

粘土地盤中の模型杭の周面摩擦力に関する実験的研究

Experimental Study on Frictional Resistance of a Model Pile in Clay

田中 邦博* (Kunihiro Tanaka)

石堂 稔** (Minoru Ishido)

村田 秀一*** (Hidekazu Murata)

近年、軟弱地盤等で、摩擦杭の合理性・経済性が再認識され、現場に於て積極的に採用される件数が多くなってきている。しかし、摩擦杭の押込み時と引抜き時の周面摩擦力については、地盤が締め固められる方向（押込み時）、緩められる方向（引抜き時）で、周面摩擦力の發揮機構に差があるのではないかと考えられているが、両者が等しいまたはほぼ等しいとする場合と、異なるとする場合とに分かれ、合理的な評価方法を確立するためには、さらに、データの蓄積と検討を要するテーマとなっている。

本研究では、杭の外径、材質による杭の周面摩擦力の違いを比較検討する目的で、杭の外径、杭の材質（周表面の粗滑性）および杭の周面地盤（粘土）の強度を変化させた条件のもとで、有明粘土地盤に埋設した模型杭による押込み実験と引抜き実験を行った。その結果次のことが認められた。①押込み時で、木・コンクリート杭は $f_{max} = C$ 、鋼管杭は $f_{max} < C$ の関係を示している。②引抜き時で、材質に関わらず $f_{max} < C$ の関係を示していることである。

キーワード：杭、支持力、粘土、摩擦、模型実験 E 4

1. はじめに

杭基礎のうち、摩擦杭は、支持力のほとんどを周面摩擦力に依存していることから、良質の支持地盤を支持層とする支持杭に比べ、種々の挙動（例えば、長期の支持力・沈下特性や地震時の安定性等）に不明確な点があり信頼性に乏しい。杭基礎については、従来より支持杭万能の風潮が支配的であったが、近年、軟弱地盤等で深い支持地盤を持つ支持杭を施工する機会が増えるにつれ、過大な負の摩擦力の発生や、顕著な不同沈下の招来などの問題がとりざたされたり、併せて、長尺杭の施工に伴う不経済性が論議されることが多くなり、摩擦杭の合理性・経済性が再認識され、現場に於て摩擦杭が積極的に採用される件数が多くなってきている。

しかし、摩擦杭の支持力特性、特に周面摩擦力については、現行の算定方法では、それを過小に評価し過ぎる嫌いがあるとの見方がほとんどである。また、押込み時と引抜き時では、地盤が締め固められる方向（押込み時）、緩められる方向（引抜き時）で、周面摩擦力の發揮機構に差があるのではないかと考えられているが、既往のデータで見限りでは、両者が等しいかまたは、ほぼ等しいとする場合^{1), 2), 3), 4), 5)}と、異なるとする場合^{6), 7)}とに分かれることなど、合理的な評価方法を確立するためには、さらに、データの蓄積と検討を要するテーマとなっている。

以上のことから、杭の周面摩擦力の合理的な評価方法を確立するために、筆者らは、有明粘土を対象に室内模型実験⁸⁾を行っている。

本研究ではこれまでの実験に引き続いて、杭の外径、材質による杭の周面摩擦力の違いを比較検討する目的で、杭の外径、杭の材質（周表面の粗滑性）および杭の周面地盤（粘土）の強度を変化させた条件のもとで、有明粘土地盤に埋設した模型杭による押込み実験と引抜き実験を行った。

本報告は、押込み時の周面摩擦力と押込み量・引抜き時の周面摩擦力と引抜き量との関係、最大周面摩擦力と地盤の強度との関係、および押込み時と引抜き時の周面摩擦力の比較などについて述べたものである。

*九州共立大学工学部土木工学科 講師

**九州産業大学工学部土木工学科 教授

***山口大学工学部社会建設工学科 教授

2. 実験方法

実験に使用した試料は、佐賀市近郊で採取した有明粘土で、人為的に2mm以上の粒状物を取り除いたものである。その主な物理的性質は、表-1に示している。

表-1 物理的性質

試験項目	数値
比重	2.62
粘土分 %	10.90
シルト分 %	88.78
砂分 %	0.32
液性限界%	85.9
塑性限界%	42.9
塑性指数	43.0

供試体は、内径25cmのモールド（塩化ビニールパイプを使用）の中央に模型杭を設置し、模型杭の周面を包むようにモールド内に、初期含水比を液性限界値の約1.5倍に調節し、十分に練り返した有明粘土を30cmの厚さになるまで入れた。この時、押込み・引抜き時に杭先端部の影響が出ないように、粘土は模型杭の周面のみに接し、模型杭の上下先端部5~10cmは粘土地盤から突き出た状態にした。

模型杭は長さ50cmの円柱形で、材質を木（ラワン材）・コンクリート（モルタルを主材とし、細鉄筋を芯としたもの・RC）・鋼管の3種類とし、それぞれに杭の外径を3, 4, 5cmと変化させた。さらにモールド内の粘土の強度を種々に変化させるために、放置(0)を含め表-2に示す圧密荷重を30日間載荷した。圧密荷重には、コンプレッサー制御による空気圧を用いた。また、圧密を促進させるために、粘土の上下およびモールドの内側面にろ紙を置き、さらに、下部には砂の薄層を敷いて両面排水の形式とした。なお、載荷板は、圧密時に杭に影響しないように杭との間にはクリアランスを設け、杭の突出部の下端はシールをしていないので、圧密荷重載荷期間は杭の移動を防止するため下端に支えを置いた。供試体の概略図を図-1に示す。

実験は、圧密期間経過後、圧密荷重を除荷した後、直ちに歪制御（1mm/1min）方式で、押込みと引抜きのそれぞれについて別々に、静的な一方向のみの単調加力実験を行った。試験機の概略図を図-2、図-3に示す。このうち、図-2は押込み時の概況であり、図-3は引抜き時の概況である。

粘土地盤の強度は、非排水せん断強度（粘着力(Cu)）による評価を行うため、実験後、杭周面の粘土地盤に対して、供試体を上下方向に三等分する位置でそれぞれ左右2ヶ所の点で室内ペーンせん断試験^{8)・9)}を行い、各測定値を平均して求めた。

なお、杭の外径とモールドの内径との比D/dの設定は、三浦らの報告¹⁰⁾に基づいている。

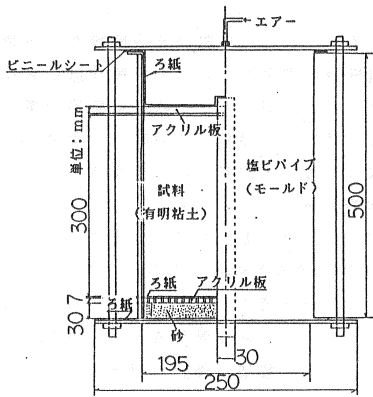


図-1 供試体の概略図

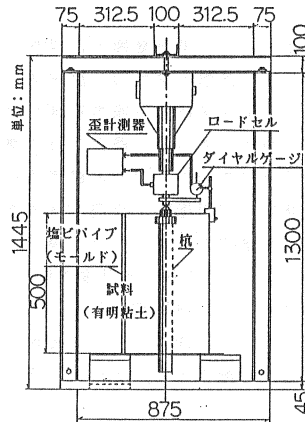


図-2 試験機の概略図 (押込み実験)

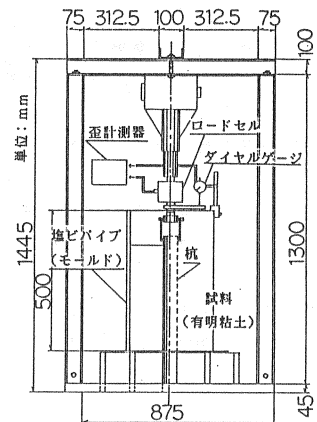


図-3 試験機の概略図 (引抜き実験)

3. 実験結果と考察

表-2には、今回行った押込み実験および引抜き実験での最大荷重、その時の杭の変位置、最大周面摩擦力をなどをまとめて示している。

なお、周面摩擦力 f は、次式¹¹⁾で与えられると仮定している。

$$f = P / (\pi \cdot D \cdot L) \dots \dots \dots (1)$$

ここに P: 荷重(kgf) - 試験体の自重による影響を補正¹¹⁾ (この場合、押込み時は杭の自重を加え、引抜き

杭の周面摩擦力の評価法

時には差し引く)したものである。なお、最大荷重は、供試体のなかには変位置の増加に伴い荷重が不規則な増減を示し、最大時の荷重を定性的に判定することに困難が伴うものもあるが、変位置に関係なく荷重の最大値を採用した。

D : 杭の外径 (cm)

L : 杭の貫入量で再圧密後の粘土厚 (cm)

これらの実験的事実に基づいて、杭の外径および杭の材質の違いが杭の周面摩擦力に及ぼす影響に注目して実験的考察を行うと次の通りである。

表-2 実験結果の総括表

杭の種類	杭の直径 (cm)	圧密荷重 (kgf/cm ²)	押引別	最大周面摩擦力 f _{max} (kgf/cm ²)	その時の引抜き量・押込み量 (mm)	粘着力C _u (kgf/cm ²)	最終粘土厚 L (cm)	最大荷重 P _{0max} (kgf)	抗自重を考慮した最大荷重P _{max} (kgf)
鋼管	3.0	0	押	0.1684	9.73	0.048	28.5	44.554	45.229
				0.0734	9.24	0.070	29.5	19.718	20.394
				0.0473	7.54	0.045	29.0	13.603	12.925
			引	0.0267	0.21	0.050	27.5	7.613	6.933
				0.1001	25.49	0.047	28.0	27.082	26.407
				0.0933	14.50	0.042	24.2	26.832	28.382
	4.0	0	押	0.1013	6.74	0.042	27.1	32.947	34.489
				0.0360	22.75	0.049	22.5	11.731	10.188
				0.0929	28.00	0.050	26.7	32.698	31.158
			引	0.0524	13.99	0.106	24.8	16.099	17.640
				0.1135	16.74	0.083	26.8	33.821	35.362
				0.0912	8.01	0.127	26.0	31.325	29.788
	5.0	0	押	0.0591	29.24	0.099	25.5	20.467	18.924
				0.0195	14.64	0.040	26.0	6.989	7.961
				0.0482	16.74	0.045	25.0	17.971	18.944
			引	0.0351	16.99	0.046	24.5	14.477	13.507
				0.0163	0.80	0.046	24.0	7.114	6.139
				0.0951	14.76	0.133	24.8	36.067	37.041
木	3.0	0	押	0.1483	22.00	0.155	24.2	55.411	56.383
				0.0319	5.26	0.188	24.0	12.979	12.008
				0.0594	20.75	0.189	24.5	23.837	22.864
			引	0.1258	28.01	0.168	28.7	33.821	34.033
				0.0560	11.26	0.101	28.0	14.976	14.781
				0.0660	15.24	0.194	28.2	17.722	17.517
木	0.1	押	0.0469	22.99	0.070	27.8	12.106	12.280	
			0.0388	19.25	0.067	24.0	8.611	8.783	
			0.0462	3.25	0.069	27.4	12.106	11.938	
		引	0.0513	3.25	0.108	25.5	12.480	12.318	
			0.1131	28.75	0.108	26.0	27.581	27.706	
			0.0226	1.61	0.204	25.0	5.941	5.302	
木	4.0	0	押	0.0539	4.75	0.059	25.0	12.854	12.688
				0.0218	23.24	0.090	27.5	7.238	7.525
				0.0420	15.51	0.107	27.7	14.352	14.609
			引	0.0625	27.24	0.057	27.3	21.715	21.455
				0.0761	5.27	0.089	26.5	25.584	25.334
				0.0423	26.24	0.050	26.5	17.222	17.601
木	5.0	0	押	0.0642	28.50	0.049	27.5	27.331	27.715
				0.0336	3.75	0.042	26.7	14.477	14.100
				0.0612	7.76	0.047	24.0	23.462	23.087
			引	0.0996	4.99	0.088	28.5	25.709	26.757
				0.0441	11.01	0.125	29.5	13.354	12.269
				0.0432	7.51	0.100	28.0	12.480	11.403
コンクリート	3.0	0	押	0.0677	5.99	0.092	26.5	15.850	16.900
				0.0865	26.73	0.109	27.5	21.341	22.416
				0.0517	5.23	0.124	27.0	14.227	13.147
			引	0.0340	1.00	0.066	29.0	8.237	9.281
				0.0702	19.26	0.093	24.8	15.350	14.281
				0.0395	7.75	0.150	25.3	10.483	9.409
コンクリート	4.0	0	押	0.0236	0.70	0.072	26.2	6.115	7.783
				0.0232	1.49	0.073	25.5	5.741	7.431
				0.0244	2.74	0.061	26.5	9.859	8.138
			引	0.0387	4.24	0.070	27.5	14.976	13.360
				0.1053	15.99	0.041	27.5	42.806	45.496
				0.0684	26.75	0.041	26.5	25.834	28.469
コンクリート	5.0	0	引	0.0307	3.00	0.053	26.0	15.226	12.541
				0.0244	4.99	0.045	24.5	12.106	9.404

3. 1 杭の変位置と周面摩擦力の関係

図-4~図-11は、杭の変位置と前式(1)で算定した周面摩擦力の関係を、押込み時および引抜き時のそれぞれについて杭の外径ごとに示している。このうち、図-4~図-7は押込み実験の結果を、図-8~図-11は引抜き実験の結果を示している。

これらの図から、押込み時・引抜き時とも、全体的には、杭の変位置が5mm以内、総じて杭の外径の10%程度までに、弾性的挙動から塑性的挙動へと移行することが読み取れる。その場合、押込み時よりも引抜き時の変

位置が2倍程度大きい傾向にある。また、杭表面がより粗である、木およびコンクリート杭が鋼管杭よりも変位量-周面摩擦力曲線は、急に立ち上がり小さな変位量ですべりだしていることが言える。このことは、押し込み時よりも引抜き時で、しかも同じ材質、外径の杭であれば地盤のせん断強度が大きいほど、より強い傾向として現れている。さらにその後、続けて载荷するとほぼ最大値を維持したまま変位量のみが増大する傾向にあるものと、载荷とともに荷重および変位量が漸増し荷重が最大値に達した後、続けて载荷すると荷重が急激に低下するものとの2つに大別できる。粘土地盤のせん断強度が大きいものほど後者の傾向が強いようであるが、最大荷重時の変位量については、実験値にばらつきがあり、傾向を特定するまでには至っていない。

さらに、両者の地盤のせん断強度がほぼ等しければ、両者の荷重-変位曲線の形状は比較的類似し、最大の周面摩擦力を発揮する変位量にも大きな差異はないが、最大値には所々違いがみられ、押し込み時の最大周面摩擦力が引抜き時のそれよりも2~3倍程度大きい結果も現れている。

最大荷重時の状況については、表面が滑らかな鋼管杭は、地盤のせん断強度に関係なくすべり破壊は杭と粘土の接縁部で起こり、杭表面に粘土の付着はほとんど見られないが、表面が比較的粗である木およびコンクリート杭では、すべり破壊は杭の接縁部に近い粘土中で起こり、杭表面に粘土の付着が見られる。

また、各模型杭周辺の地表面には、押し込みの場合には杭方向に押し込まれた若干量のくぼみが、引抜きの場合には押し上げられた若干量の盛り上がりがあり、それぞれ杭周面から、鋼管杭では杭半径程度の広がり、木およびコンクリート杭では杭直径程度の広がりで見られる。

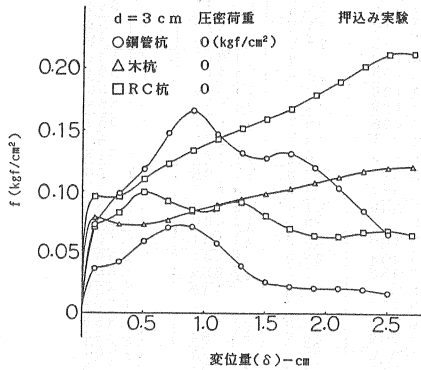


図-4 杭の変位量と周面摩擦力との関係-押し込み時

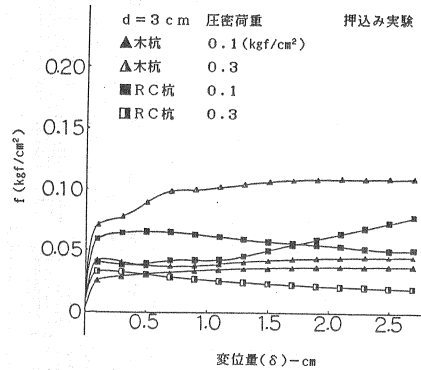


図-5 杭の変位量と周面摩擦力との関係-押し込み時

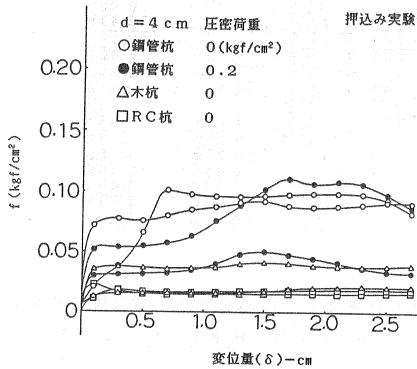


図-6 杭の変位量と周面摩擦力との関係-押し込み時

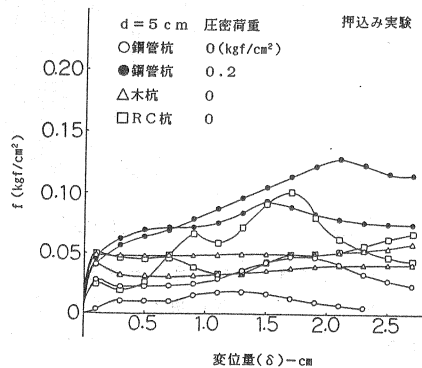


図-7 杭の変位量と周面摩擦力との関係-押し込み時

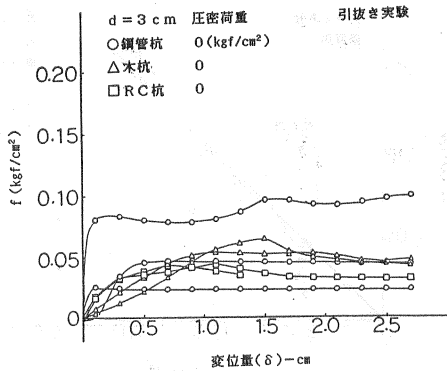


図-8 杭の変位量と周面摩擦力との関係-引抜き時

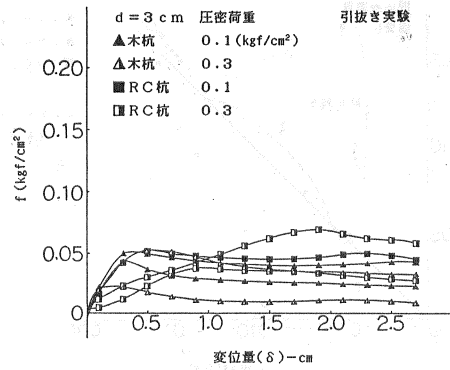


図-9 杭の変位量と周面摩擦力との関係-引抜き時

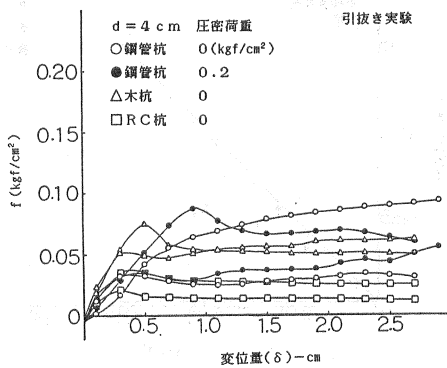


図-10 杭の変位量と周面摩擦力との関係-引抜き時

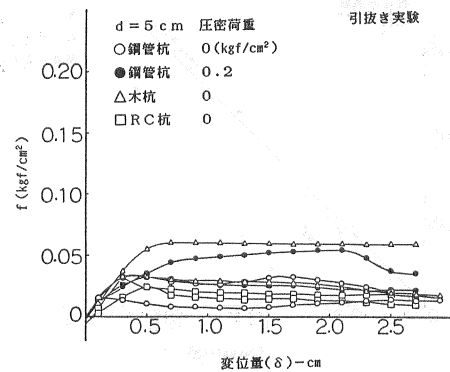


図-11 杭の変位量と周面摩擦力との関係-引抜き時

3. 2 粘土のせん断強度（粘着力 C_u ）と最大周面摩擦力（ $f_{p,max}$, $f_{t,max}$ ）の関係

杭の外径および杭の材質の違いが杭の最大周面摩擦力に及ぼす影響について、図-12～図-17は杭の材質ごとに杭径の大きさの違いによる影響を、図-18～図-23は杭の外径ごとに杭材質の違いによる影響を、それぞれ地盤の粘着力（ C_u ）最大荷重時の押し込み時と引抜き時の杭の周面摩擦力の関係を用いて比較している。なお、各々の図中には、既往のデータ²⁾をも併せて掲示している。

図-12～図-17のうち、図-12～14は押し込み実験での結果を、図-15～17は引抜き実験での結果を示している。これらの図によれば、全体的にみて、押し込み実験の場合、コンクリート杭は $f_{p,max} = C_u$ 、木杭は $f_{p,max} \leq C_u$ の傾向を示し、杭の表面が滑らかな鋼管杭は部分的な発錆の影響によりデータにばらつきがみられるが、 $f_{p,max} < C_u$ の関係を示していると言える。鋼管杭 < 木杭 < コンクリート杭の順に周面摩擦力が大きく発現する傾向にあることが分かる。杭の外径が大きくなるにつれ、これらの傾向は明確になるようである。また、三浦らの報告¹⁾には、木杭の方がコンクリート杭よりも大きな周面摩擦力が発現するとの報告もあるが、本実験に用いた木杭の材質が比較的滑らかな表質を持つラワン材であるため、三浦らの報告とは逆の結果が出たものと判断される。いずれにしても杭表面の粗滑性が周面摩擦力の発現性に大きく影響するようである。一方、引抜き実験の場合、押し込み時に示された傾向とは異なり、杭の材質による明確な差異はなく、周面摩擦力の大きさに大きな違いはみられない。データにばらつきがあるが、概略的に見て $f_{t,max} < C_u$ の関係を示し、粘土のせん断強度が大きくなっても周面摩擦力は比例して大きくならず、ほぼ一定の値で推移する傾向にある。本実験で見る限り、引抜き時の場合、

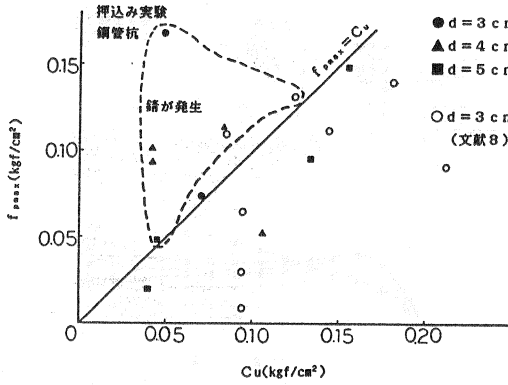


図-12 杭の外径の違いによる影響
- 押込み時(鋼管杭)

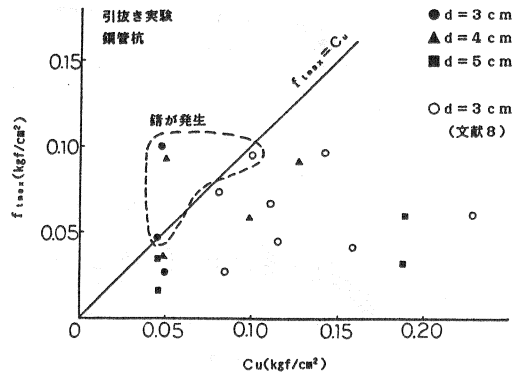


図-15 杭の外径の違いによる影響
- 引抜き時(鋼管杭)

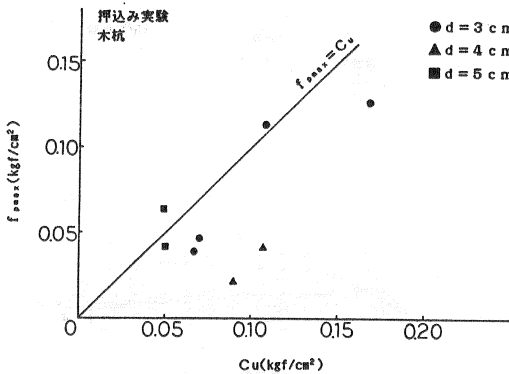


図-13 杭の外径の違いによる影響
- 押込み時(木杭)

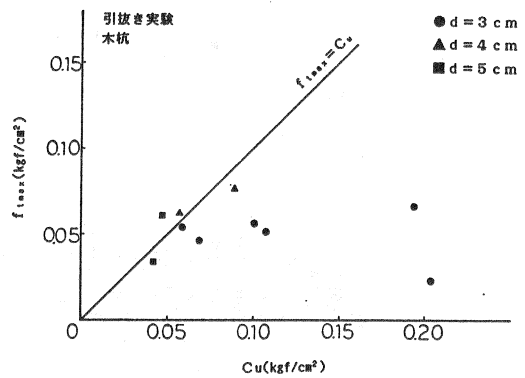


図-16 杭の外径の違いによる影響
- 引抜き時(木杭)

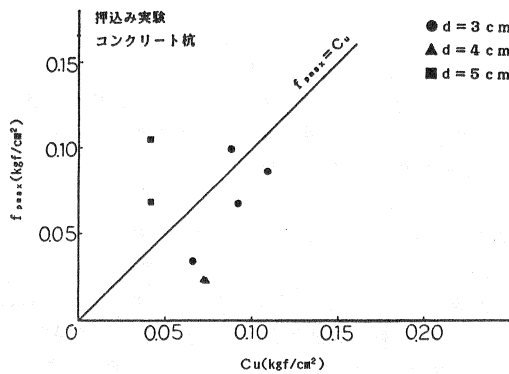


図-14 杭の外径の違いによる影響
- 押込み時(コンクリート杭)

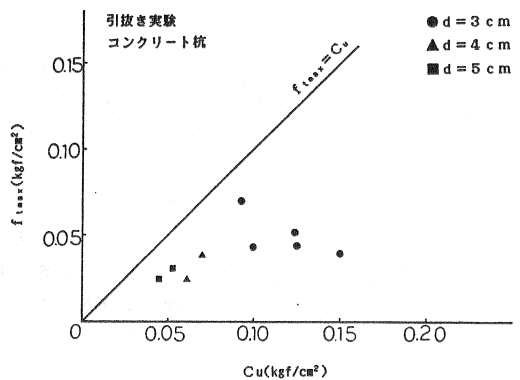


図-17 杭の外径の違いによる影響
- 引抜き時(コンクリート杭)

材質の違いによる影響は明確には見い出させない。

図-18~23のうち、図-18~図-20は押込み実験での結果を、図-21~図-23は引抜き実験での結果を示している。これらの図によれば、杭の外径が3 cmおよび4 cmの場合、鋼管杭で発生した錆の影響を考慮すると、杭の材質の違いが周面摩擦力に影響を及ぼすことなく、いずれの杭もほぼ同じ傾向を示し、 $f_{max} < C_u$ の関係を示し

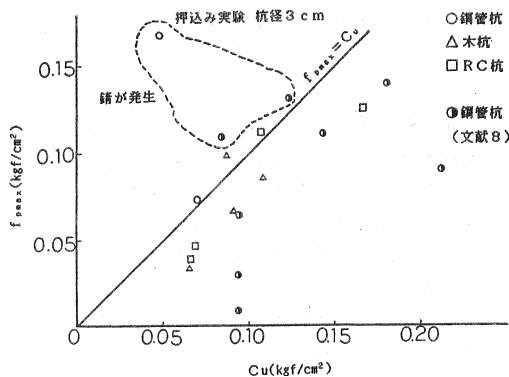


図-18 杭の材質の違いによる影響
- 押込み時(杭径3cm)

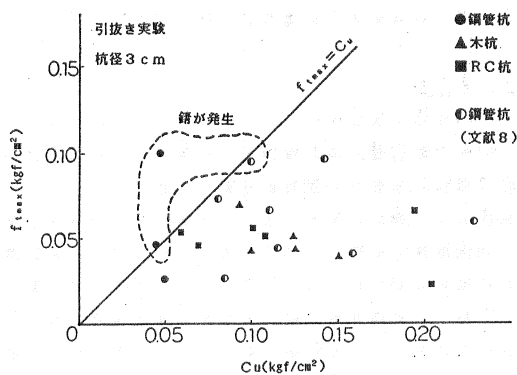


図-21 杭の材質の違いによる影響
- 引抜き時(杭径3cm)

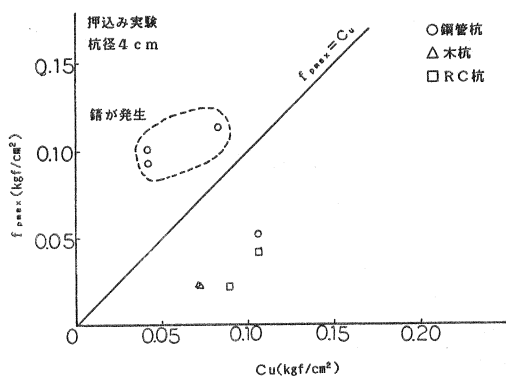


図-19 杭の材質の違いによる影響
- 押込み時(杭径4cm)

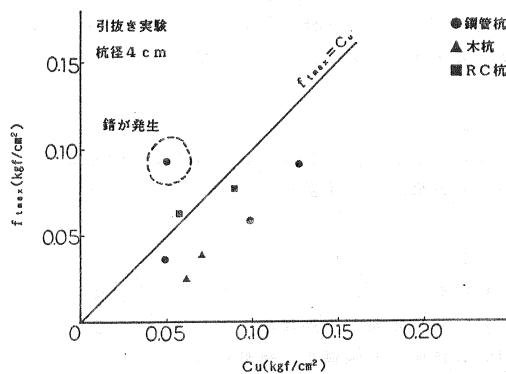


図-22 杭の材質の違いによる影響
- 引抜き時(杭径4cm)

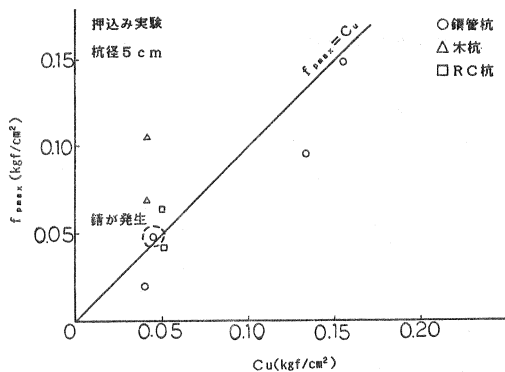


図-20 杭の材質の違いによる影響
- 押込み時(杭径5cm)

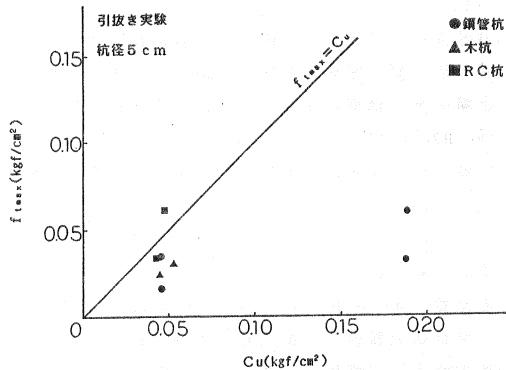


図-23 杭の材質の違いによる影響
- 引抜き時(杭径5cm)

ている。また、杭の外径が5cmの場合は、上記とは異なった傾向を示し、材質の違いがそのまま周面摩擦力に現れ、木杭・コンクリート杭は $f_{max} = C_u$ の関係を示し、鋼管杭は部分的な発錆の影響によりデータにばらつきがみられるが、 $f_{max} < C_u$ の関係を示していると言える。杭の外径が同じであれば、外径の大きな杭ほど周面摩擦力の発現に対して材質の違いが影響を及ぼすようである。しかし、押込みであるのか、引抜きであるのかの方向

性の違いはほとんど影響を持たないようで、図-12～図-17で示された傾向ほど明確には認められない。

4. まとめ

今回の模型実験によれば、データは比較的散在しているが、概略的な傾向として次のようなことが言える。

①杭の変位量と周面摩擦力との関係において、押し込み時・引抜き時ともに、総じて杭の外径の10%までの変形量で弾性的挙動から塑性的挙動へと移行している。この場合、押し込み時の変形量よりも引抜き時のそれが、2倍程度大きい傾向にある。また、地盤のせん断強度が強いものほど、あるいは、表面が粗い材質の杭ほど、変位量-周面摩擦力曲線は、急に立ち上がり、小さな変位量で滑り出すことが言える。最大周面摩擦力については、押し込み時の方が引抜き時よりも2～3倍程度大きい数値を示している。

②粘土の非排水せん断強度と最大周面摩擦力との関係において、押し込み時に材質の違いによる影響が、特に外径の大きな杭により明確に認められた。すなわち、概略的な傾向として、木杭・コンクリート杭は $f_{p,max} \approx C_u$ の関係を示し、鋼管杭は部分的な発錆の影響によりデータにばらつきがみられるが、 $f_{p,max} < C_u$ の関係を示していると言える。一方、引抜き時においては、押し込み時の場合ほど、材質や外径の違いや粘土の非排水せん断強度の大小に関係なく、最大周面摩擦力は $f_{t,max} < C_u$ の関係を示している。

今後、各材質の定量化、粘土の圧密時のひずみ方向と杭の載荷方向との関係、さらに引抜き時に試料底部に発生すると考えられるサクションなどについて検討する必要があると考えられる。

謝 辞

実験の実施および整理に協力頂いた九州産業大学平成2年度卒業研究生、諫山洋之君・井上孝一君・岩谷良太君・高田丞二君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 杉村義弘・中田慎介・岡部徳一郎・青木雄二郎・大木紀通(1988): 杭基礎の引抜き抵抗力に関する研究(押し込み・引抜き時の周面摩擦力), 第23回土質工学研究発表会, pp.1393-1394.
- 2) 古谷博明・小関楯志・榊豊和(1977): 250,000 DWT大型鉱石シーバースにおける鋼管グイ基礎工法, 「土と基礎」, Vol.25, No.14, pp.17-24.
- 3) 伊藤圭典(1978): 打込み・埋込み・場所打ち杭の引抜き抵抗力比較測定, 第23回土質工学シンポジウム, pp.1-8.
- 4) 浅沼秀弥・神長耕二・越川裕・森浩樹(1983): 打込み杭の打撃特性が周面摩擦力の発現に及ぼす影響について, 第18回土質工学研究発表会, pp.1021-1022.
- 5) 伊藤圭典・前原雅幸(1986): 場所打ち杭の引抜き抵抗に関する実験と考察, 「土木学会論文集」, 第376号/III-6, pp.59-67.
- 6) 川辺一洋・青木雄三郎(1977): 砂質土における模型杭の引抜き性状に関する実験, 「東急建設技報」, 第4号, pp.25-28.
- 7) Rao, K. S. and Venkatesh, K. H. (1985): Uplift Behaviour of Short Piles in Uniform Sand, 「土質学会論文報告集」, Vol.25, No.4, pp.1-7.
- 8) 石堂稔・田中邦博・浜村信久・松尾雄治(1990): 粘土地盤中の模型杭の周面摩擦力について, 「九州産業大学工学部研究報告」, 第27号, pp.95-99.
- 9) 田中幸夫・三浦哲彦・持田末男・中村六史(1988): 粘土地盤における摩擦杭の支持力に関する実験, 土木学会西部支部研究発表会, pp.454-455.
- 10) 三浦哲彦・持田末男・田代章・中村六史(1987): 有明粘土地盤における木杭の摩擦抵抗について, 土木学会西部支部研究発表会, pp.370-371.
- 11) 三浦哲彦・持田末男・中村六史(1987): 有明粘土地盤における摩擦杭の支持力機構に関する基礎実験, 第32回土質工学シンポジウム, pp.39-42.