ウレタンモデル地盤における直接基礎剛性と沈下量

福田光治¹・宇野誠²・西浦譲二²・西英典²・山崎智寛²・間昭徳³・島田豊⁴・

堀江信征⁴・佐藤雄太⁵・金子賢治⁵・熊谷浩二⁵

ジオセル構造の開発と設計条件を整理するためにウレタンによる地盤モデルと数種類の剛性と厚さが異なるジオテキスタイルを使用した基礎実験を行った。ウレタン地盤モデルのモデルとしての適切性を調べたあと、ジオテキスタイルで直接基礎を模擬し、敷設方法、重ね方などの効果を簡易な実験により確認した。着目した現象は最大変形量と沈下形状であり、ジオテキスタイルの剛性や重ね方による沈下性状への影響を調べた。さらにこの実験結果をジオセルの開発に発展させるために弾性論を使用してジオセルの剛性や構造を調べる目的で概略的な解析を行った。本論文では実験結果と解析結果を示す。さらにこうした実験結果を踏まえてジオセル構造の開発方向を展望する。

キーワード：直接基礎，支持力，沈下，ジオセル，敷設方法

1. まえがき

本研究はジオセル¹⁾を直接基礎に使用する場合の評価方法と設計手法を整理することを目的に実施したものである。直接基礎の沈下量は基礎の幅や厚さ、また剛性に影響されることが知られており、実験でも確認されている^{2),3)}。理論的には弾性論などにより研究されている⁴⁾。ジオセルを直接基礎に使用する場合も弾性論で示されている知見は役に立つ。文献2), 3)ではジオセルとジオグリッドの組み合わせ、またジオグリッドの剛性を変えて、その影響や効果が検討されている。しかしジオセルの基礎構造や材料特性も多様な方向が模索されているので、合理的で適切な方向性を追及することが求められる。

本論文ではウレタンモデルにより地盤をモデル化し、その上にジオテキスタイルでモデル化した剛性や組み合わせに着目した簡単なジオセル直接基礎を模した模型実験を行った結果を示すとともに、その結果に基づいてジオセルを用いた直接基礎の構造や適切な材料特性を設計論の立場から検討した結果を示す。

2. ウレタンモデル地盤の変形性

ウレタンモデル地盤は写真-1に示すように幅25cm、ウレタン厚さ14cm、奥行き2cmの小さなモデルである。ウレ

写真-1 ウレタン地盤モデル

タン一枚の厚さは1cmで、14枚重ねてモデル地盤とした。このウレタンモデル地盤の変形性を調べるために写真に示すように重量20gの3×4のナットを合計5ヶ段階載荷し、その最大の変形量に着目して式(1)～(4)により地盤や直接基礎の剛性を推定することにした。

$$w(0,0) = \frac{P\lambda}{2bk} \rho_1 \quad (1)$$

$$\lambda l = \left(\frac{kbl^4}{4E_b I} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

¹正会員，肥後地質調査，(〒861-0920 熊本市戸島西1丁目18-25)

²非会員，肥後地質調査，(〒861-0920 熊本市戸島西1丁目18-25)

³正会員，三菱樹脂，(〒103-0021 東京都中央区日本橋大石町1-2-2 三菱樹脂ビル)

⁴正会員，東京インキ，(〒114-0002 東京都北区王子1丁目12番4号 TIC 王子ビル)

⁵正会員，八戸工業大学土木建築工学科，(〒031-8501 青森県八戸市大字大開88-1)

図-1 段階载荷における表面沈下

図-2 ウレタンモデル地盤の剛性

$$k = \frac{\pi G_s}{b(1-\nu_s) \ln\left(\frac{l}{b}\right)} \quad (3)$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \quad (4)$$

ここに $w(0,0)$: 载荷版中央表面の沈下量, ν_s : 沈下量係数, P : 荷重, b : 奥行幅, l : 基礎幅, G_s : せん断係数, E_s : 弾性係数, ν_s : ポアソン比である。

段階载荷による载荷幅中央の沈下量を図-1 に示す。ナット 4 ケの载荷段階までは沈下量は荷重に比例する傾向を示している。しかし 5 ケ目のナットを载荷すると急激な沈下が得られた。载荷重を鉛直に保持する器具を設けていなかったため、偏芯载荷になったことが原因と考えられる。そこでウレタンモデル地盤の変形性として载荷重と沈下量が比例する部分から剛性を求めた。図-2 は基礎中央表面沈下と载荷重の関係を示している。全体の傾向を考慮し、かつ全体の実験結果と整合性を合わせるように近似化してウレタンモデル地盤の剛性を求めると

$$E_s = 7 \text{ kN/m}^2, \quad \nu_s = 0.5$$

が得られた。

写真-2 直接基礎モデル実験材料

3. ウレタン地盤モデルによる直接基礎モデルの剛性と沈下

ウレタン地盤モデルの実験結果を基準にして、その上に敷設される直接基礎の構造による表面沈下量の抑制効果を調べる。使用する材料は写真-2 および表-1 に示すように剛性や厚さが異なる 6 種類であり、一枚一枚を剛性が異なる直接基礎のモデルと考えた。材料 A は鉄、材料 B~D はゴム、材料 E はウレタン、材料 F は布である。まず各材料 1 枚を敷設した直接基礎による沈下量の抑制効果を調べる。次に複合基礎の効果を調べるために材料 F を最下端に敷設し、その上に材料 A~E を置いた基礎の実験を行う。さらに複合基礎の敷設方法を確認するために

表-1 直接基礎モデルの仕様

基礎モデル	材料	長さ cm	厚さ cm	幅 cm	重さ g	密度 g/cm ³	弾性係数 kN/m ²
A	鉄	7.5	0.2	2	21	7.00	2.0×10^8
B	ゴム	7.2	1	2	3	0.21	6.0×10^2
C	ゴム	6.8	0.5	2	2	0.29	6.0×10^2
D	ゴム	7.4	0.35	2	9	1.74	7.3×10^3
E	ウレタン	7.6	1	2	1	0.07	4.4×10^2
F	布	7.3	0.2	2	4	1.37	9.8×10^4

写真-3 直接基礎モデルAの沈下

写真-4 直接基礎Bモデル

写真-5 直接基礎Cモデル

写真-6 直接基礎Dモデル

写真-7 直接基礎Eモデル

写真-8 直接基礎Fモデル

材料Cを2枚使用し、その基礎に材料Fを敷設して材料Fの敷設位置の効果を調べる．表-1に示すように材料の長さ、幅は各材料類似している．しかし厚さと密度は異なる．この材料の違いは引張り試験結果の弾性係数に反映されており、剛性が異なる直接基礎のモデル化が可能と判断した．

ここで材料Aはコンクリートなど剛性が非常に大きい直接基礎を、材料B～Fはジオセル基礎構造を想定して小さい剛性の材料を選定した．

写真-3～9は載荷後の変形状態例を示している．この変形状態から中央に発生している最大沈下量を読み取り整理した．その最大表面沈下量を示したのが図-3～8である．

図-3は直接基礎Aモデルによる表面沈下量抑制効果

写真-9 直接基礎組み合わせ(B+Fモデル)

を示したものである．ジオセル直接基礎モデルの意義

図-3 直接基礎 A モデルの表面沈下

図-4 直接基礎 B モデルの表面沈下

図-5 直接基礎 C モデルの表面沈下

図-6 直接基礎 D モデルの表面沈下

はナット 5 ケの載荷重による最大沈下量により沈下量抑制効果を評価することができる。図-3 のナット 5 ケの沈下曲線がジオシンセなし敷設の基準となる表面沈下量である。さらに本実験は複合敷設直接基礎の効果を調べることが目的の一つである。その敷設材料のうちジオシンセ敷設の基準としたのが曲げ剛性がもっとも小さいと考えられる材料 F の布 1 枚による直接基礎モデルの表面沈下曲線である。図には材料 F を単独で布施した直接基礎の沈下量も示している。材料 F を敷設した直接基礎の表面沈下量は 0.1mm ほど抑制されているが、沈下形態および沈下量ともほとんど類似している。つまり F 材料による直接基礎モデルは、引張り剛性はあるが曲げ剛性が小さいため、単独敷設では直接基礎としての機能が発揮されていないことが確認できる。しかし曲げ剛性が小さい材料であっても、機能的に配置されると引張り剛性の効果が期待できることを示すのが本実験の目的であるである。

以下の図ではナット 5 ケおよび材料 F の敷設効果を基準にしてジオシンセ敷設効果を調べることを目的としている。図中の細線は材料 A による表面沈下量を、太い実

線は材料 A の下端に材料 F を敷設した場合の沈下量を示している。図より材料 A の表面沈下量はナット 5 ケの基準沈下量を 0.4cm ほど抑制していることを示している。しかし材料 A の下に材料 F を敷設した効果を評価することはできない。

図-4 は材料 B と材料 F を組み合わせた直接基礎の沈下抑制効果を調べた結果である。ナット 5 ケの基準表面沈下量に対し約 0.5cm の抑制効果がみられる。さらに材料 B の直接基礎の沈下量に対し、材料 F を直接基礎下端に敷設することにより約 0.1cm の沈下抑制効果が発生していることが分かる。

材料 C による沈下量の抑制効果を示したものが図-5 である。ナット 5 ケの基準表面沈下量に対し約 0.3cm 抑制されていることが分かる。さらに材料 F を下端に敷設することによってさらに約 0.1cm 沈下が抑制されることは明瞭である。しかし中央部分の沈下量は抑制されるが、材料 A、B の材料効果に比較すると、上部載荷重の形状が明瞭に発生しており、直接基礎の端部の効果は明瞭には見られない。

図-6 は材料 D の直接基礎の沈下抑制効果を示したも

図-7 直接基礎 E モデルの表面沈下

図-8 直接基礎 C モデルの構造と表面沈下

図-9 基礎剛性と表面沈下量

のである．ナット 5 ケの基準表面沈下量に比べると約 0.2cm 抑制される，さらに材料 F を下端に敷設することによって約 0.1cm 沈下が抑制される．上部荷重の形態は表面沈下形態に明瞭に映し出されており，材料 D の直接基礎としての幅効果は明瞭には見られない．

図-7 は材料 E を直接基礎とする模型実験結果である．明瞭な沈下抑制効果は見られない．また上部荷重の形状が沈下形状に反映されており，直接基礎の幅効果は見られない．従って材料 F を敷設した効果も明瞭には現れていない．

図-8 は材料 C と F を複合組み合わせで，複合敷設効果を調べたものである．材料 C を 2 枚重ねると中央部では約 0.4cm 沈下が抑制される．さらに 2 枚の材料 C の下端に材料 F を敷設すると，さらに約 0.1cm 沈下が抑制さ

れる．ところがこの材料 F の沈下抑制効果は布の断面内敷設場所によって異なる．材料 C の間に材料 F を挟在した CFC の実験結果は，やや実験結果がばらついているが，沈下量の抑制量を見る限り敷設した効果は見られず材料 C を 2 枚重ねた沈下量に比べると逆に沈下量をやや増加させる負の効果を示している．一方材料 C 1 枚の直接基礎の形状に比べて材料 C を 2 枚重ねた直接基礎の沈下抑制効果は広がっている．

図-9 は各敷設条件における直接基礎中央表面沈下量を整理したものである．図中の A～F は敷設材料に対応している．上段実線は基礎材料 1 枚の単独敷設基礎実験結果，下段実線は基礎材料 1 枚の下端に材料 F を敷設した実験結果を示している．図の右端に直接基礎がないウレタンモデル地盤だけの沈下量を付記している．また直接

図-10 沈下量比 ρ_1 ⁴⁾

基礎の沈下抑制効果の基準は図中の基礎なしおよび材料 F の敷設材料の表面中央沈下量になる。図より剛性が小さい材料 E, F の単独敷設直接基礎の場合、表面沈下量は基準沈下量と類似しており、敷設効果は見られない。ところが材料 A ~ D は明瞭に沈下が抑制されていることが分かる。しかも鉄の材料 A がもっとも小さくことから、この沈下抑制効果は基礎剛性によって変化することになり、弾性論に示す相対剛性比の影響が反映されていることを示している。さらに図中の 2 枚重ねは、複合敷設の表面最大沈下量である。この図からは材料 A と材料 F の複合敷設効果は見られないが、材料 B と材料 F の複合敷設効果は材料 A と材料 F の複合直接基礎の沈下量に比べて抑制されているように見える。つまり相対剛性によっては鉄の材料 A に比べてより沈下を抑制する効果が発生する可能性があることを示唆している。

次に材料 C に着目して重ね合わせの組み合わせを変えた補足実験を行った。材料 C を 2 枚重ねた直接基礎は 1 枚の敷設基礎に比べ厚さが 2 倍になったことを示している。図より材料 C を 2 枚重ねると約 0.1cm 沈下が抑制される。つまりこの抑制効果は基礎厚さを増大させたことから発生した抑制効果であり、曲げ剛性の影響と考えられる。次に材料 C 2 枚からなる基礎下端に材料 F を敷設すると約 0.1cm 沈下が抑制されている。従って曲げ剛性よりも引張り効果が発揮されている。しかし材料 F を材料 C の間に敷設した実験結果は、材料 C の 2 枚重ね基礎実験結果に類似し、材料 F の敷設効果は見られない。従って非常に剛性が大きい材料 A、および非常に剛性が小さい材料 E, F の場合は材料 F を敷設する効果は見られないが、その他の材料の直接基礎との組み合わせでは、組み合わせ効果が明瞭である。材料 F を基礎下端に敷設した実験結果では概略類似した沈下量が抑制されている。この抑制量は材料 C の下端に敷設した場合でも類似した沈下量が抑制される。しかし材料 C を下端にして、材料 F を挟在させた場合は沈下量の抑制効果は見られない。逆に上記したように材料 C の 2 枚重ね直接基礎の沈下量

図-11 沈下量係数の近似

に比べやや増大している傾向がみられる。このことから材料 F の敷設効果は、基礎断面内の位置により異なることが分かる。弾性論的には基礎モーメントが最大になる側に材料 F を敷設するとその効果が発揮されるが、中立軸付近に設置しても効果はみられない。そして材料 F に接する材料 C の摩擦が軽減され、沈下量が増加する方向に向かったと考えられる。

4. 相対剛性と沈下

この章では今後の設計参考資料にするために実験で得られた沈下量に対応するような剛性を求めてみる。使用する弾性式は上記した式 (1) ~ (4) である。この中で沈下量係数 ρ_1 は図-10⁴⁾ のように示されている。図中の ρ_1 は中央の最大沈下、 ρ_2 は最大曲げモーメント、 ρ_3 は換算荷重を与える係数である。論文の趣旨から ρ_2 、 ρ_3 の説明は省略するが、本研究で必要になるのは ρ_1 の最大沈下係数である。そこでこの曲線を近似化すると式 (5) および図-11 になる。近似式の表現形式を示す。

$$\rho_1 = \frac{c}{a + b \times \exp(d \times \ln(e \lambda l))} + f \quad (5)$$

ここに a ~ f は定数である。図-10 に近似するように定数を決めると、図-11 になり、このとき定数は以下のようになる。

$$a=0.5, b=1, c=16, d=2, e=4, f=1$$

表-2 に求めた基礎の剛性を示す。基礎の剛性は推定値と実験結果が整合するように決めた。こうして求めた基礎の剛性として以下の値が求められる。

材料 A	2.1×10^8	kN/m ²
材料 B	6.0×10^2	
材料 C	6.0×10^2	
材料 D	7.3×10^3	
材料 E	4.4×10^2	
材料 F	9.8×10^4	

材料 A は鉄であるから鉄の弾性係数に類似した値を示している。また材料 E はウレタン系であり、基礎材料としては一番小さい剛性が予想される。材料 B ~ D はゴ

表-2 基礎剛性と沈下量

材料	A	B	C	D	E	F	0
l0 (長さm)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.03
b (幅m)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
h (厚さm)	0.0023	0.012	0.0034	0.003	0.01	0.002	3E-05
s	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
弾性係数 Es(kN/m ²)	7	7	7	7	7	7	7
Gs(kN/m ²)	2.3333	2.3333	2.3333	2.3333	2.3333	2.3333	2.3333
b	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
弾性係数 E b (kN/m ²)	2E+08	600	600	7333	444	98000	2E+08
l (m ⁴)	2E-11	3E-09	7E-11	5E-11	2E-09	1E-11	3E-17

k(式(3))	584.84	584.84	584.84	584.84	584.84	584.84	1807
(式(2))	0.3466	2.5247	6.5012	3.8192	3.121	2.7074	6.0483
(l / l0)	4.951	36.067	92.874	54.56	44.586	38.678	201.61
1	7.6068	1.1561	1.0236	1.0684	1.1023	1.1358	1.0273

p(kN)	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
w(0)(m)	0.006	0.0067	0.0152	0.0093	0.0079	0.007	0.0107
w0(cm)	0.6	0.7	1.5	0.9	0.8	0.7	1.1
w0(実験)	0.6	0.6	0.8	0.9	1	1	1

μ系であるが、材料Bは厚い。こうした条件は求めた剛性に反映されていると考えられる。

2) ジオグリッド効果は引張り剛性よりもジオグリッドとジオセルのなじみせん断力が関係する。

5. 直接基礎ジオセル構造の設計論

ウレタンモデル地盤を基礎地盤として直接基礎の剛性や厚さ、さらに材料を組み合わせた複合直接基礎の効果を調べた。この結果わかったことは下記のように整理される。

- 1) 沈下量の抑制効果は直接基礎の引張り剛性によって異なり、剛性が高くなるほど沈下量は抑制される。従って弾性論にいう相対剛性をいかに増大させるかを直接基礎の設計で考慮する必要がある。
- 2) 直接基礎の厚さの増大に伴い、沈下量の抑制効果は増大する。これは曲げ剛性効果である。
- 3) 基礎を部分的に改良する場合はモーメントが大きい引張り側を対象にしなければならない。
- 4) 以上の実験結果からジオセル直接基礎の効果は引張り剛性によること、敷設効果は下端に設置した場合であること、下端のジオセルの剛性を高める複合材料の敷設効果があることなどを参考にして材料開発、敷設法を検討しなければならないし、部分的な敷設が効果的であることを示している。また沈下抑制効果を最大限発揮する構造や剛性が存在する可能性を考えなければならない。

これらの知見は熊谷らのモデル実験や屋外実大規模実験でジオセルとジオグリッドの組み合わせ効果を調べた結果でも類似した結論が得られている^{2),3)}。その結果から本論文に關係する結論を整理する。

- 1) 基礎厚さが厚いほど沈下量は抑制される。

6. おわりに

ウレタンモデル地盤によって直接基礎の剛性や厚さ効果を調べた。ウレタンモデル地盤は一般的な地盤と異なり、引っ張り力を伝播させることができる。しかし、基礎の剛性や幅効果は実験的に明らかにすることができた。ジオセルの設計では、ジオセル直接基礎が軟弱地盤対策として有効というだけでなく、相対剛性比による、沈下抑制効果は異なることを明確に打ち出す必要がある。実験では曲げ剛性ばかりでなく、敷設位置によるが、引張り剛性により沈下抑制効果が異なることを示した。従って引張り剛性に着目してジオセルの設計を行わなければならないことを示唆した実験になった。

参考文献

- 1) 立花大地・對馬匠・金子賢治・堀江征信・熊谷浩二：ジオセルを用いた補強土壁の振動台模型実験，国際ジオシンセティックス学会日本支部，ジオシンセティックス論文集，第23巻，pp.95-100，2008。
- 2) T.Ajiki, H. Ohmori, K. Yazawa, K. Kaneko, K. Kumagai: Experimental study on bearing capacity of geocell-reinforced soil, PROCEEDINGS OF THE 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EARTH REINFORCEMENT (IS ' Kyushu 07 ') FUKUOKA, New Horizons in Earth Reinforcement, pp.625-628, 2007.
- 3) 佐藤雄太・立花大地・鈴木久美子・金子賢治・間昭徳・島田優・熊谷浩二：ジオテキスタイルとジオセルを

用いたマットレス工法の実物大繰り返し載荷実験，
国際ジオシンセティックス学会日本支部，ジオシンセテ
ィックス論文集，第 24 巻，pp.201-204，2009.

4)A.P.S Selvadurai: ELASTIC ANALYSIS OF
SOIL-FOUNDATION INTERACTION,ELSEVIER SCIENTIFIC
PUBLISHING COMPANY, pp.19，132-160，439-440，1979.

Deformability and settlement reduction characteristics of strip foundation composed by the layers of geo-textiles on the urethane ground model

Mitsuharu FUKUDA, Zyoji Nishiura, Hidenori **Nishi**, Tomohiro Yamazaki, Akinori Hazama, Yutaka
Shimada & Koji Kumagai

The experimental study was carried out for the purpose of investigating the structure of geo-cell using the urethane ground model and various kinds of geo-textile models. Improvement of soft ground and reduction of settlement of strip foundation by the geo-cell is targeted to study. Especially extensional rigidity and combination of geo-cell and geo-textile is focused on. The experimental behavior by the urethane ground model tests is analyzed as the fundamental references. The model test gave the ordinary results that the higher the rigidity of geo-textile is, the larger the reduction of settlement level is. This improvement effect shows efficiently when geo-textile is installed in the tension zone of strip foundation. It is necessary to extend the result to develop the geo-cell structure as the stripe foundation. Hence the test results are tried to interpret roughly by the elastic theory applied for the stripe foundation. It is expected to the prototype scale, actual materials, combination and piling through the elasticity.