

アーチ効果を受ける埋立地盤内の土圧の遠心力場での計測

Measurement of Earth Pressure in the Reclaimed Land
by Settlement-Induced Arch Action under Centrifugal Fields

高町茉莉	Mari TAKAMACHI	(広島大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
北出圭介	Keisuke KITADE	(中電技術コンサルタント株式会社)
洪汶宜	Wen-Yi HUNG	(National Central University)
飛田哲男	Tetsuo TOBITA	(京都大学防災研究所)

埋立地盤の底面に沈下が発生した場合、地盤内の応力状態がアーチ状に不均一となり、そのアーチ内部の地盤で乱れやゆるみが発生することがある。このようなアーチ効果が地盤内の応力分布や密度分布にどのような影響を及ぼすかを評価することは重要である。そこで本研究では、地盤底面に不同沈下が発生した場合の埋立地盤の土圧の変化を計測することを目的として、遠心載荷装置を用いて不同沈下を模擬した埋立地盤モデルの土圧の計測を行った。また、遠心載荷試験の結果は実験機関の技術や経験に基づく部分が多いため、本研究では異なる実験機関で実験を行い、結果の整合性を確かめた。実験の結果、どちらの実験からも、地盤底面の沈下の発生により沈下中心部の上層の地盤では水平土圧が理論値より大きくなるが、鉛直土圧は理論値よりも小さくなることが確認できた。これより、地盤底面の沈下によりアーチが形成されたと考えられる。

キーワード：アーチ効果，埋立地盤，土圧，遠心載荷試験

(IGC : E14)

1. はじめに

粘性土地盤上に埋立てが行われた場合、粘性土地盤の物性のバラツキ等による不同沈下¹⁾等の種々の要因で、地盤内の応力状態が不均一となり、乱れやゆるみが発生することがある。今後の埋立地の防災対策や地盤改良のためにも、埋立地盤の底面に発生する不同沈下が、周辺の地盤に与える影響について検討することは重要である。このような地盤底面の不同沈下による地盤内応力の変化を調べるためには、砂を土槽に詰めて、土槽底面の一部を下降させる落とし戸実験が有効である。

これまでも、トンネル土圧を調べるためなどの目的で落とし戸実験は数多く実施されてきており（例えば、Ladanyi²⁾、村山³⁾）、これらの実験により、落とし戸により地盤が沈下する時に沈下部から隣接する非沈下部に応力がアーチ状に伝達されることが確認されている。このような応力伝達は、一般的にアーチ効果と呼ばれている。

土質材料の力学的特性は、それぞれの深度における拘束圧により変化する。そのため、縮尺モデルを用いた 1g 場における実験では、原地盤と同様の応力状態を再現することが難しい。そのため、実物の 1/N の模型に重力加速度 N 倍の遠心力を作用させることで、実物と同じ応力状態を再現する遠心場での縮尺模型実験が行われている。このよう

に遠心場での縮小模型実験は、実物大の応力状態を再現でき、相似則も簡単のため、近年盛んに利用されるようになってきた⁴⁾。落とし戸実験に関しても、これまで足立⁵⁾らが遠心場で実験を行っている。しかし、遠心載荷試験の技術は実験機関の技術や経験に基づく部分が多いため⁶⁾、異なる実験機関で行った実験結果の整合性を確かめることが重要である。

そこで本研究では、異なる実験装置で図-1 に示すようなアーチ効果を再現し、不同沈下が発生する埋立地盤内の土圧の変化を計測し、その結果の整合性を確認することを目的として、遠心力場での実験を行った。なお、本実験では、埋立地盤の底面に不同沈下が発生する条件を想定しており、遠心加速度増加中に落とし戸を同時に作動させることとした。この点が、トンネル掘削や吸い出しによる空洞発生を目的に遠心加速度載荷後に落とし戸を作動させる実験と異なっている。

実験には、京都大学防災研究所の遠心載荷装置と、国立中央大学(台湾)の遠心載荷装置を使用した。これらの実験は、異なる実験装置を使用して、埋立地盤中の土圧の変化の傾向が同じであるかどうかを確かめるために、広島大学と京都大学防災研究所、及び広島大学と国立中央大学(台湾)との間の共同研究の一環として実施された。

2. 実験方法

2.1 京都大学防災研究所で行った実験（シリーズ DPR1）の概要

本実験では、遠心アームの半径が 2.5m の遠心载荷装置を使用した。また、土槽容器は内寸で幅 450mm、深さ 300mm、奥行き 150mm のものを使用した。地盤底面に沈下を発生させるために、土槽容器の底面に不同沈下を発生させる落とし戸模型を設置し、その上に落とし戸が落ちた時に上層地盤の沈下形状が滑らかになるように、厚さ 1cm のシリコン板を設置した。落とし戸模型の概要を図-2 に示す。図-2 に示すように、この模型は落とし戸の下に這わせているゴムチューブに水が充填されると落とし戸が上がり、その水が排水されると落とし戸が下がるという仕組みになっている。

模型とシリコン板を土槽内に設置後、落とし戸を上げた状態で水中落下法により飽和砂地盤を作製した。試料には豊浦砂を使用し、目標相対密度は 50% とした。豊浦砂の粒度分布を図-3 に示す。

地盤を飽和させるための間隙水は本来、相似則を満足させるために粘性流体を用いるべきであるが、本実験では簡単のため水道水を利用した。模型地盤の断面図及び俯瞰図を図-4、図-5 にそれぞれ示す。土圧計の設置箇所には、地盤底面に沈下が発生する箇所、地盤底面が水平で沈下の影響を受けない箇所、地盤底面が沈下部と水平部の境界となっている箇所をそれぞれ選定した。また、それぞれの土圧計を、十字の足が付いた 1cm 四方の薄いアルミ板で作成した治具（写真-1）により、地盤中に固定した。

模型地盤作製後、土槽を遠心载荷装置に設置し、静的遠心加速度を 50G まで上げる最中に砂の自重により落とし戸を落として、地盤底面に沈下を発生させた。なお、地盤底面の沈下はどのケースにおいても、静的遠心加速度が 20G 程度の比較的初期の段階で発生したが、以下では沈下が完全に停止した 50G 場の状態に特に着目して検討する。沈下の幅、地盤底面（シリコン板の上面）の最大沈下量はそれぞれ 12cm、0.8cm とした。土圧の計測は、遠心加速度が 1G から 50G に達するまで、10G ごと段階的に計測した。

実験は、同じ条件で計 2 回行った。しかし 1 回目の実験では、土圧計の不足のため、図-4 に示す計測点 D,E,F の土圧を計測していない。

2.2 国立中央大学で行った実験（シリーズ NCU）の概要

本実験では、遠心アームが 3m の遠心载荷装置を使用した。また、土槽容器は内寸で幅 767mm、深さ 400mm、奥

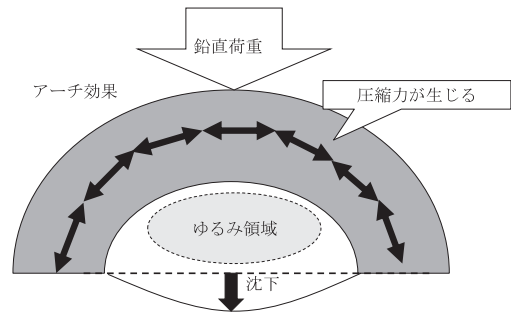


図-1 アーチ効果の概念図

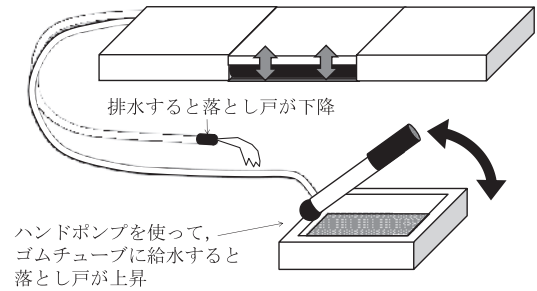


図-2 落とし戸模型の概略図 (DPR1)

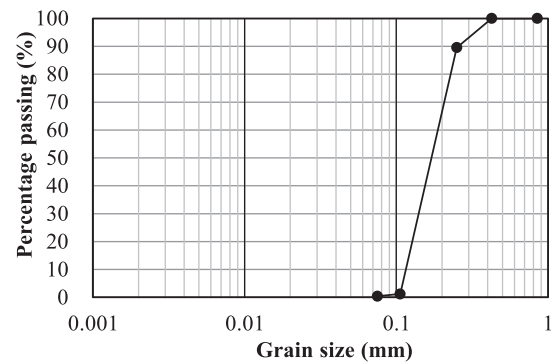


図-3 豊浦砂の粒度分布 (DPR1)

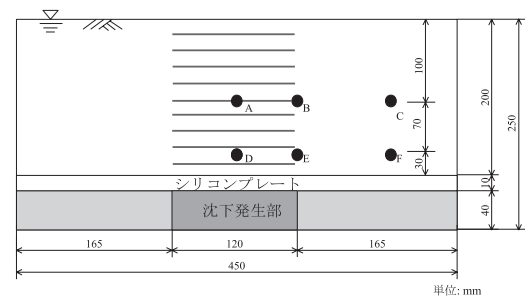


図-4 模型地盤の断面図 (DPR1)

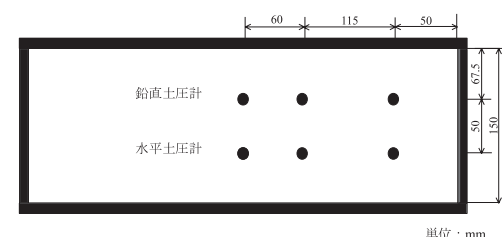


図-5 模型地盤の俯瞰図 (DPR1)

行き 350mm と、防災研究所で使用した土槽容器よりも大きいものを使用した。地盤底面に沈下を発生させるために、中心部に穴を開けた厚さ 6cm シリコン板群を土槽容器の底面に設置した。穴の形状は、防災研究所で行った実験と同様、沈下が発生する箇所の底面の最大沈下量が 0.8cm となるように、FEM 解析を行い設計した (図-6)。シリコン板群を土槽容器内に設置した後、空中落下法により飽和砂地盤を作製した。試料には粒径の小さいけい砂 (Quartz sand) を使用し、目標相対密度を 50% とした。けい砂の粒度分布を図-7 に示す。間隙水はシリーズ DPRI と同様に簡単のため、水道水を利用した。地盤作製後、遠心载荷装置に土槽を設置し、50G の静的遠心加速度を作用させた状態で地盤底面に沈下を発生させた。土圧の計測は、防災研究所で行った実験 (シリーズ DPRI) と同じ過程で行った。

本実験では、シリーズ DPRI と同じ数の土圧計を設置した。土圧計の設置箇所には、地盤底面の沈下により発生するアーチ部分、地盤底面が水平で沈下の影響を受けないと考えられる箇所をそれぞれ選定した。模型地盤の断面図及び俯瞰図を図-8、図-9 にそれぞれ示す。実験は計 3 回を行い、1 回目と 2 回目の実験は全く同じ条件で行ったが、3 回目の実験では土圧計の設置状態の違いによる計測結果への影響を調べるため、土圧計を固定する治具を用いなかった。

表-1 に防災研究所、国立中央大学で行ったそれぞれの実験の比較表を示す。主な差異は、土槽のサイズ (と土槽のサイズに影響される土圧計設置位置と壁面との距離)、土層の作成方法及びマーカーの種類である。

3. 目視によるアーチ効果の確認

3.1 シリーズ DPRI における土層断面の変化

京都大学防災研究所で行った実験 (シリーズ DPRI) では、地盤の形状の変化を目視で確認できるようにするため、模型地盤中に 2cm 間隔でマーカーを設置した。マーカーには、赤色に塗色した蕎麦 (乾麺) を使用した。これは実験中に地盤内の水分を吸収し、周囲の地盤の変形と同様の変形をするため、目視で地盤の変形を確認することが可能となる。実験終了後の模型地盤の断面写真 (変形部分を拡大) を写真-2 に示す。この図では、マーカーの設置箇所を分かり易くするため、土槽容器側面のガラス板に線を引いている。写真-2 からは分かりづらいが、模型地盤の上層部では、マーカーはほとんど直線のまま変形していなかった。よって、砂地盤の底面に沈下が発生しても、上層部はあまり変形しないことが考えられる。一方で、模型地盤の下層部では、マーカーが下に凸の形で変形していた。これは、土槽の底面に設置した落とし戸模型が作動した事に

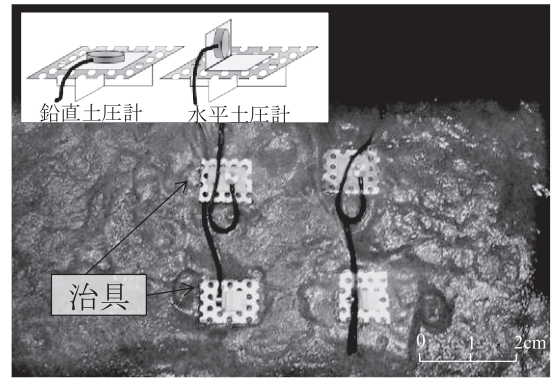


写真-1 土圧計を固定させるために用いた治具

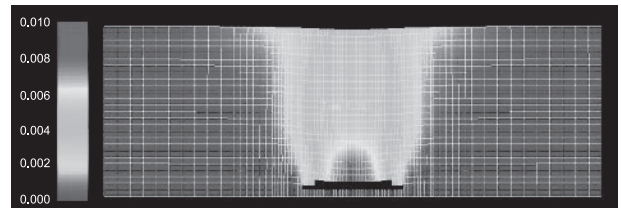


図-6 FEMによる沈下の解析 (値は沈下量：単位 mm)

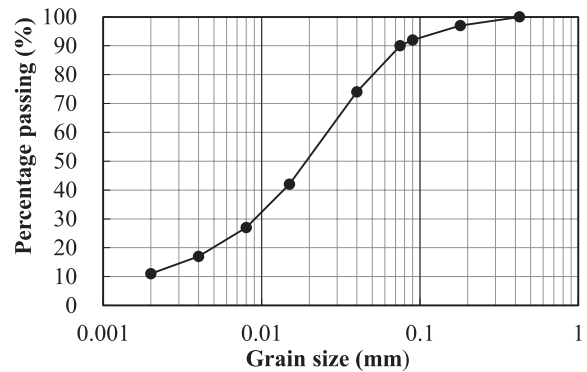


図-7 けい砂の粒度分布 (NCU)

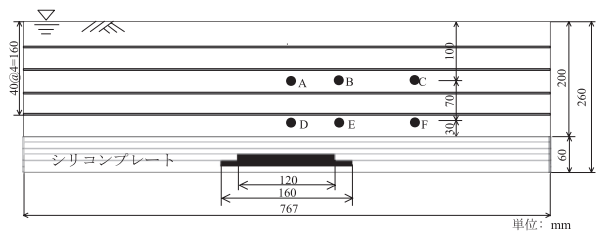


図-8 模型地盤の断面図 (NCU)

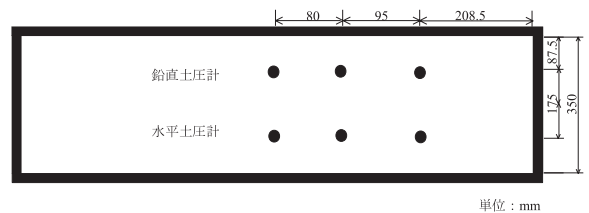
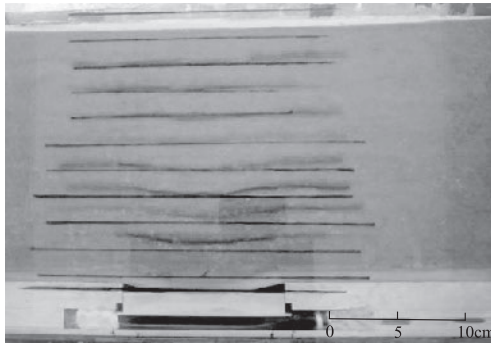


図-9 模型地盤の俯瞰図 (NCU)

表-1 2つの実験条件の比較

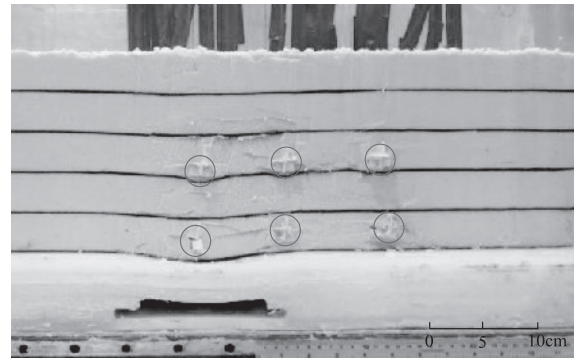
実験条件	京都大学防災研究所 (シリーズ DPR1)	台湾, 国立中央大学 (シリーズ NCU)
遠心载荷装置のアーム有効半径(m)	2.5	3.0
使用した土槽の寸法(mm) (幅×深さ×奥行き)	450×300×150	767×400×350
遠心加速度(G)	50	50
測定項目	土圧	土圧
土圧計の性能	200kPa, 500kPa	200kPa, 500kPa
試料	豊浦砂 ($\gamma_{sat} = 19.0kN/m^3$)	けい砂 ($\gamma_{sat} = 15.9kN/m^3$)
間隙水	水	水
土槽壁面からの土圧計の設置位置(mm) (短辺, 長辺)	67.5, 115	87.5, 208.5
実験用モニター装置	ビデオカメラ×1 (土槽側面を正面から撮影)	ビデオカメラ×1 (土槽地表面を撮影)
土層の作製方法	水中落下法	空中落下法
マーカー	塗色した乾麺	色砂

写真-2 実験終了後の模型地盤の断面図
(シリーズ DPR1)

より、地盤底面に沈下が発生したことが原因だと考えられる。これより、土槽底面に設置した落とし戸模型により、想定していた沈下を再現することができたといえる。

3.2 シリーズ NCU における土層断面の変化

国立中央大学で行った実験(シリーズ NCU)では、マーカーとして黒色に塗色した砂を使用し、シリコン板の上端から 4cm 間隔で色砂層を作製した。実験終了後の模型地盤の断面写真(変形部分を拡大)を写真-3 に示す。これより、マーカーの形状は防災研究所で行った実験と同様に、上層部ではほぼ変化なし、下層部で下に凸に変化していることが鮮明に見てとれる。よって、こちらの実験でも想定した沈下を再現できたといえる。また、写真-3 からは土圧計の設置位置もよくわかる(模型地盤中の十字になっている箇所: 赤丸で図示)。このように、防災研究所で行った実験と比べると、本実験の方が、地盤の変形を鮮明に見てとることができる。これは、国立中央大学で行った実験では、実験終了後に土槽容器の底面から地盤中の水を抜き、そして土槽容器の壁面を外して結果の確認を行ったためである。また、使用した土槽容器のサイズが防災研究所のものより大きかったことや、マーカーとして色砂を使用し

写真-3 実験終了後の模型地盤の断面図
(シリーズ NCU)

たことも理由として考えられる。

4. 土圧計測によるアーチ効果の確認

4.1 シリーズ DPR1 における全土圧の計測結果

京都大学防災研究所で行った実験(シリーズ DPR1)における、遠心力载荷中に計測された全応力表示の土圧の変化を、図-10 に示す。ここで、実線は計測値、破線は水平地盤における理論値であり、鉛直土圧は式(1)、水平土圧は式(2)より算出した。

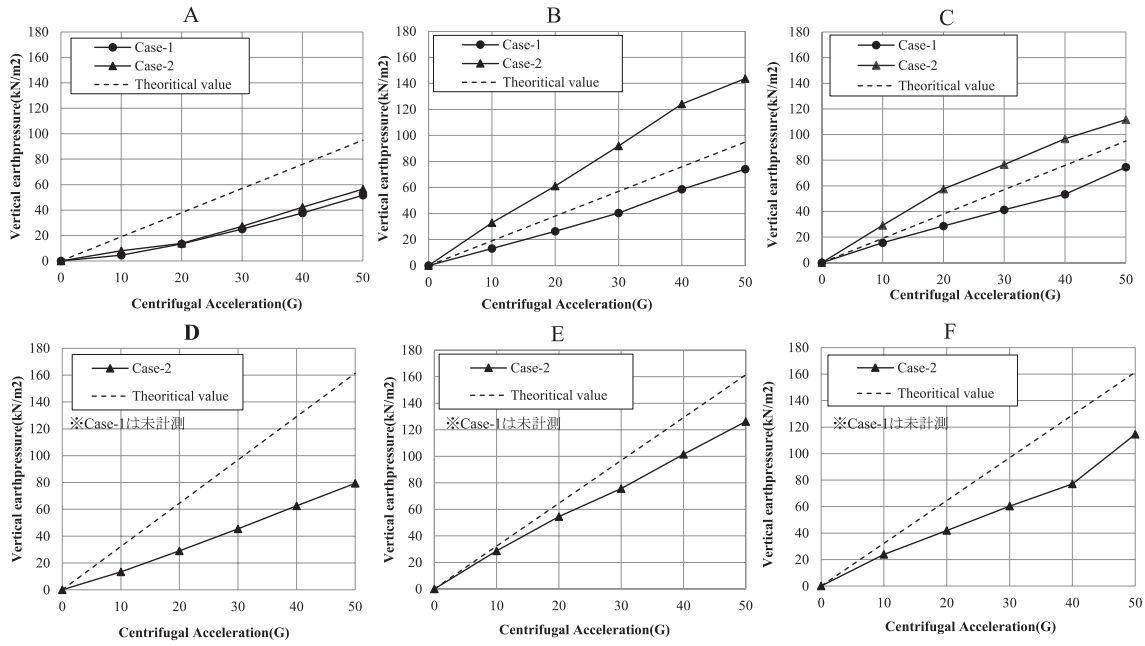
$$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z \cdot x \quad (1)$$

$$\sigma_h = [(\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot K_0 + \gamma_w] \cdot z \cdot x \quad (2)$$

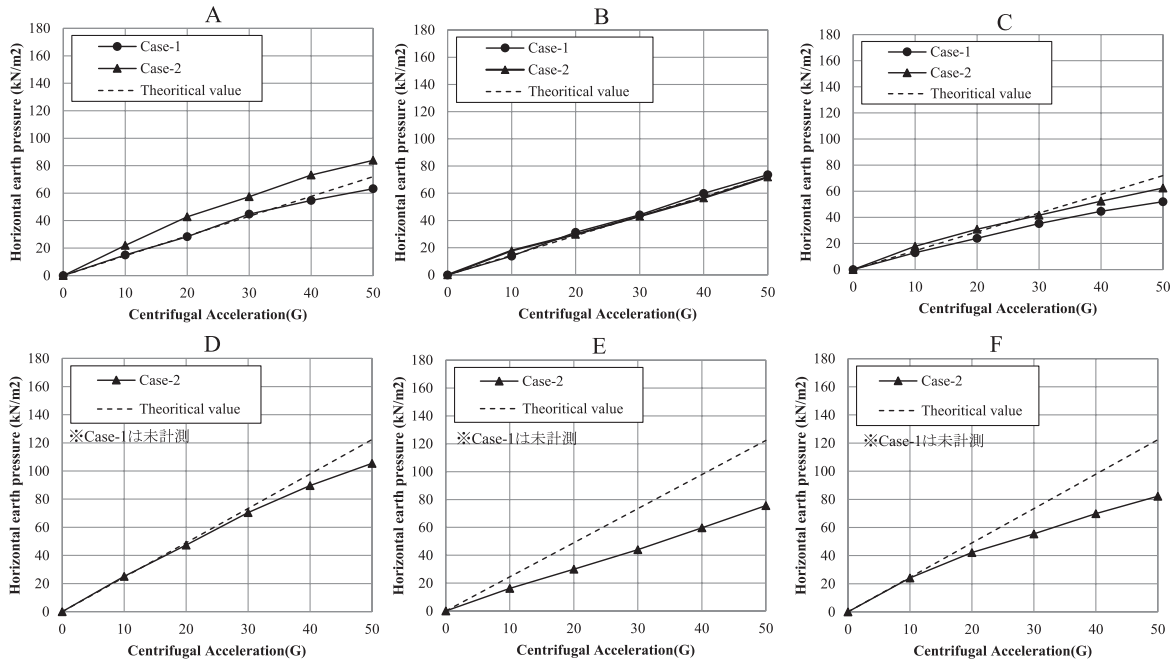
ここに、

γ_{sat} : 実験で使用した試料の飽和単位体積重量(kN/m³),
 z : 地表面から計測位置までの深さ(m), x : 静的遠心加速度(G), γ_w : 水の単位体積重量(kN/m³), K_0 : 静止土圧係数(=0.5 を仮定)である。

アーチ効果を受ける埋立地盤内の土圧の遠心力場での計測



(a) 鉛直土圧の変化

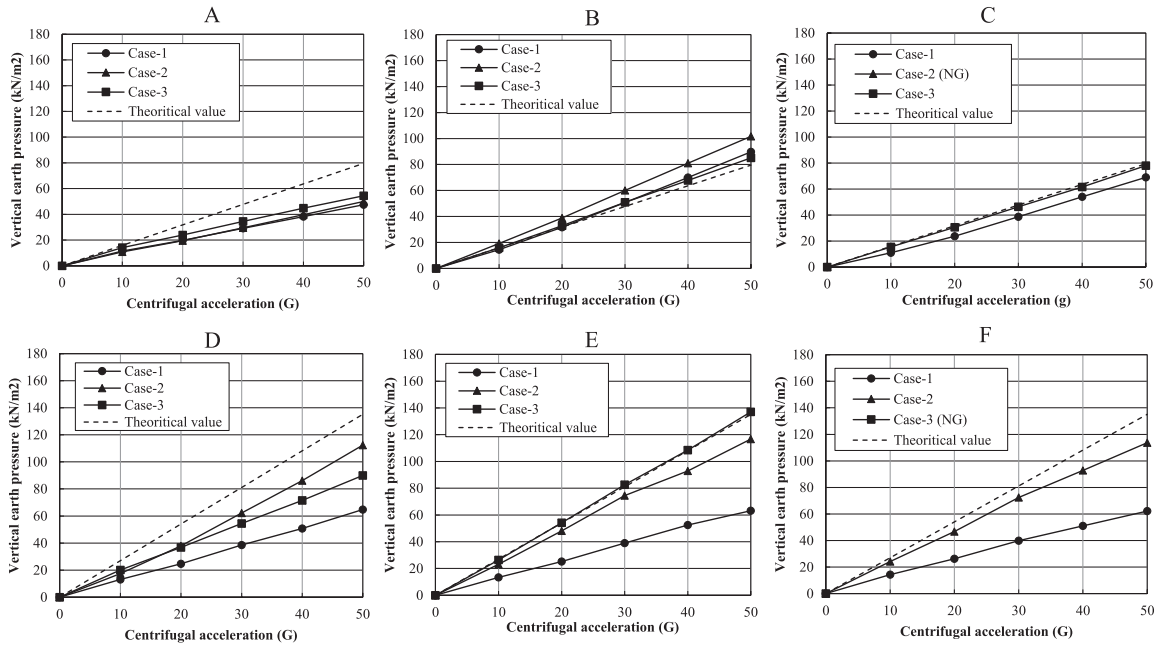


(b) 水平土圧の変化

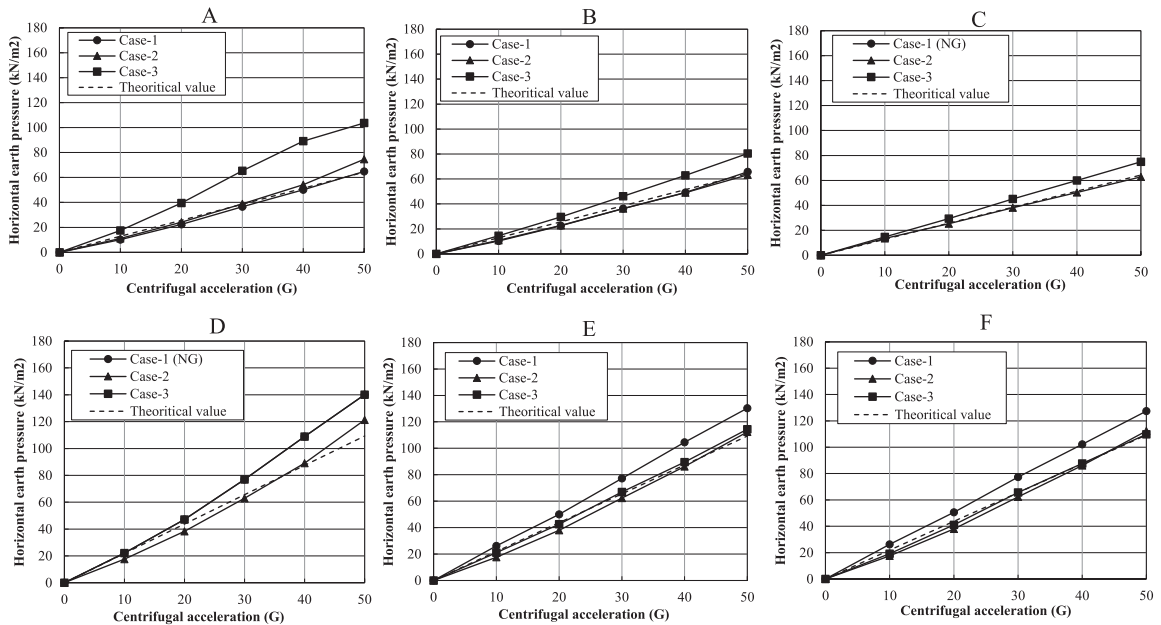
図-10 遠心力载荷中の土圧の変化 (シリーズ DPR1)

また、A~F とは、図-4 中に示す土圧計の設置箇所を示しており、凡例中の(NG)とは、土圧計の異常等の理由で計測できなかったケースを示している。計測点 A の土圧の変化に着目してみると、鉛直土圧は理論値より小さな値を示しているが、一方で水平土圧は理論値より若干大きな値、もしくはほぼ理論値に近い値を示していることが見てとれる。計測点 B~F についても鉛直土圧は低下しているが、A においては 2 ケース共に低下しており、この低下は計測のばらつきを考慮しても有意であると考えられる。そこで、

これは地盤底面の沈下により形成されたアーチ効果が、計測土圧の値に影響を与えた結果であると仮定すると、次のように説明できる。計測点 A の鉛直土圧の低下については、沈下部を中心に発生したアーチ効果により、アーチ上部の土の重量によって生じる鉛直方向の荷重が受け持たれ、アーチ内部の地盤が緩んだことが原因だと考えられる。また、水平土圧の増加については、アーチ効果により、アーチ内部に水平方向の圧縮力が作用したことが原因として考えられる。しかし、計測結果のばらつきを考えると、



(a) 鉛直土圧の変化



(b) 水平土圧の変化

図-11 遠心加速度载荷中の土圧の変化 (シリーズ NCU)

例えば計測点 C~F の値には壁面の影響も考えられるため、より大きな土槽での実験による検討も必要である。

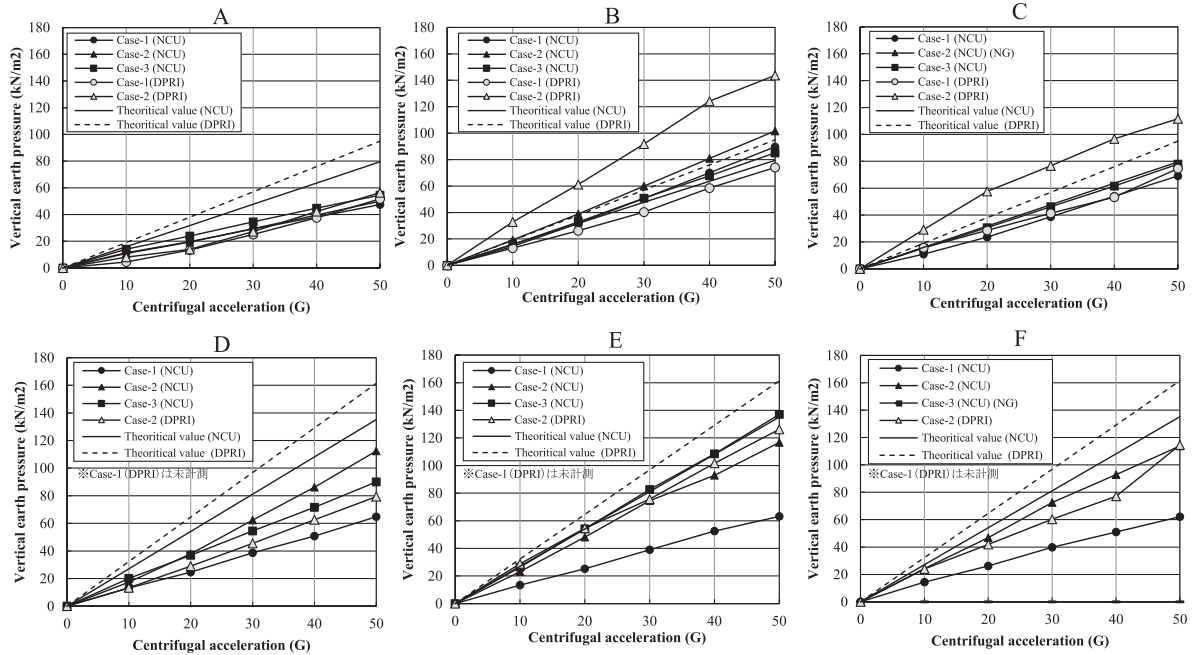
4.2 シリーズ NCU における全土圧の計測結果

国立中央大学で行った実験(シリーズ NCU)における、遠心力载荷中に計測された全土圧の変化を、図-11 に示す。ここで、実線は計測値、破線は水平地盤における理論値を示している。また、A~F とは、図-8 中に示す土圧計の設置箇所を示している。図-11 より、遠心力载荷中の全土圧の変化は、シリーズ DPRI の計測結果と同様の傾向を示し

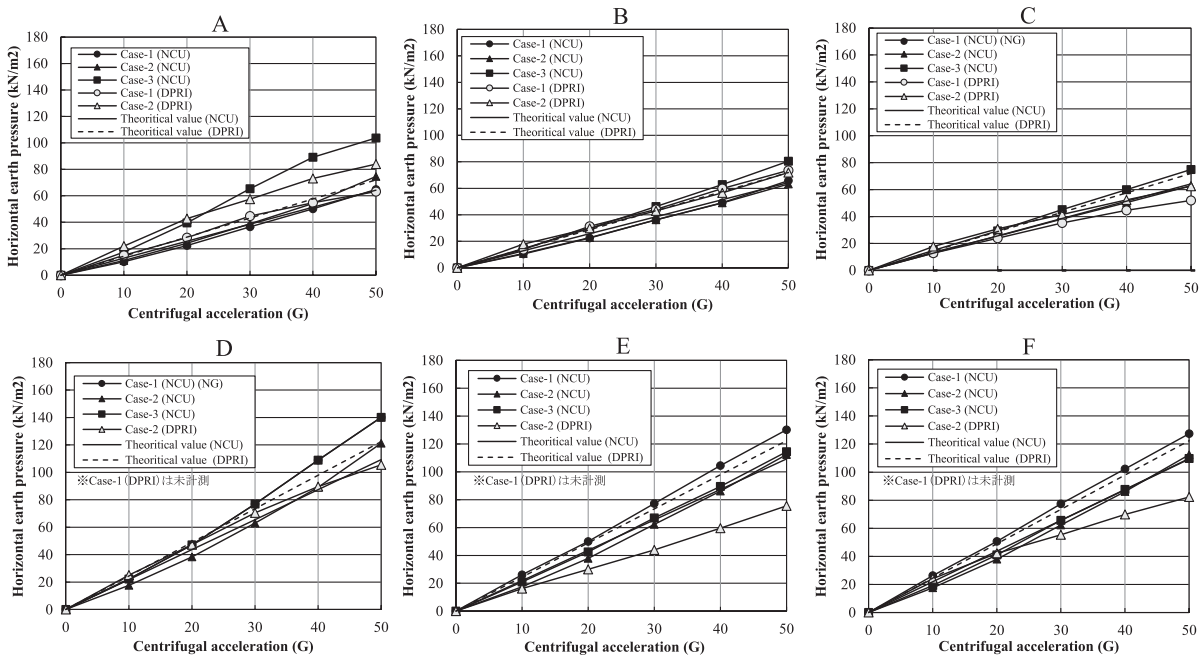
ており、計測点 A に着目すると 30% 程度の誤差はあるものの、鉛直土圧は理論値より小さな値を示しており、また、水平土圧は理論値より大きな値、もしくはほぼ理論値に近い値を示している。よって、この実験の結果に関しても、地盤底面に発生した沈下により形成された、アーチ効果が影響していると考えられる。

また、Case-3 では土圧計を固定する治具を用いなかったが、図-11 に示す通り Case-3 の計測結果は Case-1, Case-2 の計測結果に比べて過大や過小となるような一定の傾向は見受けられない。つまり、治具の影響は土圧の計測結果のばらつきの範囲に留まり、治具の有無は土圧の計測結果

アーチ効果を受ける埋立地盤内の土圧の遠心力場での計測



(a) 鉛直土圧の変化



(b) 水平土圧の変化

図-12 2つの実験で計測された土圧の変化の比較

にあまり影響を与えないといえる。

4.3 土圧の計測結果の比較

本研究で行った2つの実験における土圧の計測結果を、図-12に併せて示す。図-12より、2つの実験結果には、例えば以下の点に整合性があることが見てとれる。

- ・ 沈下部直上の計測点 A、計測点 D の鉛直土圧は、理論値のほぼ半分であり、ケースによっては静水圧に相当する。

- ・ 沈下部直上の計測点 A、計測点 D の水平土圧は、理論値と同等、もしくは大きい（最大で1.4倍程度）。
- ・ 計測点 C、計測点 F の鉛直土圧は理論値よりもやや小さい（大きな土槽を用いてもまだ壁面の影響が残っている可能性があり、検討中である）。

よって、地盤底面に沈下が発生することで、地盤中の土圧が不均一になり、アーチ効果が発生することが確認できた。また、従来土圧の計測は難しいとされていたが、本研究では異なる実験機関でも、類似の実験条件下で土圧の計測結果に整合性を見ることができた。しかし、いくつかの

表-2 各計測点の土圧の平均値及び、そのバラツキ、計測成功率

		土圧の平均値 (kN/m ²)	バラツキ (標準偏差)	計測成功率
A	鉛直	52.0	3.2	5/5
	水平	78.0	14.8	5/5
B	鉛直	87.6	8.8	4/5 (Case-2(DPRI)が×)
	水平	71.0	6.1	5/5
C	鉛直	73.9	3.2	3/5 (Case-2(NCU), Case-2(DPRI)が×)
	水平	63.1	8.1	4/5 (Case-1(NCU)が×)
D	鉛直	80.5	9.9	4/4
	水平	119.9	12.9	4/4
E	鉛直	126.7	7.2	3/4 (Case-1(NCU)が×)
	水平	119.0	6.9	3/4 (Case-2(DPRI)が×)
F	鉛直	96.8	24.5	3/4 (Case-3(NCU)が×)
	水平	100.5	19.1	4/4

ケースで、いくつかの計測箇所では計測された土圧の値にバラツキが存在した。例えば、図-12中に示す計測点BのCase-2(DPRI)、計測点EのCase-1(NCU)の様に、他と大きく異なる計測値を示すことがある。そこで、50G場における土圧の値が、他のケースと大幅に異なるケースを除外した場合の土圧の平均値、そのバラツキ(標準偏差)及び計測成功率を表-2に示す。ここで計測成功率とは、50G場において土圧の値が上述の平均値の±30%の範囲内の値となったケースの比率を示している。表-2より、計測成功率は87%程度と高く、さらに計測が成功した地点についてはあまり値のバラツキは大きくないことが見てとれる。今後の計測精度の向上には、他と傾向の異なる値が計測されるメカニズムを解明していくことが重要である。

また、静水圧相当の鉛直土圧あるいは水平土圧が観測された一部の計測点では、有効応力がほぼゼロとなる。これらの計測点の地盤の実際の状況については今後詳細な検討が必要である。

5. 結論

本研究では、地盤底面に不同沈下が発生した場合の埋立地盤の土圧の変化を計測することを目的として、性能の異なる2つの遠心載荷装置を用いて実験を行った。実験結果の比較およびまとめを以下に示す。

- (1) 実験後の模型地盤の断面形状の変化は、2つの実験で同様の傾向を示し、メカニズムの異なる2つの方法でも同様にアーチ効果を再現できた。
- (2) マーカーとして色砂を使用し、実験後に土槽の壁面を取り外してから断面図の観察を行った実験の方が、断面図の変化を明確に確認できた。
- (3) どちらの実験からも、地盤底面の沈下の発生により、沈下中心部の水平土圧は理論値と同等もしくはやや大きく、鉛直土圧は理論値よりも小さくなることが確認された。

- (4) 土圧計を固定する治具の有無は、土圧の計測結果に影響を与えなかった。

謝辞

本実験は、京都大学防災研究所、国立中央大学(台湾)との共同研究の一環として実施した。実験に際しご指導頂いた、富坂技官、川崎技官、Prof. Chung-Jung Lee, Prof. Hwei-Tsyur Chenをはじめ関係者各位に謝意を示します。

参考文献

- 1) 奥村樹郎, 土田孝: 土質定数のバラツキを考慮した不同沈下の推定, 港湾技術研究所報告, Vol.20, No.3, pp.131-168, 1981.
- 2) Ladanyi, B., Hoyaux, B.: A study of the trap-door problem in a granular mass. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.6, No.1, pp.1-11, 1969.
- 3) 村山朔朗, 松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.187, pp.95-108, 1971.
- 4) 木村孟ほか: 講座 遠心模型実験, 土と基礎, Vol.35, No.11~Vol.36, No.9, 1988.
- 5) 足立紀尚, 木村亮, 小坂馨太, 神谷信毅: 砂質および粘性地盤の遠心力場降下床実験, 第32回土質工学研究発表会講演集, pp.2149-2150, 1997.
- 6) 岡村未対, 竹下次郎, 上野勝利: 【講座】遠心模型実験—実験技術と実務への適用—2. 遠心模型の相似則, 実験技術—利点と限界, 地盤工学会誌, Vol.52, No.10, pp.37-44, 2004.
- 7) C.J.Lee, B.R.Wu, H.T.Chen, K.H.Chiang: Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil, *Tunnelling and Underground Space Technology* 21, Vol.21, No.2, pp.119-132, 2006.

(2014年6月23日 受付)