

杭基礎の耐力に関する研究

STUDY ON A LOADING CAPACITY OF PILE FOUNDATION

小笠原政文*

飯古道則**

by masafumi ogasawara, michinori hanko,

五瀬伸吾***

川口光雄****

shingo gose and mitsuo kawaguchi

We carried out an experiment of a full scale pile foundation under inclined loading investigating a loading capacity and a rupture condition.

The purpose of this experiment is to propose the rational desining method of pile foundation.

Following conclusion are obtained. 1) The yield point of the foundation agree the point that the increment of ground deformation was maxim value. 2) At first, the front ground was moved up and the first line piles yielded. 3) After that, the middle line piles yileded, but the last line piles was stable. 4) It is clear from the movement of surrounding ground and piles that we can estimate the loading capacity of the group piles foundation as the elastic foundation.

1. まえがき

我国における道路橋の杭基礎の設計は道路橋示方書IV下部構造編(以下道示と呼称)あるいは各機関で独自に定めた基準類によっている。その設計の基本は、“①杭基礎に作用する荷重によって生じる各杭頭部の軸方向反力は、杭の許容支持力を超えてはならない。②杭基礎の変位量は、許容変位量を超えてはならない。”となっている。杭頭部の軸方向反力および杭基礎の変位量は、“原則としてフーチングを剛体とし、フーチングの変位(鉛直・水平・回転変位)を考慮した弾性解析法(変位法)”を用いて算出しており、杭のパネ定数はすべての杭に対して同一の値を用いて計算している。

杭基礎(以下群杭と呼称)は通常複数の杭からなっており、その頭部をフーチングと剛結合することにより一体とする弾性体基礎であり、設計の基本に述べてある許容支持力および許容変位量(道示の下部工から決まる許容変位量)は一本の杭(以下単杭と呼称)の載荷試験データを収集し、整理した結果から得られている。上記のように現行の群杭の安定計算の基本は、鉛直および水平外力に対してすべての杭が平等に負担することを前提としており、各杭の反力差は偏心外力のみによって生じ、これを単杭の載荷試験から求めた許容支持力で照査しているのが現状である。また、水平方向の下部構造から決まる許容変位量は“基礎の有害な残留変位を避ける”という意味と同時に、弾性計算法である林-Changの式の適用限界的なものを示している

* 首都高速道路公団第2建設部設計課 班長

** 首都高速道路公団工務部設計技術課

*** ㈱建設技術研究所技術第4部 主任技師

**** ㈱奥村組技術開発部土木技術課 副課長

も理解できる。このような安定計算法や照査法は現行の設計体系においては十分な精度で適用できるものであろうが、基礎の大変形時や破壊性状を問題とする時、現行の計算法や照査法の延長で評価できるかどうかは明らかでない。

一方、道路橋の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行すべく各方面で活発な研究がなされており、道路橋下部構造についても(財)国土開発技術研究センターで昭和63年から基礎の限界状態設計法に関する研究を鋭意進めている。杭基礎を例にとると、群杭としての破壊性状を把握しておくことはこれらの研究を進める上で極めて重要であると考ええる。

以上の背景から本研究は、現行の杭基礎の設計法である単杭を対象とした安定照査方法とは別の角度から杭基礎の合理的設計法を提案することを目的として群杭の耐力(載荷重の保持ができなくなる時の基礎の最大抵抗力を意味する)や破壊性状に着目した実験を行い杭基礎の限界状態について研究したものである。

2. 実験概要

本実験では模型の相似則等の影響に関する議論を避けるため、表・1に示す鋼管杭基礎を有する逆上T式橋脚の実物モデルを想定した。実物モデルは現行の道示によると、引抜きおよび水平変位で決定され杭本数は9本となる。また、群杭と単杭との挙動の相違を研究するため単杭での鉛直(押込み、引抜き)、水平載荷試験も同時に行なった。

2.1 供試体および実験ケース

実験に用いた鋼管杭の諸元を表・2に示す。杭の材質やフーチングと水平荷重載荷のための立壁(橋脚の1部に相当)のコンクリートと鉄筋の材質は表・1に示してある。鋼管杭の施工はディーゼルハンマーによる打撃工法を用いた。なお、立壁は想定される破壊荷重の6倍の荷重に対して耐えられるように配慮し、フーチングは想定最大荷重時に対して破壊しないよう設計した。実験は実際の基礎を想定した9本の杭を有する基礎と単杭の2種類とし、それぞれの実験内容を表・3に示す。単杭に関しては押込みおよび引抜き、水平の3ケースとし群杭は実際の荷重条件を配慮し、死荷重+水平荷重(傾斜 荷重)の1ケースとした。

図・1は単杭の各実験ケースに対応した荷重載荷点付近のモデル図であり、図・2は群杭の荷重載荷点付近のモデル図(正面、平面、側面)である。単杭の引抜き試験は押込み載荷試験に用いた杭で中6日間おいて実施した。群杭を地表面から30cm突出させた理由は杭と地盤のみの相互作用を調べるのが目的であり、大変形によってフーチングが地盤の抵抗を受けることを避けるためである。

表・1 実験対象モデル (想定)

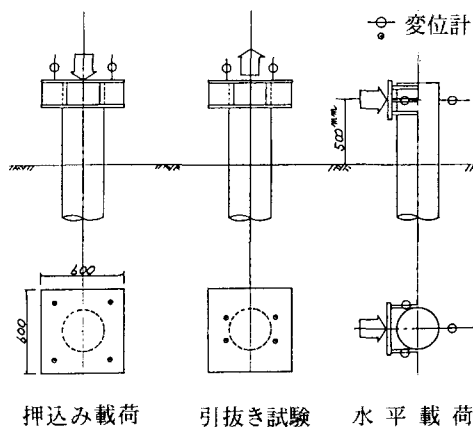
項 目	内 容
型 式	鋼単純合成H桁橋
支間長, 幅員, 斜角	l=25.8 ^m B=5.50 ^m θ=90°
型 式	逆T式橋脚
材料(フーチング)	コンクリート σ _{ck} =210kgf/cm ² 鉄筋 SD35
鋼 管 杭	φ318.5 t=6.9 SKK41 l=15 ^m

表・2 試験杭の諸元

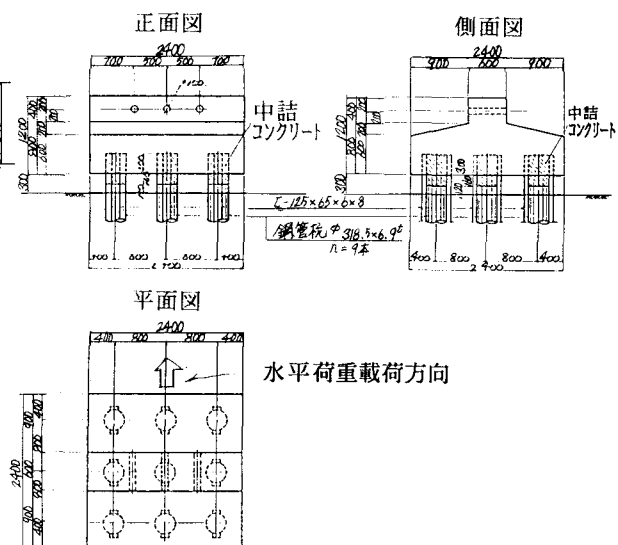
項 目	内 容	概 要 図
杭 径	φ 318.5 ^{mm}	
肉 厚	t 6.9 ^{mm}	
杭 長	l=15.0 ^m	
断 面 積	A=101.4cm ² (チャン材含む)	
周 長	U=125.0cm (チャン材含む)	
断面二次 モーメント	I=22320cm ⁴ (チャン材含む)	

表・3 実験ケース

	杭本数	1	9	計	備 考
載荷方法					
鉛直載荷(押込み)	○	-	1		群杭の杭頭結合法はA方法とする。
鉛直載荷(引抜き)	○	-	1		
水平載荷	○	-	1		○印：実施
傾 斜	-	○	1		
計	3	1	4		



図・1 単杭試験モデル

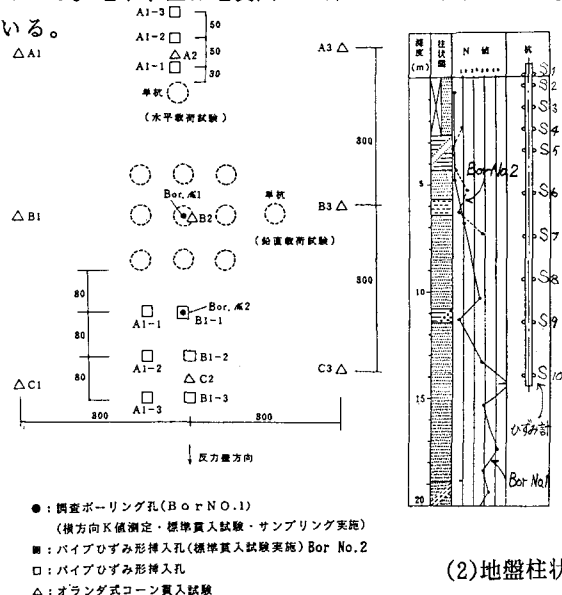


図・2 群杭の実験モデル図

2.2 地盤の特性

図・3(1)は杭配置とボーリング位置との関係を示したものである。地盤調査は図・3(1)に示すように、標準貫入試験を中央の杭の位置で杭打設前に行ない、Bor No.2の位置では杭打設後、パイプひずみ計設置時に深さ7.0mまでN値のみの測定を行なった。試験は標準貫入試験の他に9ヶ所(A₁~C₃)でオランダ式コーン貫入試験を行なった。

表・4はBor No.1の位置の地盤の物理・力学特性であり、表中の地盤の弾性係数は孔内水平載荷試験から求めた。地盤は深さ3.0m程度までは山砂の埋土層であり、これ以深は洪積の砂層と粘性土層の互層構造となっている。地下水位は地表面から深さ2.0mの位置にある。杭先端はN値30程度の砂層に2.0m程度根入れされている。



(1)杭配置と地盤調査位置

図・3 地盤調査概要

表・4 物理・力学試験結果

地層名	埋土層	常総層(砂)	常総層(粘土)	常総層(砂)	木下層
深度	2.00-	5.00-	6.50-	9.00-	11.50-
BS	BS	PS-2	DC-2	PS-3	DC-3
常数	3.00	5.75	7.50	9.80	12.10
自然含水比Wn(%)	8.0	29.3	46.7	30.5	38.8
比重	2.759	2.647	2.635	2.687	2.706
砂・礫分(%)	98	91	17	92	44
最大粒径(mm)	19.10	0.84	2.00	2.00	0.84
均等係数U _c	2.63	2.74		3.14	
曲率係数U _{c'}	0.96	1.30		1.35	
湿潤密度ρ _t (t/m ³)	1.443	1.882	1.750	1.901	1.825
間隙比e	1.065	0.819	1.210	0.845	1.058
飽和度S(%)	20.7	94.7	100	97.0	99.2
一軸圧縮強度			1.38-		0.39-
qu(kgf/cm ²)			1.64		0.42
粘着力C(kgf/cm ²)	0.017	0.28		0.088	
せん断抵抗角φ(°)	34.4	34.4		40.5	
変形係数	6.2	254.2	15.9		
E _p (kgf/cm ²)	(-1.5m)	(-4.0m)	(-8.0m)		

(2)地盤柱状と杭長との関係

3. 単杭の鉛直載荷試験

鉛直載荷試験は押込みと引拔きの2種類について実施した。

3.1 試験方法

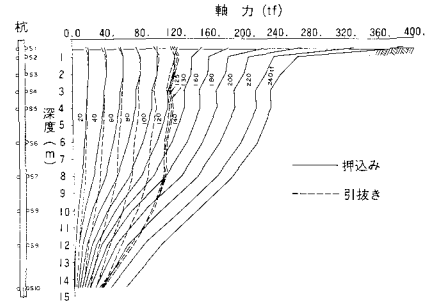
載荷試験の方法は基本的に土質工学会の杭の鉛直載荷試験法による。荷重サイクルは8サイクルとし、最大荷重は荷重保持ができなくなるまで載荷することとした。測定項目は杭頭荷重および沈下量・引抜き量、軸ひずみ(位置は図・3(2)参照)である。

3.2 試験結果

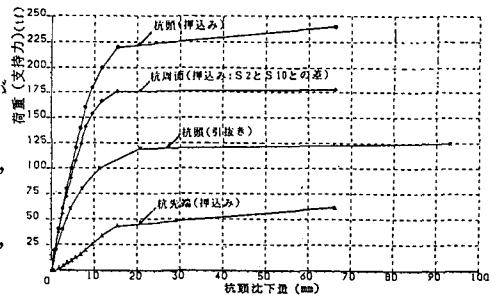
各荷重段階毎の軸力分布を図・4に示した。実線は押込み試験、点線は引抜き試験の結果である。杭に付けた記号 $S_1 \sim S_{10}$ は杭体ひずみ計の位置と名称であり、軸力分布はこのひずみに杭体のヤング係数と断面積(チャンネル含む)を乗じた値をプロットしたものである。図・5には押込み試験と引抜き試験の荷重と沈下量(あるいは引抜き量)との関係を示した。縦軸が各支持力であり、横軸は杭頭沈下量である。図・5で押込み試験の杭周面支持力は、 S_2 と S_{10} 間の軸力の差であり、引抜き試験は杭頭の荷重である。また杭先端支持力は杭頭荷重から杭周面支持力を差引いた値であり、 S_{10} から杭先端まで(50 cm)の周面支持力を含んでいる。この図から押込み試験で得られる杭周面極限支持力に対して杭頭の極限引抜き力(杭周面支持力+自重)は70%程度であることが判る。杭周面支持力が極限に達したと考えられる時の杭頭変位量は押込み試験で15 mm 、引抜き試験で20 mm 程度であり、引抜き試験の時の変位量が多い。通常、杭周面の摩擦支持力は杭頭沈下量が10 $\sim$ 20 mm の範囲にあると言われており、試験の結果は両者ともこの範囲にある。

押込み試験で杭周面支持力が極限に達していると考えられる沈下量(15 mm)以降も杭頭の支持力は増大しているが、これは杭先端の支持力の増大傾向と相似であり、杭先端の支持力特性が反映されたものと考えられる。杭先端支持力は僅かだが、増大傾向にある。また、道示で定義されている極限支持力は杭径の10%(30 mm)の沈下量を生じた時の杭頭荷重(225 tf)であり、この時の杭先端支持力の分担は約20%である。

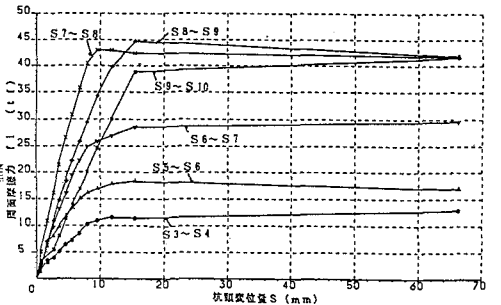
図・6は押込み試験における各ひずみ測定点間の杭周面摩擦力(f_1)と杭頭変位量(S)との関係を示している。また表・5は杭頭における降伏荷重の判定結果である。降伏荷重の判定方法の中で $S_R \sim S/D$ 法は S_R が杭頭残留変位量(縦軸)、 S が S_R を生じる時の杭頭変位量、 D が杭径を意味し、残留変位の急増点で降伏値を判定しようとするものである。他2者の判定法は土質工学会の降伏値の判定方法である。図・6から杭周面摩擦力は地表面下浅いところから順次極限に達していることが傾向的に知れる。ただし、 $S_7 \sim S_8$ 間は杭頭沈下量



図・4 軸力分布



図・5 荷重(支持力)～沈下量曲線



図・6 周面摩擦力と変位量の関係(押込み)

表・5 単杭の降伏・極限荷重の判定結果

載荷試験結果	押込み	引抜き
判定方法	降伏荷重	降伏荷重
	P_y (tf)	P_y (tf)
$\log P \sim \log S$ 法	175.0	90.0
$\Delta S / \Delta \log t \sim P$ 法	168.0	90.0
$S_R \sim S/D$ 法	160.0	90.0

が10^{mm}付近まで直線的に増大し比較的早い段階で極限に達している。降伏荷重は押込み試験で160～175tf、引抜き試験で90tfである。押込み試験で降伏支持力の上限である175tf時の杭頭沈下量は10^{mm}程度であり、これは図・6でS₅～S₈の間の周面摩擦力が極限に達する時の沈下量に相当する。また、降伏荷重の下限値160tfは杭頭沈下量が8^{mm}付近であり、これは図・6でS₃～S₆の間の周面摩擦力が極限に達する沈下量と符合する。上記の傾向から押込み試験における杭頭の降伏荷重は杭周面摩擦力が浅いところから順次極限に達していく時の荷重と考えられ、降伏荷重の上限は地表面から杭の根入れ長の2/3程度までの範囲の周面摩擦力が極限に達した時と考えられる。降伏荷重を安全側に評価し、判定値の最低値(160tf)を用いると地表面から杭の根入れ長の1/3～1/2の範囲の杭周面摩擦力が極限に達した場合が、通常の降伏荷重として取扱う場合に相当する。

4. 単杭の水平載荷試験

4.1 試験方法

鉛直載荷試験と同様に、載荷試験の方法は土質工学会の杭の水平載荷試験方法に準じ、荷重は8サイクルに分けて載荷した。

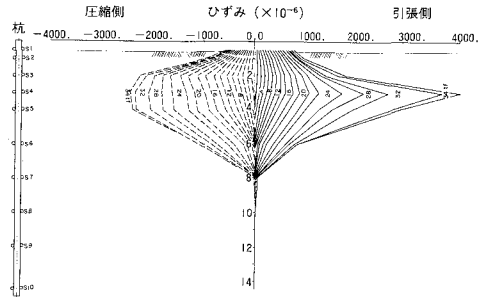
載荷位置は地盤面から50^{cm}(図・1参照)とし、杭頭荷重・変位および杭体のひずみを測定した。地盤の動きは図・3(1)に示すように3本のパイプひずみ計を設置し、地表面の状況は観察によりクラック発生状況をスケッチした。最大荷重は荷重保持ができなくなるまでとし、反力は群杭試験用のフーチングを利用した。

4.2 試験結果

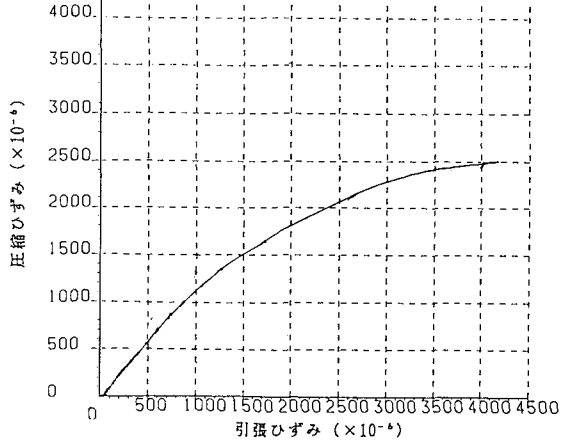
各荷重段階の杭体のひずみ分布を図・7に示す。横軸はひずみ量であり、実線が引張りひずみ、点線が圧縮ひずみを意味する。最大ひずみは深さ2.4^m付近(S₄)で発生している。図・8はS₄の位置の圧縮側ひずみを縦軸、引張り側ひずみを横軸とし測定値をプロットしたものである。杭体が健全な間は圧縮ひずみの増加程度と引張りひずみの増加程度とはほぼ等しく、線形関係にあると考えられる。この図から増加荷重に対する引張り側ひずみの増加量が大きくなるひずみは1200 μ 付近であり、非線形性が強くなっている。この時の杭頭水平荷重は24tf程度である。すなわち、24tf付近で杭体は非線形的挙動に移行している。

杭頭水平荷重と水平変位との関係を図・9にプロットした。最大荷重は32tfで、その時の変位量は340.9^{mm}である。降伏荷重の判定結果を表・6に示す。これから降伏荷重は17.0tfから22.5tfの間にあると考えられる。杭体自体が非線形的挙動に移るのが24tf付近であることからこの降伏荷重は有効抵抗地盤の塑性化と考えることができ、この後杭体が降伏していくことが知れる。

図・10は現行告示において杭の水平抵抗計算



図・7 杭体ひずみ分布曲線

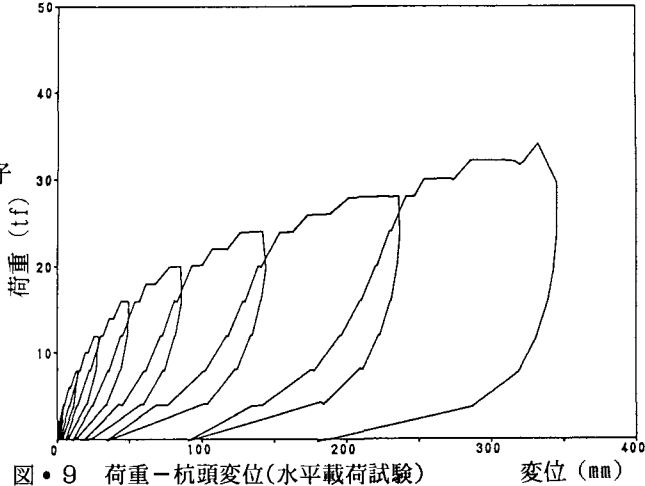


図・8 圧縮ひずみと引張りひずみの関係

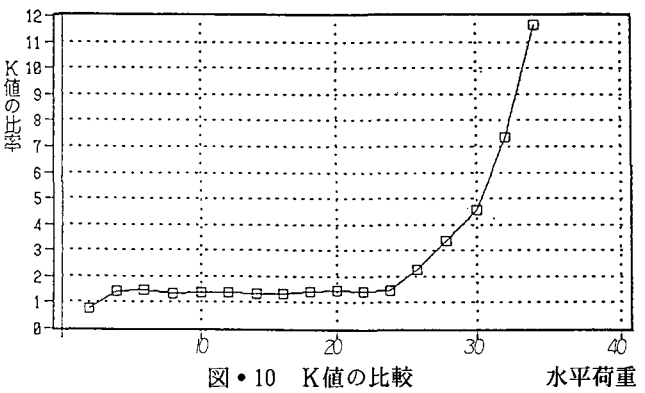
に用いる地盤と杭との相互バネ定数である地盤反力係数 k 値について考察したものである。縦軸の k 値の比率は、分母に実験から得られた地中部最大曲げモーメント値に合うように林-changの式から求めた逆算 k 値をとり、分子に実験から得られた杭頭変位に合うように林-changの式から求めた逆算 k 値をとったものである。横軸は杭頭の水平荷重である。これから両者間の k 値の比率は設計荷重である5.0 tf付近では1.0前後であるが、その後24.0 tfまで1.4倍程度の一定値で推移し、それ以後は非線形的に倍率が急増する。杭頭荷重24.0 tfは杭体のひずみの急増点とほぼ一致しその関連性が指摘できる。この結果は大変位の時林-changの式から杭頭の変位が実測値に合うようにして求めた k 値を使って求めた最大曲げモーメントは実測の最大曲げモーメントより小さく評価され、危険側の判定を下す可能性があり、しかも降伏値をこえたとその傾向が非線形的に増大することがわかる。

表・6 単杭の降伏荷重の判定結果

結果の判定方法	降伏荷重(tf)
$\log P \sim \log S$ 法	17.0
$\Delta S / \Delta \log t \sim P$ 法	19.0
$S_R \sim S / D$ 法	22.5



図・9 荷重-杭頭変位(水平荷重試験)



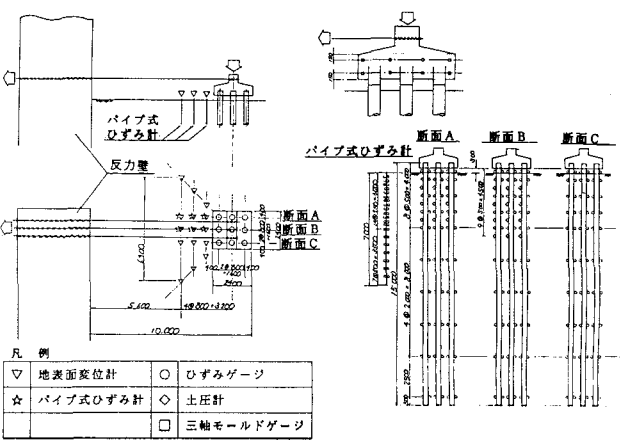
図・10 K値の比較

5. 群杭の載荷実験

5.1 実験方法

載荷実験に伴う測定項目と配置を図・11に示す。地盤の動きを調べるための地表面変位形およびパイプ式ひずみ形、杭体の応力状態および杭体に作用する地盤反力を知るためのひずみ形と土圧計、またフーチングの応力を調べるために三軸モールドゲージと、鉄筋にひずみ計を取付けた。さらに、杭頭部における各杭の荷重分担を考察するために杭頭にせん断ひずみ計を設置した。写真・1に全体の載荷状況を示す。載荷方法は、まず鉛直荷重のみ行ない、その後この鉛直荷重を保持したまま水平荷重を載荷した。

鉛直荷重は測定(荷重～沈下、軸ひずみ、地表面沈下)を行ないながら死荷重相当分の



図・11 測定項目と配置

200tfを3サイクルで載荷した。水平荷重は鉛直荷重200tfを保持しながら8サイクルに分けて反力壁に取りつけたセンターホールジャッキ(最大載荷重200tfを6台)とSEEEケーブルを使って水平荷重の保持ができなくなるまで水平荷重を加えた。なお、鉛直荷重は水平変位に追従でき、水平荷重載荷の間は鉛直荷重を一定値に確保できるよう配慮している。水平荷重の増大は静的な地震力の増大として考えることができる。

5.2 実験結果

(1)鉛直方向載荷実験

荷重と沈下量との関係を図・12に示した。これから両者の関係は載荷重200tfまでは線形関係にあることが判る。200tf(杭一本あたり22.2tfに相当)載荷時の沈下量は1.6mm程度であった。22.2tfの時の単杭の鉛直載荷試験での沈下量(1.0mm弱である)に対して6割程度沈下量が大きく、群杭効果が観察される。各杭頭のひずみを各鉛直荷重段階毎に示したのが図・13である。これから各杭頭のひずみは100μ前後であり荷重の分担については明確な傾向は見られなかった。図・14は杭の配置と杭の記号との関係を示したものである。

(2)偏心載荷実験

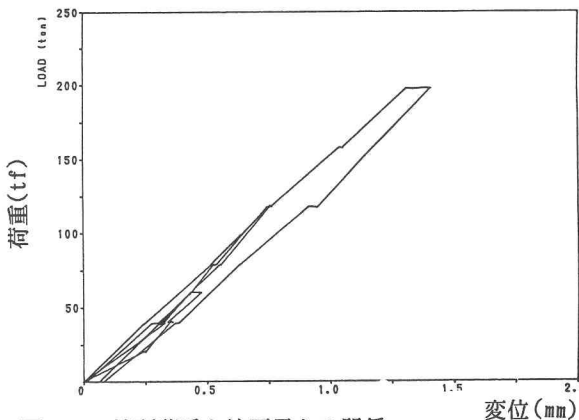
偏心載荷実験は死荷重相当(200tf)の鉛直荷重を一定に保持した状態で水平荷重を増大させたもので、その時の杭頭における水平荷重と水平変位量との関係を図・15に示した。同図には単杭の水平載荷試験から得られた荷重～変位関係において群杭の杭本数に合わせて水平荷重を9倍した場合の荷重～変位の関係を群杭の結果と併せてプロットしている。この結果両者の関係は相似の傾向を示す。このことは、地震力の増大に伴う群杭の挙動と耐力を基本的には単杭の挙動と耐力から予測できることを示唆していると考ええる。また杭群で囲まれている地盤のすりぬけは観察されず周囲の杭と一体となって挙動していることがうかがえた。

降伏荷重及び極限荷重の判定結果を表・7に示す。降伏荷重は140～155tfの間にあり平均は152tfで、単杭の降伏荷重の平均値の9倍の175tfより若干小さい結果となったが、単杭と群杭における一本あたりの降伏荷重とはほぼ対応していると言える。

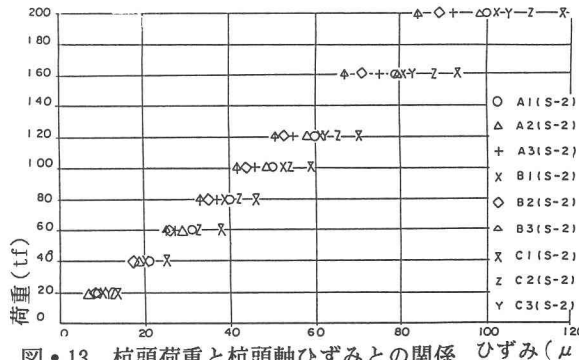
図・16(1),(2)は表・7に示す降伏荷重の判定方法



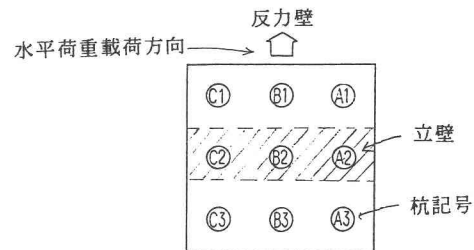
写真・1 群杭の載荷実験状況



図・12 杭頭荷重と沈下量との関係



図・13 杭頭荷重と杭頭軸ひずみとの関係

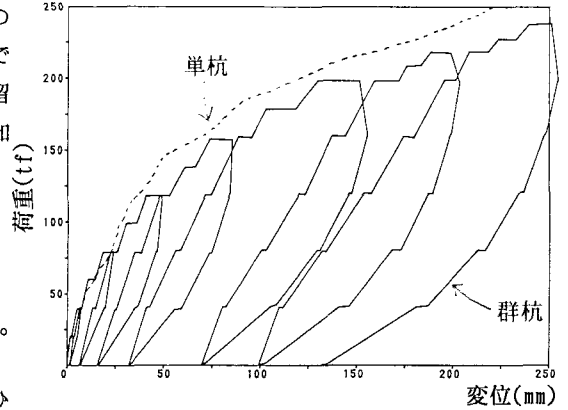


図・14 荷重載荷方向と杭配置との関係

である $\Delta S/\Delta \log t \sim P$ 法と $S_R \sim S/D$ 法の降伏荷重判定の根拠である。両者の急増時の水平荷重はほぼ同程度であり、降伏と判定される荷重付近は杭の水平方向残留変位の増大が加速される荷重とほぼ一致することが知れる。設計に用いた水平荷重は(フーチングは含まないが)48tfである。この水平荷重は載荷実験から得られる降伏荷重のおおよそ1/3となる。荷重保持ができなくなる最大荷重240tfを当該基礎の耐力と考えると耐力は設計荷重に対して5倍の余裕を持つことになる。杭体のひずみ分布の一例を図・17に示す。最大ひずみは杭頭部(正確には地表面から15 $^{\circ}$ mの位置)で生じ、ひずみは非常に大きい値を示したが杭体に局部座屈等は見られなかった。

土圧計で得られた最大地盤反力度と載荷重との関係を図・18に示した。縦軸を地盤反力度比、横軸を載荷重とした。地盤反力度比は中間行の杭(B_1, B_2, B_3)の最大地盤反力度を各々1.0とし、外側の杭の最大地盤反力度と比較したものである。 A_1 杭は当初1.7倍程度中間の杭(B_1)に比べ大きい地盤反力度を受けるが、その後漸減し水平荷重200tf付近で逆転する。 A_2 と B_2 、 A_3 と B_3 との関係についても同様の傾向が見られる。以上からA行の杭(外側の杭)が受ける最大地盤反力度はB行の杭(中間の杭)と比べた場合、降伏荷重付近まではA行の杭が大きい、終局の状態ではB行の杭の受ける最大地盤反力度が大きいことが知れる。このことは荷重が比較的小さい時は中間行の杭に比べ外側の杭が大きな力を地盤から受け、載荷重が増加するに従って地盤から受ける力が順次中間行の杭にその比重を移していくものと考えられる。その比重の移る速さは中間列(A_2, B_2, C_2)、後列(A_3, B_3, C_3)、前列(A_1, B_1, C_1)の順になっており、これは後述する地盤のひび割れの順序と符合する。また、中間列(A_2, B_2)の受ける最大地盤反力度が等しくなる時の荷重180tf付近は前面の地盤の隆起の時期と符合し前列の杭(A_1, B_1)の受ける最大地盤反力度が等しくなるのはさらに前方の範囲の地盤が隆起する時期と符合することは興味深い(図・20参照)。

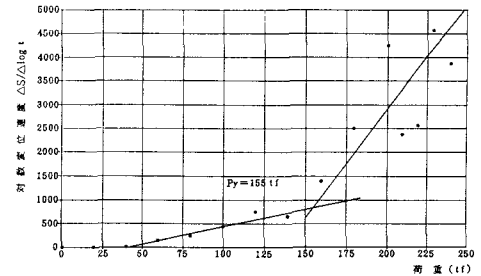
図・19は杭頭部に設置したせん断ひずみ計から求めたせん断力(各杭頭に働く水平力)を基に中央の杭(B_2)に対する各杭の水平力の分担比(縦軸)を各荷重(横軸)段階毎にプロットしたものである。 B_3 および C_2, C_3 の杭は A_2, A_3 の杭と同様な分担比であることからプロットは省略した。この図から最前列以外の杭の水平荷重



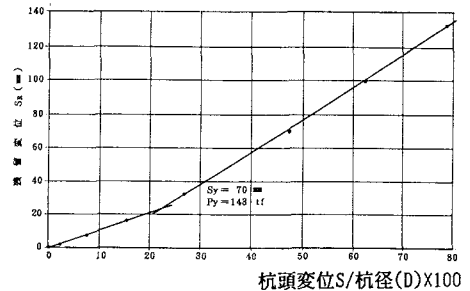
図・15 荷重と杭頭変位との関係(偏心載荷試験)

表・7 群杭の降伏荷重の判定結果

結果の判定方法	降伏荷重(tf)
$\log P \sim \log S$ 法	160.0
$\Delta S / \Delta \log t \sim P$ 法	155.0
$S_R \sim S / D$ 法	143.0



(1) $\Delta S/\Delta \log t \sim P$ 曲線(群杭)



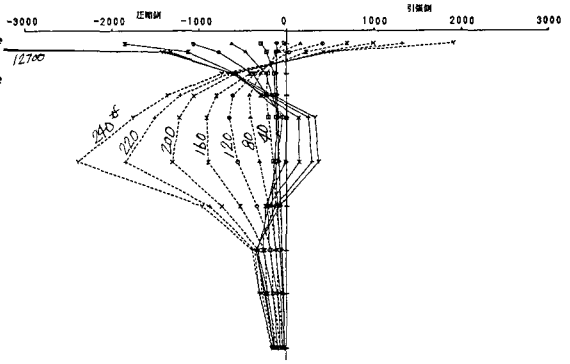
(2) 杭頭ひずみ率 $S/D(\%)$

図・16 降伏荷重判定の例

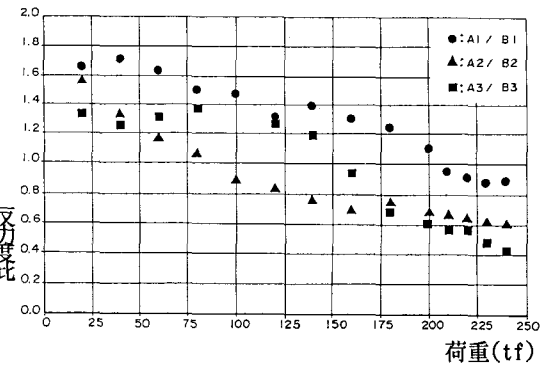
の分担力は荷重段階に関わらずほぼ同一である。最前列の杭は中間列、後列の杭に比べ、水平荷重160tf付近まで2～3倍の分担で推移する。前列の杭は160tf付近に変曲点があるが、この荷重の時後述するように前列の杭は降伏すると推定されるため、杭の剛性が急速に変化していくものと考えられ、分担比として評価はできない。

地盤の状況を図・20にスケッチで示した。ひび割れ線に書いてある数値はその時の水平荷重を意味する。これから地盤のひび割れはまず中間列の杭(C_2 , A_2)付近から斜めに荷重120tfで発生し、その後後列の杭(A_3, C_3)、前列の杭(A_1, C_1)の順で同様なクラックが発生しており、載荷重方向の前面の地盤の隆起は160～220tfにかけて生じている。この前面の地盤の隆起時の荷重は、荷重と変位量との関係における降伏荷重(140～160tf)より若干大きくなっている。また、最終的には A_3, C_3 杭の側面から反力壁方向に大きな円弧のようなひび割れの進行状況が見られた。最後列(A_3, B_3, C_3)の杭の背面土は図に示すように各サイクルの最大荷重毎に沈下し、最大30°の沈下量となった。フーチングのひび割れは、最初に載荷重200tfでパカという音とともに C_3 杭の側面に発生した。試験終了後フーチングのひび割れの状況を調べた結果、ひび割れは鉄筋のかぶりの範囲に生じており、ひび割れ深さは浅く、フーチングは全体として健全であった。

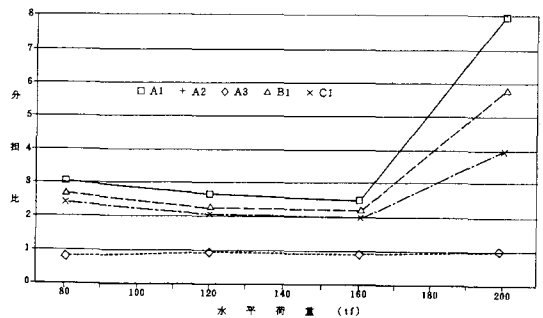
一方、図・21(1),(2),(3)は最大ひずみの発生位置である杭頭の圧縮ひずみと引張りひずみ(縦軸)の変化を載荷重(横軸)に対してプロットしたものである。両者の関係でひずみが急増する点を杭体の降伏ひずみと考えたと最前列の杭(A_1, B_1, C_1)は載荷重160tfではほぼ同時に降伏している。中間列の杭(A_2, B_2, C_2)の降伏は載荷重200tfであり、最後列の杭(A_3, B_3, C_3)は載荷重160～200tfを境に圧縮側と引張り側とがある一定の引張りひずみ(言い換えれば引張り軸力)に収束する傾向である。最後列の杭は最大ひずみが1000 μ 以下であり、杭体は健全であると考えられる。最前列の杭体の降伏荷重は前面の地盤のひび割れ時の荷重と同程度であるが、荷重～変位関係における降伏値より遅れて杭体が降伏している点は単杭の水平載荷試験と同じ傾向である。したがって、最初に地盤の降伏が発生し次に杭体の降伏が進行していく



図・17 杭のひずみ分布の例(A1)



図・18 各杭体に作用する最大地盤反力度の比較



図・19 杭頭部せん断ひずみ比(B2杭を1.0とした場合)

と考えることができる。

6. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 単杭の鉛直載荷試験

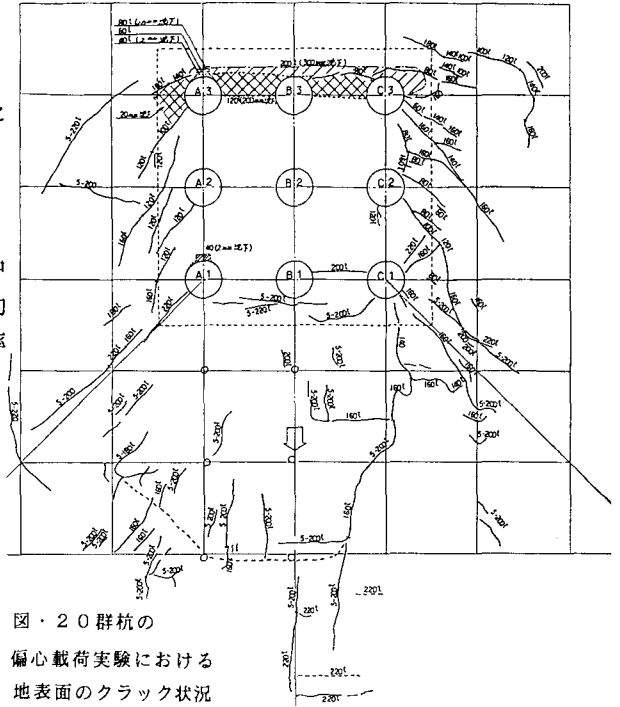
- ① 極限荷重載荷時の周面摩擦力は押し込み時と引抜き時で異なり、後者は前者の約70%（中6日間おいた場合）である。また、全体の約80%を杭周面に負担し、杭先端付近の負担率は20%程度である。
- ② 周面摩擦力が極限状態に達するときの変位量は押し込み時が 15mm 、引抜き時が 20mm 程度であり、極限に達する変位量にはずれがある。
- ③ 押し込み試験での降伏荷重は周面摩擦力の一部が極限に達するときであり、周面摩擦力が全て極限に達した後も荷重の増大に対して抵抗力は、杭先端の支持力特性が反映されて僅かであるが線形的に増大する。

(2) 単杭の水平載荷試験

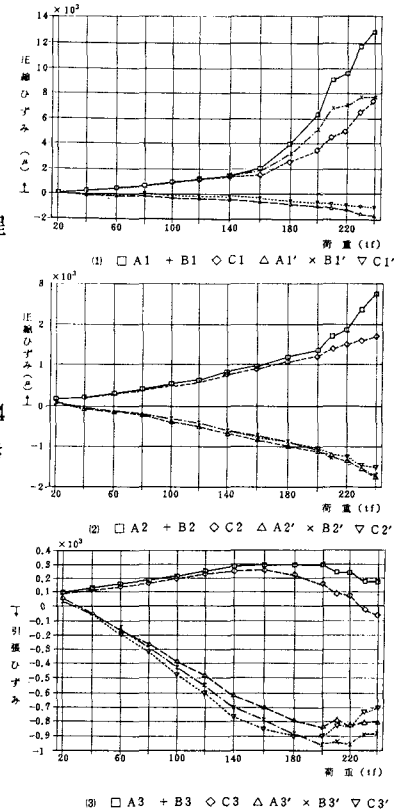
- ① 荷重～変位量関係における降伏荷重は地盤の塑性化の進行が大きくなる時であり、その後杭体が降伏する。杭体の降伏ひずみは 1200μ 程度である。
- ② 極限荷重は約 32tf で、その時の変位量は 35cm （杭径の11%）程度である。これは降伏荷重の約1.5倍、設計荷重の約6倍である。
- ③ changの式を用いて逆算k値を求める場合、境界条件を杭頭変位とした場合と地中部最大曲げモーメントとした場合に微小変位領域では両者等しいがそれ以後は前者が後者の1.4倍前後で推移し、降伏荷重付近から前者のk値が急激に大きくなり、変位を境界条件として杭体の耐力を評価するのは危険側の判定を下す恐れがある。

(3) 群杭の載荷試験

- ① 単杭の水平試験結果を杭本数倍した荷重～変位量の関係と群杭の荷重～変位量の関係とは相似であり両者はほぼ等しく、単杭の挙動と耐力から群杭の挙動と耐力を評価できる可能性が示唆される。ただし、杭頭部の結合条件の相違の影響からひずみの最大値やその分布は両者大きく異なる。
- ② 杭に囲まれた地盤にすりぬけ現象は見られず、基礎全体が一体の弾性体基礎として挙動している現象が観察された。



図・20 群杭の
偏心載荷実験における
地表面のクラック状況



図・21 載荷重と杭頭ひずみとの関係

このことは杭基礎全体を一体の弾性体基礎としてとらえ、基礎全体の耐力評価と関連づける設計法の可能性を示唆している。また、文献⁹⁾の連壁基礎と同様な破壊形状を示しており、ケーソン、連壁、杭基礎の終局耐力(終局限界)では同一の設計体系として評価できると考える。

③最前列の杭は他の列の杭に比べて降伏荷重あたりまでは2～3倍の水平力を分担し、中間列および最後列の杭の分担割合は終始等しい。

④基礎と周辺地盤の変状は、まず荷重方向に対して中間列の杭の両側から斜めに地盤のひび割れが発生し、次に最後列の杭で同様なひび割れが起こり、前面の土の盛上がりで最前列の杭体の降伏がほぼ同時期に起こり、フーチングのひび割れと続き最後に最後列の杭からのひび割れが荷重方向に円弧上に広がるという順序で破壊が進行した。

⑤基礎全体の降伏は地盤の塑性化の進行の増大点と符合し、その後最前列の杭体の降伏が前面地盤の隆起と同時期に発生した後中間列の杭体の降伏が続き、後列の杭は健全な状態を維持する。

7. おわりに

今回の試験によって種々の知見が得られた。その主なものは一つは単杭の挙動と群杭の挙動との関連性の把握、二つは杭体の降伏と地盤の降伏との関連性の把握、三つは基礎全体が一体の弾性体基礎として挙動していることが伺えたこと、四つは水平力を受ける杭基礎の破壊の順序の把握である。しかし、これらは試験の現象面からの考察であり、今後解析的面から研究を行い、成果を基礎の限界状態設計法に反映させるとともに耐力に着目した基礎の合理的設計法の提案に結び付けたい。また、本実験が実施された地盤は深さ3.0mまで砂の埋土層で比較的軟弱であることから、地盤性状や杭基礎の形状によって破壊形状が異なるかどうかは今後の研究が必要であろう。

最後に本研究が今後の限界状態設計法に関する研究の一助となれば幸甚である。

<参考文献>

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編・V耐震設計編 1990.2
- 2) (財)首都高速道路厚生会：首都高速道路下部構造物設計基準 1986.4
- 3) 土質工学会：クイの鉛直荷重試験基準・同解説 1972.3
- 4) 土質工学会：杭の水平荷重試験方法・同解説 1983.10
- 5) 建設省土木研究所基礎研究室：荷重試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査 土木研究所資料 NO.2721 1989.1
- 6) 土質工学会：杭基礎の設計法とその解説 1985.12
- 7) (財)国土開発技術研究センター：道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究 1989.3
- 8) (財)国土開発技術研究センター：道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究(その2) 1990.3
- 9) 飯島，鈴木：地中連統壁基礎の大変形水平荷重試験 基礎工 Vol.17 No.1 1989.1
- 10) 宇都，前田，五瀬：杭の横方向基準変位量に関する一考察 橋梁と基礎 Vol.21 No.9 1987
- 11) 杉村他：杭基礎の引抜き抵抗力に関する研究(押込み・引抜き時の周面摩擦力) 第23回土質工学会 1988.6

(1990年10月12日受付)