液状化を起こしたりすることがあげられている。それらを考慮して、「クロスウェーブ」を使用した場合の効果について以下に示す。

まず初めに、クロスウェーブの段差の抑制効果は踏み掛け版よりも劣る。しかし、新潟県中越地震と中越沖地震で発生した橋台裏込め部の最大段差は 100 cmであったが、これは踏みかけ版でも到底抑制できるものではない。しかし大半の橋台裏込め部の段差は 50 cmであったという調査を参考にすると、模型試験で 60 cmを想定した沈下量のときに、通行可能範囲（通行配慮が必要）であるという結果になった。

次に、クロスウェーブは施工が容易であることが挙げられる。踏み掛け版はコンクリート製であるため、運搬・施工には大型の重機が必要である。しかし、クロスウェーブはプラスチック製であり、大型重機などの持ち込みが不要である。そのため、施工が容易であるといえる。

最後に、クロスウェーブはプラスチック製であるため軽量である。そのため、沈下や側方流動抑制について、EPS 工法と同じような効果が挙げられると考えることができる。それによって液状化の発生も抑制できると考えられる。さらに、クロスウェーブはプラスチック貯留材であるため、貯留や排水機能を利用することによって、道路排水や冠水対策にも用いることが期待できる。

以上の模型試験の結果から、「踏み掛け版」に代わる新しい段差抑制工法として、「クロスウェーブ」の使用は可能であるという結論に至る。

6. 今後の展望

クロスウェーブは、新たな段差抑制工法の一つとして、十分な効果が期待できる結果が得られたので、今後は実物大試験において、実証していくことが必要である。また、クロスウェーブの剛性を上げること、地盤と定着させるなどの改良を行うことにより、沈下量をさらに減少させる検討も行っていく。