

タイにおける軟弱地盤上の離岸堤を対象とした 格子状補強シートによる沈下抑制に関する模型実験と数値解析

○岡村昭彦¹・森 啓年²・平本貴一²

¹ 芦森工業 (株) ・² 山口大学大学院創成科学研究科

1. はじめに

タイ国バンコク南部のタイ湾では、マングローブ林の破壊により天然の防波堤が消失し、海岸浸食が進んでいる。そこで、海岸浸食を抑制し、マングローブ林の再生を促進するために、離岸堤の設置が進められている。しかし、タイ湾沿岸部は、N 値 1 未満の軟弱地盤層が表層から 10m 以上堆積していることが、離岸堤の建設において大きな課題となっている。

これまで現地では、竹柵による消波効果を期待した護岸が多くみられたが、2012 年には図-1 のようなジオテキスタイル製の袋に砂を充填した Geo-Tube 製の離岸堤による対策が試行された。この事業については Nopmueng ら¹⁾がその有効性を報告しているが、前述の様に軟弱地盤上への築堤となり、1 年間で 1m 以上沈下したため、現在は Geo-Tube 製離岸堤の上に碎石による追加の盛土を施工し、満潮時に水没しないように高さを維持している。このように、現地では軟弱地盤上の離岸堤の沈下に対する経済的な対策技術が必要とされている。

この対策の一つとして、筆者らは格子状補強シートを基礎とする離岸堤を提案している。格子状補強シートは図-2 に示すようにジャケット・充填材・土木シートで構成された土木資材であり、格子状に組んだ直径 10 cm のジャケット内に特殊モルタルを充填し、剛性の高い格子状の補強枠を形成するものである。盛土施工前にその底部に敷設することでジャケット自身の引張抵抗と特殊モルタルの圧縮抵抗による高い曲げ抵抗により地盤表層を安定させ、軟弱地盤上の盛土による不同沈下を抑制する効果を期待するものである。



図-1 Geo-Tube 製離岸堤 (Marine Department 提供)

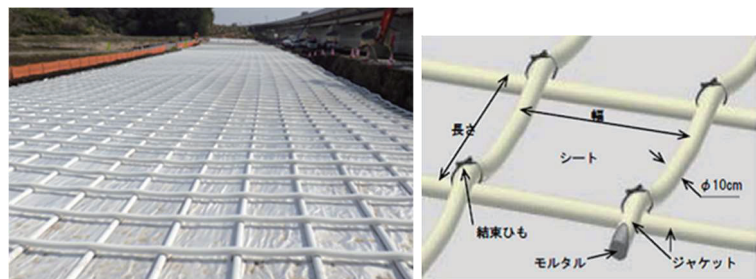


図-2 格子状補強シート

格子状補強シートが盛土による不同沈下抑制効果を発揮するのは図-3 に示すメカニズムによるものと考えられる。盛土施工時に天端下は沈下するとともに、その部分の軟弱地盤が側方に移動する、いわゆる側方流動が発生し、法尻付近をはじめ周辺地盤に隆起が発生する。剛性のある格子状補強シートを盛土底部に敷設することにより、荷重分散効果で不同沈下が抑制され、天端下の沈下量とともに側方流動も減少することが期待できる。

本研究は、格子状補強シートを用いた盛土の沈下に関する模型実験を行い、その再現解析の知見を用いて、タイ湾で試験施工した格子状補強シートを用いた離岸堤の最終沈下量を予測し、現地への適用性を検証したものである。

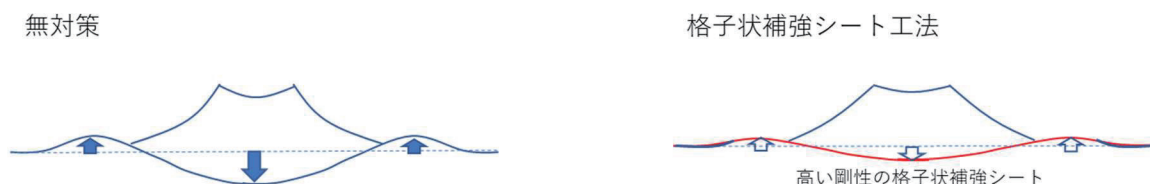


図-3 格子状補強シートの沈下抑制メカニズム

Model experiment and numerical analysis on settlement suppression using the Lattice Frame Reinforcement Sheet for breakwaters on soft ground in Thailand.

Akihiko Okamura¹, Hirotohi Mori², Takakazu Hiramoto² (¹Ashimori Industry Co., Ltd., ²Department of Civil and Environmental Engineering, Yamaguchi University)

2. 模型実験

2.1 実験方法

格子状補強シートの軟弱地盤の不同沈下抑制効果を定量的に把握し、解析における格子状補強シートのモデル化に関する知見を得るために、模型実験を行った。

模型実験は、幅 1,300mm、高さ 310mm、奥行き 150mm のアクリル製の土槽を作成し、この中に排水層となる砂層の上に軟弱地盤となるカオリン粘土を敷設した模型地盤（図-4）により実験を行った。カオリン粘土は、当初現地粘土の含水比 130%を想定して予備実験を行ったところ、盛土がカオリン粘土中に完全に埋没した状況となった。そこで、カオリン粘土の初期含水比を 100%とし、さらに 7 日間自重圧密により沈下させ、8 日目に粘土表面を削り取り、実験開始時の層厚は 150mm とした軟弱地盤を用いて実験を実施した。カオリン粘土の土質性状を表-1 に示す。カオリン粘土下の排水層は図-4 に示すように珪砂 3 号を 50mm 敷き均し、この上に不織布を敷き、軟弱地盤となるカオリン粘土を設置している。

盛土は実寸の 1/10 スケールを想定し、その高さは 100mm、天端幅は 100mm、法面勾配は 1:1 とした。盛土の使用材料は、珪砂 2 号を 16.7kN/m³ と統一し、すべてのケースで盛土による上載荷重は同じ 5.0kg になるようにしてある。盛土底部には、実験ケースによってジオテキスタイルや格子状補強シートを模したシートを敷設し、その上に盛土を構築した。また、実験過程で水位が一定となるように操作し、地下水位面はカオリン粘土の表層から 50mm 下の高さになるように設定し、予備試験では概ね 14 日間で沈下が収束することが確認できているので、実験期間は盛土構築後 14 日間とした。

本実験の観測について、盛土やその周辺地盤の変位を観測するためレーザー変位計を用いた。レーザー変位計の測定位置は天端に 2 点（平均値を利用）、法尻、法尻から 100mm、200mm（一部ケースは 150mm）にそれぞれ 1 点ずつ置き、1 分間隔で記録している。なお、本実験では、側方流動の程度を把握するため間接的に法尻及び法尻から 100mm、200mm（一部ケースは 150mm）の地点における隆起量をもって評価している。

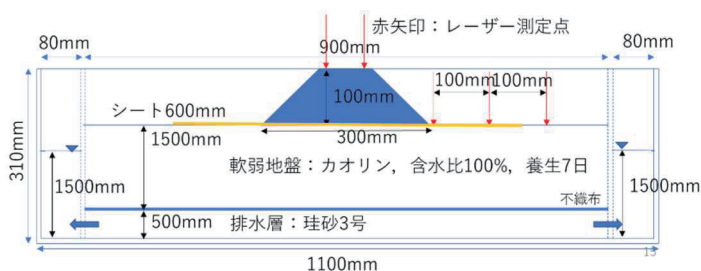


図-4 実験模型

表-1 カオリン粘土の性状

	カオリン粘土
土粒子の密度(g/cm ³)	2.603
初期含水比(%)	100.0
実験後含水比(%)	31.3
液性限界(%)	46.9
塑性限界(%)	26.9
塑性指数	20.0

2.2 実験ケース

本実験のケース一覧を表-2 に示す。軟弱地盤上に直接盛土を施工する CASE-1、軟弱地盤上にジオテキスタイルを敷設し、その上に盛土を施工する CASE-2、軟弱地盤上にモデル化した格子状補強シートを敷設し、その上に盛土を施工する CASE-3 である。

対策工の実験モデル化では、CASE-2 のジオテキスタイルを再現するために、厚さ 0.09mm、密度 36.7g/m² のポリエステル製の織布を用いた。盛土は実寸の 1/10 スケールのため、CASE-3 の格子状補強シートを再現するにあたり、図-5 のように直径 10mm のポリプロピレン製の筒をジャケットとし、そこにセメントミルクを充填したものを格子間隔 100mm×100mm で CASE-2 において用いたジオテキスタイル製シートに合成ゴム系接着剤により接着したものをを用いた。本来であれば、格子状補強シートそのものを実験で用いることが望ましいが、本実験のスケールでは困難であったため、ジャケット自身の引張抵抗と特殊モルタルの曲げ抵抗をセメントミルクを充填したポリプロピレン製の筒により再現を試みた。この再現性は他の条件の実験結果とも比較し、ある程度の妥当性を確認している。なお、ジオテキスタイル製シート、格子状補強シートの大きさは幅 600mm、奥行き 150mm であり、格子状補強シートの質量は 223g である。



図-5 格子状補強シートの実験モデル

表-2 実験ケース

CASE	対策工
1	無対策
2	シート工法
3	格子状補強シート工法

2.3 実験結果

CASE-1～3の実験終了時（14日後）の実験状況の写真を図-6に示す。また、レーザー変位計による沈下量の観測結果を図-7に示す。沈下量は正が沈下方向、負が隆起方向である（以下、同じ）。盛土の天端の沈下量に着目すると、CASE-2がCASE-1の沈下量の9割程度、CASE-3がCASE-1の沈下量の4割程度まで低減される結果となった。

次に、側方流動に伴う隆起量であるが、いずれのケースも隆起が周辺地盤にみられた。図-7に示す法尻から100mmの位置で比較すると、隆起量の値はCASE-2が最も大きく、CASE-1、CASE-3の順となっている。これはCASE-2で使用したシートが軽いため盛土沈下時にシートが引き込まれ、法尻付近でシートだけ浮き上がったためであり、カオリン粘土そのものの隆起量はCASE-1とほぼ同じであることを確認している。



図-6 実験状況（14日経過，左：CASE-1，中：CASE-2，右：CASE-3）

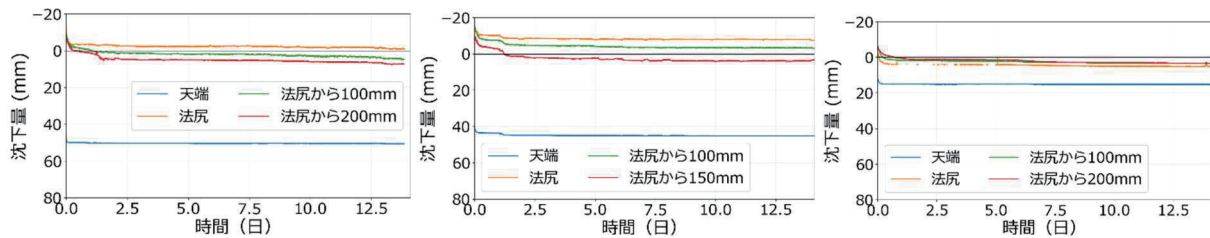


図-7 実験結果（左：CASE-1，中：CASE-2，右：CASE-3）

2.4 再現解析

実験結果を再現するため、有限要素プログラム PLAXIS-3D による数値解析を実施した。本解析で用いた解析モデルを図-8に示す。解析モデルは、模型実験と同様に基礎地盤は排水層の珪砂3号、その上にカオリンによる軟弱層をモデル化し、各CASEの対策工を板要素によりモデル化し、その上に盛土を作成した。

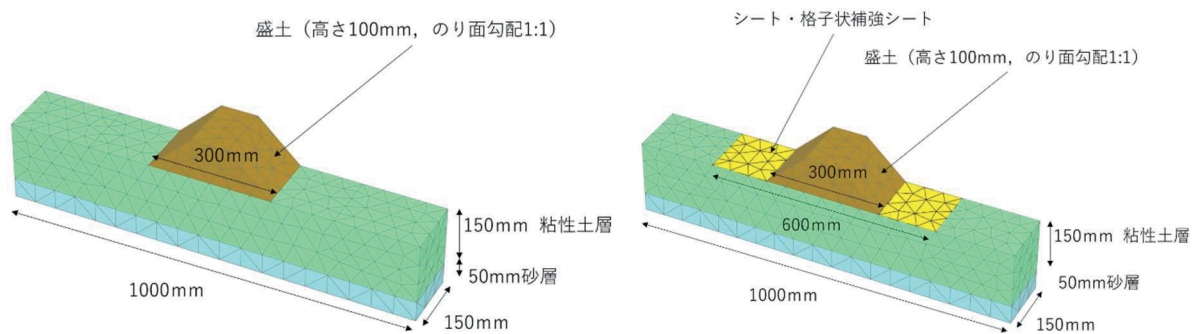


図-8 解析モデル（左：CASE-1, 右：CASE-2, CASE-3）

なお、軟弱層のモデル化は関口・太田モデルを用い、そのパラメータは、圧密試験と太田²⁾による手法から設定し、透水係数及び λ^* 及び κ^* については、パラメトリックスタディを行い、実験結果と合致する様に設定した。また、CASE-3の格子状補強シートは厚さ10mmの板要素でモデル化し、弾性係数は実大規模で行った実験³⁾で求めた3,500MPaとしている。なお、CASE-2のジオテキスタイルについては、同じ板要素を厚さ0.1mmで用いた。解析で使用した土質定数を表-3にまとめる。再現解析における地下水位は、模型実験と同様に軟弱地盤表層から50mmの深さとした。

数値解析の結果を図-9～11に示す。図-9及び10より、格子状補強シートの剛性により、実験と同様に不同沈下が抑制され、天端下の沈下量が減少していることが、解析でも確認できる。また、図-11に示す通り、天端の初期沈下量に関しては、実験結果より小さめの値が出る傾向がみられた。実験終了時の沈下量に関しては解析結果と実験結果は比較的良好に対応している。これらの結果より、板要素を使用することにより、格子状補強シートの不同沈下抑制効果を解析において

も再現可能であることを確認することができた。

表-3 解析パラメータ (実験結果再現)

	モデル	単位重量 kN/m ³	λ^*	κ^*	M	弾性係数 kN/m ²	ポアソン比	過圧密比	透水係数 m/day
盛土	線形弾性	16.7	-	-	-	22	0.3	-	1.0×10^{-1}
対策工	線形弾性	1.1	-	-	-	3,500	0.3	-	-
軟弱地盤	関口・太田	18.4	0.360	0.112	1.22	-	0.33	1.00	4.8×10^{-2}
排水層	線形弾性	17.0	-	-	-	10,000	0.3	-	1.0×10^{-1}

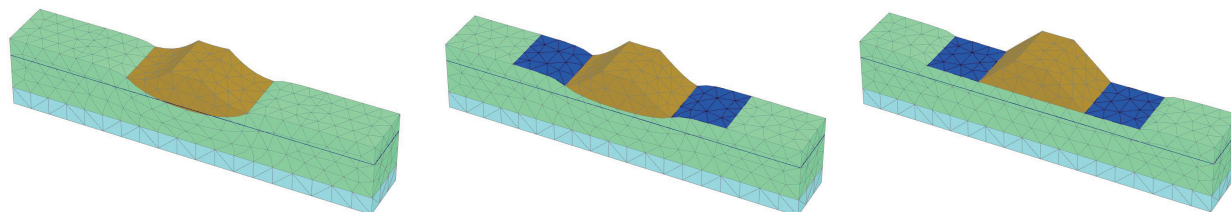


図-9 変形図 (左: CASE-1, 中: CASE-2, 右: CASE-3)

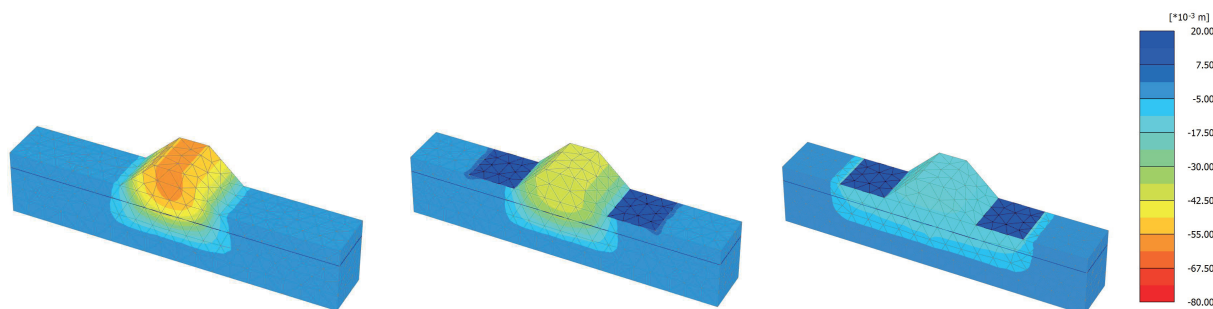


図-10 鉛直変位コンター図 (左: CASE-1, 中: CASE-2, 右: CASE-3)

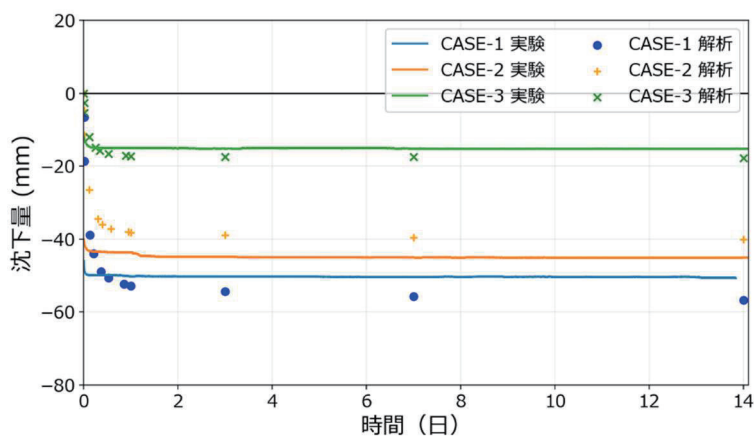


図-11 模型実験と再現解析の比較 (天端沈下量)

3. タイ湾における試験施工

3.1 試験施工方法

2017年1月に図-12に示すバンコク南部のサムットサコーン県の沖合200mに格子状補強シートを格子間隔1m×1mで20m×20mの大きさと試験施工した。格子状補強シートを敷設した上に図-13に示す断面で、石積みによる離岸堤を施工した。この離岸堤は、盛土幅10.5m、天端幅2.5mで高さ2mの台形であり、100～300mmの大きさの砕石を中詰めに使用し、外側は500mm以上の大きさの石で築堤した。

現地のボーリング調査より、試験施工箇所の地盤状況は非常に軟弱であり、深さ17mまでN値1未満の粘土層で、その下に厚さ2mのN値19の粘土層があり、これより下にN値40以上の層が存在する。粘土層の飽和単位重量は13.9kN/m³

であり、塑性指数は23.5であることが、土質試験結果から分かっている。

現地において離岸堤を施工した直後から、堤体の天端の沈下測量を行っている。計測間隔は施工後～3ヶ月は2週間ごとに、3～15ヶ月は1月ごと、15～35ヶ月は2月ごと、35～60ヶ月は概ね3月ごとに測量を行っている。5年間観測した結果、0.51mの沈下量が観測されている。

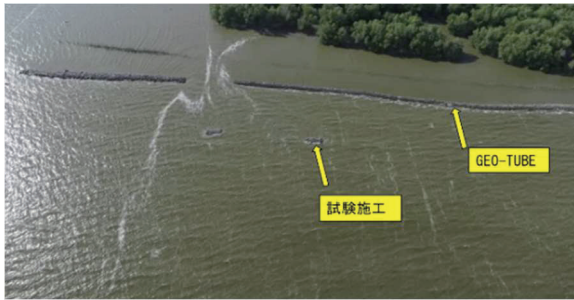


図-12 試験施工箇所

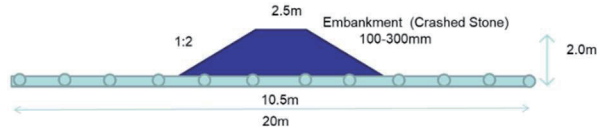


図-13 離岸堤の断面

3.2 数値解析

前述の模型実験の再現解析から、格子状補強シートを板要素で再現することが可能であるため、本試験施工の数値解析についても同様の手法での実施を試みた。

図-13に解析モデルの概要を示す。粘土層のモデル化は関口・太田モデルを用い、そのパラメータは、太田²⁾らによる手法から設定し、透水係数及び λ^* 及び κ^* については、パラメトリックスタディを行い、実験結果と合致する様に設定した。各層の土質定数は表-4に示す。格子状補強シートは模型実験の再現解析と同様に板要素でモデル化し厚さは実寸に合わせて100mmとし、弾性係数は実大規模で行った実験³⁾で求めた3,500MPaとしている。なお、数値解析における地下水位は、現地在が海域であることから粘性土層表層とした。

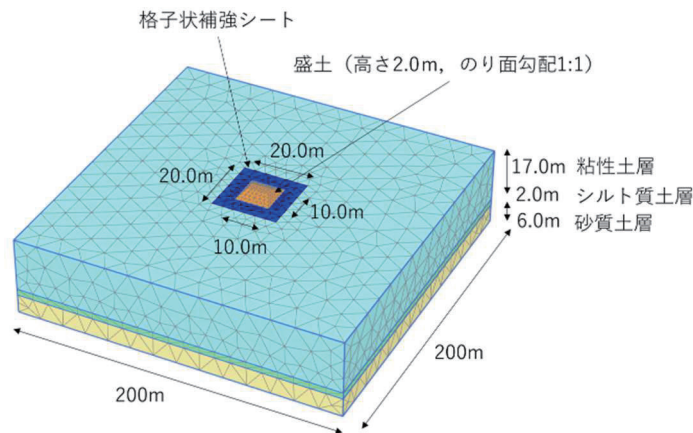


図-14 試験施工解析モデル

表-4 解析パラメータ (現場観測再現)

	モデル	単位重量 kN/m ³	λ^*	κ^*	M	弾性係数 kN/m ²	ポアソン比	過圧密比	透水係数 m/day
盛土	線形弾性	20.0	-	-	-	20	0.3	-	1.0×10^{-1}
格子状補強シート	線形弾性	1.1	-	-	-	3,500	0.3	-	-
粘性土層	関口・太田	13.9	0.065	0.021	1.17	-	0.338	1.00	4.9×10^{-4}
シルト質土層	関口・太田	16.0	0.12	0.047-	1.06	-	0.3	1.00	6.7×10^{-6}
砂質土層	線形弾性	22.0	-	-	-	35,000	0.3	-	1.0×10^{-1}

図-15に90%圧密時の変形図と鉛直変位コンターを示す。格子状補強シートにより、不同沈下が抑制され、天端下の沈下量が減少していることが、解析でも確認できる。図-16に現地観測の沈下量と数値解析における沈下量の比較結果を示

している。数値解析は、現地観測の結果を概ね再現できており、このグラフから90%圧密に到達するのが施工から9年後となり、90%沈下量は0.6m程度になることが推測される。

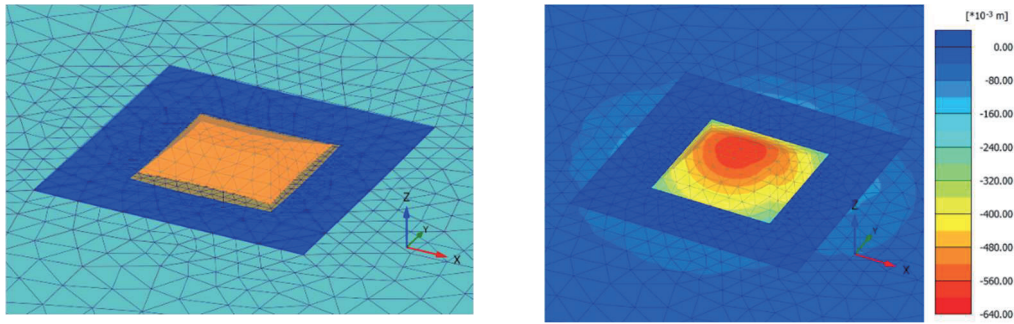


図-15 90%圧密時の変形図および鉛直変位コンター図

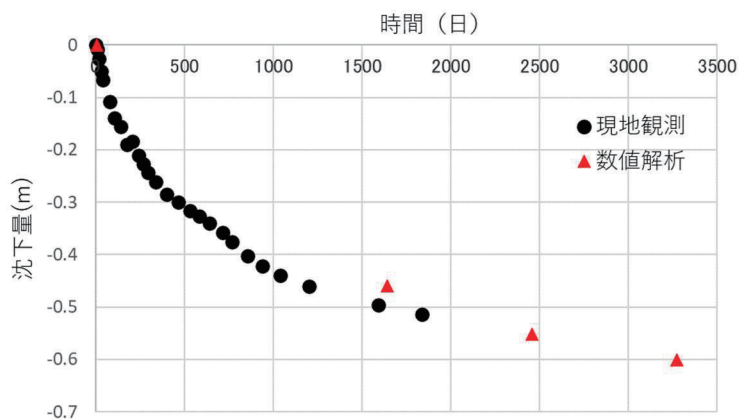


図-16 現地観測と数値解析の比較

4. おわりに

以上の実験及び現地観測、それらの再現解析から、以下の事項が明らかになった。

- ・ 模型実験およびその再現解析より、格子状補強シートの不同沈下抑制効果は板要素により再現可能であり、実験及び解析のいずれにおいても、本地盤条件下では無対策に比べ沈下量が6割程度減少することが確認できた。
- ・ タイにおける試験施工においても一定の不同沈下抑制効果が確認され、数値解析を行ったところ90%圧密時沈下量は0.6mとなり、施工から9年程度かかることが予測された。

格子状補強シートは、その不同沈下抑制効果により初期沈下も大幅に低減することが示されており、タイの海岸浸食対策の新たな対策技術として利用可能であると考えられる。引き続き沈下観測を行い、解析精度の向上に努める所存である。

参考文献

- 1) Nopmueng, A., 山本吉道, Rattanarama, P.: タイ国でのマングローブ林の特徴と海岸侵食防止効果, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, I_768-I_773, 2014.
- 2) 太田秀樹, 鍋谷雅司, 藤井信二, 山本松生: 弾・粘塑性有限要素解析の入力パラメーター決定における一軸圧縮強度の利用, 土木学会論文集, 第400号/III-10, pp.45-54, 1988.
- 3) 岡本道孝, 北本幸義, 吉田輝, 大野進太郎, 岡村昭彦: 軟弱地盤の表層安定対策としての格子状補強シート工法の開発と適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), 76 巻 2 号, pp.158-173, 2020.