

格子状補強シート工法によるクレーン支持地盤の表層改良効果に関する解析的検討

Analytical Study on the Surface Layer Improvement Effect of Crane-supported Ground with Lattice Frame Reinforcement Sheet

田中 恵 祐 中本 詩 瑤 吉田 輝
岡本 道 孝 小原 隆 志¹⁾ 中島 悠 介²⁾

要 約

格子状補強シート工法は、格子状に組んだ筒状繊維内に注入したモルタルの固化により曲げ剛性を発揮する補強棒と地盤の表層安定用シートを複合させて軟弱地盤の支持力を増強する技術である。当工法を鉄道橋梁改修工事におけるクレーン基礎地盤の支持力増強対策へ適用し、現地でクレーン揚重作業時の沈下量を計測するとともに、三次元有限差分解析を用いて現地計測の再現解析を実施した。その結果、現地計測と解析から得られた沈下量と沈下モードは概ね一致し、数値解析のモデル化手法の妥当性およびクレーン揚重作業時の安定性を確認できた。また、同手法を用いて地盤条件と荷重条件、格子間隔をパラメータとした数値解析を実施し、当工法に関する簡易設計ノモグラムとこれを用いた設計フローを整備した。

目 次

- I. はじめに
- II. 施工実績
- III. 再現解析
- IV. 簡易設計ノモグラム
- V. おわりに

I. はじめに

軟弱地盤上の軌道や道路における路床・路盤の支持力向上を目的とした仮設の表層改良工法としては、セメントなどによる安定処理工法が代表的であるが、施工時のセメント粉塵の飛散や撤去時の騒音・振動が問題となる場合があった。この問題を解決するために、筆者らは竹棒シート工法の基本原理を応用し、格子状補強棒と施工法を工夫した格子状補強シート工法を開発した^{1)~3)}。これまでに、試験施工を含め 11 現場で適用した実績がある。

当工法の基本構成を Fig.1 に示す。これは、格子状に組んだ筒状繊維（以下、ジャケットと記す）を軟弱地盤上に敷設した後、ジャケット内に注入したモルタルの固化により曲げ剛性を有する補強棒と地盤の表層安定用シート（以下、土木シートと記す）を複合させた表層改良工法である。超軟弱地盤以外は、土木シート、ジャケットの順に敷設してから、モルタルを注入する。

今回、当工法を鉄道橋梁改修工事における、クローラクレーン基礎地盤の支持力増強対策へ適用し、現地でクレーン揚重作業時の沈下量の計測を行った。また、三次元有限差分解析を用いて現地計測の再現解析を実施し、数値解析のモデル化手法の妥当性およびクレーン揚重作業時の安全性を確認した。さらに、同手法を用いて当工法の簡易設計ノモグラムとこれを用いた設計フローを作成した。

II. 施工実績

1. 工事概要

工事概要をFig.2に示す。クレーン設置位置は鉄道営業線橋梁に近接しており、揚重作業時のクレーンの安定性確保が求められた。しかし、作業ヤードの基礎地盤表層はN値が小さい軟弱地盤で構成されているので、クレーンの安定性を確保するため表層安定処理などの対策が必要と判断された。

当工事は湧水期中（11月～5月）に完了させる必要があり、

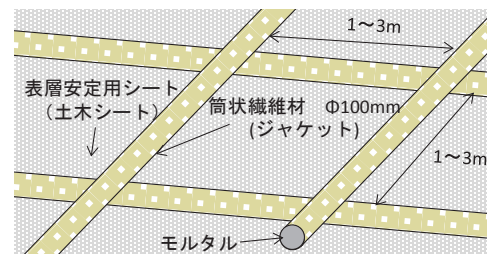


Fig.1 格子状補強シート

(Basic Feature of the Lattice Frame Reinforcement Sheet)

1) 九州支店 Kyushu Branch

2) 東京土木支店 Tokyo Civil Engineering Branch

キーワード: 表層安定処理, ジオシンセティックス, 不同沈下対策, 三次元数値解析, 設計ノモグラム

Keywords: surface soil stabilization, geosynthetics, differential settlement measure, three-dimensional numerical analysis, design nomogram

改良土の強度発現やその撤去に要する時間が工程に及ぼす影響が懸念された。これに加え、堤外地における土壌のアルカリ規制などを踏まえ、当工法による対策を行うこととした。

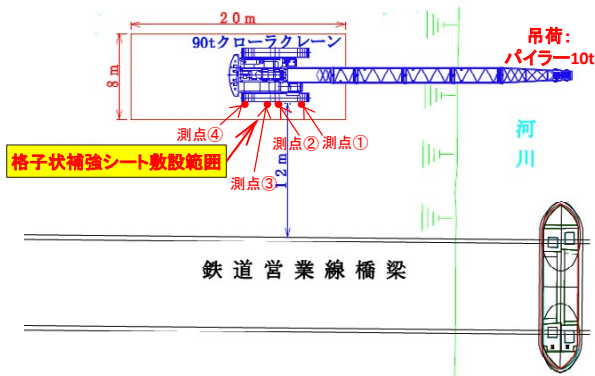


Fig.2 工事概要
(Outline of Construction)

2. 格子状補強シートの施工手順

当工法の施工フローをFig.3に示す。モルタルは生コン工場からアジテータ車で搬入し、現地で流動化剤と水中不分離剤を添加した。攪拌後にシリンダーフロー試験を実施し、目標の流動性が得られていることを確認した後、ポンプを用いて50L/minでジャケット内へモルタルを注入した。モルタルの圧縮強度が20N/mm²程度となる2.5日間の養生後、層厚30cmの碎石層を造成し、その上面に敷鉄板を設置した。当工事では、8m×20mの敷設範囲において、施工基面の整形から敷鉄板の設置までに約6日間を要した。なお、モルタルの配合や使用材料等については参考文献⁴⁾を参照されたい。

3. クレーン揚重作業時の沈下量計測

揚重作業時にクレーン近傍の4点で計測した沈下量をFig.4に示す。吊荷を揚重することでクローラに作用する荷重が偏心したため、吊荷に最も近い測点①で沈下量が大きく、後方になるに伴い、沈下量は小さくなった。同図には別報⁹⁾で示した設計時の予測沈下量を併記するが、実測値は予測沈下量を下回る結果となった。これは、設計として基礎地盤のN値を安全側で評価したことが主な原因と考えられる。また、沈下モードもやや異なっていることから、以下に述べるように、モデル化手法を見直して精密な再現解析を行った。

Ⅲ. 再現解析

Fig.4で示した実測沈下量は、揚重作業による沈下量増分(=総沈下量-クレーン自重による沈下量)であり、クレーン作業前から揚重作業時までの総沈下量は確認できていない。また、実測値は設計時の予測沈下量の1/5~1/2と小さく、沈下モードも設計時と異なる結果となった。そこで、解析精度の向上と総沈下量の評価のため、三次元有限差分解析により現地計測の再現解析を実施した。

1. 解析方法

三次元解析メッシュをFig.5に示す。設計時の解析メッシュ⁵⁾

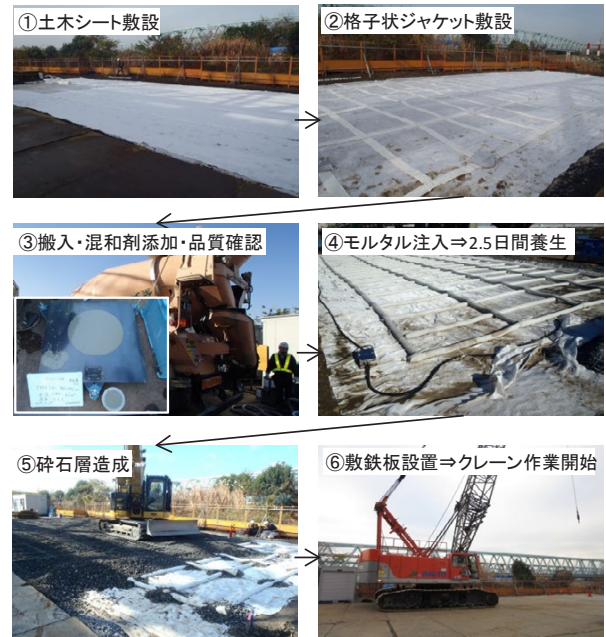


Fig.3 格子状補強シート施工フロー
(Construction Procedure of the Lattice Frame Reinforcement Sheet)

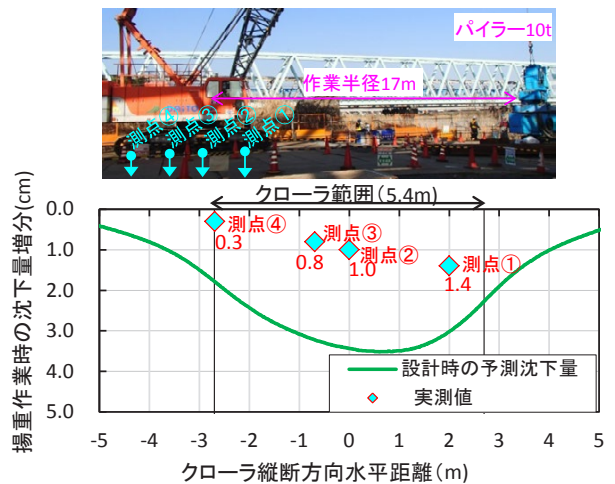


Fig.4 沈下量計測結果
(Actual Settlement Due to Crane Work)

から大きな変更はしていない。施工条件を正確に再現するため、格子状補強シートの敷設範囲を8m×10mとし、地盤の表層安定を目的に敷設した土木シートをジオグリッド要素でモデル化した。また、敷鉄板と碎石間の摩擦を考慮するためインターフェイス要素を考慮した。基礎地盤に対する動的コーン貫入試験結果をFig.6に示す。設計時には、地盤条件として一層地盤でかつ保守的にN値=1.8と設定したが、再現解析では、多層地盤(8層)に変更し、動的コーン貫入試験結果の平均値と圧密試験結果を基に解析物性値を設定した。原地盤の解析物性値をTable 1に示す。また、格子状補強棒および碎石の解析物性値をTable 2に示す。動的コーン貫入試験結果が得られていない5m以深(層8)については、その性状に鑑み、上層(層7)と同様の値を使用した。碎石は圧密試験、

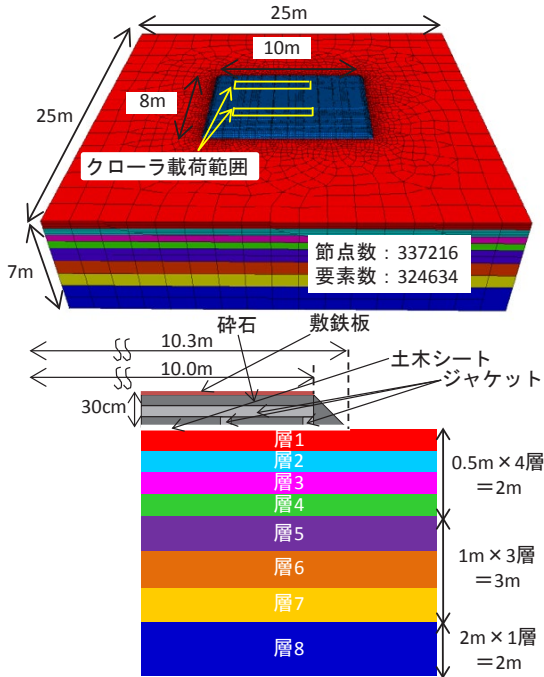


Fig.5 三次元解析メッシュ
(Three-Dimensional Analysis Mesh)

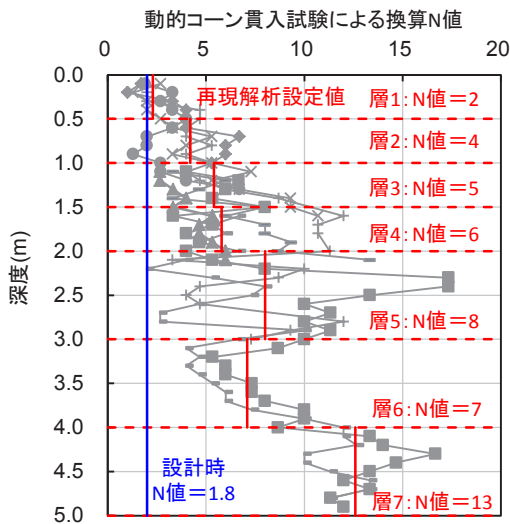


Fig.6 動的コーン貫入試験結果
(Dynamic Cone Penetration Test Results)

格子状補強棒は現地から回収した供試体の曲げ試験結果から入力値を評価した。さらに、土木シートの解析物性値は引張試験から設定した。ここでは、紙面の都合上、割愛する。荷重は、揚重作業において最も大きく偏心した接地圧分布を砕石表面に入力した。解析プログラムは、Itasca社が開発した有限差分法解析プログラムであるFLAC3Dを用いた。

2. 解析結果

(1) 総沈下量

クレーン作業前から揚重作業時までの解析による総沈下量の平面的な分布を Fig.7 に示す。また、計測断面の解析結果を Fig.8 中に示す。解析から最大 4.5cm 程度の総沈下量が得られ、クレーン作業における安全上の目安⁶⁾である 5cm を下回ることから、解析的に安全性を確認することができた。

(2) 揚重作業時の沈下量増分

揚重作業前後の水準測量から求めた揚重作業による沈下量増分の実測値と解析値を Fig.8 に併記した。各測点において、沈下量増分はほぼ同程度であり、沈下モードについても概ね一致していることから、今回実施した解析は、現地での計測結果を精度良く再現できたと判断できる。

IV. 簡易設計ノモグラム

当工法の設計では、現地の条件に加え想定される荷重条件に応じて、沈下量を予測する必要がある。詳細な沈下量予測には、三次元数値解析が必要であるが、当工法の適用性の概略判断(予備検討)を行うため、前述の現地計測結果の再現解析と同様の手法を用いて、地盤条件と荷重条件、格子間隔

Table 2 原地盤の解析物性値
(Analysis Parameters of Lattice Frame Reinforcement and Rubble)

格子状補強棒			砕石	
内部摩擦角 ϕ (°)	46		降伏応力 p_c (kN/m ²)	177
粘着力 c (kN/m ²)	初期	200	圧縮指数 λ	0.031
	$\epsilon=0.003$	300	膨潤指数 κ	0.0087
	$\epsilon=0.01$	400	限界状態指数 M	1.49
引張強度 (kN/m ²)	1.0e7		比体積 v	1.39
変形係数 E (kN/m ²)	716978			
ポアソン比 ν	0.2			

Table 1 原地盤の解析物性値
(Analysis Parameters of the Ground)

層No.	構成則	降伏応力 p_c (kN/m ²)	限界状態指数 M	せん断剛性 G (kN/m ²)	体積弾性剛性 K (kN/m ²)	比体積 v	膨潤指数 κ	圧縮指数 λ
1	修正 Cam-Clay	37.5	0.79	500	2333	1.82	0.0046	0.087
2		75.0	0.89	1000	4667			
3		93.8	0.93	1250	5833			
4		112.5	0.96	1500	7000			
5		150.0	1.02	2000	9333			
6		131.3	0.99	1750	8167			
7		243.8	1.15	3250	15167			
8		243.8	1.15	3250	15167			

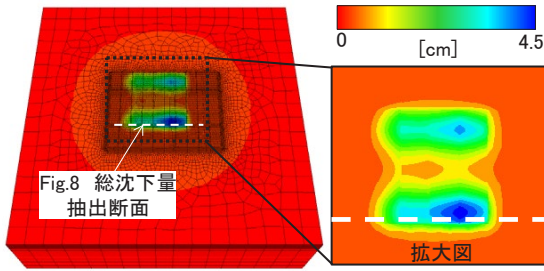


Fig.7 総沈下量分布
(Distribution of Settlement)

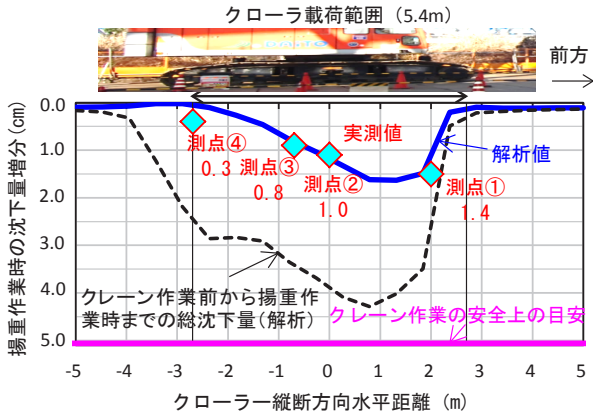


Fig.8 再現解析結果
(Reproduction Analysis Results)

をパラメータとした解析を実施し、格子状補強シートの簡易設計ノモグラムを作成した。

1. 解析方法

設計ノモグラム作成に用いた三次元解析メッシュを Fig.9 に示す。解析対象領域は中央部にクレーン荷重を配置した 40m×40m のエリアとしたが、解析メッシュは、対称性を考慮し、対象領域の 4 分の 1 を切り出した。Table 3 に解析ケースを示す。地盤は深度方向に N 値一定の 1 様地盤とした。地盤 N 値 4 ケースに対し、90t、150t および 350t クローラクレーンの重機荷重を想定し、それぞれのケースで Fig.9 に示すクローラ接地領域に 1 様に鉛直荷重を段階的に作用させた。軟弱地盤の層厚は安全側を考慮して 10m とし、格子間隔は 1m×2m と 2m×2m を基本としたが、層厚の違いや格子間隔の違いによる影響を評価するため、90t クレーンのみ層厚 3m と 1m のケースを追加した。地盤の解析物性値を Table 4 に示す。地盤の構成則には修正 Cam-Clay モデルを使用し、降伏応力 P_c 、体積剛性 K およびせん断剛性 G には N 値から得られる換算値 γ を用い、排水条件とした。また、格子状補強枠と砕石には、Table 2 で示した値を使用した。

2. 解析結果

N 値=5 の地盤上に敷鉄板のみを設置した場合 (Case0-2) と 2m×2m の格子状補強シートを設置した (Case3-4) 場合について、350t クレーンによる接地圧を 95kPa とした際の地

盤沈下量分布を Fig.10 に示す。格子状補強シートによる補強効果が発揮され、格子状補強シートを設置した方が敷鉄板のみを設置した場合よりも地盤の沈下量が小さいことが確認できる。

格子間隔 2m×2m における 90t クレーン接地圧とクレーン荷重による最大沈下量の関係を Fig.11 に示す。地盤の N 値が大きい程、クレーンの沈下量は小さいことが確認できる。また、90t クレーンよりも 350t クレーンの方が同一接地圧に対するクレーンの沈下量は大きい。これはクローラ接地領域が大きい 350t クレーンの方が、接地圧が地盤内に広く分布するためである。さらに、敷鉄板のみの場合よりも当工法を適用したケースでクレーン沈下量が小さく、格子状補強シ

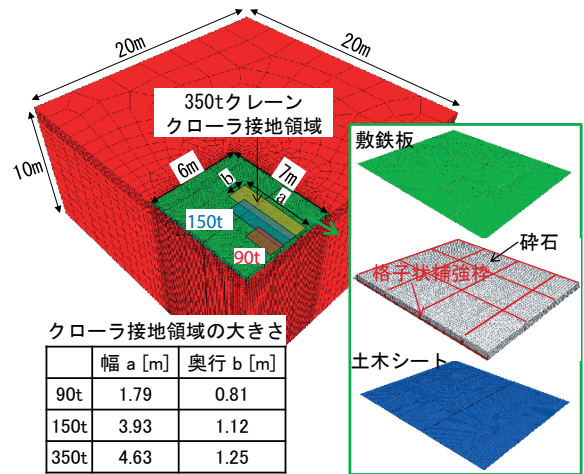


Fig.9 三次元解析メッシュ
(Three-Dimensional Analysis Mesh)

Table 3 解析ケース
(Analysis Cases)

ケース	層厚(m)	格子間隔	クレーン	地盤N値
1	10	無	90t	5
2			350t	5
3		2m×2m	90t	1
4				2
5				3
6				5
7		1		
8		2		
9		3		
10		5		
11		2m×2m	150t	1
12				2
13				3
14				5
15		1		
16		2		
17		3		
18		5		
19		1		
20		2m×2m	350t	2
21				3
22				5
23				1
24		2		
25		3		
26		5		

Table 4 地盤の解析物性値
(Analysis Parameters of the Ground)

N値	構成則	降伏応力 p_c (kN/m ²)	限界状態指数M	せん断剛性G(kN/m ²)	体積弾性剛性K(kN/m ²)	比体積 v	膨潤指数 k	圧縮指数 λ
1	修正 Cam-Clay	18.75	1.20	263	686	2.29	0.014	0.14
2		37.5		526	1373			
3		56.3		789	2059			
5		93.8		1316	3431			

トによる表層改良効果が明確に現れている。

クレーン最大沈下量を安全上の上限値の目安⁶⁾とされている5cmとした場合の許容接地圧と地盤N値の関係(簡易設計ノモグラム)をFig.12に示す。同図は、各種クローラクレーンの自重による接地圧も示している。軟弱地盤の層厚が10mである場合、格子状補強シートにより、90tクレーンであればN値2以上、150tクレーンであればN値5以上の軟弱地盤において安全上の上限とされる沈下量以下に緩和できる可能性がある。ただし、350tのクローラクレーンは地盤N値が5より小さい場合、沈下量を5cm以下とすることが難しい。なお、軟弱層厚が1mの場合、90tクレーンであればN値1以上で設置可能となる。今回の解析では、軟弱層厚が薄いケースは90tクレーンのみで実施したが、大型クレーンにおいても同様に軟弱層厚が薄い場合、当工法を適用することでクレーンを設置できる可能性がある。また、各大きさのクレーンにおいて、格子間隔をパラメータとして解析を実施したが、許容接地圧に顕著な差異は認められなかった。なお、当工法と碎石層を併用した鉄道や道路の路床・路盤では、 K_{30} 値やCBR値に格子間隔の影響が明確に表れている⁸⁾。

3. 簡易設計ノモグラムを用いた設計フロー

簡易設計ノモグラムを用いた設計フローをFig.13に示す。対象地盤の層厚およびN値、クレーン仕様を確認した後に、簡易設計ノモグラムを用いて許容接地圧 σ_a を推定し、施工時に用いるクレーン作業時の接地圧 σ_d を比較する。その結果、 $\sigma_a > \sigma_d$ の場合に当工法を適用可能となる。一方、 $\sigma_a < \sigma_d$ の場合、簡易設計ノモグラムからは適用不可となる。しかし、前述したように簡易設計ノモグラムは、安全側を考慮して、軟弱地盤層厚を10mとして作成しており、より詳細な検討を行う場合は、現地の土層構成を反映した三次元数値解析を実施する必要がある。

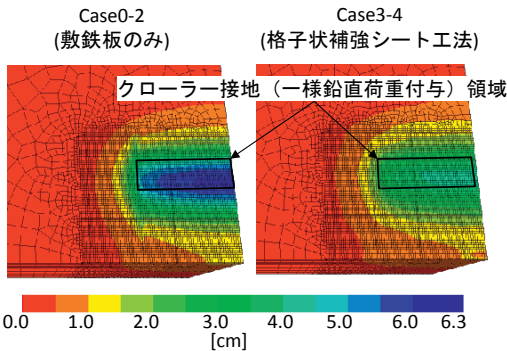


Fig.10 350tクレーンの接地圧95kPa時の沈下量分布
(Distribution of Settlement)

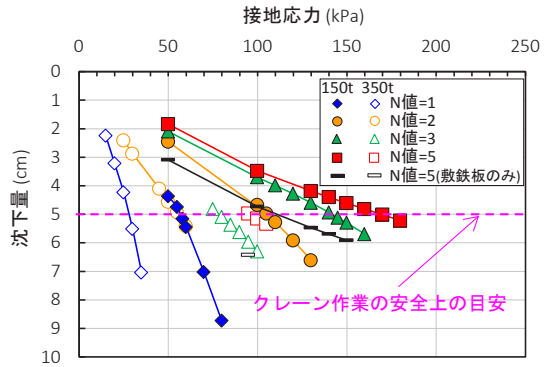


Fig.11 クレーン接地圧と沈下量の関係
(Relations of Grounding Pressure and the Subsidence Level)

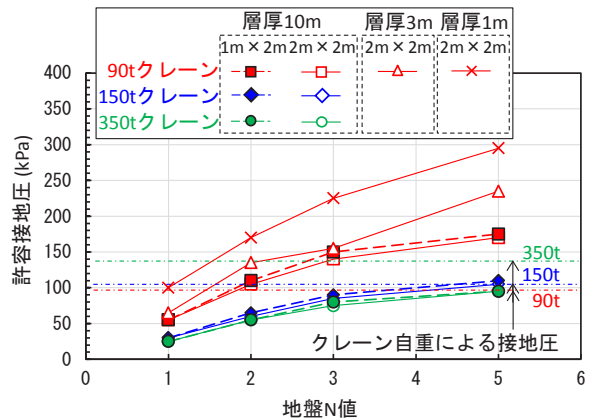


Fig.12 簡易設計ノモグラム
(Simple Design Nomogram)

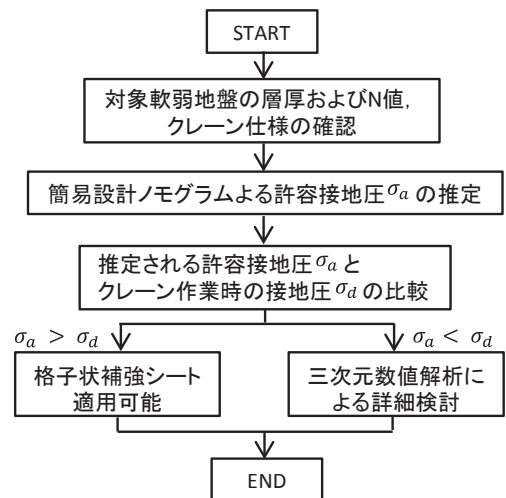


Fig.13 設計フロー
(Design Flow)

V. おわりに

今回、当工法を鉄道橋梁改修工事における、クレーン基礎地盤の支持力増強対策へ適用した際に、クレーン揚重作業時の沈下量を計測し、三次元有限差分法解析を用いて現地計測の再現解析を実施した。その結果、揚重作業時の計測値と沈下モードおよび沈下量は概ね一致し、解析におけるモデル化手法の妥当性を確認した。また、揚重作業時の最大沈下量は4.5cm程度であり、クレーン作業における安全上の目安⁶⁾である5cmを下回っており、作業時の安全性を解析的に確認できた。

さらに、同モデル化手法を用いて、地盤条件と荷重条件、格子間隔をパラメータとした解析を実施し、当工法の簡易設計ノモグラムとこれを用いた設計フローを作成した。

今後は、クレーン足場の支持力対策として当工法の施工実績を積み重ねて簡易設計ノモグラムの信頼性を高めるとともに、施工性の良さや撤去の容易さ、環境負荷の低さなどのメリットを活かし、仮設道路の路床改良⁹⁾や仮設軌道路盤の構築などへの適用件数も増やしていきたい。

なお、当工法は当社と芦森工業株式会社が共同開発したものであり、平成29年度地盤工学会関東支部賞を受賞したことを付記する。

謝 辞

三次元有限差分解析を実施するに当たり、土木設計本部大野進太郎グループ長、宇津野衛設計員にご協力頂いたことに感謝する。

参考文献

- 1) 北本幸義ら；筒状織物やホース状材料等（ジャケット）の地盤工学分野への適用について，ジオシンセティックス論文集，Vol.18，2003.12，pp.225-230.
- 2) 北本幸義ら；ジャケット工法について，ジオシンセティックス技術情報，Vol.20，No.3，2004.11，pp.18-23.
- 3) Yoshida et al.；Effects of surface soil stabilization by a lattice-frame-reinforced sheet, Proc. 8th International Conference on Geosynthetics, 2006.9, pp.100-106.
- 4) 中島悠介ら；格子状補強シートによる90tクローラクレーンの沈下対策（その2）施工実績と対策効果の確認，土木学会第71回年次学術講演会，2016.8，pp.1277-1278.
- 5) 小原隆志ら；格子状補強シートによる90tクローラクレーンの沈下対策（その1）3次元FEM解析による補強効果の検討，土木学会第71回年次学術講演会，2016.8，pp.1275-1276.
- 6) 日本建設機械化協会；移動式クレーン・杭打機等の支持地盤養生マニュアル，2000.
- 7) 地盤工学会；軟弱地盤の調査・設計・施工法，1966，pp.93-107.
- 8) 岡本道孝ら；格子状補強枠を有したシート材による軌道路盤改良効果，第42回地盤工学研究発表会，2007.7，pp.1595-1596.
- 9) 岡村昭彦ら；格子ジャケットを用いたシート工法による軟弱地盤上の仮設道路施工，ジオシンセティックス論文集，Vol.23，2008，pp.107-112.

Analytical Study on the Surface Layer Improvement Effect of Crane-supported Ground with Lattice Frame Reinforcement Sheet

Keisuke Tanaka, Shion Nakamoto, Teru Yoshida, Michitaka Okamoto, Takashi Obara¹⁾ and Yusuke Nakajima²⁾

The lattice frame reinforcement sheet is a technique used to reinforce supporting force by combining the reinforcement frame which is allowed to solidify after injecting mortar into the cylindrical fiber of the lattice and the surface layer stability sheet.

We used this construction method to repair a rail road bridge by strengthening the supporting force of the foundation ground of the crane and measured the settlement during crane work. In addition, we developed a theoretical model by three-dimensional finite difference analysis.

As a result, the settlement and settlement mode measured in the field and calculated by analysis were generally in agreement, confirming the validity of the numerical analysis modeling and the stability of crane work. Using the same method, we developed a numerical analysis that used the ground condition, load condition and lattice interval as parameters and created a simple design nomogram of this construction method.