

裏込め載荷時の軟弱粘土地盤と杭基礎の 相互作用に関する実験的研究

渡部要一¹・竹村次朗²・木村 孟³

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部土性研究室 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

²正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

³正会員 工博 東京工業大学学長 (〒152 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

軟弱地盤中に建設された杭基礎橋台の背面に裏込め盛土を築造する場合の地盤および杭基礎構造物の安定性を調べるために、深さ方向に強度が増加する軟弱な正規圧密粘土地盤に対して、この種の安定問題に特に大きく影響すると考えられる、杭間隔、軟弱層厚、杭先の拘束を種々変化させた実験条件の下で遠心模型実験を行った。また、裏込めの土圧が橋台の側面に作用しないように仕切板を設置し、軟弱地盤に生じる側方流動の影響のみを調べる実験も併せて行った。一連の遠心模型実験の結果から、これら各種影響要因が軟弱地盤の安定性や変形メカニズムおよび杭基礎構造物の変形挙動に与える影響を定性的に明らかにした。

Key Words : pile, abutment, clay, soft ground, backfill, lateral soil movement, centrifuge model test

1. 序論

軟弱粘土地盤上に建設された杭基礎橋台の背面に裏込め盛土を築造すると、橋台に直接作用する盛土の土圧に加えて、軟弱地盤に生じる側方流動により杭基礎に大きな力が作用し、その結果橋台に著しい水平変位が生じる。通常の杭の水平抵抗の問題は上部構造物からの水平荷重を受ける杭を土が支える、いわゆる主働杭の問題であるが、ここで取り上げる側方流動を受ける杭基礎は、いわゆる受働杭の問題であり、流動する土が杭に水平力を与える一方、杭の存在が側方流動を抑え、地盤の安定性を向上させるという極めて複雑な杭と土の相互作用の問題といえる。

Broms¹⁾以来、主働杭に関する研究はこれまでに数多く行われてきているが、それに比べ受働杭の問題に関連するものはあまり行われておらず、数少ない既往の研究としては、以下のようなものがある。すなわち、堀部ら²⁾や木村³⁾は、実際の杭基礎橋台の水平移動の観測事例を整理し、盛土の安定数($\gamma H/c_u$)をもとにした橋台の側方移動の可能性の判定基準をそれぞれ提案した。ここで γ は盛土の単位体積重量、 H は盛土高さ、 c_u は粘土の非排水せ

ん断強度である。これらの提案は強度一様な粘土地盤を対象としており、わが国において広く分布するような自重圧密により深さ方向に直線的に強度が増加する正規圧密粘土地盤の場合、地盤強度をどのように取り扱うべきか等の問題が残されている。また、石原ら⁴⁾と木村³⁾は、設計の際に必要な杭に作用する荷重分布、すなわち側方流動荷重の分布形状を二等辺三角形と仮定し、その大きさの推定方法も提案している。この方法では、側方流動荷重を盛土荷重のみの関数としているため、地盤の強度や杭間隔による影響をどのように取り入れていくかが今後の課題とされている。以上のような現場観測に基づく研究のほかに、Itoら⁵⁾、Matsuiら⁶⁾は、杭周りの変形を二次元的なものと仮定して、塑性論的な方法により、杭間隔を考慮した側方流動荷重を解析的に求めている。また、Springmanら⁷⁾、Stewartら^{8),9)}、Kimuraら¹⁰⁾は、裏込め盛土あるいは近接盛土を行う場合の地盤および構造物の安定性を遠心模型実験装置を用いて調べている。

これらの研究にもかかわらず、現状では、杭基礎構造物と地盤の変形メカニズムについては未解明な点が多く、地盤強度、杭間隔、軟弱層厚を合理的に取り入れた地盤の安定性ならびに杭に作用する荷

Table 1 Specification of model piles

Pile type	Material	Diameter mm	Thickness mm	$EI \text{ Nm}^2$ (MNm ²)
AL	Aluminum	10.0 (1000)	0.40 (12)	9.62 (962)
SU1	Stainless	10.0 (1000)	0.11 (11)	8.78 (878)
SU2	Stainless	10.0 (1000)	0.17 (17)	13.05 (1305)

() : Prototype scale

Table 2 Test conditions : Backfilling test

Test code	Pile spacing (mm)	Number of piles	Pile length (mm)	Pile tip condition	Existence of retaining wall	Pile type
LP00S	---	0	(100)	---	---	---
PA23S	24	12	100	Fixed	No	SU1
PA24S	24	12	100	Fixed	Yes	SU1
LP81S	35	8	100	Sand	No	AL
LP82S	35	8	100	Sand	Yes	AL
LP83S	35	8	100	Fixed	No	AL
LP84S	35	8	100	Fixed	Yes	AL
PA84S	35	8	100	Fixed	Yes	SU1
LP41S	75	4	100	Sand	No	AL
LP42S	75	4	100	Sand	Yes	AL
LP43S	75	4	100	Fixed	No	AL
LP44S	75	4	100	Fixed	Yes	AL
PA23L	24	12	140	Fixed	No	SU2
PA24L	24	12	140	Fixed	Yes	SU2
PA81L	35	8	140	Sand	No	SU2
PA82L	35	8	140	Sand	Yes	SU1
PA84L	35	8	140	Fixed	Yes	SU1

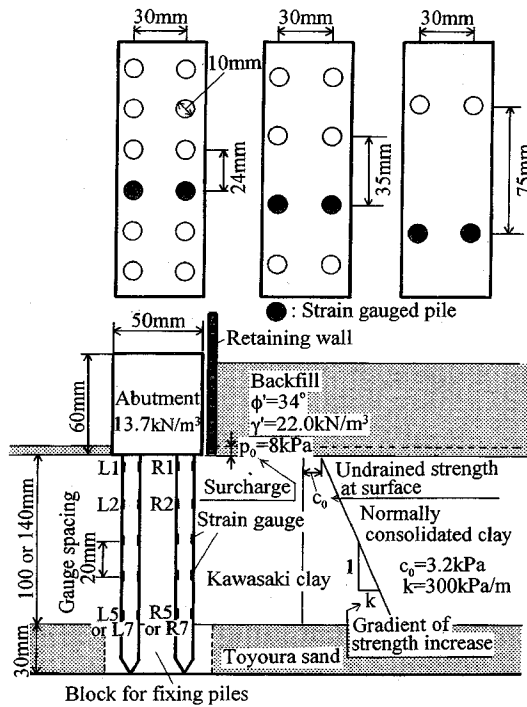


Fig. 1 Model piled abutment and arrangement of piles

重分布の推定法は確立されていない。本研究では、既往の設計法では十分考慮されているとはいえないこれらの要因の影響を調べることを目的に、小型模型内に実物と同等の応力-ひずみ状態を再現することができる遠心模型実験装置を用いて、粘土地盤上の杭基礎橋台模型に対する裏込め載荷実験を行った。

2. 遠心模型実験

(1) 遠心模型および実験条件

遠心模型実験は、小型模型内に実物と同じ応力-ひずみ状態を再現することができるため、土質工学上の多くの問題のように材料の自重応力の影響を強

く受ける場合には、極めて有効な実験手法となる。遠心模型実験における杭の曲げ剛性に関する相似則は、

$$E_p I_p = n^4 E_m I_m \quad (1)$$

となる(Stewart⁸⁾)。ここで、 E は杭材のヤング率、 I は杭の断面二次モーメント、 n は遠心加速度比であり、添字 p は実物、添字 m は模型を意味している。本実験では、外径1mの鋼管杭を実物として想定した外径10mmで肉厚の異なるアルミニウム製およびステンレス製模型杭を3種類作製し、これらを用いて100gの遠心加速度場で実験を行った。ひずみ計測用の杭には杭軸方向に20mm間隔でひずみゲージが、アルミニウム製の杭では橋軸方向の裏込め側に、ステンレス製の杭では両側に貼ってあり、これにより、前者では軸ひずみと曲げひずみの和を、後者では曲げひずみを計測した。各模型杭の諸元はTable 1に示す通りであり、表中には原型となる鋼管杭の諸元も示してある。

本研究では、杭間隔および軟弱層厚(杭長)が軟弱地盤および杭基礎構造物の安定性に与える影響を調べることを目的とし、これらを基本的なパラメータとして実験条件を設定した。実験に用いた杭基礎橋台模型(水中有効単位体積重量13.7kN/m³)をFig. 1に示す。橋軸直角方向の杭間隔は実際的な範囲を考慮して、外径10mmの模型杭に対し、杭径の2.4倍、

Table 3 Soil properties:Kawasaki clay(M30)

Liquid limit : W _L %	52.4
Plastic limit : W _p %	23.1
Plasticity index : I _p	29.3
Density : ρ _s g/cm ³	2.69
Compression Index : C _c	0.327
Swelling Index : C _s	0.046
Void ratio : e at σ _v '= 98 kPa	1.040
Rate of strength increase C _u /σ _{vc} '	0.400

3.5倍および7.5倍の3種類とし、これよりなる杭列はいずれの場合も橋軸方向に杭径の3.0倍の間隔で2列とした。また、軟弱層厚(杭長)は杭径の10倍(100mm)および14倍(140mm)の2種類である。これらの諸条件の下で、より実物に近い状況を想定して杭先を砂層に根入れしたケースならびに杭の境界条件を明確にするために杭先を固定したケースに対して、橋台背後の裏込め載荷実験を行った。この杭先を固定したケースは、強固な支持砂層に十分な長さの根入れをした場合を想定した実験であるともいえる。また、裏込めと橋台の間に仕切板を設置して、裏込めの土圧が橋台に作用しないようにし、側方流動が杭基礎に与える影響のみを調べる実験も併せて行った。橋台側面および仕切板の表面はともに滑面であると見なせる材料からできている。各実験コード毎の条件はTable 2に示す通りである。実験コードの1つ目の数字は杭本数(ただし2は12本を表す)、2つ目の数字は杭先条件と裏込め載荷条件を表し、"1"と"2"は杭先砂層、"3"と"4"は杭先固定で、奇数、偶数は仕切板無し、有りをそれぞれ意味する。また、末尾の"S"と"L"はそれぞれ軟弱層厚100mmと140mmを表している。なお、仕切板は上部を補強、固定したスチール製の板で、PAシリーズの実験では厚さ5mm、LPシリーズの実験では厚さ2mmのものを用いた。LP00Sでは、杭が存在することにより地盤の変形メカニズムがどのように変化するかを調べるために、杭が存在しない場合の裏込め載荷実験を行った。この実験では、構造物の自重により地盤が破壊しないように、構造物の接地圧を10kPaとかなり小さくしてある。

(2) 実験方法

実験に用いた模型容器は幅500mm、高さ326mm、奥行150mmの鋼製容器である。杭先を砂層に根入れする実験では、この底部に水を張り、豊浦砂を投入して十分に締め固め、厚さ30mmの飽和した砂層を作成し、杭先を容器底部に剛結にする実験では、予

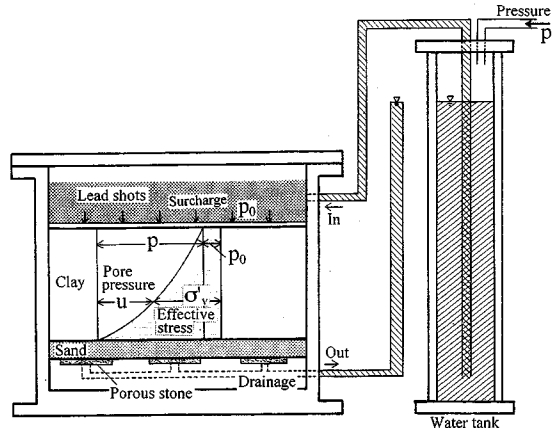


Fig.2 Seepage consolidation system

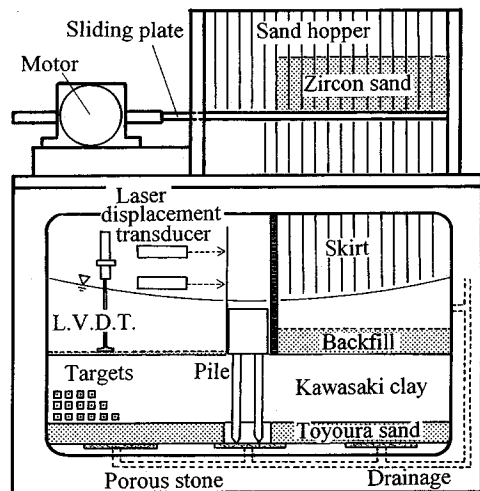
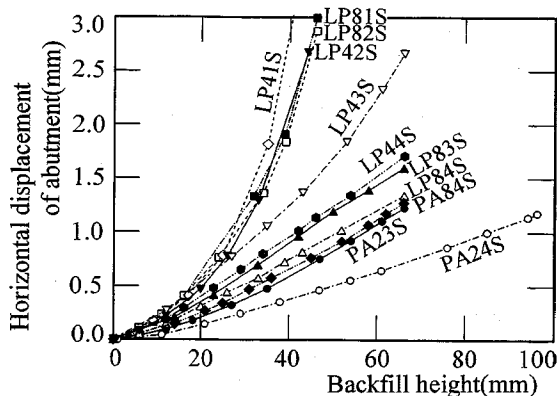
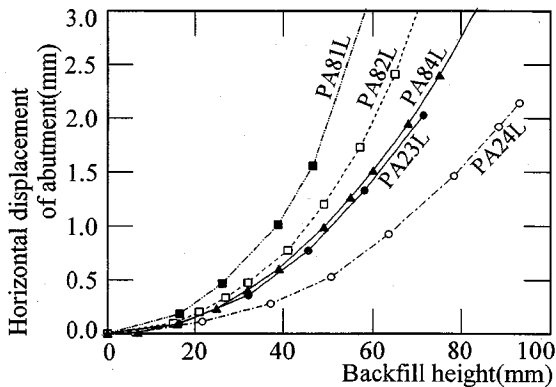


Fig.3 Test setup

め、杭が取り付けられた高さ30mmの杭先固定ブロックを容器に固定する(Fig.1)。次に東京湾川崎沖から採取したTable 3に示す諸特性を有する塑性指数約30の海成粘土(川崎粘土M30(竹村ら¹¹⁾)を液性限界の約1.5倍の含水比に調整し、十分に攪拌、脱気した後容器に所定量投入し、5kPaで予備圧密する。予備圧密終了後、地盤前面に変位計測用の光学ターゲットを設置し、容器背面側から間隙水圧計を埋め込む。次に地盤表面に8kPa分の鉛散弾を敷きならし、これによる予備圧密が終了した後、容器に上蓋を取り付けて密閉し、100gの遠心加速度場における粘土層底面での粘土の自重による有効鉛直応力に相当する水圧を容器上面から作用させ、容器底面を大気圧に開放することにより透水压密を行い



(a) Pile length: 100mm



(b) Pile length: 140mm

Fig.4 Horizontal displacements of abutment versus backfill height

(Fig.2), 深さ方向に強度が増加する正規圧密粘土地盤を作成する(渡部ら¹²)。この透水圧密は、後の遠心加速度場での自重圧密による地盤表面の沈下を少なくし、橋台模型底面と地盤表面との間隔を極力小さくすることが主な目的であるが、これにより遠心圧密時間を短縮することができるという利点も有している。透水圧密終了後鉛散弾を取り除き、杭先を固定する実験では、地盤表面に突き出ている杭頭に幅50mm、高さ60mm、奥行150mmのアルミニウム製の橋台模型を取り付け、また、杭先を砂層に根入れする実験では、杭配置と同じ位置関係となるように小型オーガ(木工用ドリル)で粘土に小孔を開け、そこに予め橋台模型に取り付けられている杭を挿入する。この後100gのもとで8kPaのサーチャージに相当するジルコン砂を地盤表面に敷きならし、容器に遠心加速度場での盛土作成をシミュレートする装置(サンドホッパー)(Takemuraら¹³)を載せ、Fig.3に示すシステムを組み上げる。これを遠心模型実験装置に取り付け、橋台模型を水没させ、100gの遠心加速度場で自重圧密を完了させた後、サンドホッパーを動作させ、30秒毎に約10mm(実物に換算すると約3.5日で1m)の裏込めの築造を水中で行った。水中で盛土を行うのは、空中で行う場合に盛土内に生じるサクシジョンの影響ならびに粘土表面の乾燥を避けるためであり、水中において、実際の盛土材と比較的に近い単位体積重量となるように、非常に大きな密度(土粒子密度 4.63g/cm^3 で、有効単位体積重量 γ' は 22kN/m^3)を有するジルコン砂を盛土材として使用した。また、ここで採用した載荷速度で実験を行うと100mmの裏込めを築造するのに要する時間が約5分となり、この間、粘土地盤はほ

ぼ非排水であると仮定できる。載荷実験中は、地盤の変位、地盤内間隙水圧の変化、裏込め側と前面側の杭のひずみ、橋台の水平変位を計測した。なお、Fig.1には応力履歴より求めた粘土地盤の強度分布および盛土材に用いたジルコン砂の強度定数を示してある。

3. 実験結果

(1) 橋台の水平変位

裏込め盛土高さや橋台模型上面の水平変位の関係をFig.4に、また橋台の水平変位を杭間隔比(杭間隔と杭径の比)に対してプロットしたものをFig.5に示す。変位が小さい間は計測誤差の影響が大きく、有意な比較ができないため、ある程度変位が大きくなり、かつ全ての実験ケースが比較できるように、ここでは裏込め高さが40mmの時点の橋台の水平変位について比較している。同一の杭間隔では、仕切板があるものの方が裏込めの土圧が橋台側面に作用しないため、水平変位が小さくなっている。また、杭先を砂層に根入れしたケースでは、杭先固定のケースに比べ大きな水平変位が発生している。杭間隔比が3.5で、杭先を砂層に根入れした場合、同じ裏込め高さに対して長い杭のケースの方が水平変位はかなり小さくなっており、一般に軟弱層厚が厚い、すなわち杭が長いものの方が水平変位が大きくなるといわれていることは逆の傾向になっている。

杭先を固定した実験では、裏込め高さ40mmの時点ではまだ変位が小さく計測誤差の影響が大きいため、裏込め高さ65mmの時点での橋台の水平変位を

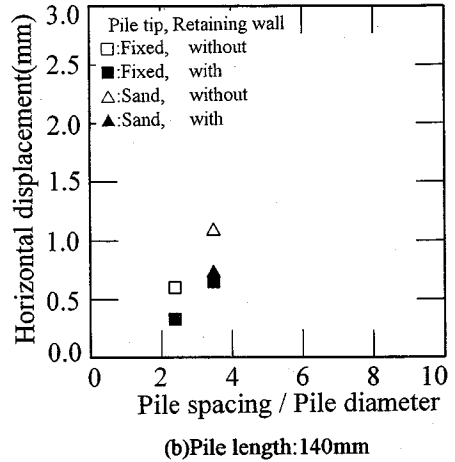
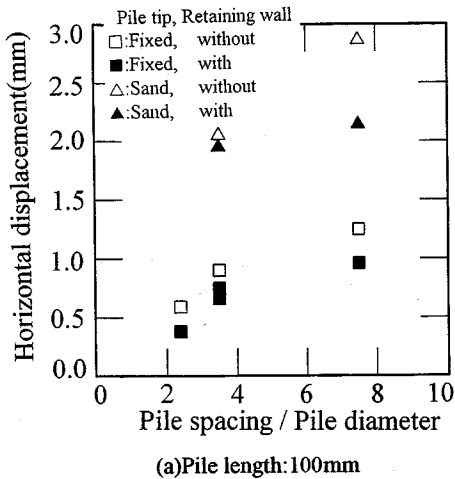


Fig.5 Relationship between horizontal displacement of abutment at backfill height of 40mm and pile spacing ratio

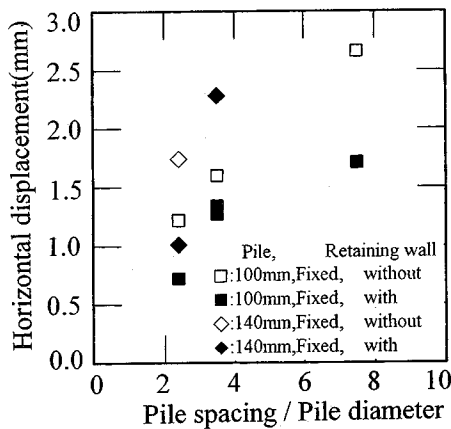


Fig.6 Relationship between horizontal displacement of abutment at backfill height of 65mm and pile spacing ratio(Pile tip fixed)

示したものがFig.6である。短い杭の実験、長い杭の実験とも杭間隔が狭いものの方が水平変位が小さく、杭の本数が増えるほど橋台の安定性が増加するといえる。次に、短い杭の実験で、水平変位がやや大きくなり、計測誤差も少なくなったと考えられる杭間隔比が3.5と7.5のケースにより、仕切板の有無の影響を比較する。仕切板が無いケースに対する仕切板が有るケースの水平変位の割合は、杭間隔比が3.5のケースで約85%、杭間隔比が7.5のケースで65%となっている。この割合が小さいほど裏込めから橋台に作用する土圧の影響が大きいことを意味し、杭間隔が狭く杭の本数が増えるほど杭1本当たりが支持する裏込めの水平土圧が小さくなり、橋台の

水平変位に占めるこの水平土圧の影響の割合は減少するものの、杭が増した分、杭に作用する側方流動荷重の合計が増え、橋台の水平変位に占める側方流動荷重の影響の割合が増加する結果となっている。このことから、橋台の水平変位は、杭間隔が広く、杭本数が少なくなると裏込めから橋台に作用する水平土圧の影響が大きく現れ、逆に、杭間隔が狭く、杭本数が多くなると側方流動荷重の影響が支配的になるといえる。

一方、Fig.6において、同一の杭間隔で長い杭(軟弱層厚140mm)と短い杭(軟弱層厚100mm)を比較すると、長い杭のケースの方が水平変位が大きくなっており、Fig.5に示した杭先を砂層に根入れした実験とは逆の傾向になっている。このことから、深さ方向に強度が増加する正規圧密地盤では、杭先を支持砂層に十分長く根入れし、拘束が非常に強く、剛結されているとみなせるような場合には、一般にいわれているように杭が長いものの方が橋台の変位が大きくなるが、杭先が密な砂層に短い根入れを有し、そこである程度の回転が起こるような場合には、下部支持層への根入れが同じであれば、杭が長いものの方が杭先の拘束が強くなり、杭先付近の粘土の強度が増し、また砂層の有効応力も大きくなることから、一般にいわれていることとは逆に杭基礎構造物全体としての安定性が増加するといえる。このように、裏込め荷重を受ける杭基礎橋台の安定性は杭先の拘束条件の影響を大きく受けることがわかる。

(2) 粘土地盤の変形

Fig.7は、粘土地盤の変形状況を変位ベクトルに

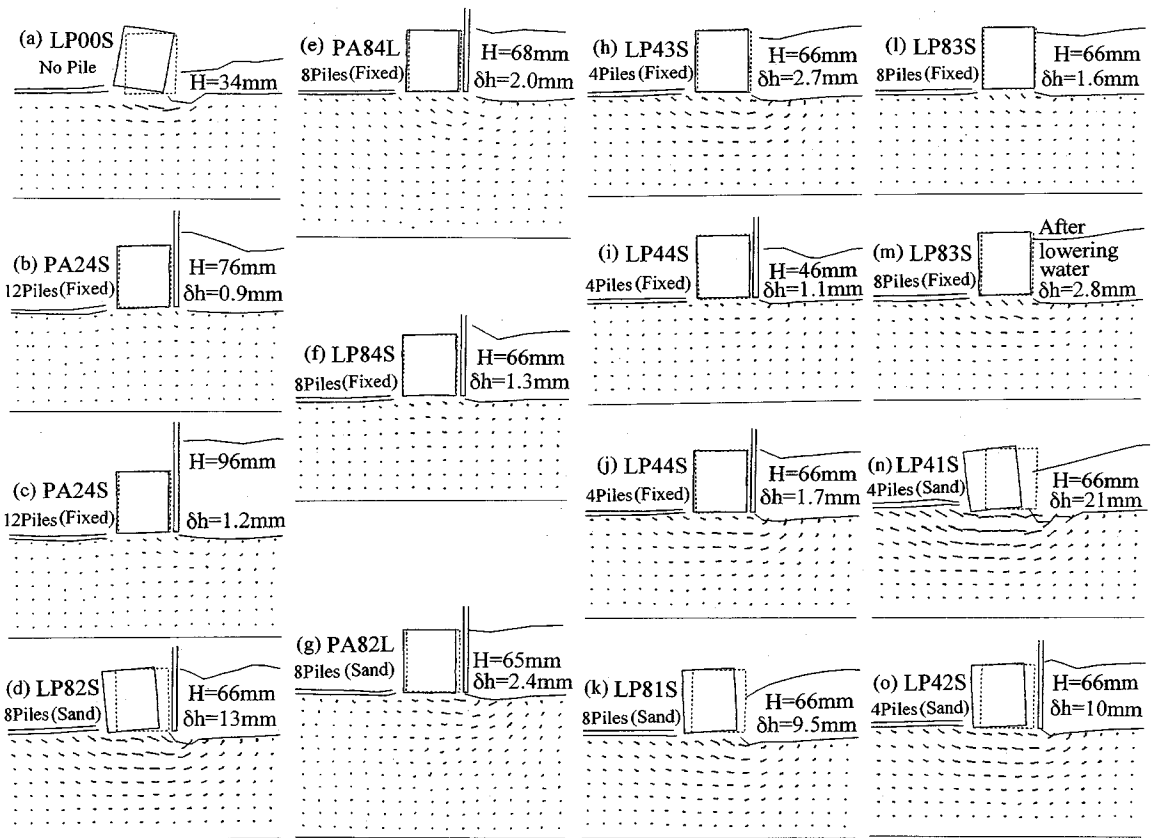


Fig.7 Observed deformation after backfilling

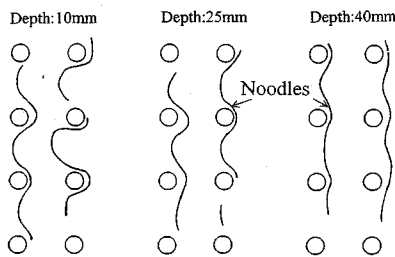
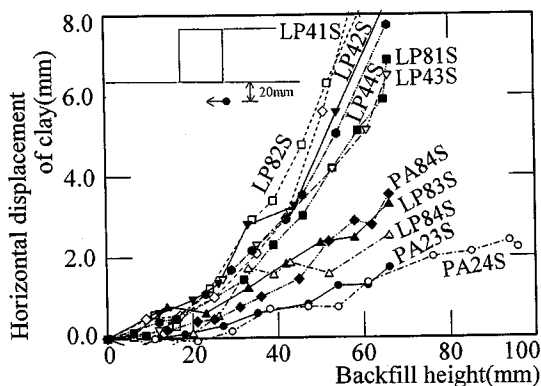


Fig.8 Deformations of clay around piles observed after test(LP83S)

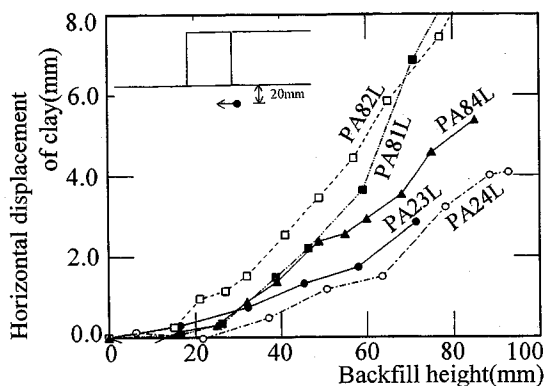
より示したものである。図中の H は裏込め高さを、 δh は橋台の水平変位を表している。杭が存在しない(a)LP00Sでは、橋台の右側の裏込め下から橋台左下端部にかけての浅い領域に橋台上部を中心とした円弧状のすべり線が発生しており、橋台上部が裏込め側に傾くような破壊形状となっている。このような変形をするのは、杭が存在しないため粘土表面の変位とともに橋台が移動すること、ならびに破壊

時の裏込めが低いため、裏込めから橋台に作用する水平土圧では橋台が前面側には転倒しないことなどが原因と考えられる。なお、橋台が沈下し、橋台右下端部からすべり線が発生するのではなく、橋台の重心位置が初期状態に比べ破壊時に高くなっている。これは、橋台の接地圧が非常に小さいこのケースでは、橋台の自重が滑動に対する抵抗モーメントに寄与している破壊パターンとなり、橋台の自重を杭が支持している場合と類似の現象であると考えられる。

一方、杭先を砂層に根入れした実験では、杭に作用する側方流動荷重と裏込めから橋台に作用する水平土圧により左側の杭先付近を中心に回転するような変形が生じており、杭および杭周辺の粘土地盤が一体となって前面側に倒れ込むように破壊している。また、杭先を固定した実験では、橋台右下から橋台下の浅い領域に水平変位が見られ、LP00Sと類似した変形パターンとなっているが、杭の存在により橋台の変位が非常に小さく、上述のような回転移動が生じないために、構造物(杭上部)の変位より大きな地盤変位が浅い領域に集中して発生し、この部分の



(a) Pile length: 100mm



(b) Pile length: 140mm

Fig.9 Horizontal displacements of clay 20mm below abutment versus backfill height

粘土が杭と杭との間をすり抜けている様子が観察される。このすり抜けによる水平変位(相対変位)はせん断変形が集中する地盤表面から2つ目のターゲット付近で最大となり、それ以深ではほぼ直線的に、しかしやや右に凸の形状となるように減少している。

杭先を砂層に根入れしたケースで杭の長さが異なる(d)LP82Sと(g)PA82Lを比較すると、杭が長いPA82Lの方が杭先の拘束が強く構造物が安定し、その結果、地盤も比較的安定して杭先固定のケースに近い挙動を示している。杭先を固定したケースで杭の長さが異なる(f)LP84Sと(e)PA84Lを比較すると、地盤の変形状況は、その大きさ、深さ方向の分布ともほぼ等しく、杭が長いPA84Lでは地盤深部ではほとんど変位を生じていないことがわかる。変形が及ぶ深さは橋台幅とともに変化すると考えられるので、このことを考慮すれば、およそ橋台幅の2倍より深い領域では有意な変位は生じないものといえる。

杭先を固定したケースで杭間隔が異なるPA24S, LP84S, LP44Sの裏込め高さがほぼ同じ時点での地盤の変形状況((b),(f),(j))を比べると杭間隔が狭くなるに従って地盤の変位も小さくなっており、Fig.6で示した橋台の安定性と同様に杭本数が増加すると地盤の安定性も向上することがわかる。また、(c),(f),(i))は、上記の3つの実験において実際に上部構造物に支障を来すと考えられている橋台変位100mm(木村³⁾)に対応する橋台変位(1mm)とほぼ等しい1.2mmの変位が生じた時点のものであるが、地盤の変形に杭間隔の差はあまり現れておらず、杭先の拘束が強い場合には、本実験で対象とした杭間隔が杭径の2.4倍から7.5倍という実際の範囲では、杭間隔によらず地盤の変位と構造物の変位の関係は

ほぼ等しいものといえる。

なお、杭先を固定したケースでは、仕切板有りのケース((f)LP84Sおよび(j)LP44S)と仕切板無しのケース((i)LP83Sおよび(h)LP43S)をそれぞれ比べると、地盤の変形状況は非常に良く似ており、地盤の変形パターンは仕切板の有無にはあまり影響を受けないといえる。

杭周辺の粘土の変形状況を観察するために、光学ターゲット設置時に粘土中に予め挿入しておいた素麺を実験後に掘り出して、その変形状況をスケッチしたものをLP83SについてFig.8に示す。なお、LP83Sでは、約65mmまでの裏込めを完了させた後、橋台前面側の水位を下げるにより裏込めの重量を増加させ、意図的に地盤を大きく変形させた。深さ10mmでは粘土が杭間を非常に大きくすり抜けているが、深さ40mmでは粘土が杭間をあまりすり抜けておらず、この中間的な挙動をしている深さ25mm付近にすべり面が存在していると考えられる。また、粘土のせん断変形は杭近傍のごく限られた領域に集中しており、杭周りの塑性変形の集中領域は極めて狭い範囲であるといえる。なお、Fig.7(m)(LP83S)に示した水位を下げた後の地盤の変形状況よりもFig.8における地盤内部の変位の方がかなり大きいことから、Fig.7に示した地盤の変形は、粘土や光学ターゲットと容器前面の透明なアクリル板との間の摩擦のために実際よりもやや小さなものとなっているといえる。

Fig.7に示した地盤の変位ベクトルからもわかるように、橋台下の粘土の水平変位は、粘土表面から2つ目のターゲットで最も大きくなっており、このターゲットの水平変位が地盤の安定性の1つの指標になるものと考えられる。そこで、橋台の右下の地

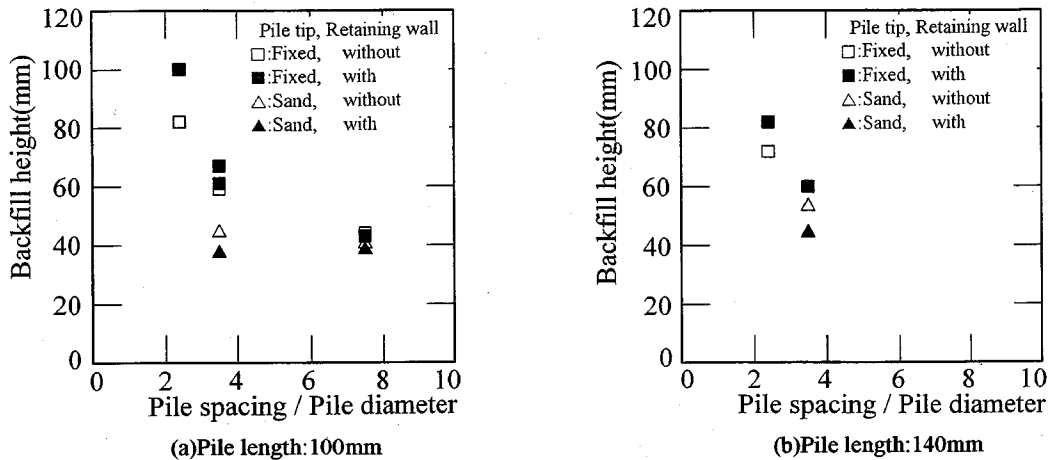


Fig.10 Relationship between backfill height at failure(horizontal displacement of clay of 3mm) and pile spacing ratio

盤表面から2つ目のターゲットの水平変位と裏込め高さの関係を示したものがFig.9である。容器前面側の透明なアクリル板と粘土との摩擦、および実験手法上橋台模型底面と粘土表面との間にわずかに生じてしまう隙間が各実験毎に微妙に異なることや、写真から読み取った座標をもとにプロットした図であることから、かなりの実験誤差および計測誤差を含んだものになっている。この裏込め高さ粘土の水平変位の関係は、Fig.4に示した橋台の水平変位に比べてかなり大きくなっているが、その変化の傾向はFig.4の裏込め高さ粘土の水平変位の関係と非常に良く似ているといえる。杭先固定のケースでは、Fig.4の橋台の変位は杭の変形(たわみ)に対応しており、これは杭に作用する側方流動荷重の分布にも対応している。従って、地盤の水平変位と杭に作用する側方流動荷重の大きさとの間には非常に大きな相関があるといえる。すなわち、杭間隔が狭く地盤が安定している場合には側方流動荷重が小さく、その結果橋台の変位も小さくなり、また、杭間隔が広く地盤が不安定な場合には側方流動荷重が大きく、その結果橋台の変位も大きくなることわかる。

Fig.9において、粘土の水平変位が大きなケースでは、水平変位が3mmを超えた付近から裏込め高さに対して水平変位が急増していることから、この時点を破壊と定義し、そのときの裏込め高さを杭間隔に対してプロットしたものをFig.10に示す。なお、Fig.9は実験誤差や計測誤差が非常に大きく含まれているため、これを滑らかな線で近似して粘土の水平変位が3mmになる点を求めた。また、一部の試験では水平変位が3mmに達していないため、この

ような場合には外挿して求めている。杭先を砂層に根入れした短い杭のケースでは、杭間隔の差の影響があまり現れていないことから、杭先の根入れが浅く、この部分で回転が生じるような場合には、杭の存在は地盤の安定性にはほとんど影響せず、受働杭として機能していないといえる。一方、杭先を固定したケースでは、杭間隔が狭いものほど地盤破壊時の裏込めが高くなっており、杭の存在が地盤の安定性に大きく影響していることがこの図からも確認できる。このことから、支持層への浅い根入れによって杭の鉛直支持力が十分に期待できる場合でも、受働杭として機能させる場合には、十分な長さの根入れが必要であることがわかる。また、杭間隔比が7.5になると、杭先の条件の差による違いが見られなくなり、杭先を固定したケースでも杭の存在が地盤の安定性にさほど寄与しておらず、杭軸直角方向にある程度杭本数を多くしないと、受働杭としての機能が十分には発揮されないといえる。

(3) 地盤内過剰間隙水圧の変化

杭先固定ケースにおける裏込め築造時の過剰間隙水圧の変化をFig.11に示す。いずれのケースでも裏込め側、前面側ともに裏込めに伴い間隙水圧は載荷初期の段階からほぼ直線的に増加しており、間隙水圧計設置位置での応力の変化は裏込め荷重に対して原点を通る直線として表せる。また、橋台前面側の間隙水圧の変化を見ると、杭間隔が広く、杭が長いものの方が大きな過剰間隙水圧を生じており、裏込めの土圧が前面側により大きく伝播することがわかる。

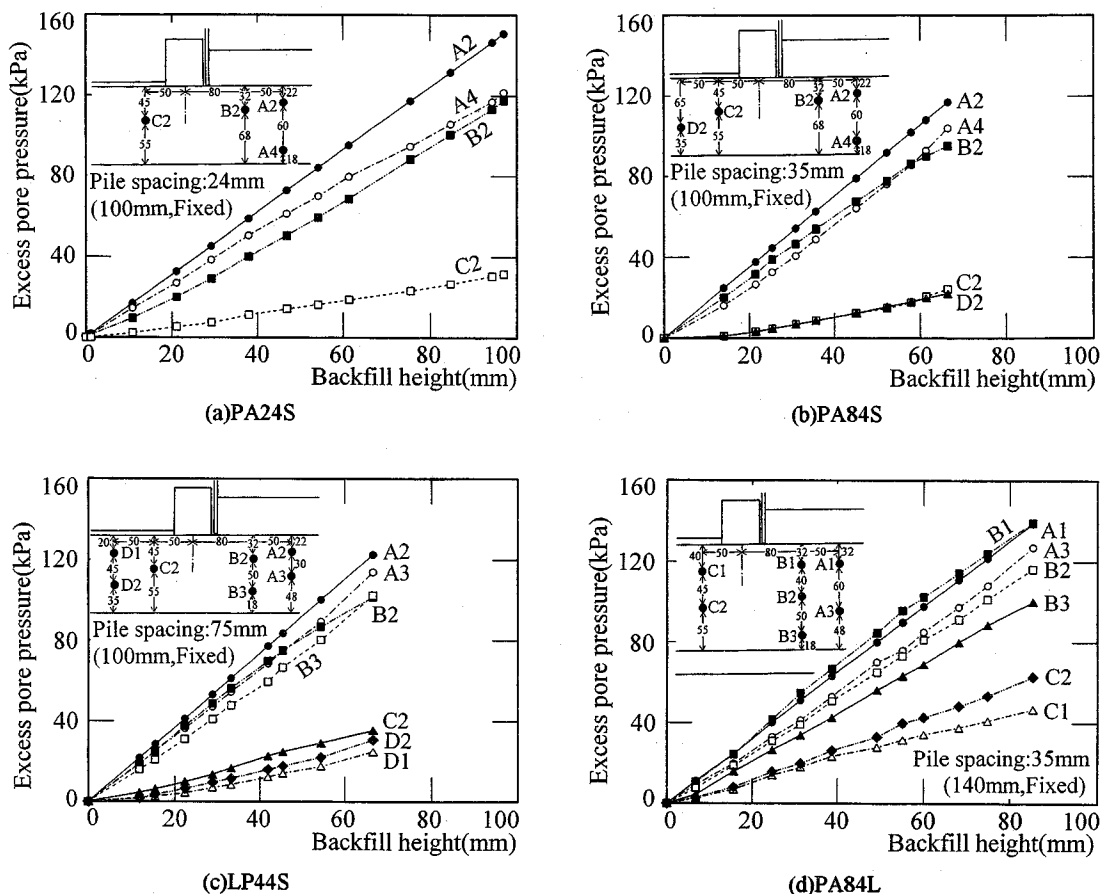
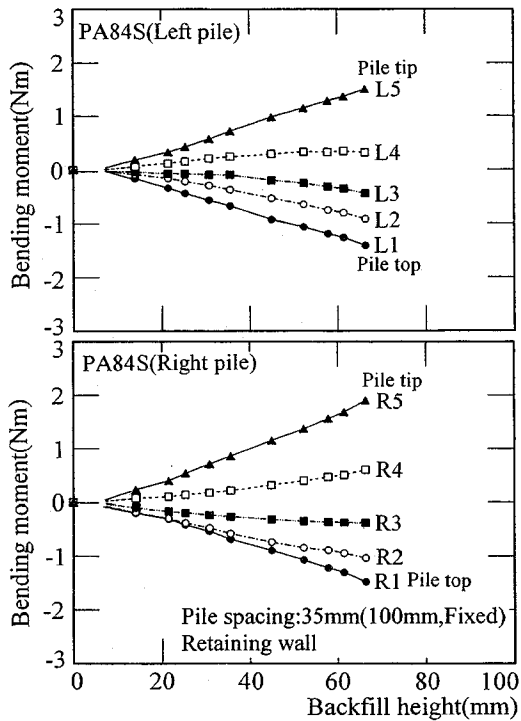


Fig.11 Variation of excess pore pressure during backfilling test

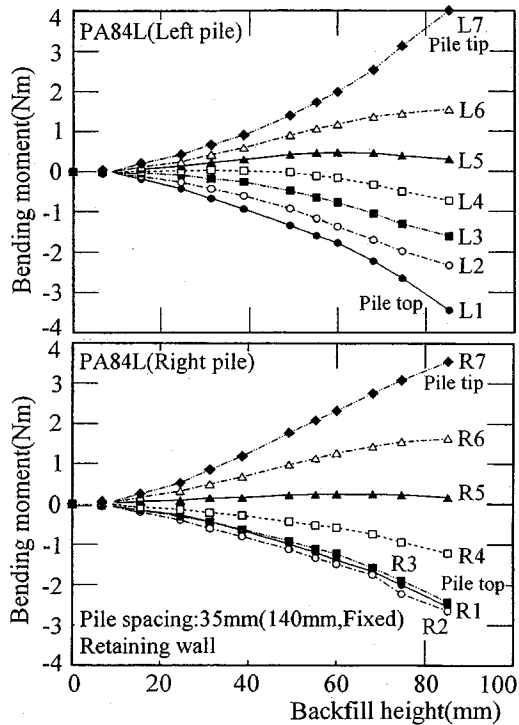
(4) 杭に生じる曲げモーメントの変化

Fig.12は、杭先を固定し仕切板を用いた実験PA84SとPA84Lにおける裏込め高さと杭に生じる曲げモーメントの関係を示したものである。曲げモーメントはひずみゲージにより計測されるひずみをもとに算出しているが、杭の上下端近傍では、杭を剛結している部分の影響が現れており、特に杭が長いPA84Lの右側では、この付近(R1, R2)の曲げひずみがうまく計測できていないようである。この部分の値を無視して考えれば、杭先固定のケースでは、左右2列の杭の曲げモーメントがほぼ同様の変化をしており、杭先が十分に拘束されている場合には、橋台底面の拘束により粘土が水平方向にしか変位できず、左右の杭にほぼ等しい側方流動荷重が作用することがわかる。PA84Lの左側の杭で裏込め高さ60mm以降曲げモーメントに大きな増加が見られるのは、杭上下端のL1とL7でのみ急増していることから曲げ変形により杭が降伏したためと考えられる。仕切板により裏込めの土圧が橋台に作用しな

いこれらのケースでは、裏込め高さと曲げモーメントの関係は、裏込め高さ7~8mmまでは曲げモーメントをほとんど生じず、それ以降杭体や地盤が降伏するまではほぼ直線的に変化していくといえ、載荷初期から発生する過剰間隙水圧とは異なる変化をしている。曲げモーメントが直線的に変化するのは、過剰間隙水圧の変化のところでも述べたように、裏込め築造に伴う地盤内の応力伝播が、地盤の破壊近くまではかなり直線的に変化することと関連していると考えられる。Stewartら^{8),9)}も遠心模型実験より同様の結果を得、曲げモーメントが直線的に増加し始める盛土の圧力が約 $3c_u$ であることを示している。ここで c_u は粘土の非排水強度であり、彼らの実験で対象としている粘土地盤は上部層が過圧密で、ほぼ一様な強度の地盤である。本研究では、いずれの実験ケースでも裏込め高さ約7~8mmのところ折れ曲がり点になっており、この高さの盛土の鉛直圧力は $4.8c_0 \sim 5.5c_0$ となる。ここでは自重圧密された正規圧密粘土地盤の代表強度として表面強度 c_0 を用

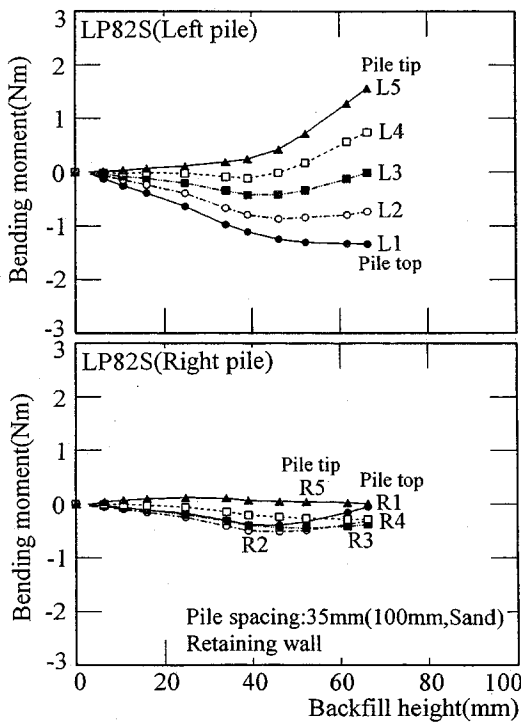


(a)PA84S

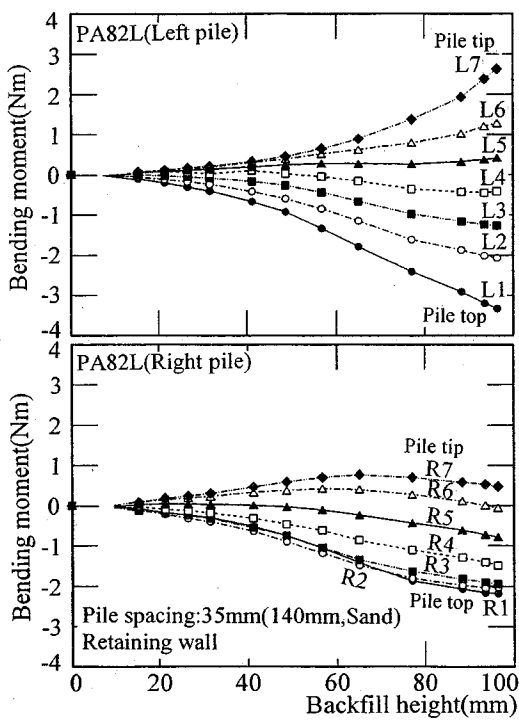


(b)PA84L

Fig.12 Bending moments versus backfill height(Pile tip fixed)

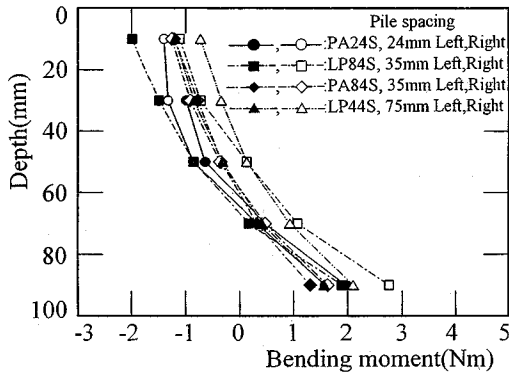


(a)LP82S

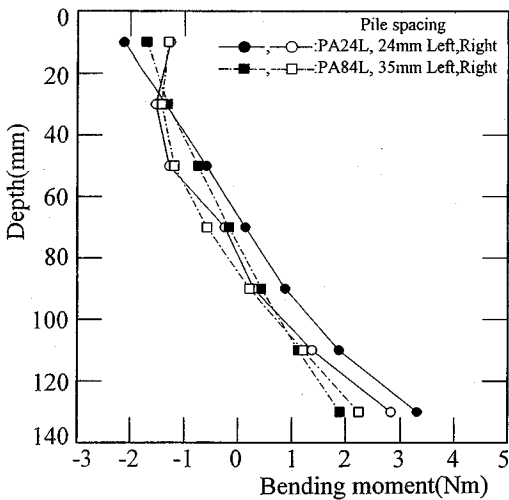


(b)PA82L

Fig.13 Bending moments versus backfill height(Pile tip in sand layer)



(a) Pile length: 100mm (with retaining wall)



(b) Pile length: 140mm (with retaining wall)

Fig. 14 Observed pile bending moments at failure point of clay around piles

いているため、Stewartら^{8),9)}の結果より係数が若干大きくなっているが、Fig. 7において大きな水平変位を生じる領域での粘土の平均強度(粘土表面から深さ20mmまでの平均強度 $c_u = 6.2 \text{ kPa}$)で考えれば、本研究の結果($2.4c_u \sim 2.8c_u$)とStewartら^{8),9)}の結果はかなりよく一致していると判断できる。また、いずれの実験ケースでもほぼ同一の盛土高さでひずみが発生し始めることから、この値は、本研究で対象とした各種パラメータの影響をあまり受けないものと考えられる。しかし、本研究で対象としていない橋台幅の影響はある程度受けるものと予想される。

Fig. 13は、杭先を砂層に根入れし、仕切板を用いた実験LP82SとPA82Lの裏込め高さと杭に生じる曲げモーメントの関係を示したものである。なお、LP82Sでは、杭の片面にのみひずみゲージが貼られ

ているため、軸力の影響を若干含んだデータとなっている。短い杭のLP82Sでは裏込め高さ30mm程度、長い杭のPA82Lでは裏込め高さ60mm程度で構造物が大きく変位し始めるまでは、左右の杭とも杭先固定のケースに比べ若干小さいものの、ほぼ同様に曲げモーメントが直線的に増加している。しかし、さらに裏込めを高くすると、構造物前面側に当たる左側の杭では曲げモーメントの増加が見られるのに対し、裏込め側に当たる右側の杭では曲げモーメントの増加はほとんど生じない。これは、構造物前面側の杭は、杭先が砂層中で回転するように変位するため、砂層からの水平抵抗をより大きく受けるが、裏込め側の杭は、大変形時には杭先が砂層中から引き抜かれる方向に変位するため、砂層からの拘束が減少することが原因と考えられる。杭が長い方が裏込め側の杭の曲げモーメントの減少割合が小さいことから、Fig. 5で示したように杭先を砂層に根入れした実験では、杭が長いケースの方が上部構造物の安定性が向上することの理由として、粘土層が厚い分、下部粘土層の強度が大きく、また下部砂層の拘束圧が増加しているため、短い杭に比べ橋台の変位に対する杭の深部の変位や裏込め側の杭の浮き上がり量が小さく、下部層の拘束がそれほど低下しないことが考えられる。

Fig. 14は、Fig. 10で定義した杭周辺地盤が破壊に至る時点での、杭の曲げモーメントの深さ方向の分布を示したものである。ここでは、杭の境界条件が明確であり、かつ裏込めの水平土圧が橋台に作用せず、側方流動荷重の影響のみを比較できるケースとして、杭先を固定し、仕切板を設置した実験について示している。また、橋台底面と粘土との摩擦による成分を差し引いた結果を示している。曲げモーメントは杭に貼付されたひずみゲージにより計測されたひずみをもとに算出しているが、アルミニウム製模型杭(AL)を用いたLP84SとLP44Sでは、ひずみゲージが曲げに対し片側にしか貼られておらず、軸ひずみの影響を含めて曲げモーメントに換算しているため、左側の杭では正の方向に、右側の杭では負の方向に値が若干シフトしていることに注意する必要がある。これらの分布を見ると、破壊時の曲げモーメント分布は、いずれの杭間隔でもほぼ同様の曲率を有した曲線となっていることがわかる。曲げモーメントの2階微分は側方流動荷重となることから、破壊時の側方流動荷重の分布は、杭間隔比が2.4~7.5倍の範囲では杭間隔によってあまり変化しないものと結論づけられる。Fig. 7の(c), (f), (i)において示した通り、橋台の変位がほぼ同じ時点での地

盤の変形状況がほぼ同じということは、杭と地盤の相対変位が同じであるといえ、この杭間隔の範囲であるならば、側方流動荷重はこの相対変位によって決まるものと考えられる。

4. 結論

本研究では、軟弱地盤中の杭基礎橋台背面に裏込め載荷する遠心模型実験を行い、以下の結論を得た。すなわち、

- 1) 杭先の拘束が十分にある場合、地盤のせん断変形は、構造物周辺の浅い領域に集中して発生する。また、地盤と杭の相対変位は、このせん断変形の集中領域で最も大きく、それ以深では橋台幅の約2倍の深さまで、裏込め側にやや凸な形状となるもののほぼ直線的に減少し、さらに深い領域ではほとんど相対変位を生じない。
- 2) 杭周りの粘土のせん断変形は、杭近傍のごく限られた領域に集中して生じる。
- 3) 杭先の拘束が十分にある場合には、杭間隔が狭くなるほど、すなわち、杭の本数が増加するほど地盤の安定性が向上し、破壊時の裏込め高さが高くなる。
- 4) 杭先の支持層への根入れが浅く、ある程度回転が生じるような場合、深さ方向に強度が増加する正規圧密粘土地盤では、杭が長い方が杭先の拘束が強くなるため、杭基礎構造物および地盤の安定性が向上する。しかし、さらに粘土層が厚く、杭が長くなると杭先の拘束が十分にあるものと見なせるようになり、杭が著しく長いものの方が安定性が低下する可能性もある。
- 5) 杭間隔が広く杭本数が少ない場合には、裏込めから橋台に作用する水平土圧の橋台変位に対する影響の程度が大きくなるが、杭間隔が狭く杭本数が多い場合には、杭に作用する側方流動荷重の影響が橋台変位に対して支配的となる。
- 6) 杭間隔が杭径の2.4倍から7.5倍という実際の範囲では、地盤の変位と杭基礎構造物の変位の関係はほぼ等しいものとなり、杭1本当たりの挙動に杭間隔の影響はあまり現れない。
- 7) 裏込め高さや地盤内に生じる過剰間隙水圧、すなわち地盤内に伝播する応力の関係は、載荷初期からほぼ直線的に変化する。
- 8) 水平変位が大きな領域の粘土地盤のせん断強度を c_u とすると、側方流動により杭に生じる曲げモーメントは、裏込めの鉛直圧力が $2.5c_u \sim 3.0c_u$

まではほとんど生じず、それ以降破壊に至るまでは裏込め高さに対して直線的に変化する。

- 9) 杭間隔が杭径の2.4倍から7.5倍の範囲では、杭周辺地盤破壊時の側方流動荷重の分布はほぼ等しいものとなる。

遠心模型実験を通して、上記のように杭間隔、軟弱層の厚さ、杭先の拘束条件などの要因が、地盤の安定性や杭基礎の変形挙動に与える影響について定性的に明らかにした。これらの影響を定量的に明らかにしていくためには、各影響要因を考慮に入れた地盤の安定性や杭に作用する側方流動荷重の評価が必要であり、これについては現在検討中である。

参考文献

- 1) Broms, B. B. : Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27-63, 1964.*
- 2) 堀部正文, 塩井幸武, 浅沼英弥 : 軟弱地盤上の橋台の設計, 第36回土木学会年次講演概要集, III, pp.572-573, 1981.
- 3) 木村 衛 : 軟弱地盤上の橋台の側方移動対策, 土と基礎, Vol.30, No.5, pp.33-40, 1982.
- 4) 石原静夫, 越田 昭, 斉藤正忠, 前田詔一 : 側方流動の杭基礎に及ぼす影響に関する現地試験, 土と基礎, Vol.29, No.4, pp.19-24, 1981.
- 5) Ito, T. and Matsui, T. : Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles, *Soils and Foundations, Vol.15, No.4, pp.43-59, 1975.*
- 6) Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T. : Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements, *Soils and Foundations, Vol.22, No.2, pp.71-81, 1982.*
- 7) Springman, S. M. and Bolton, M. D. : Modeling the behavior of piles subjected to surcharge loading, *Proc. of Centrifuge 91*, pp.253-260, 1991.
- 8) Stewart, D. P., Jewell, R. J. and Randolph, M. F. : Embankment loading of piled bridge abutments on soft clay, *Proc. of GEO-COAST '91*, pp.741-746, 1991.
- 9) Stewart, D.P., Jewell, R.J. and Randolph, M. F. : Centrifuge modelling of piled bridge abutments on soft ground, *Soils and Foundations, Vol.34, No.1, pp.41-51, 1994.*
- 10) Kimura, T., Takemura, J., Watabe, Y., Suemasa, N. and Hiro-oka, A. : Stability of piled bridge abutments on soft clay deposits, *Proc. of 13th ICSMFE*, pp.721-724, 1994.
- 11) 竹村次朗, 廣岡明彦, 末政直晃, 木村 孟 : 中間土-Headache Soilか否か? -, 土と基礎, Vol.41, No.7, pp.1-4, 1993.
- 12) 渡部要一, 末政直晃, 竹村次朗, 木村 孟 : 軽量材を用いた軟弱地盤上の裏込め盛土実験, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.2211-2212, 1991.
- 13) Takemura, J., Watabe, Y., Suemasa, N., Hirooka, A. and Kimura, T. : Stability of soft clay improved with sand compaction piles, *Proc. of 9th ARC*, pp.543-546, 1991.

(1994. 11. 8 受付)

CENTRIFUGE MODEL TESTS ON INTERACTION BETWEEN SOFT CLAY AND PILED BRIDGE ABUTMENTS SUBJECTED TO BACKFILL LOADING

Yoichi WATABE, Jiro TAKEMURA and Tsutomu KIMURA

Stabilities of piled bridge abutments in soft clay deposits subjected to backfill loading is affected by many factors; i.e. pile spacing, depth of soft clay ground, pile length and fixity conditions of pile tip etc. A series of centrifuge in-flight backfilling tests were conducted for normally consolidated clay deposits, in which an undrained strength increases linearly with depth, in order to investigate the effects of these influence factors. From results of the tests, the effects of these factors to the stability and deformation mechanism of soft clay ground and the behavior of piled structure were studied, qualitatively.