

ある群杭の水平載荷試験

齋藤二郎 土屋幸三郎
芳賀孝成

Lateral Loading Test of a Pile Group

Jiro Saito Kozaburo Tsuchiya
Takashige Haga

Abstract

Although much research has been done on group piles, many of the works have been theoretical, or model tests, and research on full-scale group piles has been rare. Therefore, lateral loading tests were carried out on full-scale group piles and the behaviors of group piles were investigated. The tests were conducted on two types of foundations, one being a group of 25 piles with pile heads rigidly connected by footing concrete, and the other 2 piles far enough apart to ordinarily be considered as acting individually but with their pile heads joined by footing concrete. The size of a single pile was diameter of 32 cm and length of 8 m. The principal items of investigations were lateral displacement and inclination of footing, bending moment of pile surface, underground displacement, and underground conditions. The results of the tests were displacements of single piles 60 to 70 percent of group piles under identical loads, and deformations of group piles extending deeper than single piles.

概要

群杭に関する研究は数多くなされているが、その多くは理論的研究や模型実験によるもので実物大の群杭について調査・研究がなされた例は少ない。このため実物の群杭基礎に対して水平載荷試験を行ないその挙動を調査した。水平載荷試験は25本の杭の頭部をコンクリートで剛結した群杭基礎と2本の杭を各々単杭として挙動すると考えられる距離まで離してその頭部をコンクリートで剛結した基礎の2種の基礎に対して実施した。杭の外径は約32cm、長さは約8mである。主な調査項目はフーチングの水平変位と傾斜角、杭体曲げモーメント分布、地表面と地中変位、および地盤性状である。試験の結果、一定荷重における単杭の変位は群杭変位の0.6~0.7であること、群杭の土中の変形は単杭に比較し深部まで及ぶこと、などが認められた。

1. まえがき

橋梁基礎や鉄塔基礎などの群杭の杭本数、断面は水平抵抗力により決定されることが多い。群杭に関する研究調査はこれまで数多くなされて来たが、その内容としては理論的研究や模型実験によるものが多く、実物大の群杭について研究調査がなされた例は少ない。このため理論研究や模型実験の成果の検討が十分になされず、これが群杭の挙動の解明が進展しない障壁の一つとなっている。

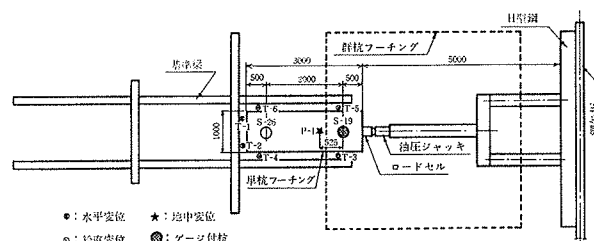
上記の観点から実物大の群杭基礎に対し水平載荷試験を実施してその挙動を調査したのでここに結果を報告する。なお本実験は国鉄の技術課題であり国鉄構造物設計事務所および東京第2工事局の指導により実施したもの

である。

2. 試験方法

2.1. 試験概要

試験は実際に使用する25本の杭からなる鉄塔基礎と2本の杭を単杭として挙動すると考えられる距離まで離し



図一 単杭試験方法と測定機器の配置

て頭部を継いだ実験用基礎の2種に対して別個に水平加力し、両者の挙動の比較を行なったものである。2種の基礎杭に対して便宜上前者の杭を群杭、後者の杭を単杭と呼ぶ。各杭は外径318.5mm、肉厚6.0mm、長さ7.9mの鋼管杭で各々の頭部は厚さ70cmの鉄筋コンクリートで剛結した。

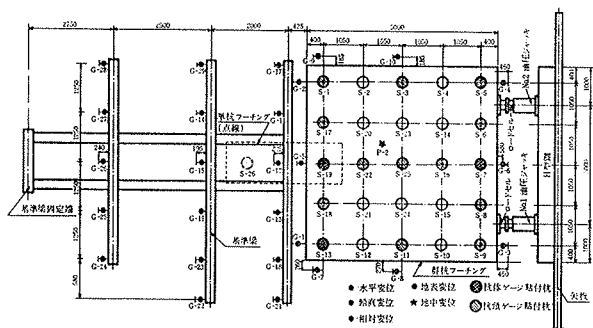


図-2 群杭試験方法と測定機器の配置

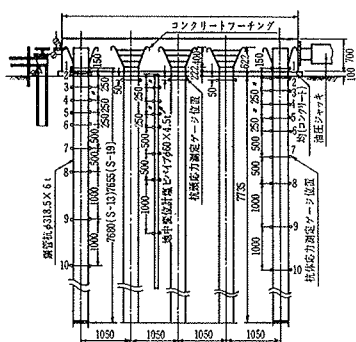


図-3 群杭基礎断面と杭体ゲージ貼付位置

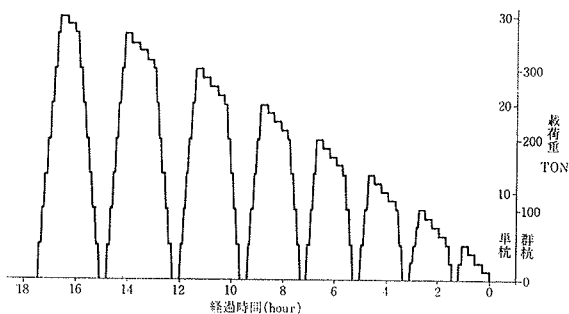


図-4 荷重方法

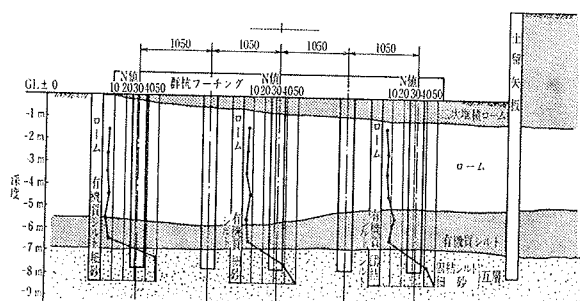


図-5 地質断面図

地層	試験深度	N値	qc kg/cm ²	物理的性質			力学的性質		孔内横方向載荷試験		
				ω (%)	γ _t (g/cm ³)	e	qu (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	K _{im} (kg/cm ²)	K _o (kg/cm ²)	K _o (kg/cm ²)
有機質粘土	GL -0.60	4	10	131	1.23	3.96	0.51	14	244	3.1	1.3
				135	1.25		0.76	31			
ローム	GL -2.0	6	30	102	1.35	3.00	3.64	130	15.2	14.7	6.2
				109	1.41		4.76	210			
凝灰質粘土	GL -3.5	4 1 6	20	116	1.39	-	2.13	136	5.2	7.5	3.2

表-1 各地層の土質試験結果

試験ではまず単杭計験を行ない、次に単杭フーチングを取り壊した後、単杭の1本を加えて25本群杭としフーチングを打設して群杭試験を行なった。単杭試験・群杭試験における杭の配置、測定計器配置を図-1、図-2、図-3に示す。主な試験項目は(1)フーチングの水平・鉛直変位、(2)杭体応力、(3)地表面および地中変位、(4)地盤性状である。フーチングの水平変位および地表面変位はダイヤルゲージにより測定した。杭体応力は杭体に貼り付けたストレインゲージにより求めた。地中変位は塩化ビニールパイプにストレインゲージを貼り付けたものを地中に埋設して求めた。試験最大荷重は単杭基礎に対しては30ton、群杭基礎に対しては375tonとし、荷重方法は両者とも図-4に示す急速8サイクル荷重である。

2.2. 土質性状

試験地盤は第三紀層を基盤とした丘陵地の一角で上部

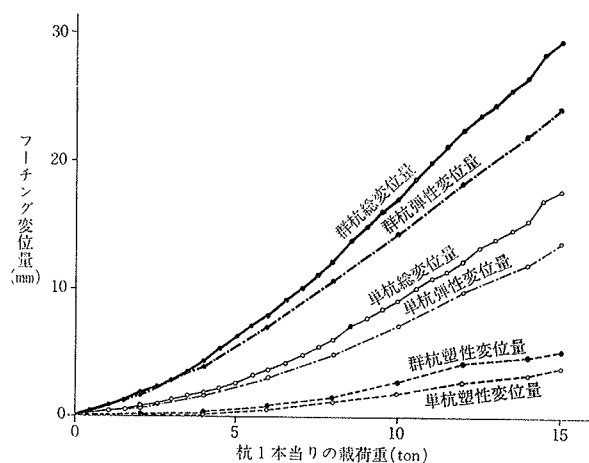


図-6 フーチング変位

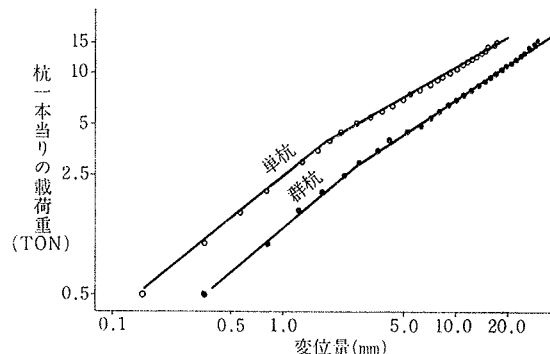


図-7 フーチング変位 (両対数表示)

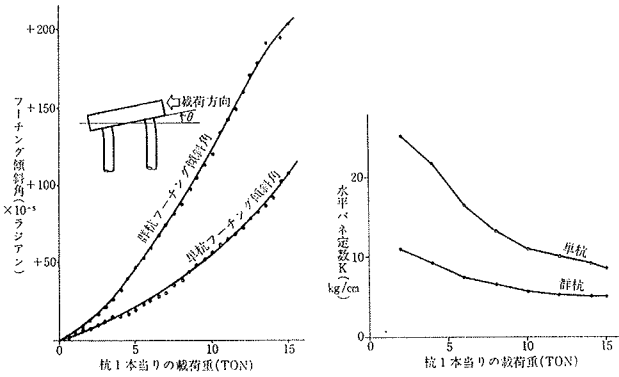


図-8 フーチング傾斜角 図-9 水平バネ定数

約1mにはロームの二次堆積物の沖積層があり、その下はGL-7mまでローム、凝灰質粘土、有機質シルトの互層となっている。地質断面を図-5に示す。また各地層の土質試験結果を表-1に示す。

3. 試験結果

3.1. 基礎の変位

図-6に杭1本当りの載荷重と群杭・単杭フーチングの総変位、弾性変位、塑性変位を示す。なお杭1本当りの載荷重は群杭の場合は全載荷重の1/25、単杭の場合は1/2である。弾性変位、塑性変位とも群杭の方が大きな値となっている。図-7は両対数紙に杭1本当りの載荷重とフーチング総変位量との関係をプロットしたものである。単杭、群杭のいずれの場合も変位が2mmを越え

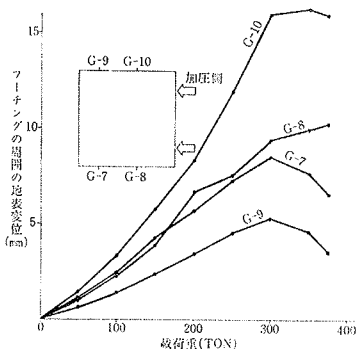


図-10 周辺地盤変位

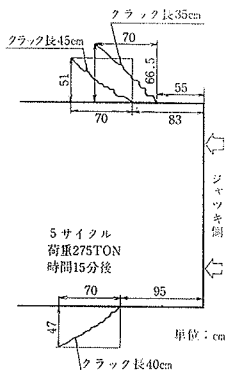


図-11 周辺地盤クラック

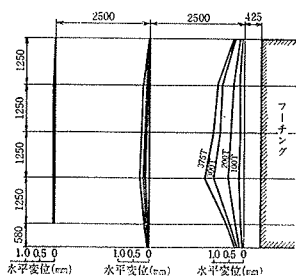


図-12 前面地盤変位(1)

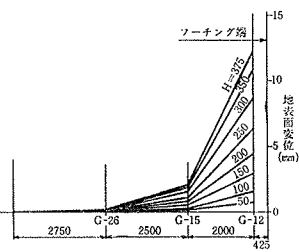


図-13 前面地盤変位(2)

る付近から若干変位増加率が大きくなっている。これはフーチング底面の摩擦抵抗の変化に起因するものと考えられる。

図-8はフーチングの鉛直変位測定結果より算定したフーチング傾斜角である。群杭の場合は単杭の約2倍の値となっている。図-9はフーチングの水平バネ定数と杭1本当りの載荷重との関係を示したものである。単杭のバネ定数は群杭のバネ定数の約2倍の値である。

3.2. フーチング周辺地盤の水平変位

フーチング周辺地盤の水平変位状況は群杭の水平抵抗機構を解明する手掛りとなるだけでなく、基礎の変位による周辺構造物への影響を推定するための資料となる。図-10はフーチング周辺の地表面水平変位を示したものである。載荷重が300ton(杭1本当り12ton)を越えるとそれまで載荷重にほぼ比例していた周辺地盤水平変位は頭打ちとなるか減少する。これはフーチング底面摩擦力が降伏しフーチングが滑動状況に入ったためと考えら

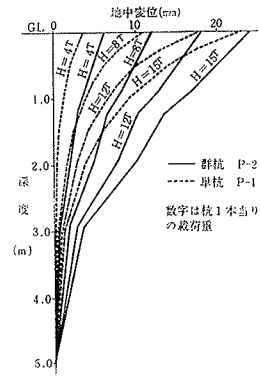


図-14 地中変位分布

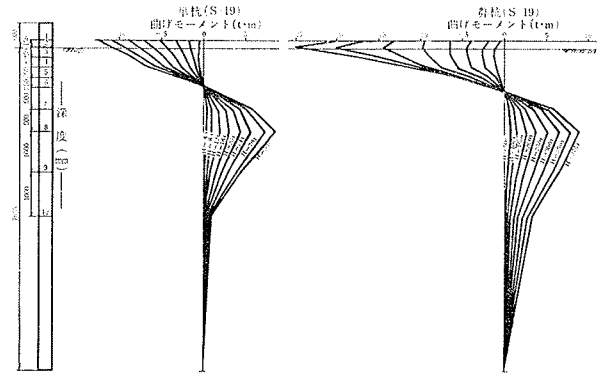


図-15 S-19 杭モーメント分布

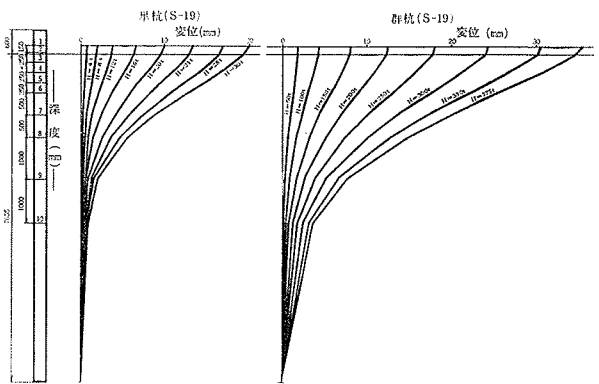


図-16 S-19 杭変位分布

れる。図-11は 275 ton 載荷時の周辺地盤のクラックの状況である。図-12, 図-13はフーチング前面の地表面水平変位分布で、フーチング端部より約 2 m 離れるとフーチング変位の10%以下の値となり、さらに 2.5 m 離れるとほとんど地表面水平変位は認められなくなる。図-14はフーチング中央付近の地中水平変位分布である。群杭の場合は単杭に比較し、水平変位が地中の深部まで及んでいることがわかる。群杭の場合はみかけ上、杭の剛性が増大し、地盤変形係数が小さくなるといえよう。

3.3. 杭体モーメントおよび変位分布

杭体モーメントは杭体ひずみ測定結果を杭打設前に実施した曲げ載荷試験結果を用いて求めた。図-15に杭の曲げモーメント分布を示す。地中部最大曲げモーメント発生深度は単杭・群杭いずれの場合も地表面より約 2 m 下である。地中部最大曲げモーメントは群杭の場合は杭頭モーメントの40%程度、単杭の場合は 74% 程度である。一方 Y. L. Chang の式では地中部最大モーメントは杭頭モーメントの約20%で、この値と実測値とは大きく相違する。試験では杭とフーチングとの剛結度が十分でなかったために杭頭固定と杭頭自由の場合の中間的な現象が実際には測定されたものと考えられる。図-16は杭の曲げモーメント分布より算出した杭の変位分布である。杭頭変位の計算値は実測値の10~15%程度大きい値となっているが、これは測定点間のモーメント分布を直線と仮定しているための計算上の誤差と思われる。地中変位分布と同様に群杭の方が杭の下部まで変形しているのが特徴的である。図-17は群杭の各杭頭モーメントを示したものである。各杭のモーメントにはかなりのバラツキがあるが1列目が最も杭頭モーメントが大きく、後列になるに従い順次小さな値となる傾向が認められる。1列目および3列目の中央杭の値は端部杭より小さいが、端部杭の場合は地盤の抵抗領域が大きいこと、中央杭(S-19)は単杭試験で以前に載荷していることなどによるものであろう。

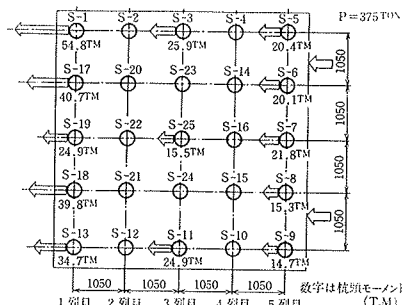


図-17 群杭の杭頭モーメント分布

4. 考察

4.1. フーチング底面摩擦力の影響

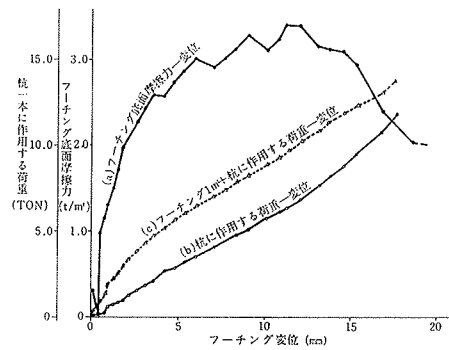


図-18 フーチング底面摩擦力と杭頭作用荷重

図-18は単杭の場合のフーチング底面摩擦力とフーチング変位の関係(a), 杭1本当りの載荷重からフーチング底面摩擦力を差し引いた荷重とフーチングの変位との関係(b), 群杭では1本当りのフーチング底面積が 1 m² なので単杭の場合もこれと対応させるため(b)の荷重に 1 m² 当りのフーチング底面摩擦力を加えた荷重とフーチング変位との関係(c)を示したものである。なおフーチング底面摩擦力は単杭の頂部断面(2および3断面)に作用するモーメントの値から求めたものである。フーチング底面摩擦力はフーチング変位が大きくなるに従って増加するが約 3.4 t/m² で降伏し、変位がさらに大きくなると約 2.0 t/m² まで減少する。最大摩擦力は地表面部の土のせん断強度とほぼ一致している。

4.2. 地盤反力係数

図-19は杭1本当りの載荷重および載荷重からフーチング底面摩擦力を差し引いた荷重とフーチング変位から Y. L. Chang の式を用いて求めた地盤反力係数(K値)との関係を示す。群杭のフーチング底面摩擦力は単杭試験の結果の変位と摩擦力の関係をそのまま適用できるものとして算定した。群杭の場合のK値は単杭の場合のK値の約1/2である。

図-20は単杭の場合のフーチング底面摩擦力を差し引いた荷重と杭頭変位(フーチング変位)との関係を示し

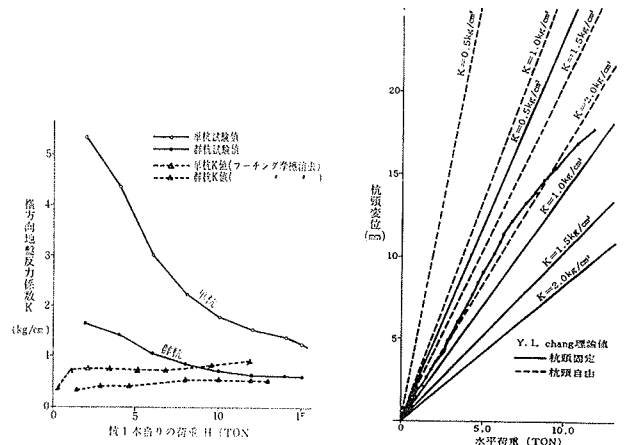


図-19 横方向地盤反力係数 図-20 理論値との比較

たものである。図中には Y. L. Chang の式から求めた作用荷重と杭頭変位の関係を示してあるが、杭頭が完全固定されているとみなせば地盤の K 値は 0.7~0.9 kg/cm³ 程度となる。しかし実際にはフーチングと杭は完全固定されていないと思われ、仮りに杭頭自由とすれば K 値は 1.8~2.2 kg/m³ となるので実際の K 値は両者の中間 1.0~2.0 kg/cm² 程度とみなすことができる。この実測 K 値は孔内横方向載荷試験 (LLT) によって求めた基準 K 値より若干小さい値である。また福岡・宇都の試験結果 (N 値が 4~6 で K=1.0~2.0 kg/cm²) とは一致している。

4.3. 群杭効果

図-21は杭 1 本当りの載荷重と群杭および単杭の杭頭モーメントの比との関係を示したものである。後列杭は杭 1 本当りの載荷重が増加するに従ってモーメントの比が減少するのに対し、前列杭は杭 1 本当りの載荷重が 8 ton のときにモーメントの比が最も小さくなる。

群杭効果は一般に次に示す③式、④式で表わされる。

$$\text{③ } e_p = \frac{\text{群杭の支持力}}{\text{単杭の支持力} \times \text{群杭の本数}}$$

$$\text{④ } e_a = \frac{\text{一定荷重に対する単杭の変位}}{(\text{一定荷重} \times \text{杭本数}) \text{に対する群杭変位}}$$

図-22は杭の支持力として一定の変位をもたらす力を考えて③式により求めた e_p と作用荷重の関係を示したものである。なお単杭の作用荷重としては杭 1 本当りの載荷重をとった場合と単杭の 1 本当りのフーチング底面積を群杭と同じ 1m² にして底面摩擦力の補正を行なった場合の 2 ケースを考えて、それぞれに対する群杭効果を計算した。玉野¹⁾ は一列の群杭の場合について種々の仮定のもとに (単杭の荷重×群杭本数) に対する群杭の低減率を示しているがこれによれば $e_p=0.8\sim0.9$ でこの値より若干小さい。図-23は④式により求めた e_a と作用荷重との関係を示したものである。

群杭効果は群杭の横方向地盤反力係数を単杭のそれと除した値 e_k で評価することもできる。図-24は e_k と作

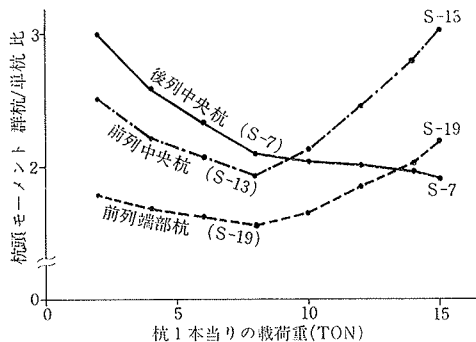


図-21 群杭と単杭の杭頭モーメント比

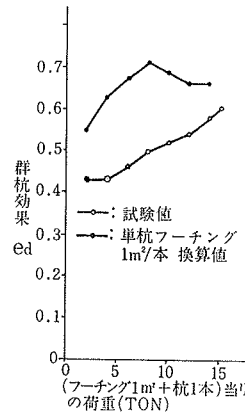


図-22 群杭効果 e_p

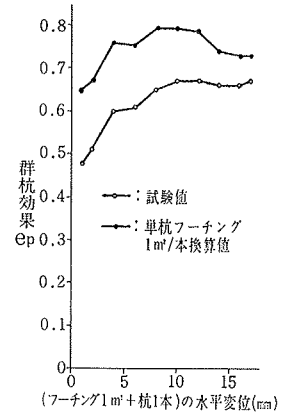


図-23 群杭効果 e_a

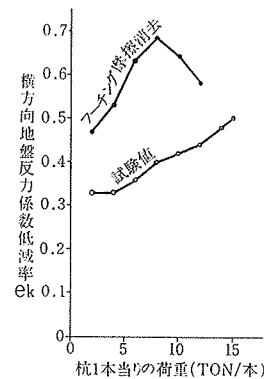


図-24 K 値低減率

用荷重との関係を示したものである。杉村²⁾ は Mindlin の第 2 解法を応用し e_k と杭本数 N の関係を $e_k=N^{-0.66}$ の関係で与えているが $N=5$ とすれば $e_k=0.345$ となり試験結果をかなり下まわる。

5. あとがき

本実験結果の検討に際し問題となったのは杭とフーチングとの剛結度合、フーチングと地盤との摩擦力、土の変形係数の深度方向の相違、各杭の荷重分担率のバラツキなどであり、これを十分に求め得たとはいいがたい。今後、群杭試験を実施する場合はこれらの事項に関しても十分なデータが得られるよう計画すべきであろう。

本報告は地盤性状、杭径、杭間隔、杭本数などの限られた条件での結果をまとめたものであり、この試験結果から設計に採用する群杭効率の提言を行なうには無理がある。今後この種の実験が各方面の研究機関によって数多く実施されることが望ましく同時に横型実験や理論解析による検討を積極的に行なってゆく必要がある。

参考文献

- 1) 玉野治光: 群杭の水平抵抗についての一考察, 第 8 回日本道路会議論文集
- 2) 杉村義広: 群杭に作用する水平地盤係数の係減効果, 第 7 回土質工学研究発表会, (1972)