

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

鳥野清¹・麻生稔彦²・荒巻真二³・加藤一志⁴

- ¹正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807-0867 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)
²正会員 博(工) 山口大学助教授 理工学研究科環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)
³正会員 工修 九州共立大学助手 工学部土木工学科 (〒807-0867 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)
⁴正会員 工修 大成建設(株)横浜支店課長 (〒231-0033 横浜市中区長者町6-96-2)

本研究では急速載荷試験中の杭の振動を剛体振動とみなし、弾塑性解析による動的挙動の解析法を提案する。剛体振動解析で必要となる減衰定数は急速載荷試験から得られる荷重-変位関係より等価粘性減衰定数を算出した。また、杭を支持する地盤ばねは地盤の非線形性を考慮してバイリニア型の完全弾塑性とする。この方法により計19本の実杭について急速載荷試験中の杭の挙動を解析したところ、実測値と解析値は良い一致がみられた。さらに、本研究では突出し杭の急速載荷試験結果における杭の弾性伸縮の影響および杭の振動における動的応答倍率の影響についても検討した。

Key Words : pile, statnamic test, bearing capacity, vibration

1. はじめに

杭は土木・建築構造物の基礎工法として非常に使用数が多いにも関わらず、品質管理としての支持力確認試験は実施数が施工数に比べて非常に少ない状況にある。この原因の一つは従来の静的載荷試験が多額の費用、時間、労力を必要とするためと考えられる。そこで、静的載荷試験に代わり杭の鉛直支持力を簡便に推定する方法が種々研究、提案されている。これらの支持力推定法の多くは杭頭に外力を加える動的試験であり、計測器や解析技術の向上に伴い、動的試験による支持力推定法の開発も進歩をとげている。

動的試験では杭を打撃し杭体内に生じる応力波の伝播状況から、杭に生じる抵抗力を一次元波動理論により求める方法^{1),2),3)}や、衝撃試験時の杭の振動挙動より杭を支持する地盤ばね定数を算出し、疑似静的な荷重-沈下曲線を描き支持力を推定する方法⁴⁾がある。これらの方法では杭頭に作用する荷重の載荷継続時間が数msから、せいぜい20ms程度であるため衝撃試験ともよばれ、衝撃試験による杭の挙動は静的な挙動とは大きく異なる。

これに対して杭頭載荷荷重の継続時間が約100msと比較的長く、より静的挙動に近い挙動が得られる急速載荷試験が近年提案され、実用に供されている。文

献⁵⁾によればこの急速載荷試験の利点としては次のようなものが挙げられる。

- ①試験に要する時間が短く1日で数本の試験が可能。
- ②反力杭や反力ばりが不用。
- ③杭種を問わず適用可能。
- ④試験費用が廉価。

我が国でも急速載荷試験の試験実績⁶⁾は数十本に達しており、本試験法の利点を勘案すれば今後も多くの試験が実施されるものと考えられる。

急速載荷試験結果を用いて杭の支持力を推定するには、静的な荷重-沈下曲線を描く必要がある。静的な荷重-沈下曲線を求める方法として、現在では一般にMiddendorpらによる除荷点法⁷⁾が用いられている。また、除荷点法では地盤の粘性減衰係数が一定値と仮定しているが、粘性減衰係数が杭変位により変化するとして、松本らにより修正初期剛性法⁸⁾が提案されている。どの方法を用いるにしても急速載荷試験により支持力を推定する際には、試験中の杭の動的挙動を正確に把握することは必要不可欠である。また、急速載荷試験は荷重載荷時間が長いとはいえ、動的現象を観測するものであり、静的挙動とは異なった動的挙動の影響を明らかにする必要がある。さらに、多くの場合、急速載荷試験では試験中に杭頭荷重および杭頭変位のみを測定し、解析にあたっては杭頭変位を時間につい

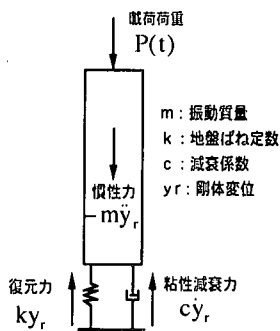


図-1 剛体振動解析モデル

て微分することにより得られる杭頭速度および杭頭加速度を使用する。このように変位を数値的に2回微分して得られる加速度には誤差が多いものと考えられ、杭頭加速度を用いずに静的支持力を推定する方法が望ましい。

そこで、本研究では急速荷重試験中の杭の挙動を把握するために、杭および地盤を非線形ばねを有する1自由度系にモデル化した剛体振動解析法を提案する。急速荷重試験の解析では多くの場合、杭および地盤は1自由度系にモデル化されているが、それらでは線形ばねが用いられている。本研究では杭を支持する地盤ばねは完全弾塑性型の非線形ばねとし、初期剛性は実測される荷重-沈下曲線の線形部分より推定する。また、粘性減衰係数は測定された荷重-沈下関係における履歴曲線より、等価減衰係数を算出して用いている。この剛体振動解析結果を実測された杭挙動と比較し、その妥当性を検証した。この際、杭の振動質量および等価減衰係数についての検討もおこなった。また、本提案法により推定された支持力を静的荷重試験の結果と比較し、推定支持力に対する本解析法の有効性を明らかにしている。さらに、動的試験である急速荷重試験における動的応答倍率や、弾性変形が無視できないと考えられる突出し長の長い杭についても、その弾性伸縮の影響を検討した。

2. 解析方法

(1) 振動方程式と解法

急速荷重試験（以下STNと呼ぶ）時における杭の挙動は、杭が伸縮しない完全な剛体と見なすと、図-1に示す1自由度系にモデル化できる。ここで、粘性減衰力 $c\dot{y}_r$ は杭体および杭周面に作用するものであり、復元力 ky_r は杭周面の摩擦力と杭先端の抵抗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、この系の振動方程式は次式となる。

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

式(1)の両辺を質量 m で除し、剛体振動の減衰定数 h 、と減衰が無い場合の固有円振動数 n_r を用いて整理すると次式となる。

$$\ddot{y}_r + 2h_r n_r \dot{y}_r + n_r^2 y_r = P(t)/m \quad (2)$$

ここで、

$$h_r = c/(2mn_r), \quad n_r = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

$P(t)$ の時刻歴はSTNにより直接得られることから、地盤ばね定数 k が一定であれば、式(2)において h_r 、 n_r および m が決定され、剛体振動の応答変位 y_r はデュアメル積分を用いて数値積分により計算できる⁹⁾。ただし、デュアメル積分により解く場合には、荷重が最大値を経てゼロとなる時刻 t_0 の前後で条件が異なるので次式となる。

$$0 \leq t \leq t_0$$

$$y_r = \frac{1}{mn_r'} \int_0^t P(\tau) e^{-h_r n_r' (t-\tau)} \sin n_r' (t-\tau) d\tau \quad (4)$$

$$t_0 \leq t$$

$$y_r = \frac{1}{mn_r'} \int_0^{t_0} P(\tau) e^{-h_r n_r' (t-\tau)} \sin n_r' (t-\tau) d\tau \quad (5)$$

ここで、 n_r' は減衰がある場合の剛体振動の固有円振動数であり、 n_r と次の関係がある。

$$n_r' = n_r \sqrt{1 - h_r^2} \quad (6)$$

式(1)において、荷重 $P(t)$ が杭の極限支持力に近い場合には、復元力 ky_r が非線形になるものと考えられる。そこで、この復元力特性を完全弾塑性型に仮定した弾塑性解析をおこなう。完全弾塑性型に仮定した地盤ばねの初期剛性 K_1 は、STNで得られる荷重-沈下曲線において最大変位 y_{max} が生じる時刻以前の弾性領域と推定される範囲より推定することとした。荷重-沈下曲線における原点と y_{max} を結ぶ等価地盤ばね定数 K_0 と K_1 を比較すると、地盤が弾性領域にあり、動的振動成分が小さい場合には K_0 と K_1 はほぼ一致する。しかし、 y_{max} が大きくなり地盤が塑性領域になれば K_1 は K_0 に比べて大きくなる。なお、弾塑性解析では等変加速度法⁹⁾による応答計算を行っている。

(2) 振動質量

著者らは、これまでに場所打ちコンクリート杭に対する衝撃試験結果より、杭が剛体振動する場合には振動質量として杭体の質量のみならず、付加質量として杭体が排除した地盤の質量を考慮しなければならないことを明らかにした⁴⁾。そこで、本研究においても振動質量 m は杭体の質量 m_p と付加質量 m_s の和として、付加質量の影響を検討する。

$$m = m_p + m_s \quad (7)$$

ただし、付加質量 m_s はコンクリート杭では杭が排除した地盤の質量、鋼管杭では管内土の質量とする。

表-1 解析対象杭

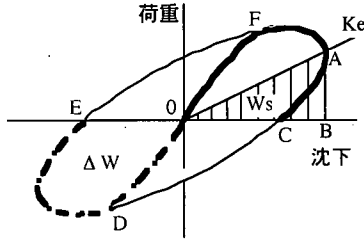


図-2 等価減衰定数算出モデル

(3) 減衰係数

減衰係数は杭の振動変位の大きさと地盤の物性値の関係で変化する。したがって、杭の剛体振動時も粘性減衰係数は振動変位に伴って変化しているものと考えられるが、この変化を実験値から求めることは困難である。そこで、本研究ではSTNで得られる荷重-沈下関係より等価減衰定数 h_e を算定し、これより減衰係数を求めることとする。STNの荷重-沈下関係は図-2の太線で示す半サイクル分である。そこで、後の半サイクルも同じ挙動をするものとして1サイクルの履歴曲線を描き、 h_e を次式により算定する。

$$h_e = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_s} \quad (8)$$

ここで、 ΔW は1サイクルの履歴曲線が囲む面積であり、 W_s は三角形OABの面積である。 ΔW の算定には曲線CDおよびEFの作図により多少の誤差が含まれる。しかし、残留沈下量が大きく履歴曲線が膨らむ場合にはこの作図上の誤差は相対的に小さくなる、また、残留沈下量が小さい場合には弾性範囲内であり、履歴減衰は非常に小さくこの場合にも作図による影響は小さいものと考えられる。式(8)から得られる等価減衰定数 h_e と粘性減衰係数 c の間には次の関係がある。

$$c = 2m_n h_e \quad (9)$$

ただし、式(9)で得られる粘性減衰係数は等価粘性減衰係数である。

(4) 支持力推定

現在、STNにおける支持力推定法として除荷点法が用いられている。この方法では式(1)左辺第2項の減衰力と第3項の復元力の和を地盤抵抗力 F_{soil} とし次式で表す。

$$F_{soil}(t) = c\dot{y}_r(t) + ky_r(t) = P(t) - m\ddot{y}_r(t) \quad (10)$$

杭の最大変位点(除荷点)での時刻には速度 $\dot{y}_r = 0$ となり、式(10)の減衰力 $c\dot{y}_r = 0$ であるのでこの時刻には静的抵抗力(復元力)が得られることになる。除荷点法ではこの静的抵抗力が一つの指標となり、静的な荷重-沈下関係もこの点を通るとしている。しかし、こ

杭種	杭番号	杭長 (m)	杭径 (m)	最大荷重 (MN)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	
コンクリート杭	P H C	Pc1	7.0	0.3	0.51	3.9	0.1
		Pc2	7.0	0.3	0.52	2.9	0.0
		Pc3	7.0	0.3	0.54	5.3	1.1
		Pc4	7.0	0.3	0.52	8.0	2.7
		Pc5	7.0	0.3	0.63	7.9	2.3
	場所打ち杭	Pc6	11.5	1.5	12.13	10.1	3.2
		Pc7	14.8	1.3	4.65	6.8	2.9
		Pc8	18.2	1.2	6.32	1.7	0.4
		Pc9	6.5	1.8	4.67	7.9	1.0
		Pc10	7.5	2.4	7.20	10.5	0.0
		Pc11	24.0	1.5	5.45	3.2	0.4
		Pc12	24.3	1.5	5.40	3.6	0.4
鋼管杭	Ps1	13.0	0.4	3.75	38.0	14.0	
	Ps2	11.0	0.8	5.81	21.5	1.2	
	Ps3	11.0	0.8	4.95	19.0	1.1	
	Ps4	47.6	1.5	16.00	20.5	4.8	
	Ps5	40.0	1.5	13.55	15.0	4.1	
	Ps6	13.0	0.4	1.18	10.4	3.4	
	Ps7	33.0	0.8	5.08	23.6	4.4	

の方法では各時刻における地盤ばねを線形としており、杭の連続した非線形挙動を把握することが困難な場合もあると考えられる。また、多くの場合STNでは杭頭の変位をレーザー変位計で測定し、この変位を微分することにより速度、加速度が求められている。一般に、このように変位を微分して得られる加速度にはあまり信頼性がない。したがって、支持力を推定する際にこのような速度、加速度を用いることは問題があるものと考えられる。

以上より、STNで得られる実測値の内、変位のみが信頼できるとすれば、式(1)で示される剛体振動の応答計算をおこない、実測変位と一致する地盤ばね特性を明らかにすれば、推定支持力の精度向上が図れるものと考えられる。そこで、本研究では完全弾塑性型の地盤ばねの降伏荷重(P_y)を変化させ、実測値と一致する完全弾塑性地盤ばね特性を求めている。

3. 解析結果

(1) 解析対象杭

本研究ではこれまでにSTNが実施されたコンクリート杭12本および鋼管杭7本を解析の対象とする。これらの杭形状を表-1に示す。これらの杭のうち、コンクリート杭のPc7およびPc8はフリクションカットが施されており、その長さはPc7が9.0m、Pc8が13.5mである。また、鋼管杭のPs4とPs5は海上に施工された杭であり、海底面から杭頭まではいずれも19.2mである。これらの杭は突出し長の長い杭と見る

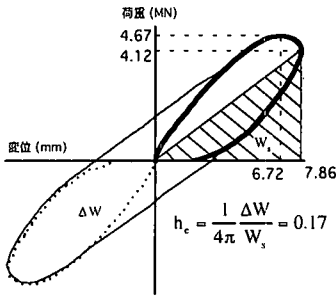


図-3 Pc9の等価減衰定数

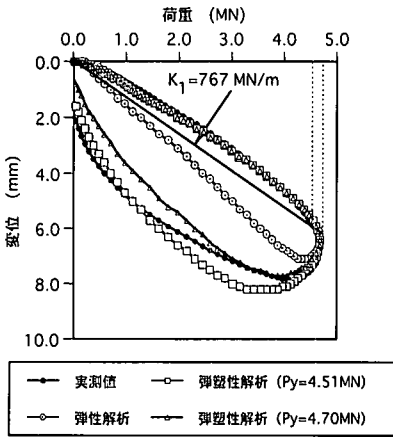


図-4 実測値と解析値の比較（付加質量なし）

ことができ、弾性伸縮の影響を無視できないことが予想される。そこで、これらの杭については弾性伸縮の影響を評価し、杭を剛体と見なす提案法の適用性を検討する。

(2) 剛体振動解析

先に示した剛体振動解析理論により、表-1に示す杭の挙動を解析した。ここでは、解析結果の例としてコンクリート杭のPc9について示す。

解析では、まず等価減衰定数を算定する必要がある。図-3はPc9の荷重-沈下関係より描いた履歴曲線である。この図より式(8)を用いて等価減衰定数 h_e を求めたところ、 $h_e = 0.17$ となった。また、初期地盤ばね定数は767MN/mである。これらの値を用い、完全弾塑性型に仮定した地盤ばねの降伏荷重 P_y を変化させて、実測された荷重-沈下関係との適合を図る。

図-4は振動質量を杭体の質量4.22tのみとした場合の結果である。図より、 $P_y = 4.70$ MNで荷重-沈下曲線を比較すると、降伏荷重以降で実測より小さくなっている。一方、降伏荷重 $P_y = 4.51$ MNでは最大荷重直後に実測値より大きな変位を示すものの、実験値と解析値はほぼ一致している。つまり、降

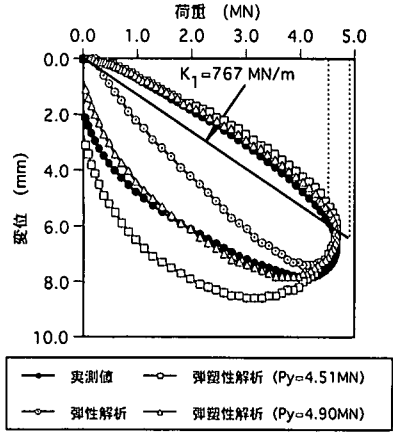


図-5 実測値と解析値の比較（付加質量あり）

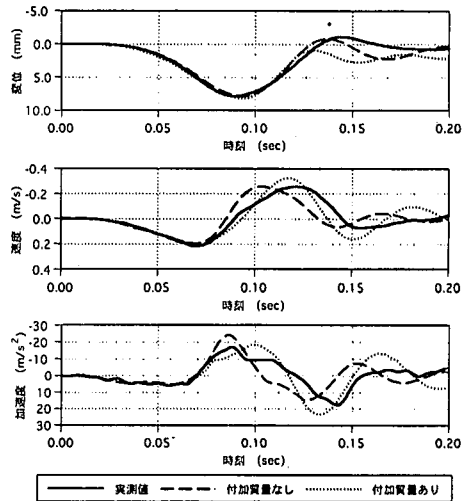


図-6 Pc9の時刻歴の比較

伏荷重 P_y によって荷重-沈下関係がかなり変化することを示している。

この杭について付加質量の影響を調べるために、振動質量として杭体の質量に杭が排除した地盤の質量3.04tを付加質量として加えた場合の結果を図-5に示す。この結果より、最適と考えられる降伏荷重は4.90MNであるものの、付加質量の有無で降伏荷重が大きくは異なることが明らかとなった。

図-6は弾塑性解析から得られた変位、速度、加速度を付加質量の有無により実測値と比較したものである。最大変位点以後に実測値と解析値とでは差があるものの、杭の動的挙動をうまく表していると考えられる。また、付加質量を考慮した場合、考慮しない時に比べて振動周期が若干長くなり実測値に近いように思われる。

同様の解析を鋼管杭(Ps7)についておこなった結

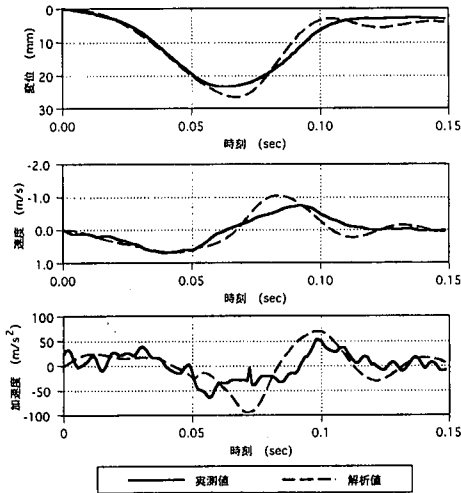


図-7 Ps7の時刻歴の比較

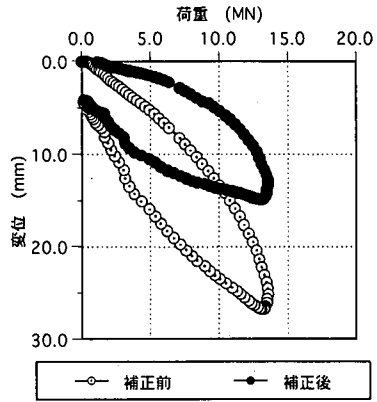


図-8 Ps4の変位補正

表-2 突き出し杭解析結果

杭番号	突出長 (m)	最大変位補正量 (mm)	初期地盤ばね定数 (MN/m)	等価減衰定数 (%)	降伏荷重 (MN)
Pc7	9.0	1.3	1125.0	25	4.12
Pc7補正			1316.0	32	3.92
Pc8	13.5	3.1	1579.0	9	6.57
Pc8補正			7000.0	18	5.88
Ps4	19.2	13.7	667.0	25	弾性
Ps4補正			952.0	10	弾性
Ps5	19.2	12.0	680.0	13	13.30
Ps5補正			1153.0	12	13.30

果を図-7に示す。解析では付加質量は考慮しておらず、初期地盤ばね定数 $K_1 = 240\text{MN/m}$ 、等価減衰係数 $h_e = 0.18$ 、降伏荷重 $P_y = 4.90\text{MN}$ であった。図-7でも実測値と解析値はよく対応しており、今回示した弾塑性解析により杭の種類に関わらず動的挙動をうまくシミュレートできることが明らかとなった。図-7の加速度波形について、実測値には周期の短い波が含まれており、解析値にはこのような波は見られない。このように加速度波形に誤差が生じる原因として、実測値が変位を2回微分して得られているために、数値微分による誤差が考えられる。このような誤差は除荷点法においても無視できないものであり、これをなくするためには直接加速度を測定することが必要であろう。また、変位波形から求める場合でも、加速度波形を積分して速度を求め、変位の微分により求められる速度と比較して精度の検討をすることも重要である。

(3) 突き出し杭の弾性伸縮

突き出し杭あるいはフリクションカットされた杭では、地盤に接しない杭部分(空中部分)の変形が大きく、杭を剛体と考えている本提案法が適用できないものと考えられる。そこで、杭頭に与えられた応力がそのまま杭の空中部分を伝搬していくものとして刻々の変位量を算出し、この変位を杭頭変位から差し引いたものを支持力に関与する杭部分(地中部分)の変位量とすることとした。

杭頭に載荷された荷重 $P(t)$ は応力波として杭体を伝播する。そこで、この応力波が突き出し部最下端(地盤面)に到着するまでの時間を算出し、この時間だけずらした荷重 $P'(t)$ が地中部の杭に作用するものとする。突き出し部の弾性伸縮量 Δl は杭頭荷重 $P(t)$ と突き出し部最下端荷重 $P'(t)$ の平均値 $\bar{P}(t)$ を用いて次式より求め

る。

$$\Delta l = \frac{\bar{P}(t)}{EA} l_0 \quad (11)$$

式(11)において、 E は杭の弾性係数、 A は杭の断面積、 l_0 は突出し長をそれぞれ表す。

突き出し部分の弾性伸縮はコンクリート杭よりも鋼管杭においてより大きいと考えられるので、Ps4についての解析結果を以下に示す。図-8は杭頭で実測された変位と突き出し部分の変位量を補正した地中部分の杭の頭部(突き出し部分の下端)の変位を比較したものである。この計算において、杭頭に作用した応力波の伝搬速度を 5100m/s としている。Ps4では突き出し部が 19m と長く、しかも鋼管杭であるため断面積がコンクリート杭に比べて小さいことから、かなり突き出し部分の変位量が多い。したがって、変位補正の有無により剛体振動解析で得られる初期地盤ばね定数 K_1 は大きく異なると考えられる。この場合にも地盤ばねに比べて杭の軸方向ばねは非常に大きいので、降伏変位 P_y の相違は小さいものと予想される。

先に示した突き出し長の長い4本の杭について、変位補正をしない場合と弾性伸縮を考慮した場合についてそれぞれ弾塑性解析を行った結果を比較して表-2に

表 - 3 弾塑性解析結果

杭番号	杭長 L (m)	杭径 D (m)	初期地盤ばね定数 K ₁ (MN/m)	等価減衰定数 h _e (%)	最大荷重 P _{max} (MN)	降伏荷重 P _y (MN)		P _{max} /P _y	δy/D (%)	
						付加質量有り	付加質量無し			
コン ク リ ー ト 杭	Pc1	7.0	0.3	137.2	18	0.51	0.50	0.50	1.02	1.21
	Pc2	7.0	0.3	129.0	15	0.52	0.51	0.51	1.02	1.32
	Pc3	7.0	0.3	143.0	27	0.54	0.49	0.49	1.10	1.14
	Pc4	7.0	0.3	115.0	36	0.52	0.44	0.44	1.18	1.28
	Pc5	7.0	0.3	104.0	30	0.63	0.57	0.57	1.11	1.83
	Pc6	11.5	1.5	1693.0	19	12.13	弾性	弾性		
	Pc7	14.8	1.3	1125.0	25	4.65	4.12	4.12	1.13	0.28
	Pc8	18.2	1.2	1579.0	9	6.32	6.57	6.57	0.96	0.35
	Pc9	6.5	1.8	767.0	18	4.60	4.90	4.51	1.02	0.33
	Pc10	7.5	2.4	889.0	27	7.20	弾性	6.66	1.08	0.31
	Pc11	24.0	1.5	1846.2	9	5.45	6.08	5.68	0.96	0.21
	Pc12	24.3	1.5	1666.7	9	5.40	5.88	5.59	0.97	0.22
鋼 管 杭	Ps1	13.0	0.4	182.0	30	3.75	3.10	3.25	1.15	4.46
	Ps2	11.0	0.8	400.0	22	5.81	5.30	5.40	1.08	1.69
	Ps3	11.0	0.8	333.0	21	4.95	4.70	4.70	1.05	1.76
	Ps4	42.0	1.5	667.0	25	16.00	-	弾性		
	Ps5	36.0	1.5	680.0	13	13.55	-	13.3	1.02	1.30
	Ps6	13.0	0.4	137.2	21	1.18	1.13	1.13	1.04	2.06
	Ps7	33.0	0.8	240.0	18	5.08	-	4.90	1.04	2.55

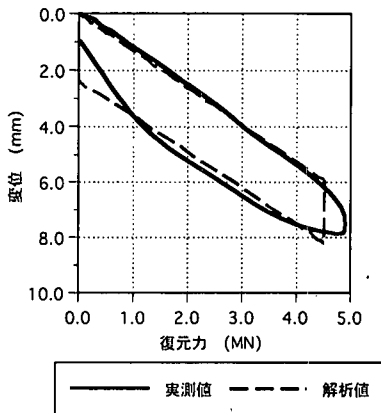


図 - 9 Pc9の復元力の比較

示す。これらの4本の杭については変位補正により荷重に対する杭変位が小さくなることから、初期地盤ばね定数はPc8を除いて1.2~2.0倍程度大きくなっている。一方、等価減衰定数は補正変位が大きくなると履歴曲線の形状が変化するために、補正しない場合に比べてかなり変化している。弾塑性解析より得られる降伏荷重は、変位補正により多少小さくなる傾向にある。しかし、コンクリート杭であるPc7、Pc8での補正量は変位補正をしない場合の10%以下であり、コンクリート杭では変位補正の影響は小さい。一方、鋼管杭では弾性伸縮量の影響を無視できない場合もあると考えられるが、今回の解析では降伏荷重は補正の有無によらず同じ値となった。

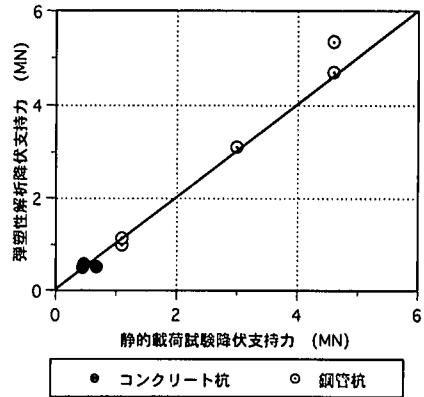


図 - 10 静的載荷試験との比較

以上より、コンクリート杭のSTNの解析においては、通常の突出し杭に対しては完全剛体とみなしても良いものと考えられる。鋼管杭についてはさらに実験データの収集が必要であろう。

(4) 推定支持力

以上の剛体解析により得られる復元力-変位関係をPc9について図-9に示す。この図において実測値としているのは除荷点法により求めた復元力であり、この復元力-変位関係は静的な荷重-沈下関係に相当するものである。今回は地盤ばねを完全弾塑性としているので、降伏変位以降の復元力は直線となっているが、解析値は実測値に良く対応しており、この図より降伏支持力を推定することが可能であると考えられる。

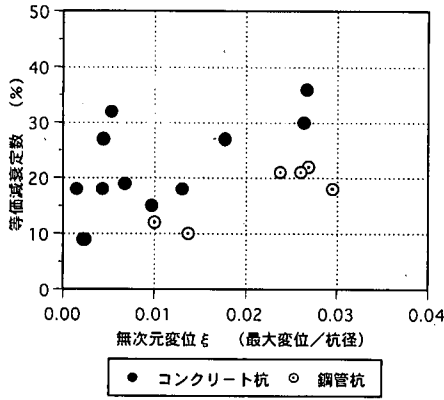


図-11 変位と等価減衰定数の関係

今回対象とした全ての杭について同様の剛体振動解析を行って得られた初期地盤ばね定数、等価減衰定数および降伏荷重を表-3に示す。表-3において降伏荷重が弾性となっているものは、弾塑性解析よりも弾性解析において荷重-沈下関係が一致したものである。また、表中の-記号は付加質量の有無で解析結果にあまり違いがなかったことから、付加質量有りの解析を省略したことを示す。この表からも付加質量の影響は小さいことがわかる。したがって、通常の杭の動的挙動におよぼす慣性力の影響は復元力に比べて小さいものと考えられる。また、杭径Dに対する降伏変位 δ_y の比も示している。これより、今回対象とした杭では降伏変位が杭径の0.2~4%程度と小さいことがわかる。

図-10は今回の解析対象杭の内、静的載荷試験が実施されている杭について弾塑性解析による降伏荷重と静的載荷試験による $\log P - \log S$ 関係より得られた降伏支持力を比較したものである。両者は良く一致しており、弾塑性解析の有効性が確認できるとともに、急速載荷試験が杭の支持力推定に有効であることを示している。

図-11に急速載荷試験時の杭の最大変位 y_{max} を杭径Dで除した無次元変位 ξ と等価減衰係数の関係を示す。今回の対象杭の多くではSTNによる最大変位は杭径の3%以下であった。コンクリート杭では杭径に対する最大変位量が大きくなるにつれ、ほぼ直線的に等価減衰定数も大きくなる傾向が見られる。しかし、鋼管杭では等価減衰定数は10~20%程度でばらついている。

図-12には杭に作用する最大荷重 P_{max} を降伏荷重 P_y で除した無次元荷重 ψ と等価減衰係数の関係を示す。この図より、等価減衰定数は杭種を問わず、無次元荷重と線形関係にあることが明らかとなった。特に、載荷荷重の最大値が降伏荷重を超える場合($\psi \geq 1.0$)には、等価減衰定数が10%以上となっており、最大載荷荷重が降伏荷重未満($\psi < 1.0$)であれば等価減衰定数

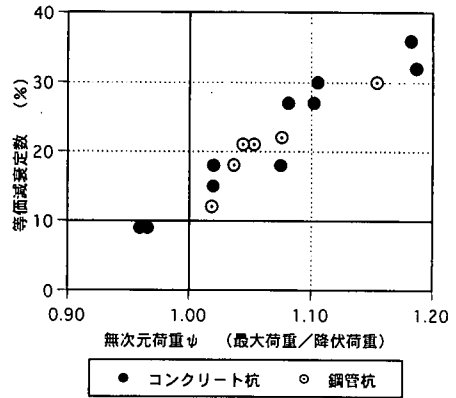


図-12 荷重と等価減衰定数の関係

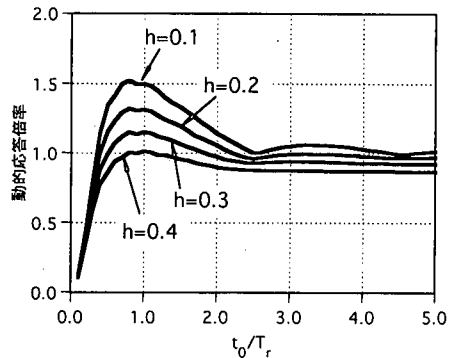


図-13 動的応答倍率

は10%より小さい。したがって、等価減衰定数が算定されれば、載荷荷重が降伏荷重以上であるか否かをある程度推定することが可能であると考えられる。

(5) 動的応答倍率

STNの解析では、杭を1自由度系と見なした強制振動解析を行う。したがって、杭の剛体振動としての固有振動数と外力の振動数が一致すればある程度共振し、杭の応答が大きくなる。本来、STNは静的載荷試験に代わる試験法として開発されたものであるため、杭挙動が静的状態と大きく異なってはならない。つまり、STNにおいて杭が荷重と共振すれば、得られる杭の応答値は地盤ばねの変化よりも、共振による応答倍率の影響を強く受ける。したがって、杭の支持力推定は困難となることから、杭の剛体振動の固有振動数とSTNにおける荷重の振動数との関係を検討した。

杭に作用する荷重が正弦波の半周期に近似できるものとして、剛体にモデル化した杭の頭部に円振動数 ω_0 の荷重 $P(t) = P_0 \sin \omega_0 t$ の半周期の作用時間 t_0 を変化させ、杭の応答変位を式(4)、(5)により計算する。得られた応答変位 y_{max} と外力 P_0 を静的に作用させた時の変位

表-4 固有周期および荷重作用時間

杭番号	固有円振動数 n (rad/s)	固有周期 T _r (ms)	荷重作用時間 t ₀ (ms)	t ₀ /T _r	等価減衰定数 (%)	動的応答倍率
Pc1	283	22.2	80	3.60	18	1.00
Pc2	336	18.7	100	5.34	15	0.98
Pc3	289	21.7	100	4.61	27	0.95
Pc4	259	24.3	80	3.29	36	0.91
Pc5	246	25.5	100	3.92	30	0.93
Pc7	164	38.3	130	3.39	32	0.94
Pc8	442	14.2	100	7.04	18	0.70
Pc9	104	60.4	130	2.15	18	1.02
Pc10	102	61.6	100	1.62	27	1.23
Pc11	132	47.6	150	3.15	9	1.06
Pc12	125	50.3	150	2.98	9	1.05
Ps1	227	27.7	100	3.61	30	0.93
Ps2	191	32.9	100	3.04	22	1.04
Ps3	174	36.1	100	2.77	21	1.03
Ps4	84	74.8	80	1.07	10	1.48
Ps5	96	65.5	100	1.53	12	1.30
Ps7	164	38.3	120	3.13	18	1.04

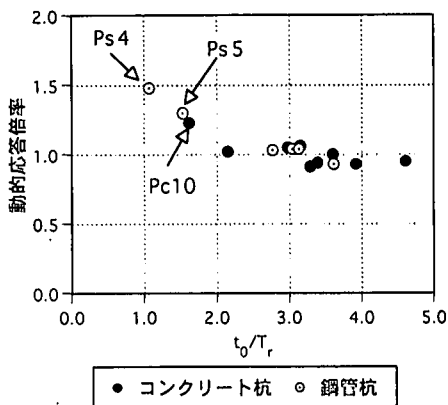


図-14 動的応答倍率(弾塑性解析)

4. 結論

δ_{st} の比から応答倍率を求めた。減衰定数を10%~40%とし、荷重の作用時間 t_0 と杭の剛体振動の固有周期 T_r の比をパラメータとした結果を図-13に示す。この図より外力の作用時間と杭の固有周期が一致する場合には、動的応答が静的応答の1.0~1.5倍程度となることがわかる。

今回の弾塑性解析より得られた初期地盤ばね定数から算出した各杭の固有周期と荷重作用時間および等価減衰定数は表-4となる。表-4の値を用いて図-13より動的応答倍率を算出すると、解析対象杭の動的応答倍率は図-14となる。なお、図-14にはSTNから得られた t_0/T_r が5.0までの結果を示している。この図では動的応答倍率は0.9~1.5の範囲にある。これは、STNにおける載荷荷重が半周期であることから、大きな共振には成長しないためと考えられる。図-14においてPs4とPs5が大きな応答倍率を示している。これは、これらの杭では他の杭に比べて固有円振動数が小さいためである。ただし、コンクリート杭と鋼管杭とを問わずに、実測値の多くは荷重継続時間が剛体振動固有周期の2倍以上($2.0 \leq t_0/T_r$)であり、この場合の動的応答倍率は0.9~1.05である。STNでは載荷荷重の最大値が地盤ばねの降伏荷重より大きい場合には、地盤ばね定数の低下により T_r は大きくなるため t_0/T_r は小さくなる。しかし、この場合には等価減衰定数が増加するために、動的応答倍率が図-13と大きく異なることは無いものと予想される。

今回得られた動的応答倍率はSTNにおける測定誤差を考慮すれば十分許容でき、動的応答倍率による補正は必要ないと考えられる。

急速載荷試験による杭の挙動の把握を目的として、弾塑性解析を行った。さらに、この解析法により推定される支持力についての検討も行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- ① 完全弾塑性型のバイリニア型地盤ばねと、杭の履歴曲線より得られる等価減衰定数より算出された減衰係数を用いる弾塑性解析により、コンクリート杭、鋼管杭のいずれについても杭挙動をうまく再現することができた。
- ② 杭の剛体振動時の振動質量として付加質量の影響を検討したが、この付加質量の影響は小さく、支持力の推定においては杭体の質量のみを考慮すればよい。
- ③ 等価減衰定数は最大荷重を地盤ばねの降伏荷重で除した無次元荷重と線形関係があり、載荷荷重が降伏荷重を超えた場合には等価減衰定数は0.1以上となる。
- ④ 突出し長の長い杭について、弾性伸縮の影響を検討した。その結果、コンクリート杭では弾性伸縮の影響は小さく、杭を剛体と見なして良い。一方、鋼管杭では弾性伸縮が大きく初期地盤ばね定数におよぼす影響は大きい。しかし、支持力に対する影響は小さいものであった。
- ⑤ 急速載荷試験における杭の動的応答倍率はおおむね1.0程度であり、急速載荷試験により得られる応答値はほぼ静的に近いものと考えられる。

杭の急速載荷試験は静的載荷試験に比べて簡便であり、試験実績も増えてきている。しかし、さらに本試験法の精度を向上させるために、多くの試験データの蓄積を図る必要がある。

本研究は「杭の急速載荷試験法研究会」(委員長: 日下部治東工大教授)の研究活動の一環として実施したものである。ご協力いただいた関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Smith, E. A. : Pile Driving Analysis by the Wave Equation, *Proc. of ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, pp.35-61, 1960.
- 2) 境友昭, 沖健, 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.
- 3) 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 KWAVE, 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.
- 4) 鳥野清, 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.
- 5) 日下部治, 松本樹典: 急速載荷試験(スタナミック試験)方法とその実施例, 土と基礎, Vol.43, No.5, pp.19-21, 1995.
- 6) 加藤一志, 日下部治, 松本樹典: 実大杭試験にみられる急速載荷試験の特性-スタナミック試験での事例-, 土木学会論文集, No.589/Ⅲ-42, pp.155-166, 1998.
- 7) Middendorp, P., Bermingham, P. and Kuiper, B. : Statnamic load testing of foundation piles, *Proc. of 4th Int. Conf. of Application of Stress-Wave Theory to Piles*, pp.581-588, 1992.
- 8) 松本樹典, 続誠, 西村真二: スタナミック試験データを利用した杭の静的~沈下曲線の一計算法, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp.1531-1534, 1994.
- 9) 小坪清真: 入門建設振動学, 森北出版, 1996.

(1998. 9. 7受付)

NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS AND ESTIMATION OF BEARING CAPACITY OF A PILE IN STATNAMIC LOAD TEST

Kiyoshi UNO, Toshihiko ASO, Shinji ARAMAKI and Kazushi KATO

The statnamic load test is a more convenient method than the static load test for estimation of the bearing capacity of a pile. This paper proposes a nonlinear dynamic analysis method of pile in statnamic load test. The behaviors of pile in statnamic load test can be modeled as a vibration of single-degree of freedom model. The soil spring is assumed as a bilinear spring and the equivalent damping coefficient is calculated from the load-settlement hysteresis loop. The analyzed results are very close to the measured displacement, velocity and acceleration at the top of the pile. Yield bearing capacity of the pile is obtained in the nonlinear analysis.