

# DIA-WIN 工法による壁杭の水平抵抗に関する研究

## Study on Horizontal Resisting Force of the Wall Pile by the DIA-WIN System

武内 義夫\*                      小林 康之\*\*  
 Yoshio Takeuchi                Yasuyuki Kobayashi  
 佐々木 淳\*\*\*                    高橋 孝二\*\*\*\*  
 Atsushi Sasaki                   Koji Takahashi  
 柏木 敏広\*\*\*\*\*  
 Toshihiro Kashiwagi

### 要 約

壁杭の鉛直支持力に関する研究は、これまで数多く行われており、円形断面の場所打杭と比較して、同等以上の支持力を有していることが明らかにされている。しかし、水平抵抗に関しては研究例も少なく、その力学的挙動等については、十分に解明されていない。

本研究では、DIA-WIN 工法による壁杭について、水平載荷試験を実施し、水平抵抗の評価を行った。その結果、水平抵抗に方向性があること、面内方向と面外方向とでは大きく挙動が異なることなどが、明らかになった。

また、簡易なモデルによる解析を行い、試験結果との比較を行った。その結果、面外方向載荷試験では実験結果と解析結果は比較的良く一致した。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 実大壁杭の水平載荷試験
- §3. 壁杭の水平載荷試験の解析
- §4. まとめ

### §1. はじめに

地中連続壁が建築構造物の基礎工法として用いられて20数年を経過している。当初、仮設の山留め壁、止水壁として用いられていた地中連続壁は、その後の施工機械の性能や施工技術の向上により、構造体としての地中壁および杭としても使用できるようになり、市街地における基礎工法として近年急速に普及しつつある。

杭として通常多く用いられている円形断面のコンクリート杭は、限られた直径のものしか施工できないのに対し、壁杭は壁厚や断面寸法を変化させることにより、大きな支持力を期待することができる。壁杭の鉛直支持力に関する研究は、これまで数多く行われており、円形断面の場所打ち杭と同等以上の鉛直支持力を有していることなどが明らかにされている。しかし、水平抵抗力に関しては、水平載荷試験例も少なく、その力学的挙動や水平抵抗の評価方法は十分に解明されておらず、今後の研究が必要とされている。

本報では、地中連続壁の施工に際し、試験用の壁杭を構築後、杭の水平載荷試験を実施したので、これらの試験結果および解析結果について報告する。

\*技術研究所先端技術研究課係長  
 \*\*技術研究所先端技術研究課長  
 \*\*\*技術研究所先端技術研究課  
 \*\*\*\*技術研究所構造研究課  
 \*\*\*\*\*建築設計部技術電算課係長

### §2. 実大壁杭の水平載荷試験

#### 2-1 試験概要

##### (1) 試験地盤

試験地点は、神奈川県大和市の当社大和寮（家族寮）新設敷地内である。Fig. 1 に試験地点の土質柱状図を示す。なお、試験地盤高さ  $GL \pm 0$  と BM 高さは、 $GL \pm 0 = BM - 2.5m$  の関係にある。

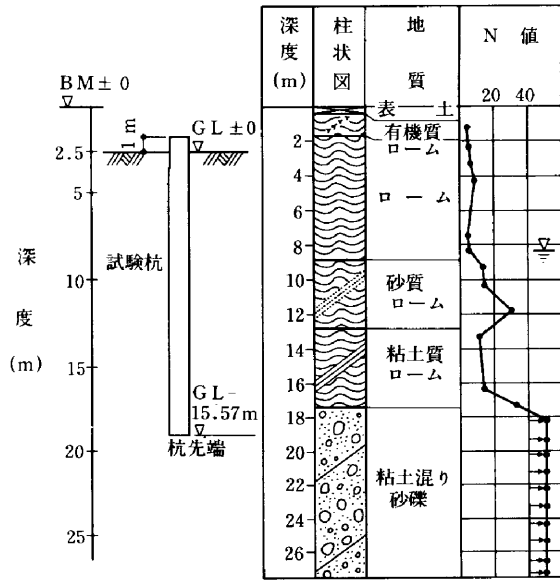
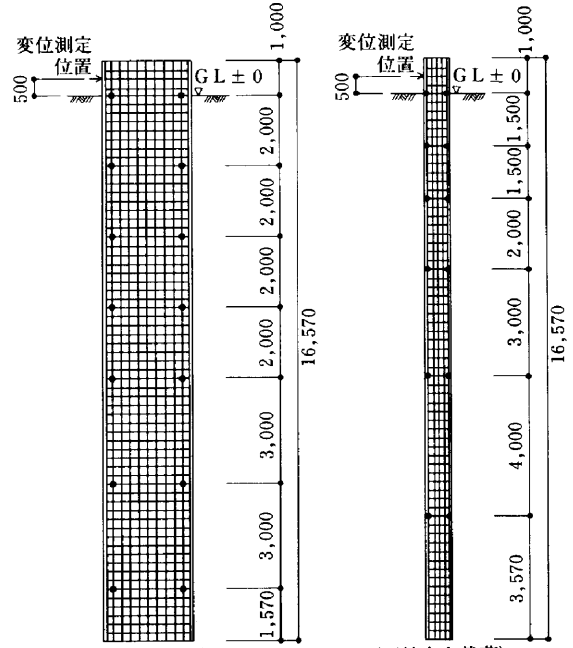
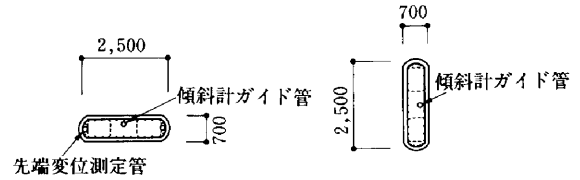


Fig.1 土質柱状図



●印は鉄筋計の位置をしめす

Fig.2 配筋状況および測定位置

(2) 試験杭の形状および使用材料

試験杭は、短辺方向0.7m、長辺方向2.5m、杭長約16.5mの形状を有する DIA-WIN 工法による壁杭であり、面内方向載荷用試験杭と面外方向載荷用試験杭の合計2本である。鉄筋は SD345、コンクリートは  $F_c = 240 \text{ kgf/cm}^2$  ( $2.35 \times 10^7 \text{ Pa}$ ) を使用した。Fig. 2 に試験杭の配筋状況を示す。

(3) 試験方法

試験方法は、土質学会編「杭の水平載荷試験方法・同解説」<sup>2)</sup>に準拠し、一方向多サイクル載荷とした。載荷点は  $GL + 0.5m$  の位置とし、油圧ジャッキ (100t × 4 台一面内載荷用、100t × 1 台一面外載荷用) により載荷を行った。面外載荷装置を Fig. 3 に、また面内試験状況を Photo 1 に示す。なお、面内方向載荷用試験杭については、最大耐力に至るまで載荷を行ったが、面外方向載荷用試験杭については、本設杭併用のため、弾性挙動範囲内で載荷試験を行った。

計測項目は、載荷点の水平変位、鉄筋の歪、杭の傾斜角および杭先端の鉛直変位とした。各測定装置の取り付け位置を Fig. 2 に併記する。

2-2 試験結果および考察

(1) 荷重-水平変位

面内および面外方向載荷時の荷重-水平変位を Fig.

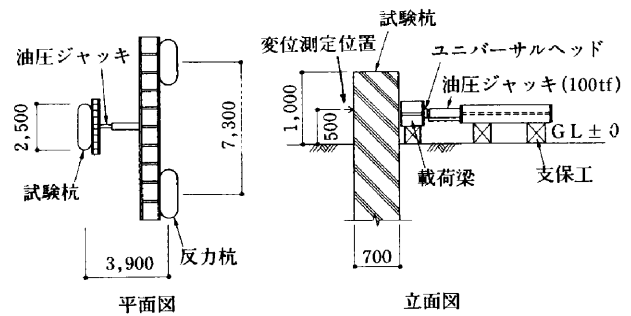


Fig.3 載荷装置 (面外方向載荷)

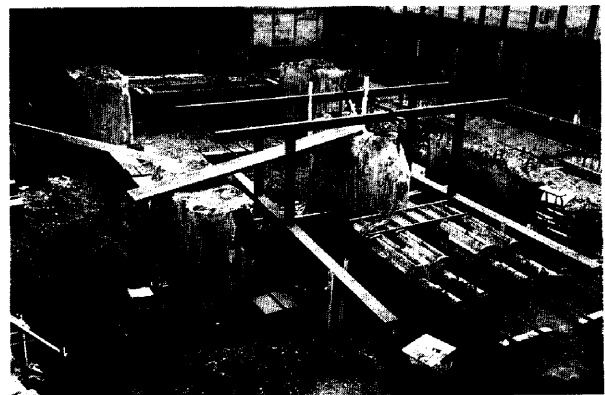


Photo 1 試験状況 (面内方向載荷)

4に示す。面内方向載荷の場合、最大載荷荷重は250tf ( $2.45 \times 10^6 \text{N}$ )であり、その時の載荷点の水平変位は111.3mmであった。また面外方向載荷の場合、弾性範囲内としたため、最大載荷荷重は51.0tf ( $5.00 \times 10^5 \text{N}$ )であり、その時の載荷点の水平変位は11.4mmであった。

両杭共低荷重での繰り返しによる水平変位の増加量は小さく、ほぼ弾性的な挙動を示している。しかし、荷重が増加するに従い、繰り返しによる水平変位の増加量も大きくなり、一般的な繰り返し載荷試験にみられる性状を示している。

面内および面外方向載荷時における荷重-水平変位 (Fig. 4) の包絡線を、Fig. 5には両リニア軸で、Fig. 6には両対数軸で示す。同一水平変位10mmで比較すると、面内方向載荷の荷重は面外方向載荷のそれと比べて、約2.7倍になっている。これより、壁杭は水平力に対する方向性を有しており、面内方向の水平抵抗力が極めて大きいことがわかる。またリニア軸で示した場合はあまり明確ではないが、対数軸で示した場合、初期荷重段階ではばらつきは大きいものの、荷重-水平変位の折れ点が明確になって現れている。面内方向の場合60tf ( $5.88 \times$

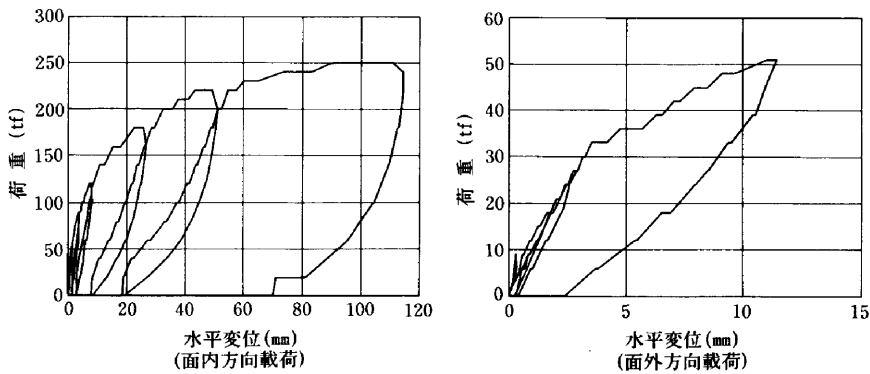


Fig.4 荷重-水平変位

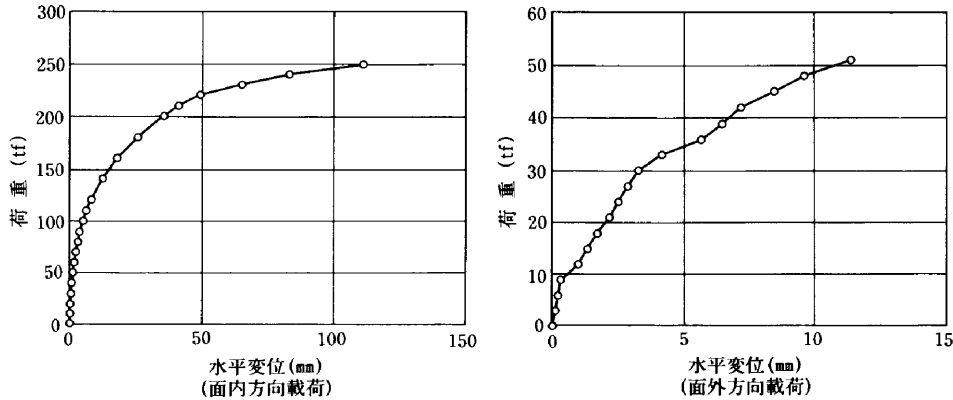


Fig.5 荷重-水平変位包絡線(リニア軸表示)

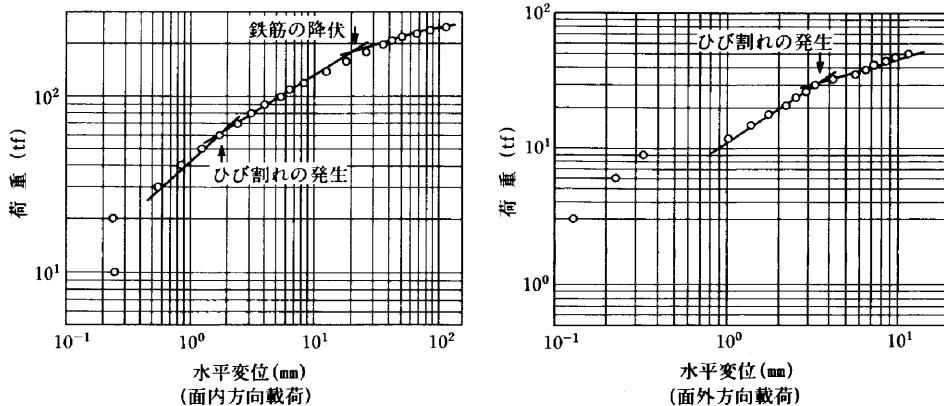


Fig.6 荷重-水平変位包絡線(対数軸表示)

10<sup>5</sup>N)、面外方向の場合33tf (3.24×10<sup>5</sup>N)で変化が見られる。これは杭に曲げひび割れ等が発生し、それによる剛性低下が原因であると考えられる。面内方向荷重の場合、170tf (1.67×10<sup>6</sup>N)では鉄筋が降伏し、230tf (2.26×10<sup>6</sup>N)以上の荷重では、荷重の増加に伴う変位は著しく増加している。これは杭が既に極限に近い状態になっているためと考えられる。

(2) 歪分布、曲げモーメント分布および変形曲線

Fig. 7に面内方向荷重時における歪分布、曲げモーメント分布および傾斜計から求めた変形曲線を示す。なお、

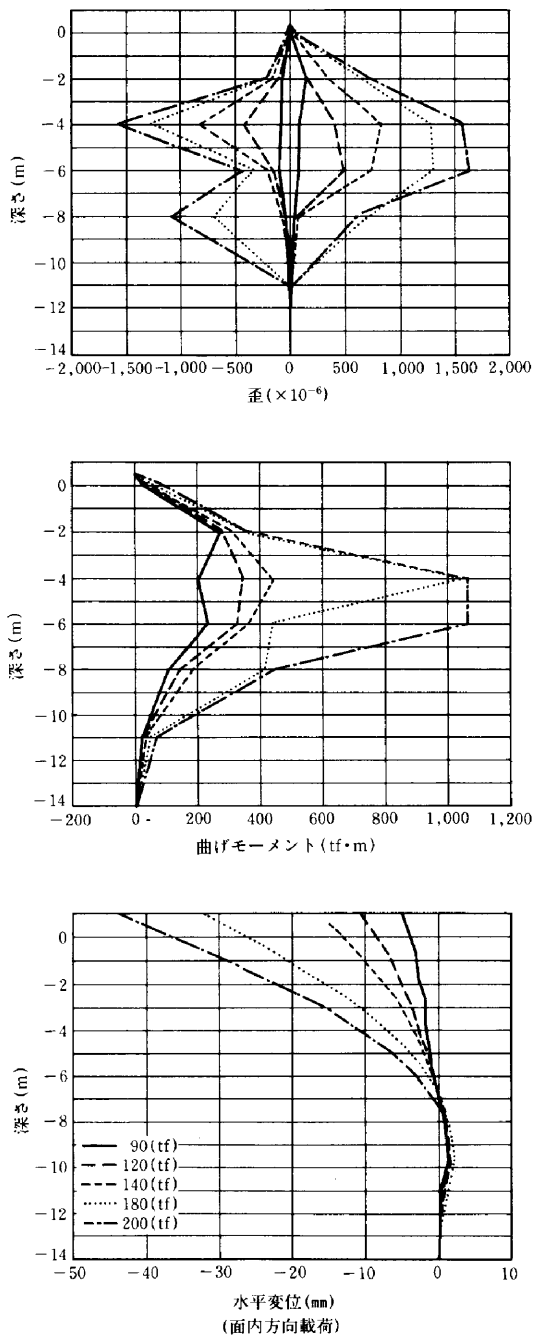


Fig.7 歪分布、曲げモーメント分布、変形曲線

歪分布の正側の値は引張り歪を、負側の値は圧縮歪を示している。歪分布および曲げモーメント分布において、それが収束する深さが杭先端に近くっており、短杭的な性状を示している。

Fig. 8に面外方向荷重時における各分布曲線を示す。圧縮側と引張り側の歪は、荷重27tf (2.65×10<sup>5</sup>N)まではほぼ対称的な値を示しているが、コンクリートにひび割れが発生したと考えられる33tf (3.24×10<sup>5</sup>N)では、引張り側の歪が急増している。歪および曲げモーメント分布は、深さGL-1.5m付近で最大値となり、GL-5

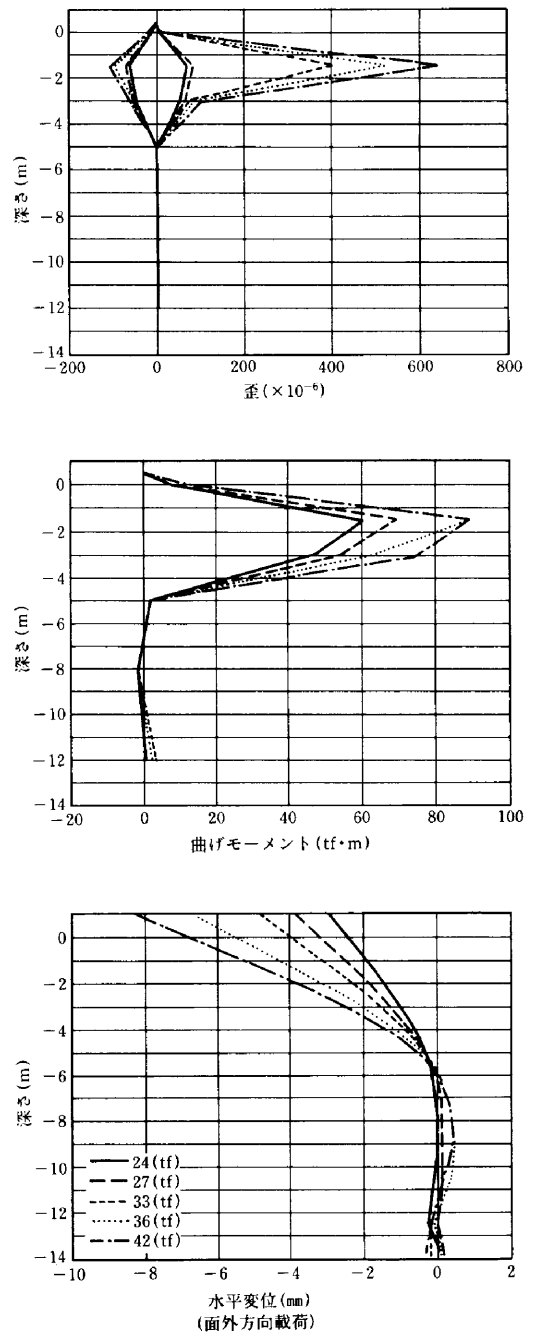


Fig.8 歪分布、曲げモーメント分布、変形曲線

m以深では収束している。また変形曲線は杭の変形状態を示していることから、壁杭は面外方向に対しては、長杭と同じ性状であると言える。最大荷重である51tf (5.00×10<sup>5</sup>N) 荷重時における鉄筋の歪は、9.00×10<sup>-4</sup>以下であった。本試験で使用した鉄筋の降伏歪は1.84×10<sup>-3</sup>であり、弾性範囲内で試験を終えた。

(3) 水平地盤反力係数

上述の試験結果に基づき、Y.L. Changの方法に従い、水平地盤反力係数を求めた。なお面内方向荷重試験用杭は有限長の杭として、また面外方向荷重試験杭については無限長の杭として計算を行った。その結果、水平変位10mmにおける両杭の水平地盤反力係数は、面内方向荷重時で6.0 kgf/cm<sup>2</sup>、面外方向荷重時で1.3 kgf/cm<sup>2</sup>であった。

§ 3. 壁杭の水平荷重試験の解析

3-1 解析の概要

(1) 解析モデル

本解析では、Fig. 9に示すようなモデルを用いた。壁杭は曲げ変形とせん断変形を考慮し、節点間を材軸直交分割のビーム要素として取り扱った。壁杭の曲げに対する復元力特性はTri-Linear型とし、曲げひび割れモーメントは(1)式を用いた。

$$M_C = 1.8 F_C Z_e \tag{1}$$

ここで、 $M_C$ ：曲げひび割れモーメント (kgf・cm)、 $F_C$ ：コンクリート強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $Z_e$ ：断面係数 (cm<sup>3</sup>) である。

また曲げ降伏モーメント  $M_y$  および終局モーメント  $M_u$  は e 関数を用いて解析した。解析に用いた材料定数、各曲げモーメントを Table 1, Table 2 に示す。

地盤はバネ要素として取り扱った。壁杭に対する加力方向直交面へ抵抗する受働バネ、および加力方向平行面に作用する摩擦バネの復元力特性は、Bi-Linear型とした。受働バネの剛性は、既往の水平方向地盤反力係数推定式である基礎構造設計指針式(2)式、岸田、中井式(3)式を用いた<sup>3)</sup>。

$$K_h = 0.8 E_0 B^{-3/4} \tag{2}$$

$$K_h B = 1.17 \left( \frac{E_0 B^4}{EI} \right)^{1/12} \frac{E_0}{1 - \nu^2} \tag{3}$$

ここで、 $K_h$ ：水平地盤反力係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $E_0$ ：変形係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $B$ ：杭幅 (cm)、 $EI$ ：杭の曲げ剛性

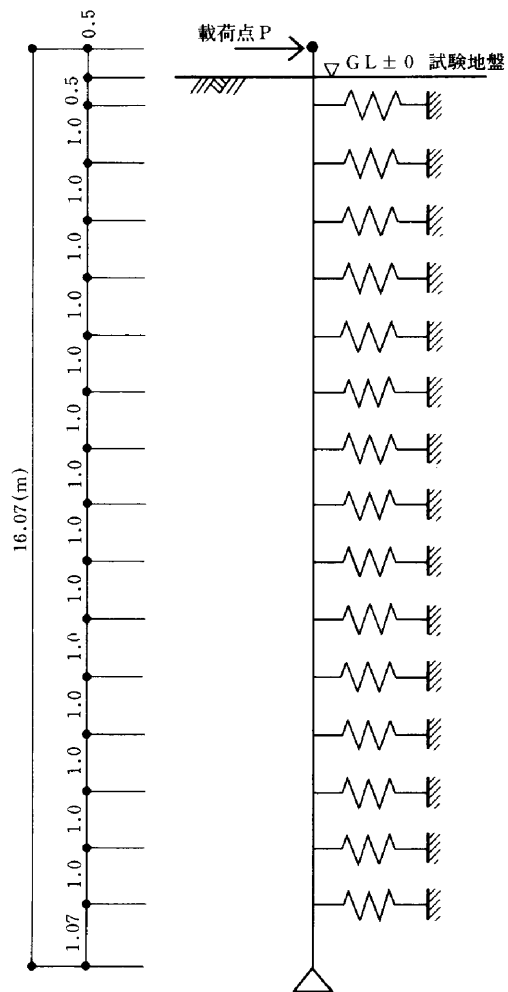


Fig.9 解析モデル

Table 1 材料定数一覧

鉄筋	降伏応力度 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏歪 $\epsilon_{sy}$	—
	3500	2.1×10 <sup>6</sup>	1.67×10 <sup>-3</sup>	—
コンクリート	強度 $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏歪 $\epsilon_{cy}$	終局歪 $\epsilon_{cu}$
	240	2.5×10 <sup>5</sup>	0.002	0.003

Table 2 各曲げモーメント一覧

	曲げひび割れモーメント $M_c$ (tf・m)	曲げ降伏モーメント $M_y$ (tf・m)	曲げ終局モーメント $M_u$ (tf・m)
面内方向荷重	190.8	423.5	580.2
面外方向荷重	57.7	126.6	138.5

(kgf・cm<sup>2</sup>)、 $\nu$ ：ポアソン比 ( $\nu=0.5$ ) である。

また最大受働抵抗は Rankine の受働土圧の(4)式を用いた。

$$R = \gamma Z \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2 C \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \tag{4}$$

ここで、 $R$ ：最大受働抵抗(tf/m<sup>2</sup>)、 $\gamma$ ：単位体積重量(t/m<sup>3</sup>)、 $Z$ ：深さ(m)、 $\phi$ ：内部摩擦角(°)、 $C$ ：粘着力(tf/m<sup>2</sup>)である。

摩擦バネは、当該地盤が粘性土であるため、最大摩擦抵抗を、最大摩擦抵抗力時の変形を10mmと仮定し、(5)式で求めた。

$$F_s = \frac{q_{uA}}{2} \quad (5)$$

ここで、 $F_s$ ：最大摩擦抵抗(kgf)、 $q_u$ ：一軸圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $A$ ：摩擦面積(cm<sup>2</sup>)である。

解析に用いた地盤定数を Table 3 に、また地盤バネ一覧を Table 4 に示す。

(2) 解析パラメータと解析方法

本解析では、載荷点を試験時と同じ GL+0.5m とし、水平に力を加えた。杭先端の支持条件はピン支持とし、単位長さ当たりの節点に受働バネと摩擦バネを設けた。この時、摩擦バネは一定とし、受働バネは(2)、(3)式中の杭幅  $B$  の値を 1, 3, 5 倍と変化させ、解析した。なお、解析は増分法による。

3-2 解析結果および考察

(1) 荷重-水平変位

載荷点における荷重と水平変位の解析結果および試験結果の比較を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a) は面内方向に載荷した場合で、受働抵抗は(2)式を用いて解析をした。Fig. 10 (b) は受働抵抗を(3)式を用いて解析した結果である。また Fig. 10 (c) は面外方向に載荷した場合で、受働抵抗を(2)式を用いて解析し、Fig. 10 (d) は受働抵抗を(3)式で解析した結果である。

面内方向に載荷した場合、荷重が小さい範囲では、受働抵抗を(2)式、(3)式のどちらを用いても、試験結果とはほぼ一致する。しかし、荷重が増加するに従い、解析における変位は試験結果に比べて小さくなっている。面外方向に載荷した場合、(2)式を用いた結果は試験結果とかなり良い一致を示したが、(3)式で評価した場合の変位は、試験結果に比べて若干小さくなっている。

(2) 曲げモーメント分布

深さ方向の曲げモーメント分布を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a), (b) は面内方向載荷の場合であり、また Fig. 11 (c), (d) は面外方向載荷の場合である。

Table 3 地盤定数一覧

深さ* Z(m)	粘着力 C(kgf/cm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	単位体積重量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	一軸圧縮強度 $q_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	変形係数 $E_o$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
0 ~ 8.9	0.62	13.2	1.7	1.81	178.5
8.9~12.9	1.55	18.4	1.7	4.48	577.8
12.9~17.9	3.20	12.4	1.7	5.51	577.8

\*：深さは BM 基準による

Table 4 地盤バネ一覧

(面内方向載荷)

深さ*** (m)	摩擦バネ		基礎構造設計指針式						岸田, 中井式					
			受働バネ						受働バネ					
			杭幅×1		杭幅×3		杭幅×5		杭幅×1		杭幅×3		杭幅×5	
$P_U^*$	$K^{**}$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	
0 ~ 8.9	36.2	36.2	11.9	41.3	35.7	54.4	59.5	61.8	11.9	14.1	35.7	20.3	59.5	24.1
8.9~12.9	89.6	89.6	45.0	133.7	135.0	176.0	225.0	199.9	45.0	50.2	135.0	72.4	225.0	85.9
12.9~17.9	110.2	110.2	75.0	133.7	225.0	176.0	375.0	199.9	75.0	50.2	225.0	72.4	375.0	85.9

\*： $P_U$ は耐力(t)、\*\*： $K$ はバネ値(t/m)、\*\*\*：深さは BM 基準による

(面外方向載荷)

深さ*** (m)	基礎構造設計指針式						岸田, 中井式						
	受働バネ						受働バネ						
	杭幅×1		杭幅×3		杭幅×5		杭幅×1		杭幅×3		杭幅×5		
$P_U^*$	$K^{**}$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$	$P_U$	$K$
0 ~ 8.9	42.5	56.8	127.5	74.7	212.5	84.9	42.5	26.3	127.5	38.0	212.5	45.1	
8.9~12.9	160.6	183.8	481.7	241.9	802.8	274.8	160.6	94.1	481.7	135.6	802.8	160.8	
12.9~17.9	268.0	183.8	804.1	241.9	1340.2	274.8	268.0	94.1	804.1	135.6	1340.2	160.8	

\*： $P_U$ は耐力(t)、\*\*： $K$ はバネ値(t/m)、\*\*\*：深さは BM 基準による、※面外は摩擦バネを無視する

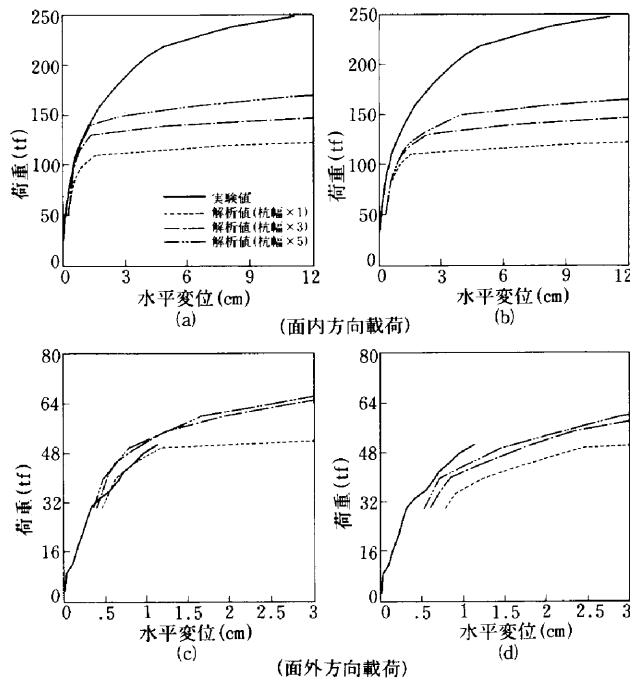


Fig.10 荷重—水平変位

解析結果は(2)、(3)式とも、面内方向載荷の場合、荷重  $P=50\text{ tf}$  ( $4.90 \times 10^5\text{ N}$ ) の場合では、試験結果とほぼ一致しているが、荷重  $P=100\text{ tf}$  ( $9.81 \times 10^5\text{ N}$ ) の場合、試験結果と比べて小さくなった。また面外方向載荷の場合、全体的には一致しているが、最大値については試験結果よりも小さくなった。

(3) 変形曲線

深さ方向の変形曲線を Fig. 12 に示す。Fig. 12 (a)、(b) は面内方向載荷の場合であり、また Fig. 12 (c)、(d) は面外方向載荷の場合のものである。

面内方向載荷、面外方向載荷とも試験結果と良い一致を示している。

§ 4. まとめ

DIA-WIN工法による壁杭の水平載荷試験から荷重—水平変位、曲げモーメント分布、変形曲線等の水平抵抗に関する貴重なデータを数多く得ることができた。また、比較的簡易な方法による解析モデルで、試験結果との比較を試みた。その結果から、本報で取り扱った解析モデルにおいて、面外方向載荷試験との比較では、ほぼ良い一致を見た。このモデルの場合でも最大曲げモーメント値に実験値より小さくなる傾向があり、本報で採用した解析モデルを用いたような場合は、断面力(曲げモーメント)の取扱い方に注意を要することなどがわかった。

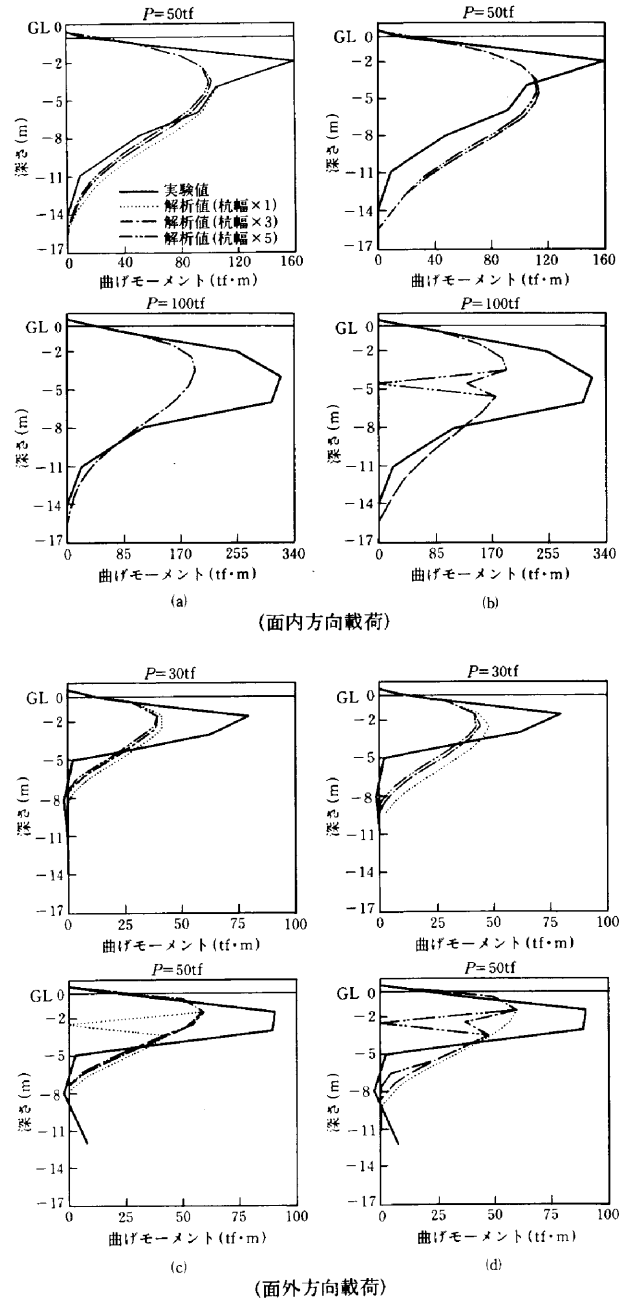


Fig.11 曲げモーメント分布

今後、試験結果を精度良く模擬出来る解析モデルを検討していく予定である。

(謝辞) 壁杭の水平載荷試験を実施するにあたり、横浜支店ヴェルデ大和出張所の方々には、多大な御協力を頂きました。記して、感謝の意を表します。

参考文献

1) 小林ほか：地下連続壁工法に関する研究(2)ー一原位置実大施工実験および鉛直載荷試験ー、西松建設技報、Vol.11, pp.58~67, 1988.

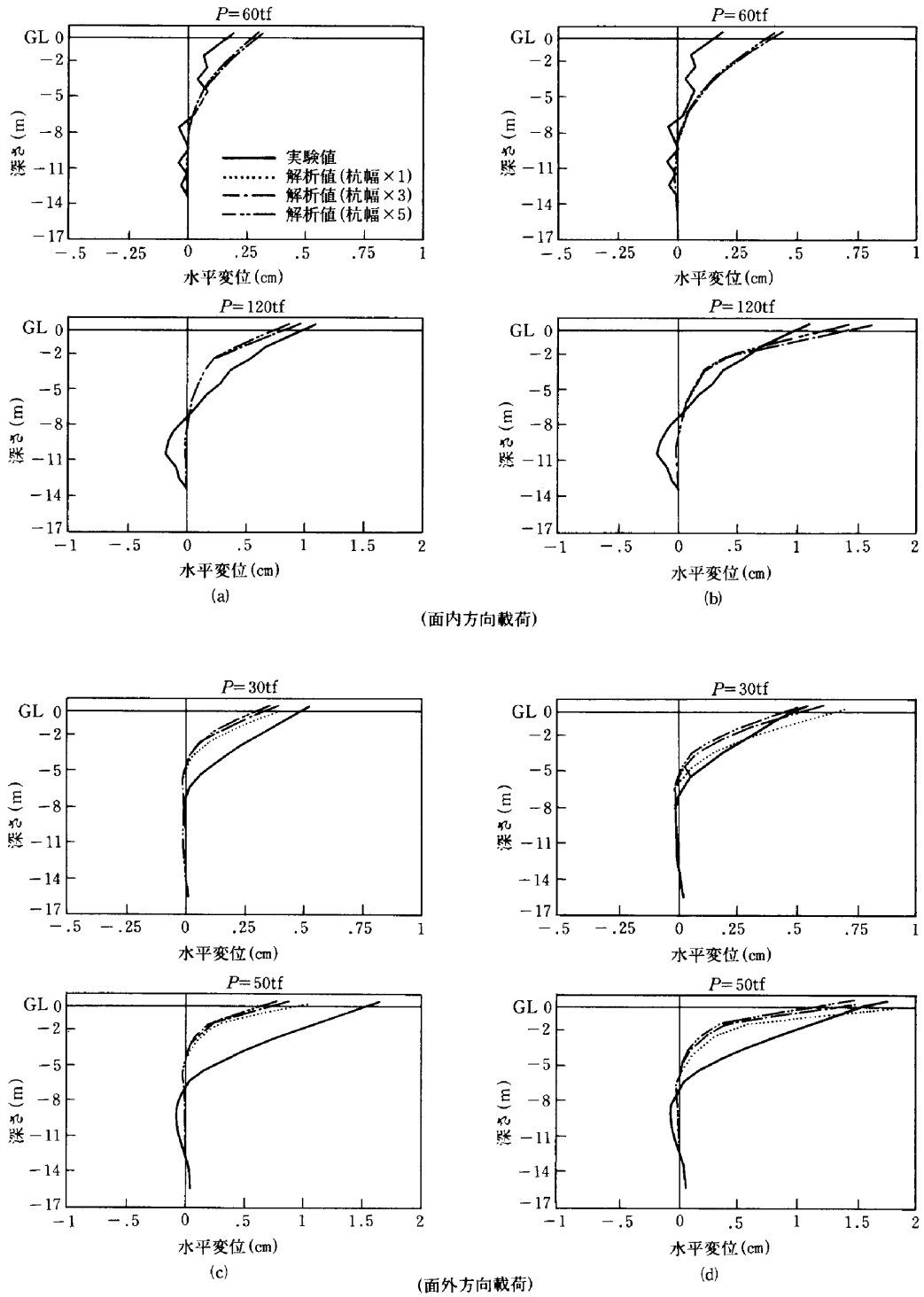


Fig.12 変形曲線

2) 土質工学会基準 杭の水平荷重試験方法・同解説, 土質工学会, 1983.

3) 地震力に対する建築物の基礎の設計指針, 日本建築センター, pp.52~53, 1985.