Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

超高含水軟弱粘土地盤におけるジオグリッド 敷設表層覆土工事に伴う地盤の変形挙動

河，恩勁
許，晋碩
澁谷，啓
伊藤，修二
藤原，照幸

(Citation)
ジオシンセティックス論文集,28:333-338

(Issue Date)
2013-12

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003304

ジオシンセティックス論文集
第28巻(2013.12)

超高含水軟弱粘土地盤におけるジオグリッド敷設表層覆土工事に伴う地盤の変形挙動

河恩勁[1]・許晋碩[2]・澁谷啓[3]・伊藤修二[4]・藤原照幸[5]

神戸空港の北西部にある超高含水軟弱粘土地盤の土地化において，粘土地盤上にジオグリッドを敷設して施工機械のトラフィカビリティーを確保した上で表土を撒き出す施工法が採用された．本施工に先立って，この工法の詳細を検討するために試験施工を実施した．本論文では，ひずみゲージを貼付けた観測用のジオグリッドシートを用いた動態観測施工における実地盤挙動を2次元FEM解析でシミュレーションした結果を示している．数値解析では，地盤−ジオグリッドの相互作用を考慮するために，ジオグリッドの室内引抜き試験より求めた摩擦特性を反映したインターフェイス要素を用いて，地盤−ジオグリッド系をモデル化している．一連の現場施工，室内試験および数値解析より，当該地のジオグリッド敷設表層覆土施工における地盤変形挙動を適切に評価できた．

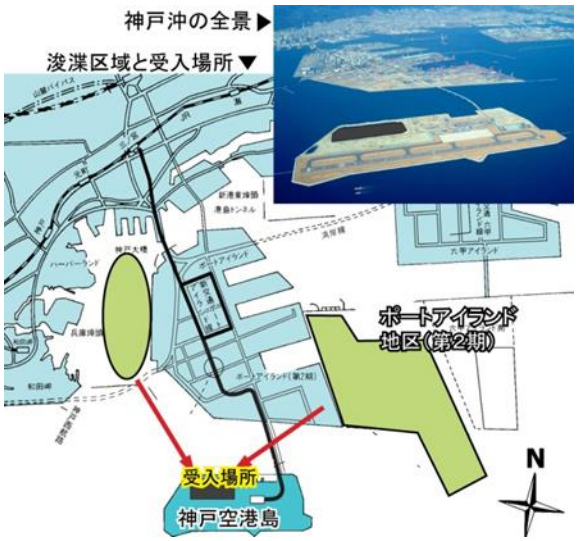
キーワード：表層覆土施工，ジオグリッド，引抜き試験，インターフェイス

１．はじめに

神戸空港北西区域では，約２年前に神戸港内の航路・泊地を維持するための浚渫工事により発生した高含水比の粘土を用いて凹地を埋立てた（**図−1** 参照）．当該区域の土地利用に向けた覆土を行うためには，工事の初期において施工機械の走行性を確保しなければならないため，ジオグリッドを用いた表層覆土工法を採用した．

ここで，地盤−ジオグリッド系の挙動の実際をできるだけ忠実に表現するために，地盤とジオグリッドとの間にインターフェイス要素を設けた FEM 数値解析を実施した．ここで，FEM 数値解析で地盤変形を正しく予測するためには，覆土材料と粘性土地盤の間に挟んだジオグリッドの引抜き抵抗力を把握しなければならない．

本論文では，軟弱粘性土地盤と覆土材料として用いた鉄鋼副産物に挟まれたジオグリッドの引抜き抵抗を測定するために室内引抜き試験を実施し，インターフェイスパラメーターに反映した．そして，地盤変形の予測結果を現場の計測結果と比較することでジオグリッドを用いた表層覆土施工におけるジオグリッドの敷設効果を評価した．



図−1　神戸空港島の浚渫粘土埋立区域

２．FEM数値解析におけるインターフェイス

通常の数値解析では，インターフェイスを考慮するのが困難であるため，インターフェイス挙動を考慮しない場合もある．今回の数値解析では，インターフェイス挙

[1]学生会員，神戸大学大学院工学研究科　市民工学専攻，博士課程後期課程(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
[2]個人会員，株式会社ESCOコンサルタント，附設技術研究所(元神戸大学大学院生)(〒431-060 韓国京畿道安養市東安区冠陽洞)
[3]個人会員，神戸大学大学院工学研究科　市民工学専攻，教授(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
[4]個人会員，前田工繊株式会社，営業推進部，(〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜2-3-6 北浜山本ビル2F)
[5]個人会員，一般財団法人地域地盤環境研究所　(〒550-0012 大阪府大阪市西区立売堀4-3–2）．

動を表現することが可能な汎用プログラム PLAXIS を用いた．このプログラムにおけるインターフェイス係数は，物理的にはジオグリッドと地盤の相互作用をモデリングすること [1)2)3)]に他ならない．これは，実施工で発生するジオグリッドのすべり，すなわち，軟弱粘土地盤上にジオグリッド敷設後に，覆土材料および施工機械が上載することにより生じるジオグリッドのスリップを表現することである．

今回の数値解析におけるインターフェイスパラメーターは，地盤と構造の相互作用を界面における土の強度定数（内部摩擦角，粘着力）と界面強度（摩擦抵抗力，粘着力）に関連する強度低減係数（R_{inter}）として表現している．地盤と構造のモデリングにおけるインターフェイス要素として弾塑性モデルを使用し，クーロンの基準を採用して，微小な変位がインターフェイス内で発生する場合には弾性挙動，連続的に発生するすべりの場合には塑性挙動を示す．

弾性挙動でのせん断応力（τ）は次の式でとなる．

$$|\tau| < \sigma_n \tan\varphi_i + c_i \qquad (1)$$

一方，塑性挙動でのせん断応力（τ）は次の式で示．

$$|\tau| = \sigma_n \tan\varphi_i + c_i \qquad (2)$$

$$c_i = R_{inter}\, c_{soil} \qquad (3)$$

$$\tan\varphi_i = R_{inter} \tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil} \qquad (4)$$

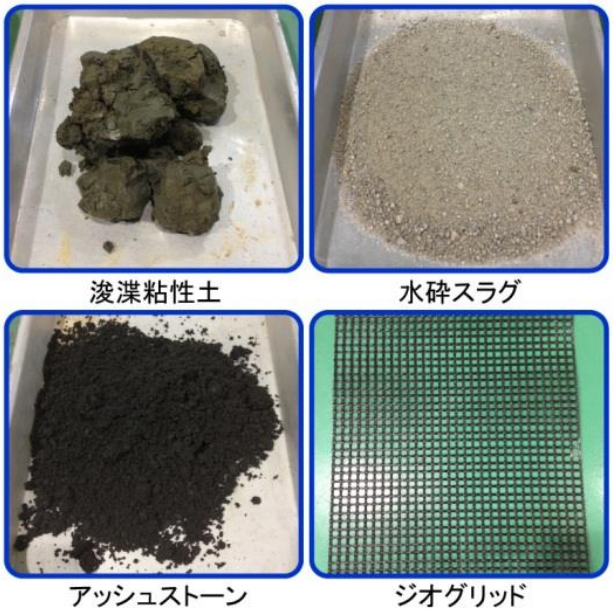
$\psi_i = 0°$では

$$R_{inter} < 1,\ \psi_i = \psi_{soil} \qquad (5)$$

ここで φ_i と c_i はインターフェイスの内部摩擦角と粘着力，ψ はダイラタンシー角，σ_n と τ は垂直応力とせん断応力である．インターフェイスの物理特性は，地盤強度条件と摩擦定数（引抜き定数）を式（1）～（5）のような法則に適用することで表現している．ここで，数値解析に反映するインターフェイスパラメーターを得るため，現場試料を用いた室内引抜き試験を実施した．

表-1　引抜き試験に用いた材料の物理特性

区分		神戸湾の浚渫粘土	水砕スラグ	アッシュストーン	ジオグリッド
分類		粘土	砂礫	礫質砂	ポリエステル
土粒子密度 ρ_s(kN/m^3)		25.51	27.08	23.45	引抜き強さ (kN/m) 80×80
含水比(%)		80.3	9.0	60.8	
コンシステンシー	液性限界 w_L(%)	121.0	NP	NP	
	塑性限界 w_p(%)	35.85			
乾燥密度 ρ_d((kN/m^3)		6.18	12.36	8.14	
粗骨材の吸水率(%)		-	-	53.4	伸び率 (%以下) 22×22
細骨材の吸水率(%)		-	3.05	52.99	
最大粒径(mm)		0.08	2.36	25.4	
最大乾燥密度 ρ_{dmax}(kN/m^3)[4)]			11.48	10.01	(縦×横)
最適含水比 w_{opt}(%)[4)]			43.4	26.5	



３．引抜き試験

(1) 試験材料および引抜き試験の装置と方法

室内引抜き試験に用いた試料を**写真-1** に示す．試料は，現場の地表からブロックで採取した浚渫粘土および鉄鋼副産物である水砕スラグおよびアッシュストーンである．**表-1** に引抜き試験に用いた試料の物理特性を示す．浚渫粘土は含水比および液性限界がともに高い．水砕スラグは含水比が低く，本試験に用いた試料の平均乾燥密度 ρ_d は 12.36kN/m^{3}である．アッシュストーンの平均乾燥密度 ρ_d は 8.14 kN/m^{3}で，吸水率は 50%以上であり，水砕スラグと比較して軽質な材料であることがわかる．本試験に使用したジオグリッドは，高強力ポリエステル繊維を素材にしたメッシュ構造を有している．

図-2 は，用いた引抜き試験装置である．試験土槽は，縦 50cm・横 35cm・高さ 20cm で上下に分離されている．引抜き試験は，下箱に粘土を詰めた後，幅 30cm のジオグリッドを中央に敷設し，ジオグリッドの変位を測定するため**図-3 (b)** に示すように下箱の引抜き口から 10cm の間隔でステンレスワイヤーを取り付けて変位計につなげる．つぎに，上箱を取り付けて覆土材料を投入し，現場の状況を考慮してランマを用いて相対密度，約 80%で締固めた後，ふたを閉じる．引抜き速度 1mm/min(一定)でジオグリッドを引張り，引抜き口の引抜き変位が 10%に達した時点で試験を中止する．試験条件として，垂直圧を 10kPa から 100kPa まで 7 段階で変えた引抜き試験を実施した．

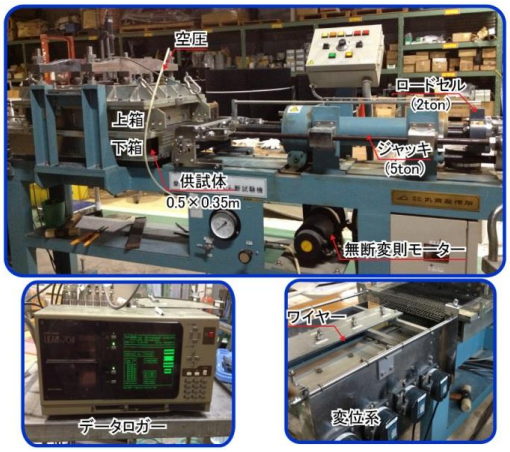


図-2　引抜き試験装置の全景

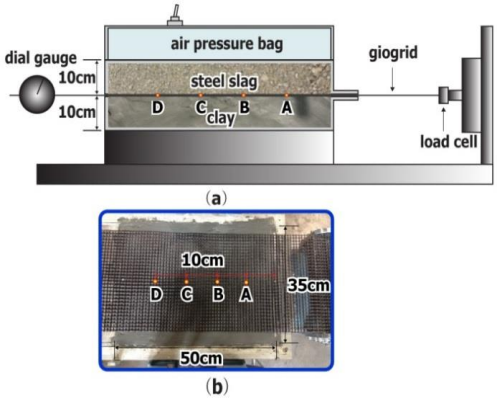
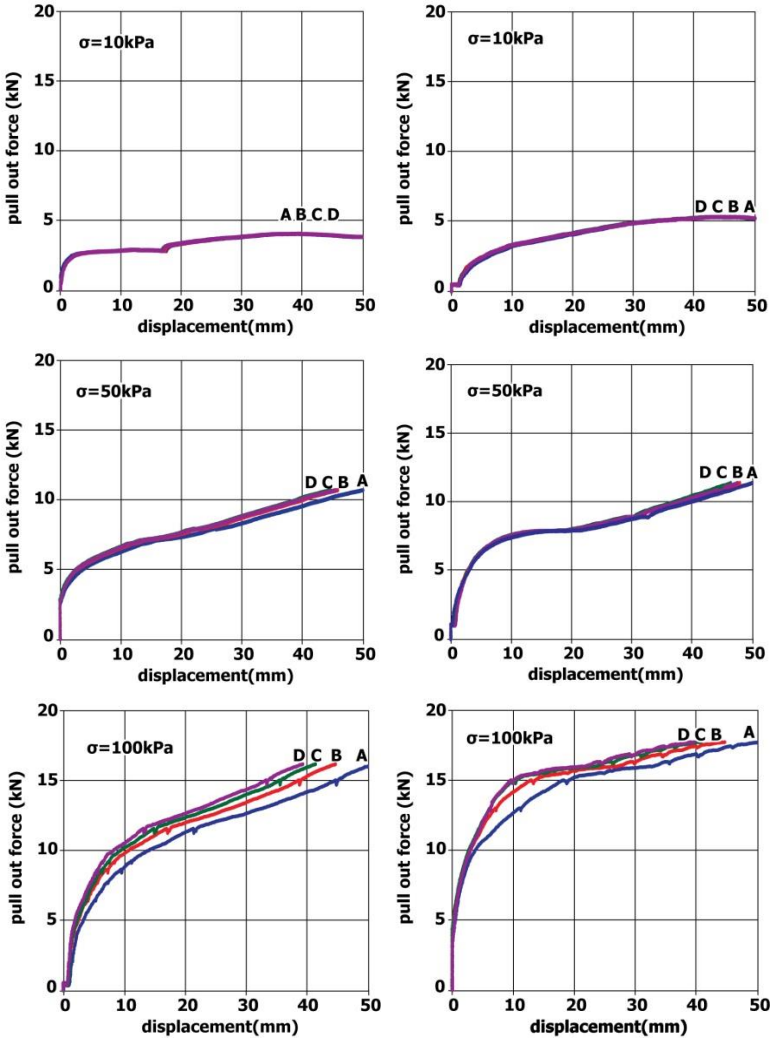


図-3　引抜き試験装置の全景と側断面図



(a) アッシュストーン　　(b) 水砕スラグ

図-4　測定点変位と引抜き力の測定

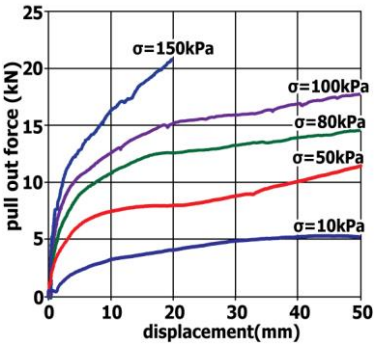


図-5　水砕スラグの測定地点 A の変位～引抜き力の関係

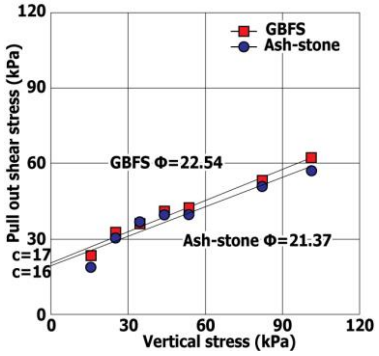


図-6　垂直応力～せん断応力の関係

(2) 試験結果

図-4 は，アッシュストーンおよび水砕スラグの拘束圧 10，50，100kPa における引抜き力をジオグリッドの各測定点の変位に対してプロットしている． 拘束圧 10kPa では，各測定点の変位が等しく，ジオグリッドが伸び縮みせずに引き抜かれたものと考えられる．一方，拘束圧が 50kPa になると各測定点の変位がやや異なっている傾向が認められる．拘束圧 100kPa では，この傾向がより顕在化し，ジオグリッドに伸びが生じ，引抜き口に近い程，伸びひずみが大きいことが分かる．このように高い拘束圧になるとジオグリッド自体が伸びながら引き抜かれる挙動特性[5]が再確認できた．

図-5 は，水砕スラグを用いた場合のジオグリッドの引抜き変位量と引抜き力の関係をプロットしたものである．引抜き力は引抜き変位が増加するに伴い大きくなり，拘束圧が大きい程大きくなる．やがて，引抜き力がジオグリッドの引張り強度に達すると破断する．図-6 は，引抜き試験結果を全面積法[6]より求めた引抜きせん断応力と垂直応力の関係を示す．引抜きせん断応力は，拘束圧が大きくなるにつれて漸増する傾向が認められる．水砕スラグのせん断抵抗角は 22.5°，アッシュスートンのせん断抵抗角は 21.4°で，土中引抜き試験結果から得られた見かけの粘着力 c_i および引抜き抵抗角 φ_i は水砕スラグがアッシュスートンに比べて若干大きいが，ほぼ同程度の値であった．

水砕スラグおよびアッシュスートン[7]の強度定数（粘

表-2　2次元解析に用いた構成モデルと地盤物性値

区分	浚渫粘性土				盛土	
	1次浚渫土(改良)	2次浚渫土(改良)	3次浚渫土(未改良)	3次浚渫土(乾燥部)	水砕スラグ	建設残土
構成モデル	Soft soil	Soft soil	Soft soil	Soft soil	M-C	M-C
間隙比	1.56	2.19	3.51	2.34		
単位体積重量 (kN/m^3)	16.17	15.01	13.47	14.72	13.5	18
内部摩擦角	-	-	-	-	36.7	35
粘着力	32	18	2.46	10	21	2
圧縮指数（λ*）	0.117	0.161	0.142	0.145	-	-
膨張指数（κ*）	0.023	0.032	0.028	0.029	-	-
弾性係数（kN/m^2）	-	-	-		100000	50000
Poisson`s ratio（υ）	-	-	-		0.3	0.3
排水条件	排水	排水	非排水	非排水	排水	排水
強度低減係数(R)		-	-	0.9	0.6	0.6
ジオグリッド：Elastic（構成モデル），EA=56kN/m						

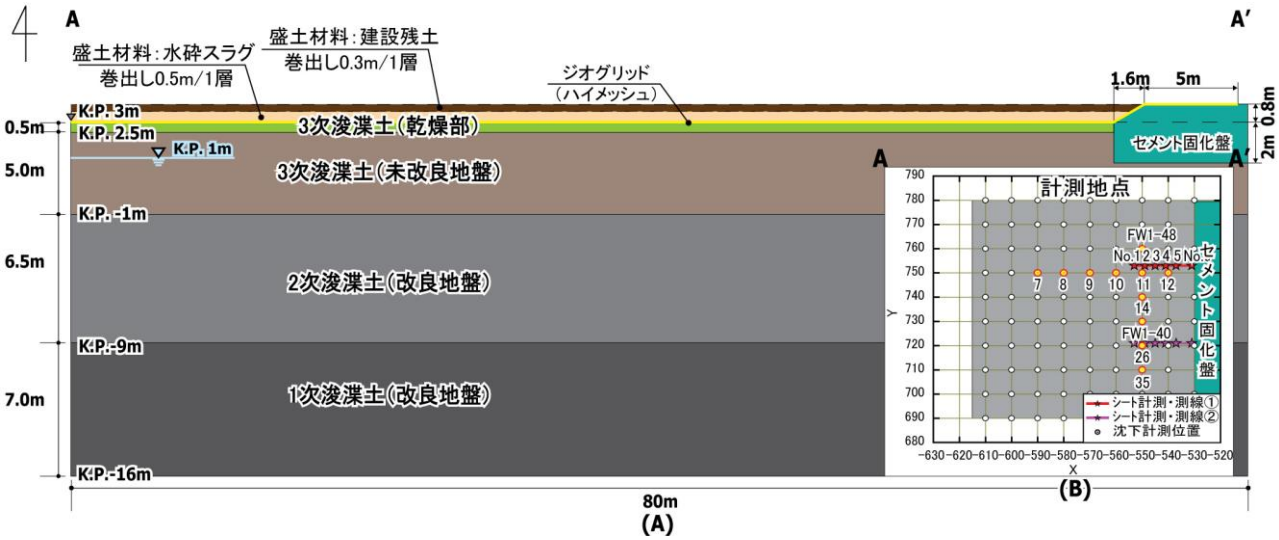


図-7　計測箇所 A-A'断面の2次元数値解析モデル化

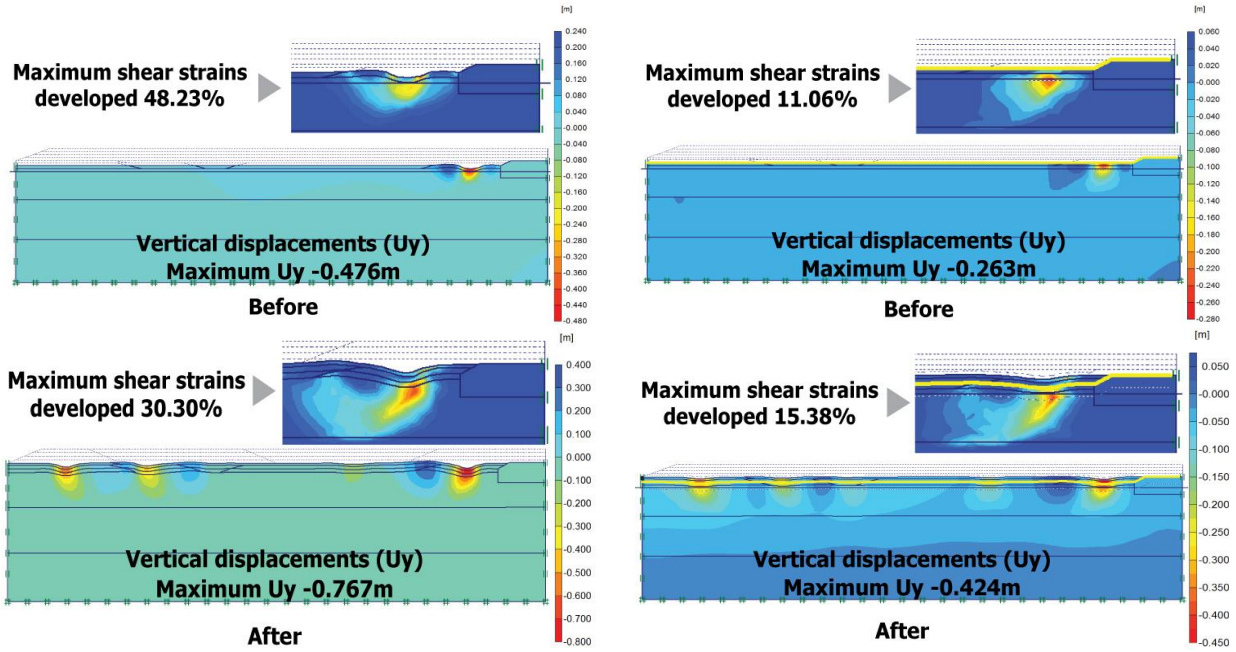
着力 c_{soil}，内部摩擦角 σ_{soil}）と引抜き試験から得た引抜き強度定数(図-6 の粘着力 c_i, 内部摩擦角 σ_i)を式（2）～（5）の関係から求めた強度低減係数 R_{inter} は約 0.6 であり，引抜き試験結果からインターフェイス挙動を定量的に評価できた．

4．数値解析による検討

表層覆土施工による軟弱地盤の変形挙動を予測するため FEM 数値解析を実施することにした．ジオグリッドの敷設による施工機械である 2ton ダンプローラー（最低地上高 32cm）の走行性確保の確認をするためジオグリッドのインターフェイスパラメーター有無による地盤変形予測に与える影響を確認するため，インターフェイス有無に伴う地盤変形に対して検討した．またそれらの予測結果を用いて原位置の計測結果と比較することで，軟弱地盤上にジオグリッドを敷設することに伴う地盤改良効果を確認する．

(1)解析モデルおよび解析条件

解析範囲を，図-7(B)に示す計測箇所 A-A'断面[8]（ひずみゲージおよび沈下の計測地点）に限定した．図-7(A)は，A-A'の部分を 2 次元数値解析でモデリングしている．図-7 に示すように，神戸空港島の土層は PBD で改良された 1 次および 2 次浚渫粘土層の上に，地盤改良後に受け入れた高含水比状態にある 3 次浚渫粘土層が存在する．3 次浚渫粘土層上部は約 0.5m が乾燥状態にあったため，最上部は乾燥部と見なした．実施工では浚渫土の上部に水砕スラグ 50cm を覆土した後，建設残土を 0.3m 施工したため，数値解析での覆土条件も同様に設定した．また，対象地盤の浚渫粘土層の埋立履歴が複雑であるため，平成 23 年～24 年にボーリングしたサンプリング試料による室内試験結果[8]を用いて地盤物性値を設定した．



(a) ケース1：ジオグリッド無　　(b) ケース2：ジオグリッド有

図-8 施工前後の施工機械による全体鉛直沈下量

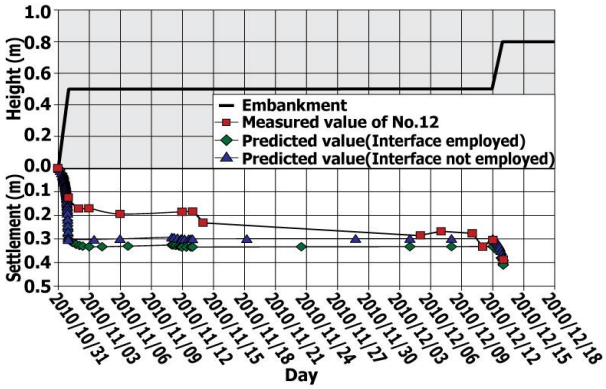


図-9 覆土施工による地盤沈下量
(規則地点 12)

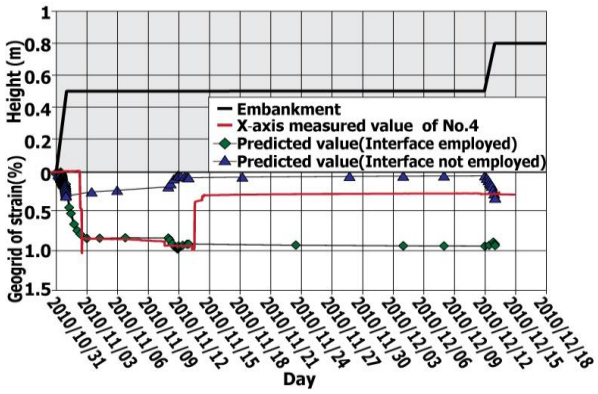


図-10 覆土施工によるジオグリッドひずみ
(ひずみゲージ No.4)

表-2 に数値解析に用いた地盤物性値を示す．地盤物性値を表層覆土施工が行われる直前の状態を再現するように，室内試験結果から得られた値よりも僅かに小さな値に設定した．用いた構成モデルは，浚渫粘性土は修正 Cam-Clay モデル，水砕スラグおよび建設残土は Mohr-Coulomb モデルを採用し，浚渫粘土の表層のジオグリッドは「ジオグリッド Element」でモデリングした．ジオグリッド Element は，ファブリックのグリッドまたはシートを表す柔軟な弾性要素で表し，ジオグリッドの製造時の固有な単位幅当たりの力の単位で弾性軸方向の剛性で設定する．

$$EA = F/(\Delta L/L) \qquad (6)$$

ここで F：単位幅あたりの軸力の比，L：長さ，ΔL ：軸ひずみである．

なお，FEM 数値解析に反映した施工手順は実際の施工履歴をできるだけ厳密に再現した．

(2) 解析結果および考察

図-8 は，ジオグリッドの敷設の有無による地盤変形の予測結果である．解析では，現場で使用した 2ton ダンプローラーを対象（最低地上高 32cm）とした．ケース 1 では，ジオグリッドを敷設せずに施工機械が浚渫粘土上を走行した場合と覆土と伴い走行した結果を示す．ジオグリッド敷設せず施工機械が走行することで全体の鉛直全体変位は 47.6cm，せん断変形は 48.23%が発生した．また，覆土施工中の施工機械により，鉛直変位は 76.7cm，せん断変形は 30.3%生じていることでジオグリッドを敷設しないことで過剰な変形が生じることが確認できる．それに比べ，ジオグリッドを敷設した場合の覆土前の鉛直変位は 26.3cm，せん断変形は 11.06%であり，覆土施工中の鉛直変位は 48.9cm，せん断変形は 18.32%と小さくなっている．ジオグリッドを敷設することで施工機械の走行性が確保されたものと考えられる．

図-9にインターフェイスの有無による地盤変形予測結果と計測結果を比較している．計測された変位と予測し

た変位は多少異なるが，沈下傾向が似ていることが分かる．計測結果と予測結果に変位量の差が生じたのは，計測地盤が軟弱であるため，計測地点周辺の覆土施工により生じた側方流動の影響が大きいものと考えられる．インターフェイス有無による全体の変位量は，同じ物性値を用いて数値解析を実施しているのにも関わらず異なる変位量を示した．これは，ジオグリッドのインターフェイス設定により，ジオグリッドと地盤にスリップが発生し，インターフェイスを設定していない場合と比べてより大きな沈下が生じたと考えられる．

一方，ジオグリッドの伸び（図-10参照）は，インターフェイスを反映した場合が計測結果と同様な伸びを示している．一方，インターフェイスを反映してない場合は，ジオグリッドが殆ど伸びてないことが確認できる．これは，インターフェイスパラメーターを設定しない場合，ジオグリッドは一つの地盤層として変形し，ジオグリッドの表面では摩擦抵抗力が働かなかったためと考えられる．インターフェイスパラメーターを設定することで，地盤と覆土材料に挟まれたジオグリッドが覆土材料と施工機械の荷重を受けて，滑りながら沈下して行くため，より大きい地盤変形およびより大きなジオグリッドの伸びひずみが生じたものと考えられる．

５．おわりに

ジオグリッドの引抜き試験結果を反映した2次元変形解析から得られた結論は以下の通りである．

1) 土中引抜き試験結果から，水砕スラグおよびアッシュスートンに発生する引抜き抵抗力はほぼ同じ程度であり，引抜き抵抗力と土の強度定数から求めた強度低減係数は約0.6であった．
2) 引抜き試験から得られた結果を用いて，FEM数値解析を実施することで，ジオグリッドのスリップ現象をシミュレーションできた．一方，インターフェイスパラメーターの設定の有無が地盤変形量およびジオグリッドのひずみに影響を与えることがわかった．
3) ジオグリッドを敷設することで，過大な沈下を防ぎ施工機械の走行性が確保できた．

謝辞： 試験施工にあたり，神戸市みなと総局および大林組（施工者）から協力を得た．

参考文献

1) Hird, C.C. and Kwok, C.M.: Finite element studies of interface behavior in reinforced embankments on soft grounds. Computers and Geotechnics, 8, pp. 111-131,1989.
2) Smith I.M. : Programming the finite element method with application to geomechanics. John Wiley & Sons, Chichester,1982.
3) Brinkgreve, R.B.J. and Bakker, H.L.: Non-linear finite element analysis of safetyfactors. 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Australia, pp.1117-1122, 1991.
4) 白濟民，許晋碩，鄭珉守，澁谷啓：鉄鋼副産物の締固め及びせん断特性に関する実験的研究，第46回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.505-507，2011.
5) 落合英俊，大谷順，林重徳，平井貴雄：ジオグリッド引抜き試験結果の定量的評価，第6回地盤改良シンポジウム，pp17-24，2004.
6) ジオグリッド研究会：「ジオグリッド工法」ガイドライン（第1分冊），pp108～110，1990.
7) Jinsuk Hur, Jemin Baek, Minsu Jung, Satoru Shibuya: Engineering properties of the mixture of steel slag with fine grained soil in use for fill material, Proceedings of the 4th Japan-Korea Geotechnical Engineering Workshop, pp.139-144, 2011.
8) 伊藤修二，澁谷啓，河恩勁，藤原照幸: ジオグリッドを用いた表層覆土施工における原位置・室内試験と現場計測結果, 第28回ジオシンセティックスシンポジウム,投稿中

GROUND BEHAVIOR OF EXTREMELY SOFT CLAY SUBJECTED TO SOIL SPREADING USING GEOGIRD SHEET

Eun-kyeng HA, Jin-suk HUR, Satoru SHIBUYA, Shyunji ITO AND Teruyuki HUJIWARA

Extremely soft clay ground formed by dredging is located in North-West part of Kobe Airport Island. In an attempt to make the ground for land use in near future, soil spreading work using geogrid sheet was employed in order to acieve the prescribed trafficability of the spreading machine. Prior to the work, a trial work using fully instrumented geogrid sheet was carried out in order to examine the details of the construction scheme work. In this paper, the results of two-dimentional FE simulation considering soil-geogrid interaction are presented. In this analysis, an interface element reflecting properly the result of in-soil pull-out test of the geogrid was employed. Ground behavior of extremely soft clay ground in the event of soil spreading with geogrid sheet was successfully evaluated by 2D FE analysis.

KEYWORDS: Soft clay, numerical analysis, interface friction, spread sandy soil