

# 波動理論解析の杭の打込み管理への適用性

崎本 純治 平間 邦興

## Application of Stress Wave Theory to Pile Driving Control

Junji Sakimoto Kunioki Hirama

### Abstract

Recently, stress wave theory has often been used for control of pile driving. However, the applicability has not yet been adequately investigated. The authors therefore carried out pile driving tests at the jobsites of a steel pipe pile driving project using a large hydraulic hammer and of a PHC pile driving project. Simulation analyses of the results were performed using the stress wave theory. This report describes the application of stress wave theory to pile driving control and behaviors during pile driving. As a result, the following were made clear:

① Penetration resistance in pile driving varies with the method of pile driving. The resistance when using a hammer having high blow frequency is smaller than when using a hammer having low blow frequency. The set-up factor on the pile surface reaches 5 to 6.

② Behaviors during pile driving are evaluated well by the stress wave theory. Consequently, the theory can be applied to control of pile driving. Static resistance can also be evaluated by carrying out pile redriving tests.

### 概 要

最近、我国でも杭の打込み管理に波動理論解析が用いられるようになってきた。しかし、その適用性についてはまだ十分な評価がなされていないのが現状である。今回大型油圧ハンマによる鋼管杭の杭打ち工事とPHC杭の杭打ち工事現場において杭打ち管理に関する問題が生じ、その解決のために杭打ち試験を実施した。この報告はその結果を波動理論によりシミュレーション解析し、波動理論解析の打込み管理手法としての適用性ならびに杭打ち時の挙動について述べたものである。その結果、以下の点などが明らかとなった。

① 打込み時の杭の貫入抵抗は打撃方法によって変化し、時間当りの打撃回数が多くなると貫入抵抗は小さくなる。② 打撃回数の多い大型ハンマを用いて細砂地盤に打設された鋼管杭の杭周囲のセットアップ率は5～6に達する。③ 波動理論解析は打込み杭の挙動をよく説明し、打撃時の貫入性、応力の評価やハンマの選定、ラム落下高の決定など杭打ち管理に有効に適用できる。また、再打撃試験等の実施により静的支持力の評価も可能である。

## 1. まえがき

最近、我国でも杭の支持力、打撃貫入性、打撃応力等の評価に波動理論解析を用いることが多くなってきた。しかし、その適用性についてはまだ十分な評価がなされていないのが現状である。今回、大型油圧ハンマを用いた鋼管杭の杭打ち工事とPHC杭の杭打ち工事現場において打撃貫入性、打撃応力、支持力等の杭打ち管理に関する問題が生じた。そこで、杭体の各深度に歪計や加速度計等を設置した試験杭の杭打ち試験と波動理論によるシミュレーション解析をそれぞれの現場で実施して杭打ち時の挙動の把握を行い、上記の問題点について検討した。この報告はこれらの検討結果と、波動理論解析の杭の打込み管理への適用性について述べたものである。

## 2. 大型ハンマを用いた鋼管杭の杭打ち管理への適用

某棧橋基礎杭工事は当初ラム重量8tfのディーゼルハンマの使用を考えていたが、同地での過去の実績や事

前に実施した波動理論による杭打ち解析結果からこのハンマでは打込み不能となる杭が多数であることが予想された。このため補助工法の併用案も考えられたが、最終的に施工性を考慮してラム重量25tfの大型油圧ハンマが使用された。この大型ハンマを用いた場合の杭の打撃貫入性や支持力の評価方法などは実績も少ないこともあって未解明な点が多い。そこで、打撃試験を実施するとともに波動理論によるシミュレーション解析を行った。

### 2.1 打撃試験の概要

**2.1.1 試験位置と地盤条件** 試験位置は茨城県鹿島郡の鹿島港々内である。図-1に各試験杭位置の土質条件を示す。上部洪積層は砂礫と礫を混じえた細砂からなり混入する礫径は概ね $\phi 10\sim 30$ mmが主体である。支持層となる下部洪積層は細粒分の混入が多いシルト混じり細砂の地盤である。

**2.1.2 試験杭** 試験杭は全基礎杭417本の中から4本を選定した。試験杭には打込み時の杭挙動を精度良く把握するため杭体の各深度にひずみゲージ、加速度計、および光学式変位計のターゲットを設置した。各試験杭の

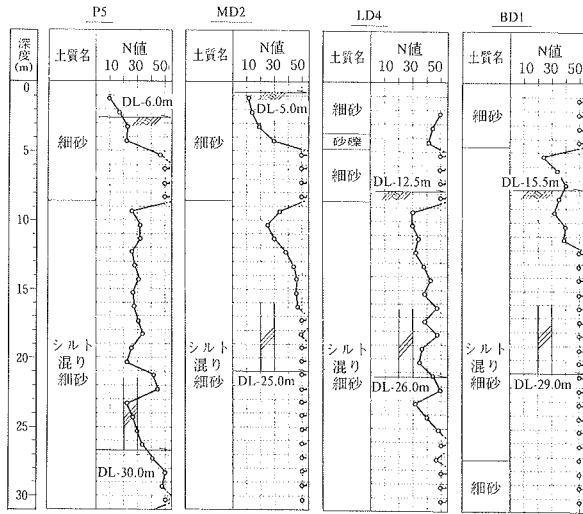


図-1 土質条件

表-1 試験杭仕様

構造名	杭の仕様	純断面積 (m <sup>2</sup> )	
		補強バンド考慮	補強バンド考慮
P5	φ 900 mm, t16 mm, L35 m	0.0701	
MD2	φ 900 mm, t19 mm, L31 m	0.0783	
LD4	φ1,000 mm, t16 mm, L31 m	0.0780	
BD1	φ1,000 mm, t22 mm, L33 m	0.0961	

表-2 打撃試験結果  
(a)初回打撃時

構造物名 No	打設深度 -DL (m) (エネルギー)	項目	最大圧縮応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		最大速度 (cm/s)		貫入量 S (mm)	リバンド量 K (mm)
			杭頭	杭先端	杭頭	杭先端		
P5	29.0 (4.7 tr・m)	A断面	1,050	338	239	416	10	8
		B断面	1,092	—	235	258		
MD2	24.0 (6.7 tr・m)	A断面	1,404	319	274	346	22	0
		B断面	798	370	256	—		
LD4	26.0 (5.7 tf・m)	A断面	883	—	271	—	22	2
		B断面	1,129	—	260	—		
BD1	26.5 (1.7 tf・m)	A断面	587	—	103	—	20	0
		B断面	597	—	139	—		

(b)再打撃時

構造物名 No	打撃回数 (打目)	項目	最大圧縮応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		最大速度 (cm/s)		貫入量 S (mm)	リバンド量 K (mm)
			杭頭	杭先端	杭頭	杭先端		
P5	3打目 (16.2 tr・m)	A断面	1,957	269	414	—	0	24
		B断面	2,207	—	479	78		
MD2	3打目 (22.3 tf・m)	A断面	2,867	353	325	123	7	26
		B断面	—	242	345	—		
LD4	3打目 (13.9 tf・m)	A断面	1,343	—	226	—	14	16
		B断面	1,835	—	—	—		
BD1	1打目 (15.5 tf・m)	A断面	—	—	213	—	11	14
		B断面	1,731	—	—	—		

仕様を表-1 に計測器取付け位置を図-2 に示す。

2.1.3 ハンマ諸元 試験杭の打込みには一般杭と同様、IHC社製の油圧ハンマ：S-500型（ラム重量 25 tf, 最大打撃エネルギー 51 tf・m）を用いた。

2.1.4 試験方法 打撃試験は通常の打込み時の試験（以後、初回打撃試験と呼称）の他、支持力の評価を行うために再打撃試験についても実施した。再打撃試験の実施時期は P5, MD2 の主計測杭については杭打ち時の地盤の乱れによる強度低下がほぼ回復したと見なせる約 1

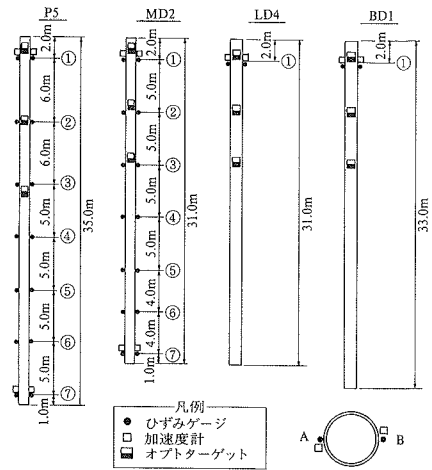


図-2 計器取付け位置

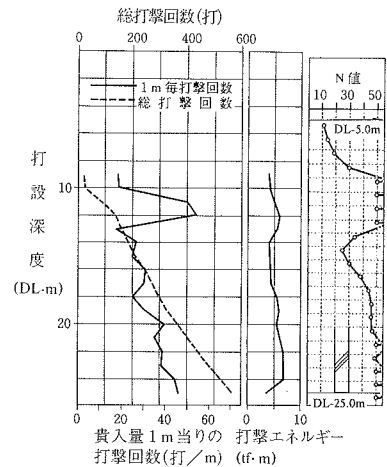


図-3 杭打ち記録 (MD2)

ヵ月後に、残り 2 本の試験杭については地盤の強度回復の時間効果を確認するために 7 日, 17 日後とした。

ハンマの打撃方法は初回打撃試験では一般杭の施工同様連続的に行い、再打撃試験では一部を除いて 30 秒から 1 分の間隔で打撃した。

## 2.2 打撃試験結果と考察

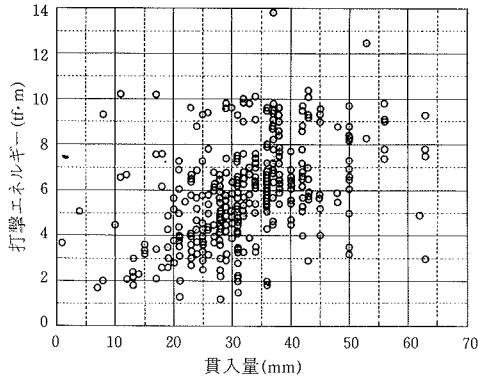
2.2.1 打撃貫入性 ラム重量 25 tf のハンマを用いた結果、すべての杭を当初の予定深度まで順調に打込むことができた。以前、同じ鹿島港において今回とほぼ同一仕様の杭をディーゼルハンマ：MB-70（ラム重量：7.2 tf, 最大打撃エネルギー：21.6 tf・m）で打設したが、数 m 高止まりした杭もあった。しかし、今回の IHC ハンマによる打ち止め時の打撃エネルギーはほとんどが 10 tf・m 以下で、平均的には 6 tf・m 前後で打設したにもかかわらず大部分の貫入量が 20 ~ 40 mm を示した。（図-4 参照）

打込み性がこのように改善された理由として、まず第一に従来のディーゼルハンマに比べラム重量が 25 tf, ハンマ総重量も 109 tf と極めて大きいことが挙げられる。

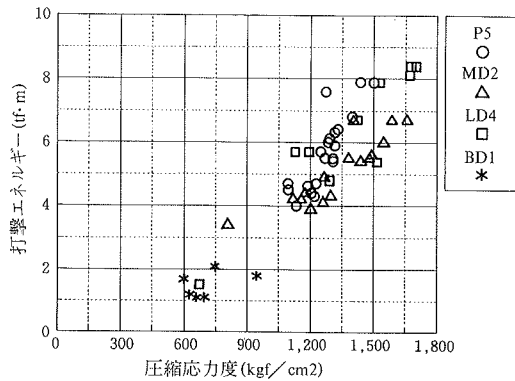
波動理論による解析ではラム重量 25 tf とラム重量 8 tf のハンマを用いて発生応力が同じになるように打撃した場合、貫入量はラム重量 25 tf の方が 2.1 倍大きい結

表一 3 土質パラメータ

砂 質 地 盤	クウェーク (inch)		ダンピング (sec/ft)	
	周面	先端	周面	先端
WEAP 解析	0.10	0.10	0.10	0.10
スミスの推奨値	0.10	0.10	0.05	0.15



図一 4 全基礎杭打止め時貫入量

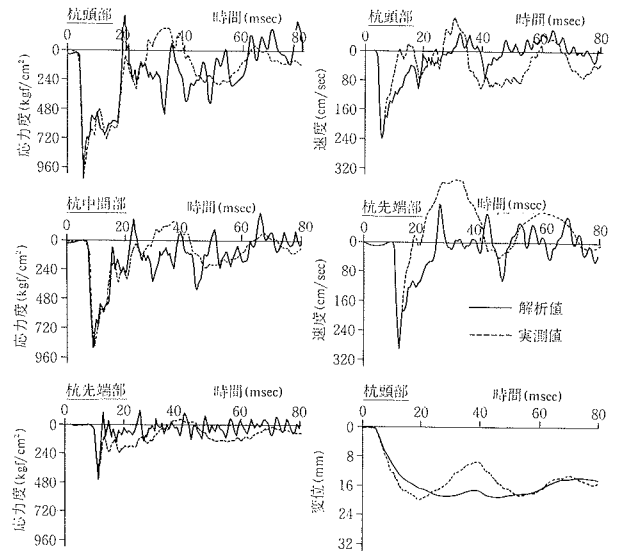


図一 5 試験杭の杭体圧縮応力度

果を得た。また、今回のハンマの総重量は打込み時の貫入抵抗の4割から6割を占めるため、これによる押し込み効果も貫入性向上に大きく寄与しているものと思われる。

第二に時間当りの打撃回数の多さが挙げられる。IHCハンマの打撃回数は最大打撃エネルギーで45回/分であるが、それより低いエネルギーでは操作次第で100回/分から150回/分まで上げることが可能である。時間当りの打撃回数が多いということは一打撃で杭周辺土に生じた過剰間隙水圧が消散しにくくなり、最終的に打撃回数の少ないものに比べて過剰間隙水圧が大きくなったことが予想される。この結果、杭周辺土の有効応力が減少して貫入抵抗力が小さくなり、一打撃当りの貫入量が大きくなったものと思われる。図一 3 に打込み時の杭打ち記録の一例を示す。

2.2.2 打撃応力 表一 2 に初回打撃試験と再打撃試験の杭体各深度の発生応力の一覧を示す。なお、表には速度と貫入量、リバウンド量についても併記した。また、図一 5 に初回打撃時の各試験杭に発生した最大圧縮応力度と打撃エネルギーの関係を示す。圧縮応力度は打撃エ



図一 6 シミュレーション解析結果 (P5: 初回打撃)

ネルギーが低いいため、最大でも1,700 kgf/cm<sup>2</sup>程度と小さい値に納まっている。

2.3 波動理論による解析

2.3.1 解析方法 杭打ち挙動の解析には波動理論による杭打ち解析プログラム WEAP を用いた。ここでは、初回および再打撃の各打撃試験で計測したひずみ(応力)加速度(速度)、変位の実測波形をシミュレーション解析し、各試験時点の貫入抵抗力を求めた。(図一 6 参照)

2.3.2 解析結果と考察

(1) 地盤定数 シミュレーション解析値が実測値と良い対応を示した時点の Quake(弾性変位量), Damping(減衰定数)の値を表一 3 に示す。これらの値には種々の提案値があるが、今回は初回、再打撃時共に Smith の推奨値とほぼ同様な値を示した。

(2) 初回打撃時の貫入抵抗力 シミュレーション解析の結果得られた初回打撃時の貫入抵抗力を表一 4 に示す。打込み時の貫入抵抗力の8割から9割が周面摩擦による抵抗力であることがわかる。また、同表中には周面摩擦力の動的減減率  $\alpha$  と先端抵抗力の動的減減率  $\beta$  を併記した。ここで、打込み時の貫入抵抗力は杭打設によって管内土の高さが変化しなかったことから杭の内と外の周面摩擦力 Rf と杭先端の純断面積に作用する先端抵抗力 Rp の和で表されると考えた。

動的減減率  $\alpha$  は静的な周面摩擦力度を  $\tau=N/5$  で表すと  $\alpha=0.2\sim 0.4$  を示した。一方、動的減減率  $\beta$  は杭先端純断面積に作用する静的な支持力度を  $q=40N$  で表すと  $\beta=0.2\sim 0.3$  を示した。

(3) 再打撃時の貫入抵抗力 シミュレーション解析の結果得られた再打撃時の貫入抵抗力を表一 4 に示す。

打込み時の動的貫入抵抗力(動的支持力)は、杭打ち時に生じる過剰間隙水圧や地盤の乱れ等により静的支持力に比べ小さくなる。また、打込み終了後、時間の経過と共に支持力は回復する。この回復の度合いをセットアップ率(再打撃時の貫入抵抗力/初回打撃時の貫入抵抗

表一 4 解析による各地盤の貫入抵抗力

	初 回 打 撃						再 打 撃				セ ッ ト ア ッ プ 率			備 考		
	① R <sub>i</sub> (tf)	② R <sub>p</sub> (tf)	③ R <sub>rest</sub> (tf)	$\bar{\tau}_i$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\alpha^{*2}$	$\beta^{*3}$	打撃回数 (打目)	④ R <sub>i</sub> (tf)	⑤ R <sub>p</sub> (tf)	⑥ R <sub>total</sub> (tf)	$\bar{\tau}_i$ (tf/m <sup>2</sup> )	④/①	⑤/②	⑥/③	周面 <sup>4)</sup> N 値	先端 N 値
P5	200	20	220	1.5	0.25	0.32	3	1,150	250	1,400	8.5	5.8	12.5	6.4	30	35
							17	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃		
MD2	280	40	320	2.5	0.35	0.29	3	1,140	60	1,200	10.1	4.1	1.5	3.8	35	65
							7	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃		
LD4	240	30	270	2.8	0.38	0.34	3	520	30	550	6.1	2.2	1.0	2.0	37	45
							4	500	〃	530	5.9	2.1	〃	〃		
BD1	150	50	200	1.8	0.22	0.23	1	650	60	710	7.7	4.3	1.2	3.6	40	80
							4	460	〃	520	5.4	3.1	〃	2.6		

\* 1)  $\bar{\tau}_i = R_i / (2U \cdot l)$ , \* 2)  $\alpha = R_i / ((N/5) \cdot 2U \cdot l)$ , \* 3)  $\beta = R_p / (40 \cdot N \cdot A_s)$   
ここに、U: 杭周長, l: 根入れ長, N: N 値の上限を40でカットした杭の根入れ部の平均 N 値, A<sub>s</sub>: 杭先端純断面積

表一 5 Hiley 式と波動理論による方法の支持力比較

静的支持力値 (tf)	P5	MD2	LD4	BD1
Hiley の式	300	270	220	80
波動理論 (WEAP)	1,400	1,200	550	710

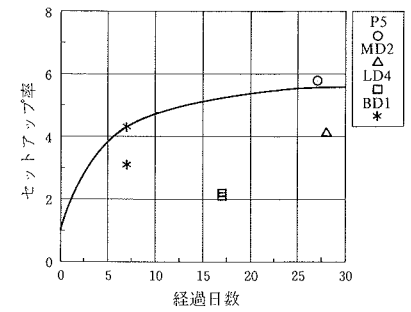
力)と呼称すると、総貫入抵抗力 R<sub>total</sub>で約1ヵ月後には4から6近くの値を示している。また、先端抵抗力 R<sub>p</sub>のセットアップ率はP5の杭を除くと打込み時の抵抗力とほぼ同様の値を示している。これは、P5の杭の根入れが一番長いことから閉塞効果の影響を受けたものと思われる。図一7に周面抵抗力 R<sub>i</sub>のセットアップ率と経過日数の関係を示す。セットアップ率は経過日数に伴って上昇する傾向を示し、初回打撃から1週間経過すれば4以上となり、1ヵ月も経過すると6近くの値を示した。

ここに、MD2とLD4が小さい値を示したのは打撃に伴う地盤強度の低下が原因と考えられる。再打撃時の貫入抵抗力は1打撃目が最も大きく打撃回数が増加し杭の貫入が始まると次第に小さくなり最終的に初回打撃時の貫入抵抗力に等しくなると言われている。MD2とLD4については光学式変位計を用いた変位計測が正常に求められた3打目を解析対象とし、この打撃以前に20mmから40mmの貫入量を生じていることからこの影響を大きく受けたものと思われる。

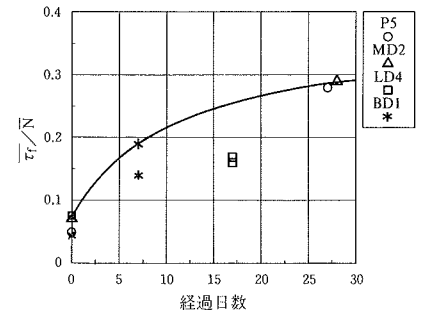
図一8に各試験杭の  $\bar{\tau}_i / \bar{N}$  と再打撃試験までの経過日数の関係を示す。ここで  $\bar{\tau}_i$  は周面摩擦力度を表し、周面抵抗力 R<sub>i</sub> が鋼管の内側と外側に等分に発揮されたものと仮定して算出した値である。また、 $\bar{N}$  はボーリング結果より求めたN値の上限を40でカットした根入れ部の平均N値を用いている。(表一4参照)  $\bar{\tau}_i / \bar{N}$  は10日前後には0.2 (=1/5)の値を越え、1ヵ月後には0.3に近い値を示している。

(4) 静的支持力の評価 表一5にシミュレーション解析により求めた再打撃時の貫入抵抗力と一般的な動的支持力式であるHiley式より求めた静的支持力値の比較を示す。これより両者の値がまったく異なっていることがわかる。Hiley式による値はむしろ打込み時の貫入抵抗力に近い値を示している。(表一4参照)

今回、載荷試験を実施していないので再打撃時の貫入



図一 7 セットアップ率経時変化



図一 8  $\bar{\tau}_i / \bar{N}$  経時変化

抵抗力と静的支持力の対応が確認されていないが、一般には打込み後1ヵ月も経過すれば地盤の強度回復は十分期待できることから、再打撃時の貫入抵抗力は静的支持力値に近いと思われる。以上のことから、今回のような大型ハンマを用いた場合、静的支持力の評価に従来の動的支持力式を適用するには無理があることがわかった。

### 3. PHC 杭打込み時の応力管理への適用

某工場の基礎杭としてPHC杭が採用された。本杭打設に先がけて、工事区域(157m×244m)の全域において13セットの試験杭の打設が実施された。使用杭はφ500, L36m((杭A種11m+中杭A種10m+上杭C種15m)のPHC杭である。打込みにはディーゼルハンマK-45(ラム重量4.5tf)が使用されたが、この時の試験打ちでは何のトラブルも発生しなかった。本杭の仕様はこの試験結果を参考に、工程短縮も配慮しφ600, L28m(下杭A種15m+上杭C種13m)の2本継ぎの仕様に変更された。本杭の打設を開始したところ、下杭の先端がGL-5~GL-7mに達した所で杭上端より5m程度の所に相次いで水平クラックが発生した。クラックの形状から、打込み時の引張応力によるテンションクラックであると推定されたが、あらためて打撃試験を実施するとともに波動理論によるシミュレーション解析を行い、その原因の究明と打込み時の応力管理について検討した。

#### 3.1 打撃試験の概要

3.1.1 試験位置と地盤条件 施工場所は東京湾沿岸の埋立地に位置し、埋立層は細砂を主体としたシルト分、貝ガラが混入した地質でN値はほとんどが5前後である。GL-4~GL-11m前後は細砂を主体とした沖積砂質土層からなり、貝ガラ層や薄いシルト層が挟在する。N

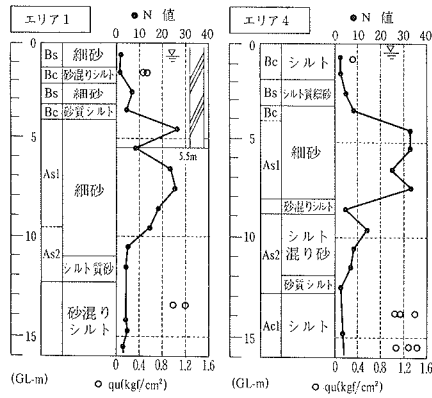


図-9 土質条件

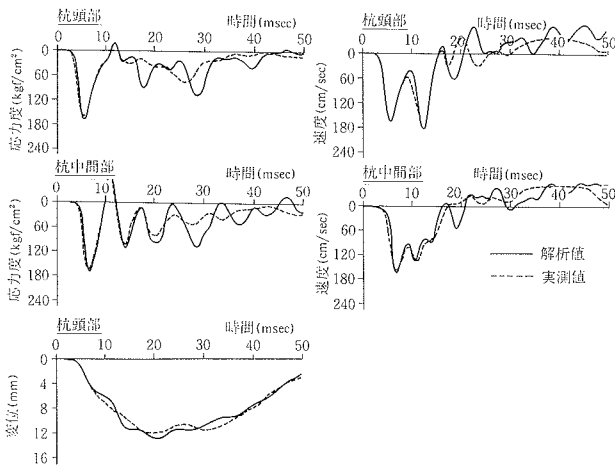


図-10 シミュレーション解析(TK160: GL-5.0 m)

値は10~30前後を示しばらつきが大きい。GL-11~GL-20 m 前後までは N 値 5 以下の軟弱な砂質シルト層が続いている。図-9 に今回クラックが多く発生したエリア 1 とほとんど発生しなかったエリア 4 の土質条件を示す。

3.1.2 試験方法 打撃試験は PHC 杭 A 種  $\phi 600$ , L15 m を三本使用し、打込み時杭体に発生する応力度、加速度、杭頭変位を杭頭から 2 m, 7 m の二箇所計測した。試験杭 1 はディーゼルハンマ K-45 を用いてエリア 4 に、試験杭 2 と 3 はそれぞれ油圧ハンマ HK-65 (ラム重量 6.5 tf), TK-160 (ラム重量 8 tf) を用いてエリア 1 に打設された。

3.1.3 試験結果 試験結果の一覧を表-6 に示す。結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 試験杭 1: 打込みの初期には落下高 1.3 m (ハンマの爆発なし)でも、最大 94 kgf/cm<sup>2</sup> の大きな引張応力が発生した。GL-4 m 以深では引張応力は 10 kgf/cm<sup>2</sup> 程度と小さくなり、クラックを生じないで打設完了した。
- ② 試験杭 2: 各深度とも引張応力の発生が認められた。GL-5.5 m 時点では水平クラックが実際に発生し、杭中央部では、108 kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力が計測された。この時のラム落下高は 1.0 m であった。
- ③ 試験杭 3: 試験杭 2 と同様打設の初期の段階から

表-6 打撃試験結果

深度 GL-m	試験杭 1		エリア 4		K45		試験杭 2		エリア 1		HK65		試験杭 3		エリア 1		TK160	
	杭体最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	ラム落下高 (m)	杭体最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	ラム落下高 (m)	杭体最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	ラム落下高 (m)	杭体最大引張応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	貫入量 (mm)	リバウンド量 (mm)	ラム落下高 (m)		
1	61	94	159	0	1.3	70	51	—	—	0.4	29	54	—	—	—	—	—	0.3
4	11	14	—	—	1.1	61	50	—	—	0.4	36	78	11	5	0.4	—	—	—
5	17	19	16	16	1.5	103	95	14	14	1.0	25	69	3	8	0.5	—	—	—
5.5	11	19	13	16	1.5	103	108	15	16	1.0	19	94	7	11	0.6	—	—	—
9	13	—	24	9	1.5	—	—	—	—	—	28	—	4	7	0.4	—	—	—
12	17	—	—	—	1.3	—	—	—	—	—	23	—	14	4	0.5	—	—	—

表-7 土質パラメータ

砂質 地盤	クウェーク (inch)		ダンピング (sec/ft)	
	周面	先端	周面	先端
WEAP 解析	0.10	0.40	0.05	0.20
スミスの推奨値	0.10	0.10	0.05	0.15

引張応力が計測された。GL-5.5 m の時点では、ラム落下高 0.6 m で最大 91 kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力が生じた。

これらの試験結果から、通常使用される打撃エネルギーにおいても、杭体の引張限界応力を越える引張応力が発生することが確認された。

### 3.2 波動理論による解析

3.2.1 解析方法 最初に波動理論を用いた杭打ち解析プログラム WEAP により打撃試験結果をシミュレーション解析し、杭打ち時の地盤の入力定数を推定した。次に推定した地盤定数を用いて事前に実施した試験打ちと本工事の杭打ち時の挙動を解析し、両者の挙動の差異を比較した。

#### 3.2.2 解析結果の考察

(1) 地盤定数 表-7 に解析で得られた地盤定数の一覧を示す。概ねスミスの推奨値に近いが、杭先端の Quake は  $Q_p = 0.4 \text{ in}$  とかなり大きい値となった。今回の PHC 杭は杭先端が閉端なので、この先端形状に起因したと思われる。図-10 に試験杭 3 のシミュレーション解析例を示す。実測値と解析値は良好な対応を示しているのがわかる。

(2) 水平クラックの原因究明 表-8 に解析結果を示す。また、図-11 に杭長と杭径の違いによる発生応力の比較を示す。ディーゼルハンマ K-45 の杭打ち解析に用いた WEAP プログラムは、地盤条件を与えるとそれに見合ったラム落下高を収束計算で求め、収束後の落下高さにおける杭体応力、変位が自動的に求まるようになっている。

今回問題となった GL-5.5 m の軟弱砂層に杭先端が位置する場合の解析結果は、収束計算をした場合、杭径が  $\phi 500$  の L11 m と 15 m,  $\phi 600$  の L11 m と 15 m のいずれのケースも杭体に発生する引張応力が  $\sigma_t = 0 \text{ kgf/cm}^2$  となった。しかし、GL-5.5 m において GL-5.0 m 付近の N 値 30 前後の砂層と同じラム落下高が作用したと仮定したケースでは、 $\phi 500$  の L11 m では  $\sigma_t = 0 \text{ kgf/cm}^2$  であるのに対し、L15 m では  $\sigma_t = 25 \text{ kgf/cm}^2$  の引張応力が生じ

表一 8 杭長、杭径の違いによる発生応力の比較(K45)

打設深度	項目	φ500		φ600	
		L11m	L15m	L11m	L15m
GL-5.5 m (取束)	ラム落下高さ	1.37	1.37	1.52	1.52
	最大引張応力度	0	0	0	0
	最大圧縮応力度	179	182	224	226
GL-5.5 m (GL-5.0 mの 落下下に固定)	ラム落下高さ	1.68	1.66	1.83	1.80
	最大引張応力度	0	-26	-63	-97
	最大圧縮応力度	278	289	325	334

単位：ラム落下高さ (m)，最大引張・圧縮応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

た。また、杭径が10 cm大きくなったφ600のL11 mでは $\sigma_t=56 \text{ kgf/cm}^2$ と大きくなり、L15 mでは $\sigma_t=93 \text{ kgf/cm}^2$ とテンションクラックが生じる限界応力の90 kgf/cm<sup>2</sup>を越える引張応力が発生する結果となった。

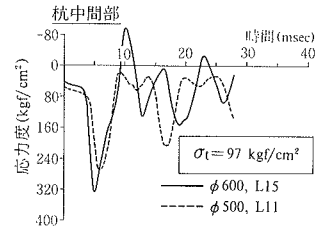
これらの結果より、本工事でテンションクラックが生じた原因は杭径がφ600と大きくなったこと、杭長が15 mと長くなったこと、地盤条件に硬軟の急激な変化があったことが、複合的に作用した結果であると判断された。エリア1のように深度が浅い所で地盤の硬軟が急激に変化する地盤条件では、ディーゼルハンマはラム落下高が地盤条件に追従できず、地盤の貫入抵抗力に対し過大なエネルギーを与え、クラックを発生させたものと思われる。

(3) 対策工への反映 この杭打ち工事は工期が非常に短かったことから工事開始時点で大半の杭がすでに製作済であった。このため杭仕様を高強度のものに変更することや、中掘り工法などへの工法の変更はできなかった。また、解析結果からも今回のような地盤条件ではディーゼルハンマは対応できないことが分かった。そこでハンマを油圧ハンマに代え、打撃力すなわちラム落下高を地盤条件に対応させて制御する方法を採用した。図一12に波動理論解析を用いて作成したラム落下高の管理図の一例を示す。このような管理方法を各深度ごとに実施した結果クラックの発生も殆どなくなり工事を無事終了することができた。

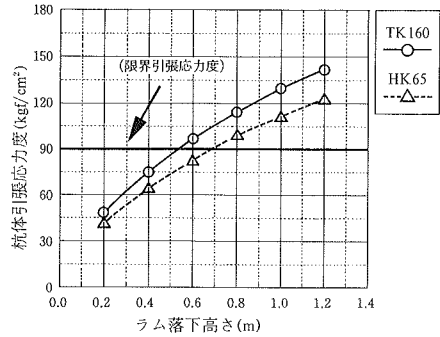
#### 4. まとめ

この報告で得られた主な結論は以下のとおりである。

- ① 打込み時の杭の貫入抵抗は打撃方法によって変化するが、時間当りの打撃回数が多くなると小さくなる。
- ② 杭の打込み時の貫入抵抗力と静的支持力の比、すなわちセットアップ率は通常2程度とされているが、大型油圧ハンマを用いてシルト質細砂地盤に打設された鋼管杭の杭周囲のセットアップ率は5～6に達した。
- ③ 地盤定数に関するスミスの推奨値はほぼ妥当であることが確認されたが、細砂地盤に打設された閉端PHC杭における先端地盤のクウェークは0.4 in とスミスの推奨値の0.1 in に比べかなり大きい値を示した。
- ④ 打込時PHC杭に発生する引張応力は、表層地盤で強度が急激に低下する所では大きくなる。また、杭長や杭径の大きさもその発生量に大きな影響を与える。



図一11 杭長、杭径の違いによる発生応力の比較 (K45)



図一12 ラム落下高の管理

⑤ 波動理論解析は打込み杭の挙動をよく説明し、打撃時の貫入性、応力の評価やハンマの選定、ラム落下高の決定等杭打ち管理に有効に適用できる。また、再打撃試験等の実施により静的支持力の評価も可能である。

#### 5. あとがき

今回、二箇所の杭打ち現場で生じた杭打ち管理問題に対して波動理論解析を適用し、好結果を得た。今後、杭の大口徑化、長尺化、ハンマの大型化、高性能化がますます進み、杭打ちの対象地盤も従来経験していない岩砕地盤や軟岩などに拡大していくものと思われる。これに伴って打込み時の貫入性、打撃応力や支持力の評価は従来の経験に基づく評価方法では対応が不可能となり、波動理論による方法がますますクローズアップされてくるものと思われる。今回の報告がこうした杭打ち管理問題の解決の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 崎本, 他: 大型ハンマを用いて打設された鋼管杭の杭打ち挙動解析, 第28回土質工学研究発表会, p.1701~1704, (1993)
- 2) 崎本, 他: PHC杭の打込時に生じた水平クラックの発生原因について, 第29回土質工学研究発表会, p.1537~1538, (1994)
- 3) 近藤, 他: 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, 大林組技術研究所報, No. 43, p.93~98, (1991)
- 4) Bredenberg, H. et al.: Application of Stress-wave Theory on Piles (Second International Conference), Swedish Pile Commission, (1985)