

動的載荷試験による鋼管杭の支持力推定法

Estimation Method of Steel Pipe Pile Bearing Capacity Using Dynamic Loading Test

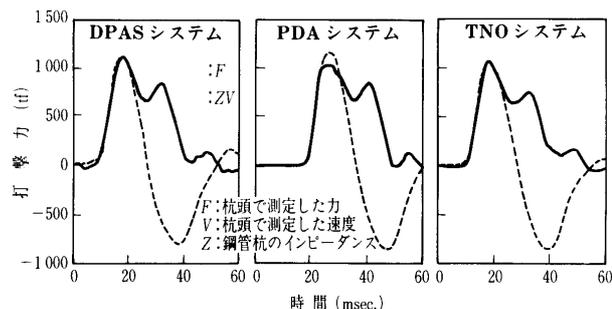
片山 猛 (かたやま たけし)
鋼管杭協会西村 真二 (にしむら しんじ)
鋼管杭協会脇屋 泰士 (わきや やすし)
鋼管杭協会林 正宏 (はやし まさひろ)
鋼管杭協会吉澤 幸仁 (よしざわ ゆきひと)
鋼管杭協会柴田 厚志 (しばた あつし)
鋼管杭協会

1. はじめに

鋼管杭協会では、打撃時の杭頭でのひずみと速度から波動理論を適応して鋼管杭の支持力を推定する方法（以下動的載荷試験と称する）を確立するため、20例に及ぶ動的載荷試験と静的載荷試験との比較を積み重ね、この中から今回

- ・動的載荷試験および静的載荷試験において極限值が確認されている。
- ・動的計測において再打撃を実施している。
- ・波形マッチング解析により得られた周面摩擦力および先端支持力を用いてシミュレーションした杭頭での荷重～沈下曲線と、静的載荷試験での $P\sim\delta$ 曲線の比較が可能である。

の条件に着目して、動的載荷試験により推定した静的支持力（以下動的支持力と称す）と静的載荷試験での極限支持力とを関連づける上で課題となる下記の点について



図一 杭頭計測法の波形比較

表一 実験諸元

実験名	川鉄千葉(その1)	川鉄千葉(その2)	川鉄千葉(その3)	住金 波崎	TTB 木更津
地盤特性	粘性土	粘性土	粘性土	砂質土	砂粘性土互層
杭径(mm)	711	609	508	400	1500
板厚(mm)	11	15.9	9	12	18
杭長(m)	54	48.5	32.0	18	56.8
根入れ長(m)	52	47.5	31.0	13	20
ハンマー	NH-100	NH-100	K-45	HK-65	IHC S-500
試験時期(日)	打設後14日	打設後3日	打設後6日	打設後6日, 30日	打設後10日, 23日
計測装置	PDA	PDA	PDA	DPAS, PDA, TNO	DPAS, PDA, TNO
支持力の解析手法	CAPWAPC	CASE	CAPWAPC	CAPWAPC等	CAPWAPC等

考察を加えたので報告する。

- (1) 各測定システムでの計測波形の比較
- (2) ハンマーエネルギーと測定可能支持力
- (3) 再打撃までの必要経過日数
- (4) 周面摩擦と先端支持力の推定
- (5) 荷重～沈下曲線の推定

2. 各測定システムでの測定波形の比較

東京湾横断道路での木更津側橋梁部のP8橋脚の緩衝工の基礎杭 ($\phi 1600 \times L52m$, ハンマー PMJ400) で計測した、同一の打撃時における波動の測定結果を示す。

DPAS, PDA, TNOの各システムによる測定波形は、力波形および速度波形の両者に関して極めてよく一致しており、測定波のシステムによる相違は小さかったものと推定される。このことは各測定システムの機能がほぼ同一レベルにある事を示唆している。

3. ハンマーエネルギーと支持力

静的載荷試験を実施する際に載荷荷重を適切に設定することは大変重要であるが、動的載荷試験においてはハンマーエネルギーの設定がそれに当たり、その設定が適切であるかどうかによって試験結果の信頼性は異なってくる。つまり、弾塑性的な力学特性を有する地盤からの抵抗力は、与える打撃に応じて変化することが予測される。このため実大杭に対してのハンマーエネルギーと支持力との関係を検討していく必要があり、そのために実大鋼管杭に対しての適用実験を行い

- (1) 落下高さとの杭の挙動および支持力の関係
- (2) 極限の支持力を推定するための適切なハンマーの選定

について検討を行った。

3.1 ハンマーエネルギーと杭支持力

これまでいくつかの現場で動的載荷試験実

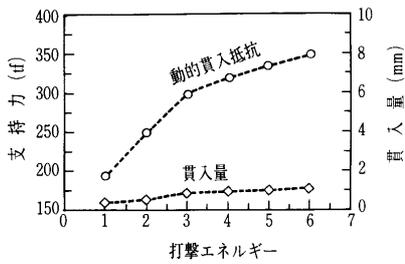


図-2 ハンマーエネルギーと支持力および貫入量 (川崎製鉄・千葉製鉄所 (その1))

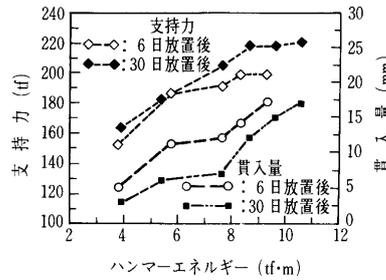


図-3 ハンマーエネルギーと支持力および貫入量 (住友金属・波崎研究センター)

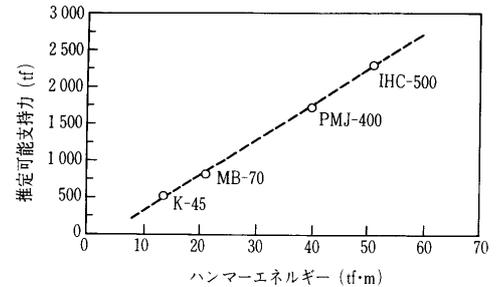


図-4 ハンマーエネルギーと推定可能支持力

施時にハンマーエネルギーを変化させ、その時の杭の挙動と支持力について調査を行ってきたが、その代表的な実験結果をここでまとめる。表-1に実験諸元を示す。ハンマーは、実験で落下高さが調整できる油圧ハンマーを用い、そのハンマーで調整可能な最小のエネルギーから最大までを順次増加させながら計測を行った。

各実験結果としてハンマーエネルギーを横軸にとり、各エネルギーごとの支持力とその時の貫入量を縦軸に表したものを図-2, 3に示す。

図-2は川鉄千葉(その1)の実験結果である。この場合、杭打設後のセットアップ現象により所定のハンマーでは杭を再び貫入させることが困難であり、打撃エネルギーを増加させても杭はほとんど貫通せず、最大エネルギーにおいても貫入量は1mm程度であった。したがって杭の極限の支持力を算定することができず、支持力は単調に増加している。

図-3は住友金属波崎研究所の野外実験ヤードで行った実験結果である。砂地盤に杭径φ400mmの鋼管杭を13m打設し、杭打設6日および30日後に行った再打撃試験においてハンマーエネルギーを変化させて計測を行った。ハンマーエネルギーを増加させると貫入量、支持力ともに増加するが、支持力に関しては最大値が存在し、エネルギーが8tf・m以上においてはほぼ一定値となった。また支持力が一定となるエネルギーにおいて貫入量が急増していることから、そのエネルギー以上で杭先端部の貫入が生じ、杭の支持力は極限値に至ったものと思われる。

3.2 極限の支持力を推定するための適切なハンマーの選定

動的載荷試験において極限の支持力を推定するためには、適切なハンマーの選定が重要である。したがって予想される極限支持力に対してその支持力を確認できる適切なハンマーを整理しておくことは重要である。

図-4はこれまで計測した事例においてハンマーエネルギーと推定可能な支持力を整理したものである。データは杭を打撃した時にはほとんど貫入せずハンマーエネルギーが過小であったと判断されたものであり、言い換えれば、その時の支持力は用いたハンマーで推定可能な限界の支持力を表していると考えられる。なおこの時の支持力は波形マッチング法により推定した静的支持力である。

4. 再打撃までの必要経過日数

杭の動的載荷試験による支持力値は杭打撃時の地盤抵

抗力を測定しているため、杭打撃による周辺地盤の乱れや過剰間隙水圧の発生などの影響で、静的な支持力値よりも小さな値となる場合が多い。しかし杭打設後には、杭周辺地盤の間隙水圧の消散などによって、杭の支持力が回復していく現象がある(セットアップ現象)。この現象により、杭の静的載荷試験では十分な放置期間を設けて載荷を行って、杭の極限支持力値を推定することを行っている。動的載荷試験でも同様で粘性土および砂質土からなっている地盤に関して、動的載荷試験を実施した結果をもとに適切な放置期間の設定の考察を行った。

4.1 粘性土地盤

川崎製鉄・千葉製鉄所内において実施された、その1、その2の結果についてまとめた(図-5)。

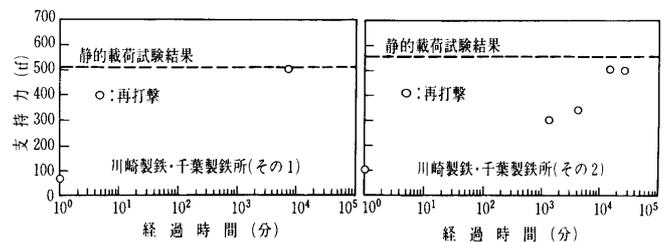


図-5 経過時間と支持力値の変化

粘性土地盤の場合、初期打撃から7~12日(1.0×10⁴~1.73×10⁴分)後には、静的載荷試験での極限支持力に近い値が測定されており、ある日数を設定して再打撃測定を数回実施する場合は、一般に静的載荷試験を実施するまでの放置期間(14日後)より短い期間で極限支持力を判定することができる。

4.2 砂質地盤

砂質地盤に関しては、住友金属工業波崎研究センターにおいて実施した結果によりまとめた。この現場では、杭打設後に5分、15分、30分、60分、3時間、20時間、47時間、6日、30日の計9回の再打撃試験を実施し支持力の増加現象を調査した。図-6にPDAおよびTNOシステムによる計測した波形に基づくCASE支持力の結果を示す。両システムの結果も杭打設後60分程度で支持力の増加現象は終了していた。支持力値は、打止め時から約20%程度の増加となった。また静的載荷試験結果との比較では、7.5%(60分後)~14%(30日後)の誤差の範囲であり、極限支持力は十分推定されている。よって、砂質地盤では、極論すれば1時間程度地盤を放置すれば支持力は回復するものと考えられる。

事例報告

5. 波形マッチングによる一意性

動的載荷試験結果を用いて静的支持力を推定するには、一般に波形マッチング等の方法による詳細解析を行い、各地層ごとに周面摩擦力度、弾性ばねおよび減衰定数などの地盤定数を求める方法がとられる。

しかし、解析に用いる地盤定数の設定や解析結果の評価に関する基準（目安）がないため、得られた解析結果の客観性に関し問題があるとされていた。図-7は各測定法の打止め付近での波形マッチング結果を比較したものである。図から各手法の波形マッチング結果の周面摩擦力分布が全く異なっていることがわかる。波形マッチング結果のばらつきは、技術者の静的支持力機構の予見（API-Method, 道路橋示方書での N 値による推定等）による解析者個人の判断の差異に依存していることが多く、今回の解析結果でもその傾向が現れている。

6. 荷重～沈下曲線の推定

波形マッチング法においては実測データを用いて逆解析により杭の先端および周面抵抗が評価できる。さらにその抵抗力を用いて静的載荷試験時の荷重～沈下関係を推定すると波形マッチングに基づく静的支持力の推定値には、ばらつきが少ないため、周面摩擦力の各層ごとのばらつきが収束して、各手法において、同様な荷重～沈下関係が得られることになる。

6.1 粘性土地盤

粘性土地盤における解析は川鉄千葉製作所内において計測したデータを用いた。図-8にCAPWAP解析に

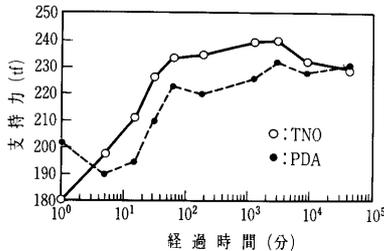


図-6 経過時間と支持力値の変化 (波崎研究センター)

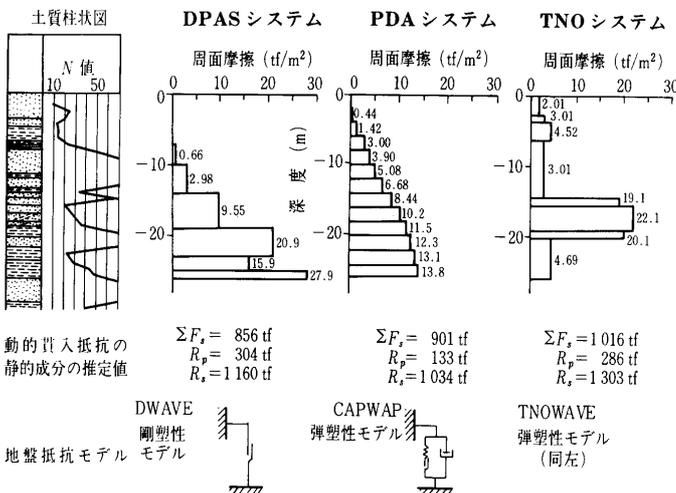


図-7 杭頭計測によるマッチング結果の比較

よって推定した、打止め時と再打撃時の荷重～沈下曲線と静的載荷試験結果を示す。再打撃時の荷重～沈下曲線は120tfまでは静的載荷試験と良く一致しており、また極限值は両者の曲線に差がみられるものの10%程度の差である。

6.2 砂質土地盤

砂地盤におけるデータとして住友金属(株)波崎屋外ヤードでの測定データを用いた。解析はTNO-WAVEとCAPWAPCを用い、杭打設後30日の再打撃結果を用いた。図-9に解析結果を示す。TNOはCAPWAPCの結果に比べて大きな値となっている。これは解析手法や解析者の違いによって生じた有意差であり、現時点ではこうした誤差が含まれることも考慮しておく必要があるが、いずれの場合にも載荷試験の荷重～沈下曲線を比較的精度良く推定したものとなっている。

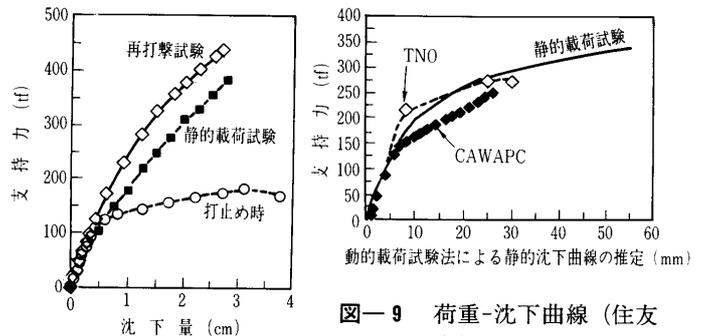


図-8 荷重-沈下曲線 (川崎製鉄・千葉製鉄所 (その3))

図-9 荷重-沈下曲線 (住友金属・波崎研究センター 30日放置後)

7. おわりに

本研究は、鋼管杭協会において宇都教授（東海大学）を委員長とする「杭支持力推定法委員会」の中で平成3年から平成6年にかけて波動理論を鋼管杭に適用して杭の静的支持力を推定し、設計・施工資料とすべく活動した成果の概要である。

研究当初は何とか初期打撃のひずみと加速度の計測から動的支持力機構と静的な機構およびセットアップ現象と土質工学の力学定数(c , ϕ , N 値等)を関連づけて、設計に用いる静的支持力を求めようという試みであった。しかし、測定を重ねていくうちに、後者のセットアップ現象と土質工学の関連づけは日本の地盤のように砂と粘性土が明確に区分できず、また薄層かつ互層になっている実状では極めて困難で経験によらざるを得ない次第である。

次善の策として、セットアップ後の再打撃の計測データを用いて、前者の動的支持力と静的支持力機構の差を動的粘性抵抗として整理し、静的支持力と動的支持力とを関連づけると比較的議論できるようである。鋼管杭協会では、これらの研究成果を小冊子にまとめ、近日中に委員会報告として刊行予定である。

最後に、終始活発な御議論・御指導をしてくださった宇都委員長(東海大学教授)をはじめ委員の方々に、また貴重な測定データを提供して頂いた東京湾横断道路(株)をはじめ、関係団体に謝意を表します。(原稿受理 1994.11.29)