

# 波動理論による杭打ち解析プログラムの適用性に関する研究

近藤 次郎      崎本 純治  
芳賀 孝成

## Studies on Applications of Pile Driving Analysis Program Based on Wave Propagation Theory

Jiro Kondo      Junji Sakimoto  
Takashige Haga

### Abstract

A program based on wave propagation theory has begun to be used overseas for estimating drivabilities of piles and their bearing capacities after installation. In order to investigate the applicabilities for real projects in Japan, the authors performed pile driving tests and simulation analyses for obtaining data from the programs. The results are as follows: ① The program can be used for drivability estimation such as of driving stress and settlement by applying dynamic reduction rates to static capacities of piles. ② Settlement  $S$  and rebound  $K$  are approximately determined by total resistance  $R$  and by the rate of shaft resistance to  $R$  respectively. ③ In order to estimate static bearing capacity from driving data, the recovery characteristic of soil strength should be made clear.

### 概 要

打込み杭の事前の施工性や打設後の支持力の評価において、諸外国では波動理論による杭打ち解析プログラムが実務に用いられるようになってきているが、我が国ではまだこの方法は実用の途についたばかりである。そこで、杭打ち試験と波動理論プログラムによるシミュレーション解析を行なって、その適用性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。① 静的に算定する杭の支持力に対して動的減減率を適用することで、打撃応力度・1打貫入量の事前予測手法として用いることができる。② 貫入量  $S$  は総貫入抵抗力  $R$  によってほぼ定まり、 $R$  に対する周面抵抗力の割合に応じて、リバウンド量  $K$  の大きさが決定される。③ 杭打ち後、地盤は強度回復するため打込み時の計測値から支持力を評価するには、地盤強度の回復性状を明確にする必要がある。

## 1. はじめに

構造物の大型化、大深度化に伴って、打込み杭もますます長尺化・大口径化している。こうした打込み杭の事前の施工性の予測および支持力の評価において、近年欧米を中心とする諸外国では、波動理論による杭打ち解析プログラム（以下、波動理論プログラムと呼称する）が広く用いられるようになってきた。この解析法は、杭体に発生する打撃応力度や貫入量を波動理論を用いて求めるもので、杭の仕様や工事に適切なハンマーの選定に用いるばかりでなく、一步進んで杭の打込み時に得られる杭頭の挙動から、杭の静的支持力を評価するという鉛直載荷試験に代わる手法としても着目されている。

この解析法の普及は、近年の計測機や計測データ処理・解析システムの進歩が大いに寄与したものと思われるが、今日では諸外国においては大規模な杭打ち工事では、必ずといって良いほど、この波動理論プログラムによる検討が行なわれている。

我が国では、波動理論による杭打ち解析手法は実用の途についたばかりであるが、今後需要が増すと考えられる。このため、筆者らは現場杭打ち試験を行ない波動理論プログラムの適用性を検討している。本報告では打撃時の杭挙動を、波動理論プログラムによってシミュレーション解析した結果について述べるとともに、推定された杭の貫入抵抗力と、鉛直載荷試験で得られた支持力を比較検討し考察を加えている。

## 2. 波動理論による杭打ち解析プログラム

波動理論プログラムのオリジナルは1960年に Smith によって開発された。ハンマー—杭—地盤系を図-1に示すように、杭体を質点の連結モデルに置き換えて打撃応力波の杭体内の波動伝播を式(1)に示す次元波動方程式で表わし、これを差分法で解くプログラムである。

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left( K \cdot \frac{\partial D}{\partial x} \right) = -R \quad \dots\dots\dots(1)$$

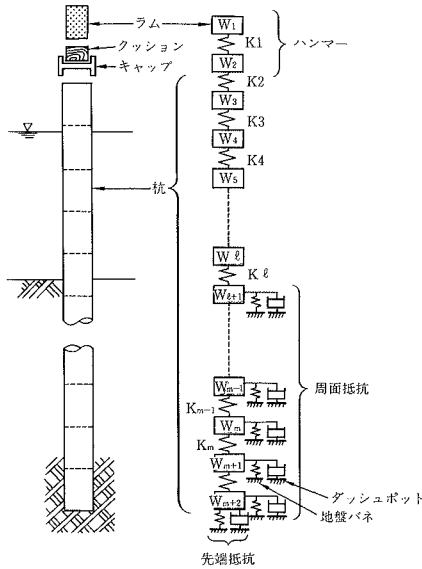


図-1 杭・ハンマー・地盤のモデル化例

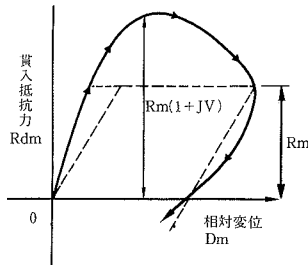


図-2 杭と地盤の相対変位と貫入抵抗力のモデル

ここに、W：杭重量，D：変位置，R：地盤の貫入抵抗力，K：ばね定数

式(1)における地盤の貫入抵抗力 R は、杭と地盤の相対変位との関係を図-2 のように仮定すれば、式(2)で表される。

$$R_m(t) = K_m \{ D_m(t) - D_m'(t) \} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、R<sub>m</sub>：杭セグメントが受ける地盤抵抗力

K<sub>m</sub>：地盤のばね定数，D<sub>m</sub>(t)：時刻 t での杭セグメントの変位置，D<sub>m</sub>'(t)：時刻 t での地盤の変位置

ただし、X が杭と地盤の最大弾性変形量 (Quake) を越えると R<sub>m</sub> は一定値になるとしている。この弾性的な杭と地盤の相対変位と地盤抵抗力の関係に、動的特性の速度依存性を考慮するため、減衰定数 J を用いて速度に比例した抵抗 J<sub>m</sub>・V<sub>m</sub>(t)・R<sub>m</sub>(t) を付加し、最終的に杭貫入時の地盤抵抗 R<sub>dm</sub> は式(3)で示される。

$$R_{dm}(t) = K_m \cdot \{ D_m(t) - D_m'(t) \} \cdot \{ 1 + J_m \cdot V_m(t) \} \dots\dots\dots(3)$$

### 3. 波動理論プログラムによる打撃貫入性の評価

以下、試験結果二例について打撃貫入性に対する波動理論プログラムの適用性を検討する。

### 3.1 杭打ち試験 1

3.1.1 試験概要 試験杭は長さ  $l = 52.5$  m、外径  $\phi = 1000$  mm の鋼管杭である。打込みはディーゼルハンマー (MH-72B) で行ない、支持層とした N 値50近くの砂層に約7m (7d) 根入れした。試験杭打設位置の地盤条件および試験杭の打撃回数の記録を図-3 に示す。また、杭・ハンマーの仕様を表-1 に示す。打込み試験での計測項目は、杭頭応力 (2 点)、杭頭加速度 (2 点)、杭頭変位 (1 点) である。図-4 に計測システムを示す。

3.1.2 試験結果の解析 試験の結果得られた打止め時の杭頭の挙動について、波動理論プログラムによるシミュレーション解析を行なった。用いた波動理論プログラムは Goble, Rausche によって開発された WEAP (1976年) である。このプログラムは、種々のハンマーの爆発機構を計算に取り込むことができ、ディーゼルハンマーによる杭打ち解析に適しているプログラムである。

図-5 は、総貫入抵抗力 R に対する杭頭変位波形のシミュレーション解析結果の一例である。解析は打込み杭の静的支持力算定法によって求めた値を基準値として R を変化させた。また、静的支持力の算定に際して、周面摩擦力度  $\tau$  はシルト・砂混じりシルト層では  $\tau_1 = N/2$  (tf/m<sup>2</sup>)、砂および砂礫層では  $\tau_2 = N/5$  (tf/m<sup>2</sup>) を用い、先端支持力度は  $q = 30N$  (tf/m<sup>2</sup>) を用いた。先端支持力はこの先端支持力度に閉塞率を 1 とし、杭先端全断面積を乗じて求めた。なお、R に対する周面抵抗力 F の割合は  $P = (F/R) = 50\%$ 、地盤の減衰定数は  $J_{side} = 0.07$  (sec/ft)、 $J_{point} = 0.15$  (sec/ft)、最大弾性変形量 Quake は  $Q_{side} = Q_{point} = 0.1$  (Inch) としている。解析の結果、実測波形と最も良い対応を示したのは、 $R = 360$  tf のケースである。この時の静的支持力算定値に対する動的減減率は、先端抵抗力に対して 0.25、周面抵抗力に対して 0.50 である。今回の結果は各抵抗力に対する一般的な動的減減率 0.50~0.75 よりも小さめの値となった。

図-6 に、R に関する周面抵抗力 F の割合  $P = (F/R)$  と、貫入量 S およびバウンド量 K の関係を示す。ここで、 $R = 360$  tf としている。S は p の変化に対して 12 mm とほとんど変化しないが、K は p によって異なり、p が大きいほど K は小さくなる。実測された K は 16 mm であり、 $p = 50\%$  とすると解析値は実測値と一致した。図-7 ~ 図-9 に、実測値と最も良いシミュレーション結果を与えた  $R = 360$  tf および  $p = 50\%$  を入力値とした場合の杭頭変位、応力度、速度の解析値と実測波形との対応を示す。各波形ともピーク値の大きさ、および断面変化面・杭先端からの反射波の傾向などが実測値に良く一致した。

### 3.2 杭打ち試験 2

3.2.1 試験概要 杭打ち試験 1 では、打撃挙動の計測箇所を杭頭部に絞って得られたデータについてシミュレーション解析を行なった。これを受けて、杭打ち試験2では杭頭だけでなく、杭体各部の打撃挙動を計測し、得られたデータについてシミュレーション解析を試みた。試

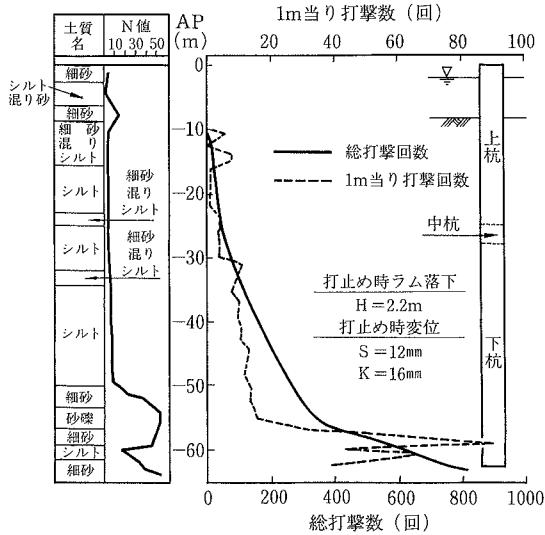


図-3 杭打ち試験1の地盤・打撃回数

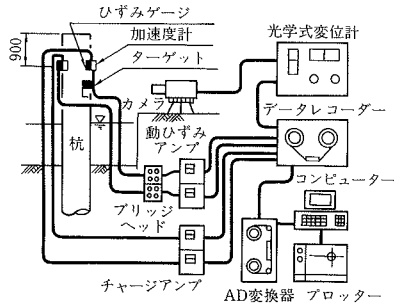


図-4 杭打ち試験1の計測システム

試験杭は、上杭・中杭・下杭から構成される長さ  $l=31$  m、外径  $\phi=711.2$  mm の鋼管杭である。打込みは油圧ハンマー NH-100で行なった。表-2に杭およびハンマーの仕様を示す。地盤はGL-10 mまでは地盤改良によって  $N=15$ とした砂層およびレキ混じり粘土、それ以深は砂質シルト・粘土層、および砂・粘土の互層となっている。図-10に地盤柱状図を示す。

試験杭の計測項目は、杭体ひずみ（4断面、計10点）、杭頭加速度（2点）、杭先端加速度（1点）、杭頭変位（光学式変位計1点）である。計測は、杭頭を地表面から20 cm残して打止めた時、および、地盤の強度回復が期待される1箇月後に突出した20 cmの部分再打込みした時の2回行ない、貫入抵抗の変化による、杭打ち挙動の差異を調べた。なお、再打込みは10打を過ぎる時点から貫入が始まり、20 cm打ち込むのに55打を要した。

3.2.2 試験結果および解析 試験の結果得られた杭体応力度および変位波形に対して波動理論プログラムによるシミュレーション解析を行なった。用いたプログラムはTTI (1968年)である。油圧ハンマー NH-100の打撃力の評価は、換算落下高さ1.44 mを使用した。シミュレーション解析における動的貫入抵抗  $R$  は静的に算定した周面および先端貫入抵抗  $R_f$ ,  $R_p$  に動的減率

表-1 杭打ち試験1の杭およびハンマー仕様

		長さ (m)	外径 (mm)	板厚 (mm)
杭	上杭	25.0	1000	20
	中杭	3.0	1000	14
	下杭	34.5	1000	12
ハンマー		形式 MH-72B	最大押圧力 280tf	
		ラム重量 7,200kgf	アンビル重量 2,080kgf	
		クッション材 カシ材	クッション厚 15cm	
		キャップ厚 25cm	キャップ重量 2,220kgf	

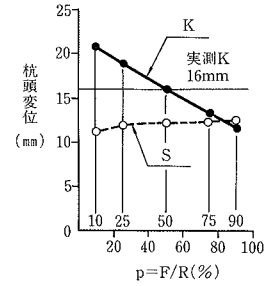


図-5 杭頭変位のシミュレーション結果

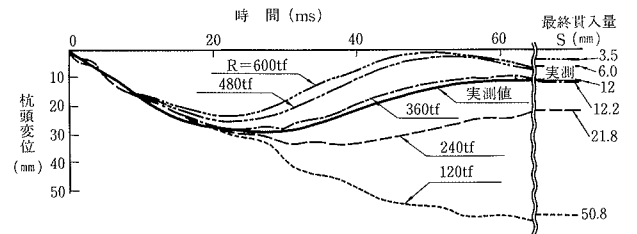


図-6 Pと杭頭変位の関係

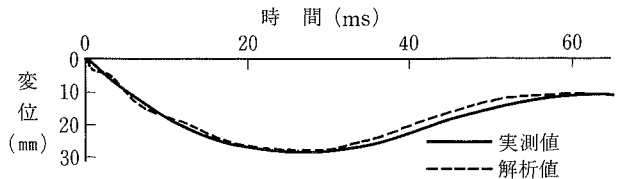


図-7 杭頭変位のシミュレーション結果

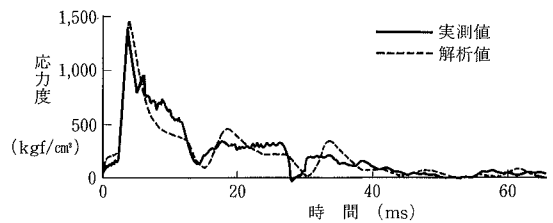


図-8 杭頭応力のシミュレーション結果

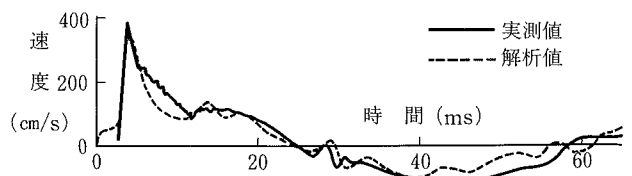


図-9 杭頭速度のシミュレーション結果

$\alpha, \beta$  を考慮して式(4)によって求めた。ここで、静的抵抗力の算定に際して周面摩擦力度  $\tau$  は砂層では  $\tau_1 = N/5$  (tf/m<sup>2</sup>)、シルト・粘土層では  $\tau_2 = N$  (tf/m<sup>2</sup>) を用い、また、先端支持力度  $q$  は  $q = 30N$  (tf/m<sup>2</sup>) を用いた。

$$R = \alpha R_f + \beta R_p \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $R_p = qAt$ ,  $At = \pi\phi^2/4$

図-11に打止め時の貫入量  $S$  が 22 (mm/打) の場合の杭頭応力度・変位、杭先端の応力度の実測波形とシミュレーション解析による解析波形を示す。また、図-12、図-13に再打込み開始後30打付近の貫入量  $S$  が 3.5 (mm/打) の場合(再打込み A)と、再打込み終了時の貫入量  $S$  が 6.5 (mm/打) (再打込み B) の杭頭応力・変位の実測値と解析値の対比を示す。いずれのケースも解析値は変位、応力の実測値と良い対応を示しているのがわかる。

これらのシミュレーション解析の結果から、杭頭応力は地盤抵抗に無関係にハンマー、クッション、杭系で決定されるのに対し、杭頭変位は地盤の総貫入抵抗力に、リバウンドは周面部と先端部の抵抗比率に、また、杭先端応力度は杭先端地盤の貫入抵抗力に大きく依存することが明らかとなった。

図-14に各ケースのシミュレーション解析で得られた  $R$  を示す。抵抗力  $\beta R_p$  は打止め時と再打込み A, B でともに 90 tf ( $\beta = 0.5$ ) となり、時間経過に伴う変化がなかった。一方、周面抵抗力  $\alpha R_f$  は、打止め時に 110 tf ( $\alpha = 0.25$ ) であったが、再打込み時には貫入量  $S$  が減少したのに対応し、再打込みの A では 510 tf ( $\alpha = 1.0$ )、B では 350 tf ( $\alpha = 0.70$ ) と打止め時に比べ大きい値となった。このように打止め時の  $\alpha R_f$  に対し、再打込み時の  $\alpha R_f$  が上昇するのは地盤のシキソトロピー現象や打撃時に上昇した過剰間隙水圧の時間経過に伴う消散などによる地盤の強度回復が原因と思われる。この周面抵抗力の増加は、衝撃力の減少量、すなわち、表-3に示すように杭頭と杭先端加速度の差が、打止め時の 80 G に比べ、再打込みの A, B でそれぞれ 470 G, 450 G と大きくなっていることから確認される。また、再打込み B が A より  $\alpha R_f$  が小さくなっているのは、再打込みを続けていくことによって、地盤強度がしだいに減少したために生じた現象と考えられる。

#### 4. 波動理論プログラムによる支持力の評価

##### 4.1 杭打ち試験3

4.1.1 試験概要 杭の支持力推定法としての波動理論プログラムの適用性を検討するために、杭打ち試験3では打込み時の杭体打撃挙動を計測した後に、鉛直載荷試験を行なって、打撃挙動のシミュレーション解析で得られた貫入抵抗力と静的な極限支持力を比較した。試験杭は鋼管杭 (S<sub>A</sub>, S<sub>B</sub> 杭) および PC 杭 (C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub> 杭) 各2本の計4本でそれぞれ添字で示した地点 A および B に打設された。

試験地盤は、上部が一軸圧縮強度  $q_u = 1 \sim 1.5$  (kgf/

表-2 杭打ち試験2の杭およびハンマー仕様

杭	構成部	外径φ(mm)	長さℓ(m)	厚さt(mm)	断面積A(cm <sup>2</sup> )	備考
	上杭	711.2	11	16	349.4	
	中杭		10	10	220.3	
下杭	10		10	220.3		
ハンマー	型式	NH-100				ラムストローク切替8段階
	駆動方式	油圧シリング				
	ラム重量	10 (tf)				
	最大ラムストローク	自由落下相当1.44 (m)				

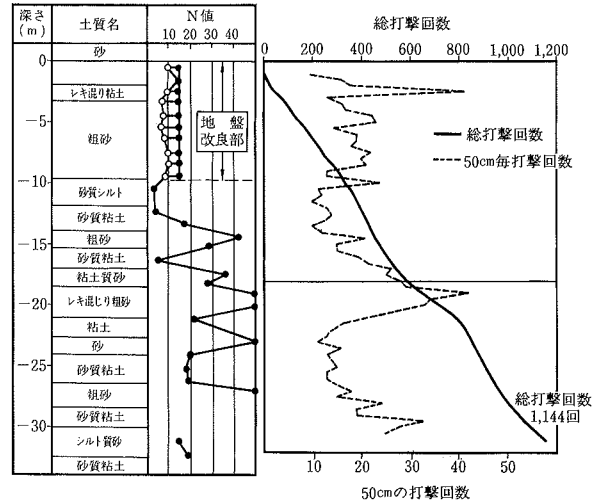


図-10 杭打ち試験2の地盤・打撃回数

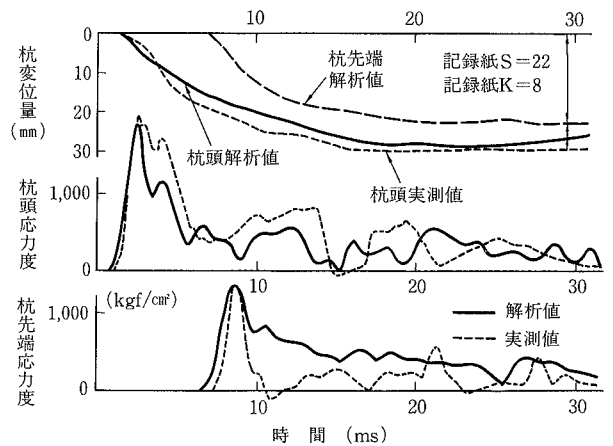


図-11 打止め時のシミュレーション結果

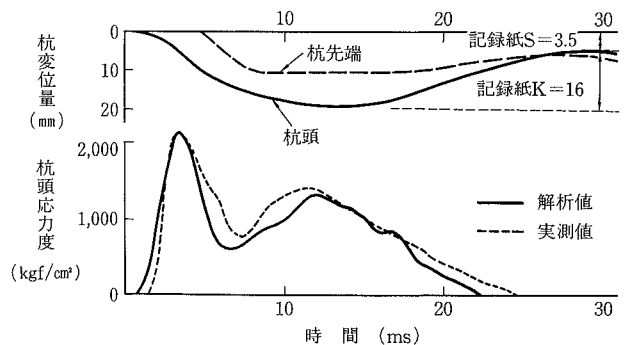


図-12 再打込み A のシミュレーション結果

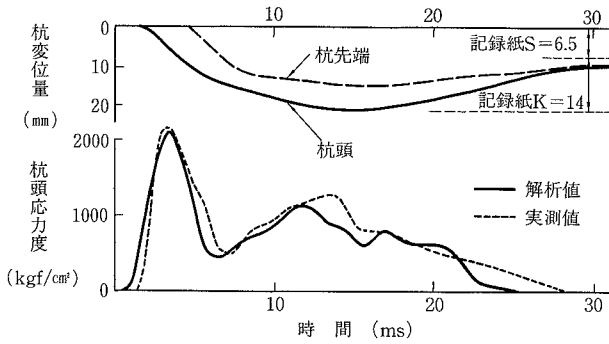


図-13 再打込み B のシミュレーション結果

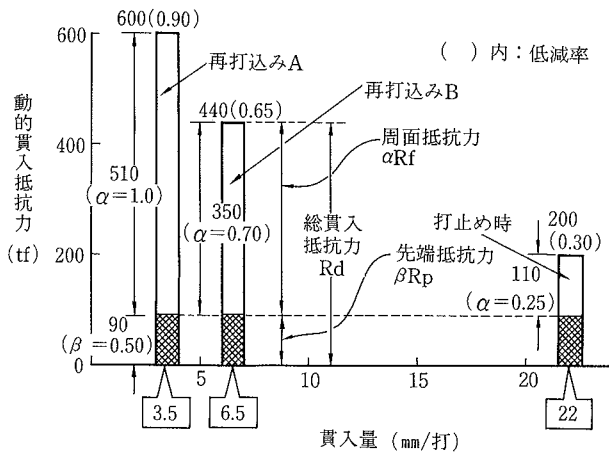


図-14 貫入量と貫入抵抗力の関係

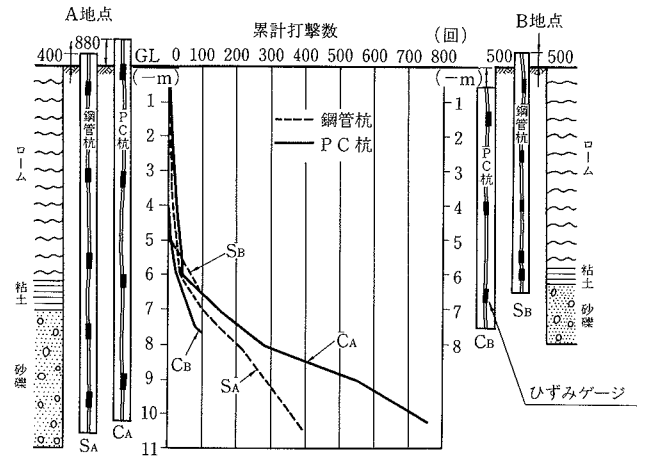


図-15 杭打ち試験 3 の地盤・打撃回数

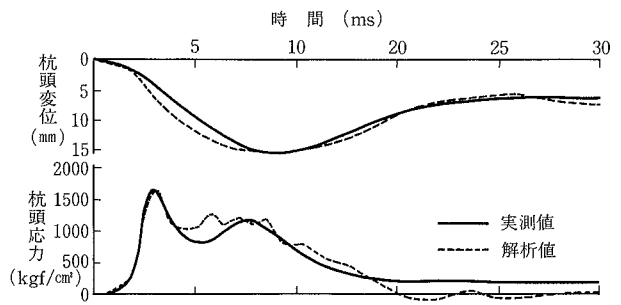


図-16 S<sub>A</sub> 杭のシミュレーション結果

cm<sup>2</sup> の関東ローム，下部は N 値が 30 前後の砂礫層から構成されている。また，地下水位は GL-20 m 以下である。試験杭は鋼管杭 (S<sub>A</sub>, S<sub>B</sub> 杭) および PC 杭 (C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub> 杭) を地点 A, B にそれぞれ 2 本ずつ打込み，計 4 本とした。打込みはディーゼルハンマー (KB25) で行なった。杭・ハンマーの仕様を表-4 に示す。

杭打ち試験時の計測項目は，各杭とも杭体ひずみ (3~5 断面)，杭頭変位 (光学変位計 1 点) である。図-15 に地盤条件および打撃回数の記録を示す。鉛直荷重試験は急速多サイクル方式で行ない，各杭とも杭頭沈下量が杭径の 10% を越えるまで荷重した。

4.1.2 試験結果 打止め時に得られた杭頭変位および杭頭応力波形を図-16，図-17 に示す。また，鉛直荷重試験で得られた各杭の荷重量 P と杭頭沈下量 S の関係，および極限支持力状態での軸力分布を図-18，図-19 に示す。ここで，極限支持力は杭頭沈下量 S が杭径の 10% に達したときの荷重とした。

4.1.3 試験結果の解析 打止め時の杭頭変位および杭体応力の波形に対して，シミュレーション解析を行なった。プログラムは TTI を用いた。図-16，図-17 に S<sub>A</sub> 杭，C<sub>A</sub> 杭の杭頭応力・変位のシミュレーション波形を示す。

図-20 に各試験杭についてシミュレーションの結果得られた貫入抵抗力 R と，鉛直荷重試験での極限支持力を対比して示す。静的極限支持力は，杭頭における貫入抵

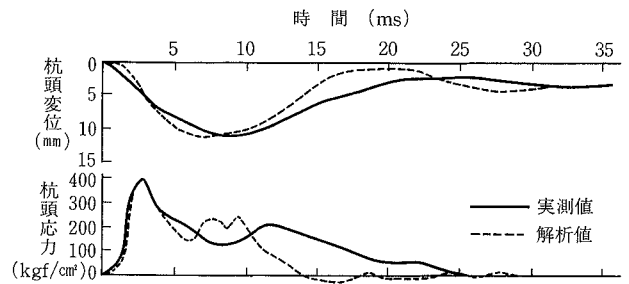


図-17 C<sub>A</sub> 杭のシミュレーション結果

表-3 杭頭・杭先端の加速度

加速度	杭頭 a <sub>1</sub> (G)	杭先端 a <sub>2</sub> (G)	差(G) a <sub>1</sub> -a <sub>2</sub>	S (mm/打)
計測				
打止め時	440	360	80	22
再打込み A	590	120	470	3.5
再打込み B	590	140	450	6.5

表-4 杭打ち試験 3 の杭およびハンマー仕様

項目	鋼管杭		PC 杭	項目	値	
	杭長 (m)	地点 A	11			地点 B
杭	杭径 (mm)	400			ラム重量 (tf)	2.5
	肉厚 (mm)	9	85	クッション材	材質	カシ
	断面積 (cm <sup>2</sup> )	110.6	684	直径 (cm)	29.5	
	単位長重量 (kgf/m)	88.8	178	厚さ (cm)	10.0	
	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.1×10 <sup>6</sup>	4.0×10 <sup>5</sup>			

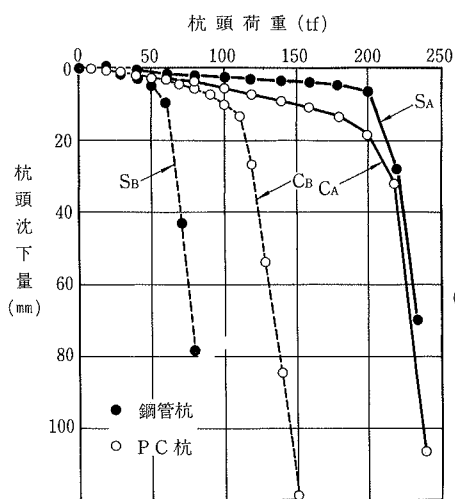


図-18 載荷試験結果

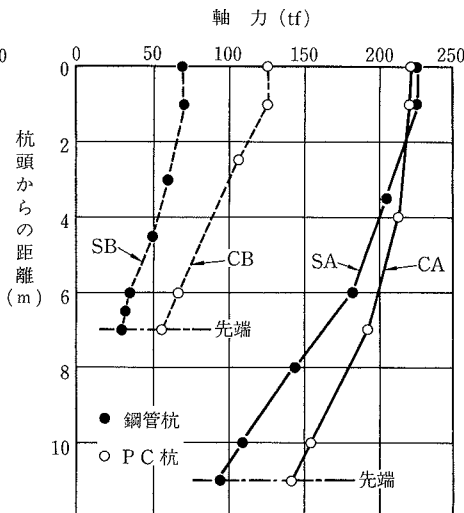


図-19 極限支持力状態の軸力分布

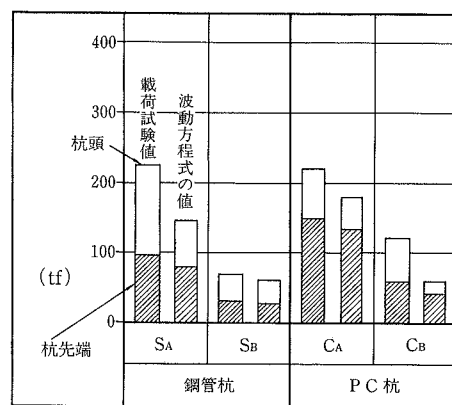


図-20 支持力の比較

抗力  $R$  に対して1.2倍~2.3倍と大きめの値を示した。杭先端の貫入抵抗と静的な先端支持力がほぼ等しいことから、この差は杭周面摩擦力の動的と静的な値の差によるもので、杭打ち時に比べ約20日後に実施した載荷試験時、周面摩擦の方が大きくなったために生じたと考えられる。この地盤の強度回復現象は3.2の再打込み試験においても顕著に表われている。したがって、打撃時の貫入抵抗から静的支持力を推定する場合、時間経過に伴う地盤の強度回復を適切に評価する必要がある。

### 5. まとめ

杭打ち時の施工性や支持力評価への波動理論プログラムの適用性について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 波動理論による杭打ち解析は、打込み杭の打撃応力度・貫入量の予測法として用いることができる。
- ② 杭打撃時の貫入量  $S$  は、総貫入抵抗  $R$  の大きさによって、また、リバウンド  $K$  は、総貫入抵抗に対する杭周面の摩擦抵抗力の割合によって決まる。
- ③ 総貫入抵抗  $R$  は杭打設後の時間経過に伴って、杭の打設によって乱された周辺地盤の強度が回復するため増加する。したがって、杭打ち解析プログラムによって静的支持力を評価するためには、 $R$  とこのような地盤

強度回復の経時変化との関係を把握する必要がある。

### 6. おわりに

今回の一連のシミュレーション解析では Quake, 減衰定数  $J$  などについては Smith の推奨値を用い、これらの値に対する検討はあまり行っていない。今後はこうした地盤定数をもっと適正に評価するため要素試験などを実施するとともに、今回確認された地盤貫入抵抗力の経時変化に着目した杭打ち試験や載荷試験を継続して種々の施工条件のもとでの解析データの蓄積を図り、波動理論プログラムによる打込み杭の施工性、支持力評価の精度を高めていきたいと考えている。

最後に、本研究においては WEAP プログラムを開発されたコロラド大学土木工学科 Goble 教授より貴重な意見を戴いた。ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Lawery, Hirsch and Coyle: Use of the Wave Equation to Resistance on a Pile during Driving, Texas A&W University, (1968)
- 2) Goble, Rausche: Wave Equation Analysis of Pile Driving WEAP Program Vol. 2, PB-261 905, (1976)