

杭周面摩擦力の速度依存性を考慮した剛体振動理論による 急速載荷試験の支持力推定に関する検討

Examination about an estimate of bearing capacity from the statnamic test which used the rigid vibration theory that considered speed dependence of frictional resistance force.

荒巻真二*, 鳥野清**, 落合英俊***, 麻生稔彦****

Shinji aramaki, Kiyoshi uno, Hidetoshi othiai, Toshihiko aso

*工修, 九州共立大学助手, 工学部土木工学科 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

** 工博, 九州共立大学教授, 工学部土木工学科 (〒807-8585 福岡県北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

*** 工博, 九州大学大学院工学研究院教授, 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

**** 工博, 山口大学助教授, 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2 丁目 16-1)

Bearing capacity of a pile was estimated using rigid vibration theory from statnamic test result, and soil spring did it with Weibull type curve that considered speed dependence. And equivalent damping coefficient of pile calculated it from history curve. This study examined the influence that the speed dependence gave to an estimate value of static bearing capacity of pile. As a result of examination, be able to identify that estimate precision of static resistance improved by using the soil spring that considered speed dependence.

Key Words: Pile, Bearing capacity, Statnamic test, Rigid vibration, Speed dependence

キーワード: 杭, 支持力, スタナミック試験, 剛体振動, 速度依存

1. はじめに

杭の鉛直支持力試験として静的載荷試験, 動的載荷試験が一般的であった。静的載荷試験は試験準備の期間を含め多くの時間を必要とし, また試験費用も多額となるため, 杭の支持力確認試験として現場で頻繁に実施することができない。一方, 動的載荷試験はハンマー等で頭部を打撃する試験方法で, 荷重の載荷時間が5msec~10msecと非常に短時間であるため衝撃試験とも呼ばれている。杭の抵抗力は打撃により杭体内に生じる応力波の伝播状況から, 一次元波動理論により求める方法^{1), 2)}や, 打撃中の杭の動的挙動を振動論によって解析し, 杭を支持する地盤ばねを推定する方法³⁾が提案されている。この試験方法は簡便であるが, 荷重の載荷時間が非常に短いため, 動的試験中の杭の挙動は静的な挙動とは大きく異なり, 推定した杭の抵抗力は精度の面で劣ると考えられる。

現在, 我が国では性能設計の導入が進んでおり, 杭基礎においても, その性能(鉛直支持力)を載荷試験によって確認することが今後増えてくると考えられる。そのため, 確認試験法としての鉛直支持力試験には, 簡便かつ信頼性の高い方法であることが望まれる。このような杭の載荷試験に求められるニーズに応える試験方法として1980年代に開発された急速載荷試験が注目されるようになった。

急速載荷試験にはいくつかの方法が提案されているが,

実用的なものはSTATNOMIC TESTと呼ばれる方法のみである。この試験は推進剤(火薬)を杭頭部で燃焼させ, その時に発生するガス圧により, 杭を地盤に100~200msecの載荷時間で押込む載荷試験方法で, 静的載荷試験と動的載荷試験の中間的な性状を示すものである。この試験より, 静的載荷試験と同等の結果を得るためには, 杭体の波動現象の影響はほとんど無いと考えてよいが, 杭が動的に貫入する影響は考慮する必要がある。

急速載荷試験結果から静的な荷重-変位の関係を求める手法の研究が数多くなされている。除荷点法に代表される杭体を一質点にモデル化する方法や一次元波動理論に基づく波形マッチング解析法, 動的FEM解析を用いた波形マッチング解析などが挙げられる⁴⁾。

杭体を一質点にモデル化する方法では, 地盤ばねを線形ばねでモデル化しているが, 一般に地盤ばねは非線形性を持つ。そこで, 筆者らは地盤ばねを完全弾塑性型と仮定し, また, 測定された荷重-沈下関係の履歴曲線より求めた等価減衰定数を用いた剛体振動解析法⁵⁾を提案した。また, 拡張カルマンフィルターを用いて, 一意的に地盤ばねの特性値を求める方法⁶⁾も提案した。

本研究では, 杭および地盤を1自由度系にモデル化した剛体振動解析法で, 地盤ばねは載荷速度による地盤強度の速度効果を考慮した非線形ばねとし, ワイブル型の指数関数でモデル化し, この特性値の推定には最小2乗法を用い

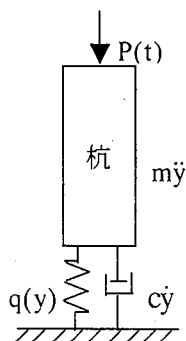


図-1 杭-地盤系モデル

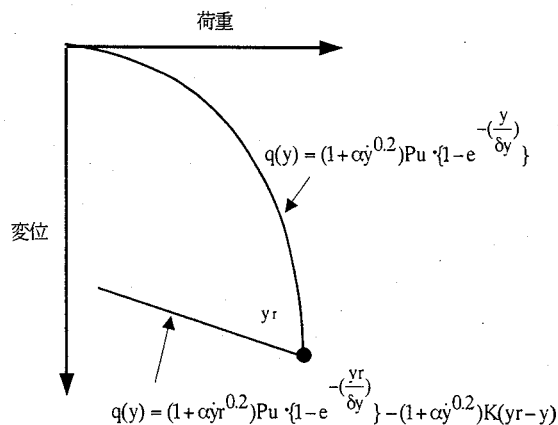


図-2 復元力の骨格曲線

た. 本法の適用性は実際の杭で行われた急速荷重試験結果を用いて行った. また, 静的荷重試験から得られた荷重—沈下関係と本法で計算された非線形ばねによる荷重—変位関係を比較し, 本法の妥当性を検討している.

2. 解析方法

急速荷重試験では荷重の荷重時間が杭体の波動現象を無視できる程度長いため, 図-1 に示すような一質点系の剛体振動でモデル化できると考える. ここで, m は振動質量, c は減衰係数, y は杭頭変位である. 減衰力 $c\dot{y}$ は杭体および杭周面に作用するものであり, 復元力 $q(y)$ は, 杭先端の抵抗力と周面の摩擦力の両方を含んだものである. いま, 荷重 $P(t)$ が杭頭に作用した場合, 運動方程式は次式となる.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + q(y) = P(t) \quad (1)$$

振動質量 m としては, 杭体の質量 m_p と付加質量として杭が排除した地盤の質量 m_s の両方を考慮する必要があることが報告されている³⁾ので, 本研究においても, 振動質量 m は次式とする.

$$m = m_p + m_s \quad (2)$$

図-2 に仮定した地盤の復元力 $q(y)$ の骨格曲線を示す. 骨格曲線は数学的に取り扱いが容易なワイブル型の指数関

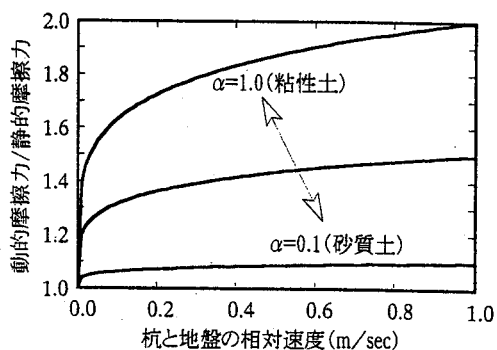


図-3 杭の貫入速度と周面摩擦力の増加率

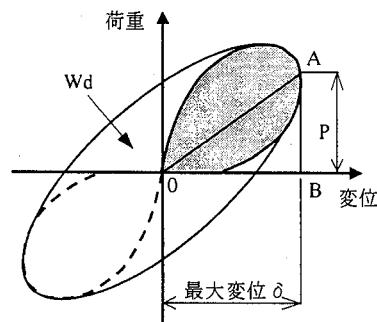


図-4 等価減衰定数の算出方法

数を用いた. ただし, 除荷過程は過去の静的荷重試験結果を参考に線形関数と仮定した.

杭の周面摩擦力はその杭の沈下速度に依存していると言われ, Randolph and Deeks によって, 図-3 に示すような杭の地盤への貫入速度と周面摩擦力の強度増加率の関係が提案されている⁷⁾. そこで, 復元力 $q(y)$ に杭の荷重速度による強度増加を考慮することとした. しかし, 本論文では杭先端支持力と周面摩擦力の分離を行わず, これをまとめて非線形復元力としてとらえているため, 周面摩擦力にのみ速度の影響を考慮することができない. そこで, 今回の検討においては支持力全体にこの強度増加の式を適用し, 復元力 $q(y)$ を次式とした.

$$\dot{y} > 0$$

$$q(y) = (1 + \alpha \dot{y}^{0.2}) P_u [1 - e^{-(y/\delta y)}]$$

$$\dot{y} \leq 0$$

$$q(y) = (1 + \alpha \dot{y}^{0.2}) P_u [1 - e^{-(y_r/\delta y)}] + (1 + \alpha \dot{y}^{0.2}) K(y - y_r) \quad (3)$$

上式において, P_u : 極限支持力(kN), δy : 降伏変位(m), K : 除荷過程の勾配(kN/m), y_r : 反転変位(m), α : 0.1(砂質土)~1.0(粘性土) $\dot{y}$: 反転変位時刻の速度(m/s)である.

係数 α は地盤を構成する材料特性等によって異なり, 実際の地盤を対象とした場合, 簡単に決定することは困難で

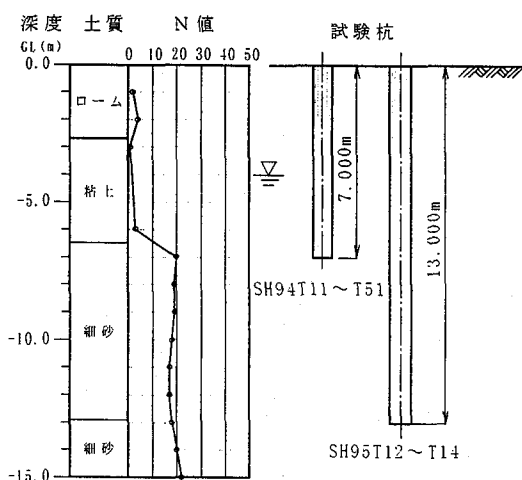


図-5 SH94T11~T51 (SH95T12~T14) 試験杭

ある。そこで、今回は杭長に対する周面地層の粘性土の占める割合に応じて、次式により定めた。

$$\alpha = 0.1 + 0.9 \cdot L_c / L \quad (4)$$

上式において、 L : 杭長(m), L_c : 杭周面地盤の粘性土の層厚(m) である。

式(1)における減衰係数 c は等価減衰定数 h_e から求めることとした。

$$c = 2h_e \sqrt{\partial q(y) / \partial y} \cdot m \quad (5)$$

図4は荷重—沈下曲線と等価減衰定数 (h_e) の算出方法を示したものである。一般的に履歴曲線から等価減衰定数 h_e は次式によって求められる。

$$h_e = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{W_d}{W_s} \right) \quad (6)$$

ここで、 W_d : 履歴エネルギー
 W_s : 弾性エネルギー

急速載荷試験では一般的に杭頭部の荷重 $P(t)$ と変位が測定される。この測定された荷重には式(1)に示すように杭本体の慣性力を含んでいる。そこで、式(7)で表されるように杭体の慣性力を補正した荷重 $P_s(t)$ を用いて等価減衰定数 h_e の算出を行った。

$$P_s(t) = P(t) - m\ddot{y} \quad (7)$$

急速載荷試験から得られる荷重—変位曲線は図中の第1象限に示す太線の半サイクルである。しかし、履歴エネルギーから等価減衰定数(h_e)を算出するためには1サイクルの履歴曲線が必要であるため、残りの半サイクルを仮定する必要がある。そこで、第1象限と同じ挙動(第3象限)をするものと仮定して、履歴曲線を描くことにした。ここで、 W_s はひずみエネルギーで図中の三角形(OAB)の面積であり、 W_d は1サイクルの荷重—変位曲線の包絡線から得られる履歴曲線の面積で、履歴エネルギーを示す。

式(1)~式(6)における未知量は復元力に関わる P_u , δy , K である。そこで、未知量の初期値を全て0とし、順次値

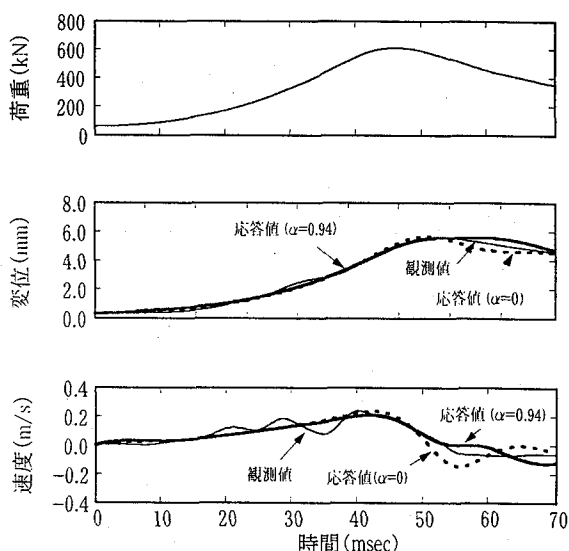


図-6 観測値と応答値の時刻歴 (SH94T21)

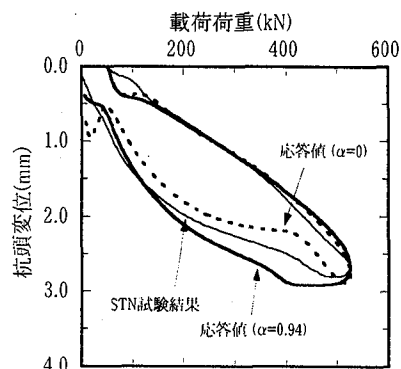


図-7 急速載荷試験の荷重—変位関係 (SH94T21)

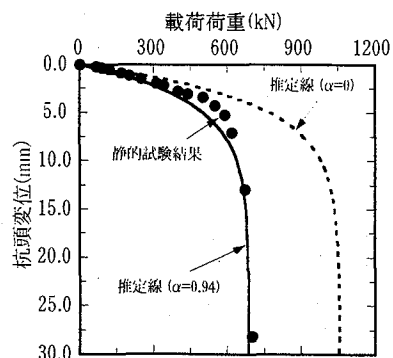


図-8 静的試験との比較 (SH94T21)

を増加させながら、剛体振動の応答計算を繰り返し行い、応答変位と測定された杭頭変位の差の二乗和が最小となるような値の組合せを P_u , δy , K の推定値とした。ただし、 P_u は急速載荷試験の最大載荷荷重の2倍以下、 δy は杭径の10%以下であると仮定した。また、 P_u , δy , K を推定することが出来れば、式(3)より、静的な荷重—沈下関係が得られたため、容易に杭の支持力の推定ができる。

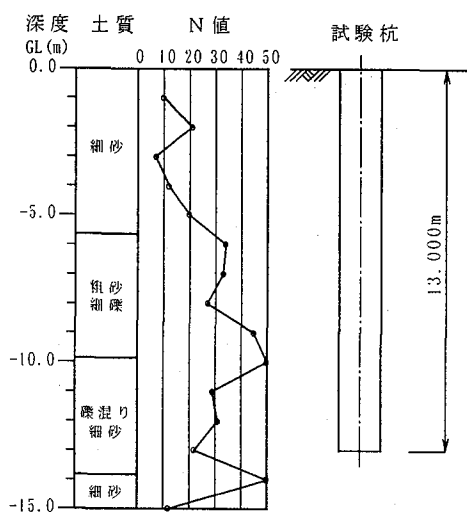


図-9 HASAKI 試験杭

3. 各杭種に対する検討

3.1 PHC 杭に対する検討

SH94T21 試験杭は外径 300mm, 厚さ 60mm, 長さ 7m の常圧蒸気養生 PHC 杭である。試験は急速荷重試験, 静的試験が実施されている。

図-5 に SH94T21 試験杭が施工された地盤の柱状図を示す。地盤は表土がローム層, GL-2.7~6.5 まだが N 値 1~3 の粘土層, それ以深が N 値 17~19 の粒径の均一な細砂層から構成されている。杭先端を N 値 20 程度の細砂層に設置されている。杭周面地層の内, 粘性土の割合は 93% であることから, 速度効果に関わる係数 α は 0.94 とした。この杭の振動質量は杭体の質量と付加質量の和として 1.72t である。また, 履歴曲線から求めた等価減衰定数 h_e は 0.14 である。

図-6 は推定した未知量を用いて 1 自由度系の応答計算結果と観測値を比較したものである。杭頭変位と杭頭速度の解析値は実測値とよく一致していることがわかる。ただし, 最大変位以降において解析値と実測値に差が生じている。速度効果を考慮しない場合 ($\alpha=0$) も同様な傾向となった。

図-7 は急速荷重試験中の杭頭における荷重—変位関係を示したものである。時刻歴同様, 除荷過程 (最大変位以降) において解析値と実測値に差が見られる。この差は, 今回の解析では, 除荷過程を線形関数を用いているためであると考えられる。

図-8 は推定した静的な荷重—沈下関係と静的試験結果を比較したものである。静的試験結果に対して, 速度効果を考慮しない場合 ($\alpha=0$) は, 終局荷重を大きく推定している。一方, 速度効果を考慮した場合 ($\alpha=0.94$) は非常によい一致を示していることがわかる。

3.2 鋼管杭に対する検討

HASAKI 試験杭は打込み工法で施工された外径 400mm,

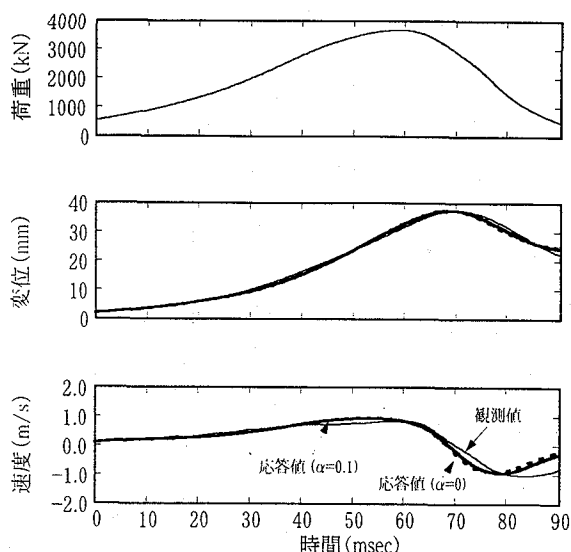


図-10 観測値と応答値の時刻歴 (HASAKI)

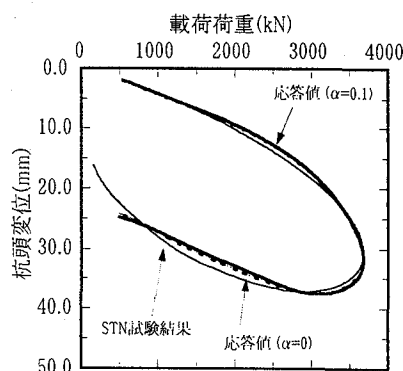


図-11 急速荷重試験の荷重—変位関係 (HASAKI)

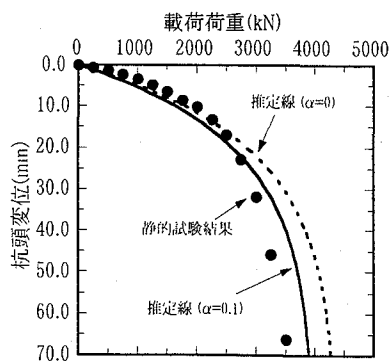


図-12 静的試験との比較 (HASAKI)

板厚 12mm, 長さ 13.0m の鋼管杭である。図-9 に試験杭付近地盤の状況を示す。地盤は砂質層で構成されており, GL-5.0m 以深で N 値が 30~50 程度である。試験工程は杭施工後 4 週間の養生期間を置き, 静的荷重試験が実施され, その 3 週間後に急速荷重試験を実施されている。

杭周面地層は全て砂質層であるため, 速度効果に関わる係数 α は 0.1 とした。また, 杭の振動質量は杭体の質量と

表-1 解析対象の諸元

	杭種	杭径 mm	杭長 m	等価減衰定数 he	地盤条件		
					先端	周面地層構成	α
HASKAI	鋼管杭	400	13.0	0.29	砂	S:100	0.10
SH94T11	PHC杭	300	7.0	0.14	細砂	As:7, Ac:54, Loam:39	0.94
SH94T21	PHC杭	300	7.0	0.14	細砂	As:7, Ac:54, Loam:39	0.94
SH94T33	PHC杭	300	7.0	0.23	細砂	As:7, Ac:54, Loam:39	0.94
SH94T42	PHC杭	300	7.0	0.11	細砂	As:7, Ac:54, Loam:39	0.94
SH94T51	PHC杭	300	7.0	0.24	細砂	As:7, Ac:54, Loam:39	0.94
SH95T12	SP杭	400	12.0	0.51	細砂	As:47, Ac:30, Loam:23	0.58
SH95T13	SP杭	400	12.0	0.98	細砂	As:47, Ac:30, Loam:23	0.58
SH95T14	SP杭	400	12.0	0.16	細砂	As:47, Ac:30, Loam:23	0.58

注) As:沖積砂, Ac:沖積粘土, S:砂

表-2 解析結果一覧

	急速荷荷試験最大値			静的試験		he	速度効果無し ($\alpha = 0$)			速度効果有り)			
	P kN	y mm	V m/s	Pu(①) kN	δy mm		Pu(②) kN	δy mm	比率 ②/①	α	Pu(③) kN	δy mm	比率 ③/①
HASAKI	3677.5	37.2	0.85	3450	12	0.29	4381	19.0	1.3	0.10	3998	19.0	1.2
SH94T11	508.2	3.8	0.16	470	2	0.14	930	4.2	2.0	0.94	481	3.1	1.0
SH94T21	524.7	2.8	0.12	705	3	0.14	1056	3.8	1.5	0.94	687	3.8	1.0
SH94T33	537.9	6.0	0.24	705	3	0.23	829	5.1	1.2	0.94	549	5.7	0.8
SH94T42	308.6	2.7	0.09	470	2	0.11	544	3.0	1.2	0.94	350	2.9	0.7
SH94T51	631.0	7.9	0.35	470	2	0.24	833	4.8	1.8	0.94	458	4.2	1.0
SH95T12	1365.8	25.8	0.56	1300	5	0.51	1292	5.0	1.0	0.58	853	4.5	0.7
SH95T13	1606.0	57.4	1.46	1300	5	0.98	1233	7.3	0.9	0.58	789	6.0	0.6
SH95T14	1173.2	10.5	0.13	1300	5	0.16	1568	7.2	1.2	0.58	1289	8.9	1.0

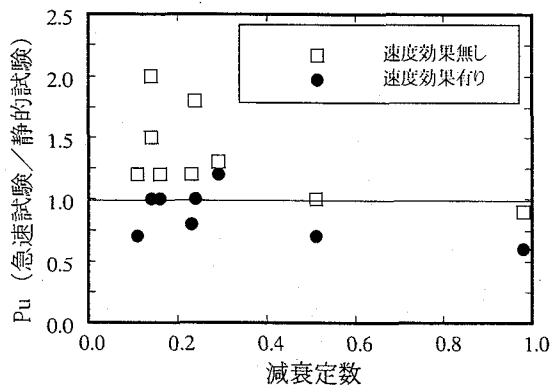


図-13 減衰係数と極限支持力 P_u の推定精度

付加質量の和として 3.83t である。また、履歴曲線から求めた等価減衰定数 he は 0.24 である。

図-10 は推定した係数を用いて応答計算結果と観測値を比較したものである。速度効果の有無どちらの場合でも、杭頭変位と杭頭速度の解析値は実測値とよく一致しており、それぞれの推定値が適切であることが伺える。

図-11 は急速载荷試験中の杭頭における荷重—変位関係を示したものであるが、時刻歴同様に一致している。

図-12 は推定した静的な荷重—沈下関係と静的試験結果を比較したものである。弾性域ではどちらの推定値も静的試験の観測値に近い挙動を示している。しかし、変位が進

むに従って速度効果を考慮しない場合 ($\alpha=0$) の方が観測値との差が見られる。

4. 検討結果

4.1 検討対象

解析に用いたデータは現地盤で行われた急速载荷試験結果を用い、表-1 にその諸元を示す。表中の周面地層構成部の数字は杭長に対する各層の比率 (%) を示している。式 (4)～(5) における係数 α は地盤を構成する材料特性等によって異なるので、今回の検討では杭周面地層の粘性土の割合に応じてその値を定めたものである。

4.2 検討結果

表-2 に解析結果の一覧表を示す。静的試験の極限支持力 P_u と降伏変位 δy は試験結果を元にワイブル型指数関数で近似した場合の値である。また、図-13 は等価減衰定数 he と P_u の比率 (急速载荷試験の推定値/静的試験の推定値) を示したものである。「速度効果無し」では P_u の比率が 0.9～2.0 と静的試験の推定値より大きめ (過大) に推定し、ばらつきが大きい。それに対して「速度効果有り」の場合は 0.6～1.2 とばらつきが小さくなり、静的試験の推定値に近い値となっている。ここで、SH95T12, T13 の結果は速度効果を考慮しない方が静的試験の推定値に近い値となっている。この 2 例は等価減衰定数が 0.5 以上と一

般的に考えられる値よりかなり大きい。これは、載荷荷重が支持力に比べて過大であったため、杭周面地盤の非線形が強くなり、履歴エネルギーが非常に大きくなるためと考えられ、この影響によって、期待していたほどの速度効果が発揮されなかったのではないかと考える。

5. まとめ

今回、復元力特性に速度効果を考慮し、ワイブル型の指数関数を用い、急速載荷試験結果より静的支持力の推定の検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- ① 地盤バネをワイブル型指数関数、減衰係数は杭の履歴曲線から求めた等価減衰定数を用いた剛体振動解析により、急速載荷試験の杭の挙動をうまく再現することができた。
- ② 杭の貫入速度による周面摩擦力の強度増加率の係数 α は杭長に対する周面地層の粘性土の占める割合に応じてその値を定め、解析を行ったところ比較的よい結果が得られた。
- ③ 復元力に速度効果を考慮することによって、急速載荷試験より推定した静的な荷重—変位関係は静的試験の結果に近い値となる。

謝辞

本論文で用いた急速載荷試験のデータは、「杭の急速載

荷試験法研究会」より提供していただいた。記して感謝します。

参考文献

- 1) 境友昭, 沖建, 村上浩, 田中幸芳, 篠原敏雄: 杭の支持力の動的測定, 杭の打込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集, pp.103-106, 1988.
- 2) 松本樹典, 西田義親, 武井正孝: 動的計測による杭の動的貫入挙動の評価法と応力波解析プログラム KWVE, 杭の打込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム発表論文集, pp.107-110, 1988.
- 3) 烏野清, 麻生稔彦, 堤一, 松井謙二: 場所打ち杭の支持力推定に関する動的試験と解析法, 土木学会論文集, No.430/III-15, pp.39-48, 1991
- 4) 地盤工学会 杭の急速載荷試験法研究委員会: 杭の急送載荷試験の載荷メカニズムと適用性, 1999.3
- 5) 烏野清・麻生稔彦・荒巻真二・加藤一志: 弾塑性解析を用いた急速載荷試験による杭の支持力推定, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.273-281, 1999
- 6) 麻生稔彦, 荒巻真二, 烏野清, 會田忠義, 落合英俊: 杭の急速載荷試験への拡張カルマンフィルターの適用性に関する検討, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.133-141, 2001.
- 7) Randolph, M.F. and Deeks, A.J.: Dynamic and static soil models for axial pile response, Proc. Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp.3~14, 1992

(2002年9月13日受付)