

杭のスタナミック試験結果の解釈法

加藤一志¹・堀越研一²・松本樹典³・日下部治⁴

¹正会員 工修 大成建設（株）横浜支店 課長（〒231-0033 神奈川県横浜市中区長者町6-96-2）

²正会員 Ph.D 大成建設（株）技術研究所 係長（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）

³正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科（〒920-8776 石川県金沢市小立野2-40-20）

⁴正会員 Ph.D 東京工業大学教授 工学部土木工学科（〒152-0033 東京都目黒区大岡山2-12-1）

本研究は、スタナミック試験結果から静的な荷重～変位関係を推定するための試験データの解釈法を体系化し適用分類を定めることを目的として、解釈法に考慮すべき事項を載荷時の杭の貫入抵抗力の発揮状況の分析より検討し、また、各種の解釈法を同一試験データに適用しその結果と静的載荷試験結果との比較より解釈法の適用性を考察した。さらに、杭体を一質点とし杭の地盤抵抗力を周面と先端に分けてモデル化する新しい解釈法を考え、その適用性も検討した。これらの結果から、各解釈法の特徴と解釈から得られる情報を整理し、解釈法の適用分類をまとめた。

Key Words : pile, statnamic load test, dynamic effect, field test, interpretation method

1.はじめに

近年の基礎設計分野における大きな流れとして、限界状態設計法の導入が挙げられる¹⁾。限界状態設計法では、施工された構造物の品質と信頼性を定量的に評価することが求められるが、杭基礎構造物においては、載荷試験がその品質や信頼性を評価する方法として重要な役割を果たすことになる。しかし、従来の静的な載荷方法に限定されていた載荷試験では、このような目的で実施するには、費用や時間が制約され、十分な数の試験を実施できない。そこで、信頼性の高い方法であるとともに、現場で迅速かつ安価に実施できる新しい載荷試験の実用化が望まれている。

これらの要求を満たす試験方法として、杭の急速載荷試験が挙げられる。この方法は、0.1～0.2秒の載荷継続時間で杭を急速に鉛直載荷する試験であり、静的に荷重を与える静的載荷試験とハンマーの打撃力による動的載荷試験の中間に位置付けられる。このような載荷が行える試験装置はいくつか実用化されている²⁾が、国内外で試験事例が圧倒的に多いものにスタナミック試験³⁾がある。急速載荷の範疇に入る試験方法の中で、試験データの蓄積がなされているのは、現在ところスタナミック試験のみであると言える⁴⁾。そこで、本研究ではスタナミック試験に限定した杭の急速載荷試験（以後

STN と略す）の試験データについて検討する。

STN 時の杭体は、速度および加速度を持って地盤に貫入するので、いわゆる動的効果により静的載荷試験（以後 SLT と略す）と比べ、杭頭において同一変位で荷重が大きくなることが知られている。したがって、STN 結果を解釈して静的な荷重～変位関係を求めるには、試験結果から動的効果の影響を差引く解析が必要である⁵⁾。こうした STN の解釈法としては、STN 開発当初の簡易解釈法から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、杭打解析と同様の一次元波動解析による方法、FEM 解析による方法が提案されている。これらの方法は個別に検討されているだけで、同一試験結果に対し複数の解釈法を適用し、比較検討がなされていない。

本研究では、まず、同一地盤に施工された 3 本の杭に実施した STN と SLT の杭の貫入抵抗力の発揮状況を比較し、その違いから解釈法に考慮すべき事項を検討した。次に、既に提案されている解釈法を同一試験結果に適用し、それぞれの解釈法の特性を比較検討した。また、杭を一質点とし杭に作用する地盤抵抗力を周面と先端に分けてモデル化し、波動解析法および FEM 解析法の地盤モデルと関連性のある方法を考え、その適用性について検討した。そして、本研究で提案した一質点解析方法を含め、各解釈法をどのような目的で適用するかを検討し、解釈法の適用分類表をまとめ、体系化することを試みた。

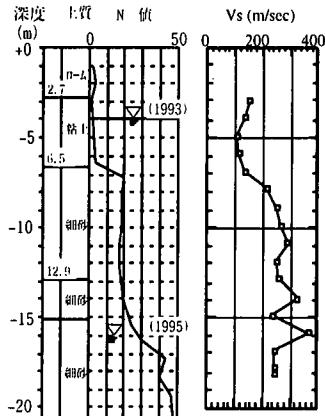


図-1 試験場所の土質柱状図・せん断波速度分布図

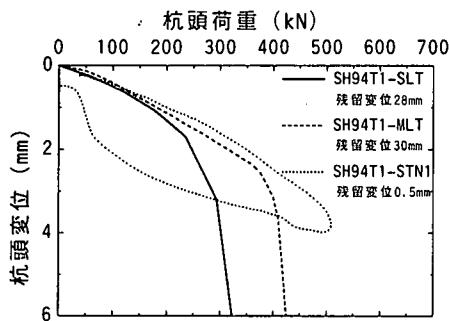


図-2 桿頭荷重～変位関係 (T1杭)

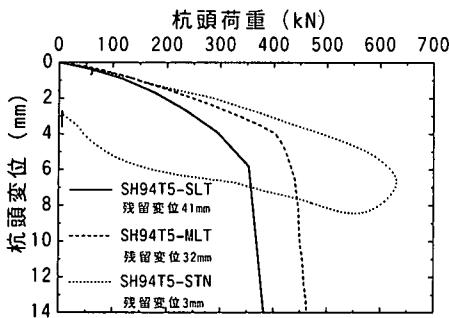


図-4 桿頭荷重～変位関係 (T5杭)

2. 急速載荷試験事例での地盤抵抗力発揮状況

STNにおいて杭に作用する地盤抵抗力の発揮状況から、STNのデータから支持力の推定、確認、あるいは静的な荷重～沈下関係を得るために解釈方法に考慮すべき事項を検討する。ここでは、同一地盤に施工された3本の杭に対して実施されたSTNにおける杭の地盤抵抗力の発揮状況を検討の対象とする。

試験地盤の状況を図-1に、試験杭の諸元を表-1に示す。図-1に示すように表層に厚さ2.7mのロー

表-1 試験杭諸元

| | T1・T5杭 | T6杭 |
|--------------------------|--------|---------|
| 杭種 | PHC杭 | 鋼管杭 |
| 長さ (m) | 7 | 13 |
| 外径 (mm) | 300 | 400 |
| 内径 (mm) | 180 | 382 |
| 板厚 (mm) | 60 | 9 |
| 断面積 (cm^2) | 452.4 | 110.6 |
| ヤング率 (MN/m^2) | 34,300 | 206,000 |
| 密度 (t/m^3) | 2.6 | 7.85 |
| 杭質量 (t) | 0.823 | 1.58 |

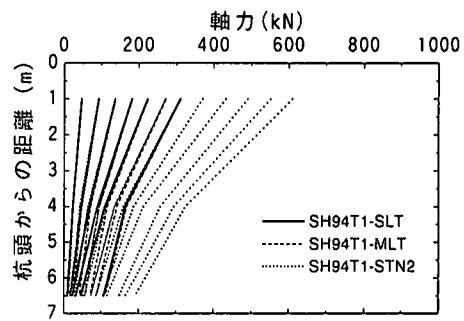


図-3 軸力分布 (T1杭)

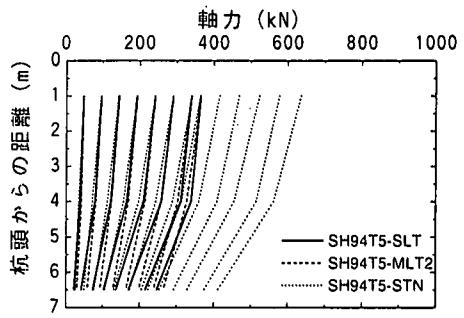


図-5 軸力分布 (T5杭)

ム層が存在し、下位には粘土層、細砂層が堆積している。粘土層の平均一軸圧縮強度は $q_u=56\text{kN/m}^2$ であった。T1杭、T5杭の試験から約1年後にT6杭の試験を実施したが、この時には地下水位が杭先端深度以下に低下していた。PHC杭であるT1およびT5杭は、それぞれ、プレボーリング孔に建込みセメントミルク工法と、プレボーリング孔に建込み最終2mをハンマーで打込むプレボーリング最終打撃工法により施工した。鋼管杭であるT6杭は、ハンマーによる打撃工法により施工した。全杭、土質(地盤)工学会のクイの鉛直載荷基準のA法に準じた繰返

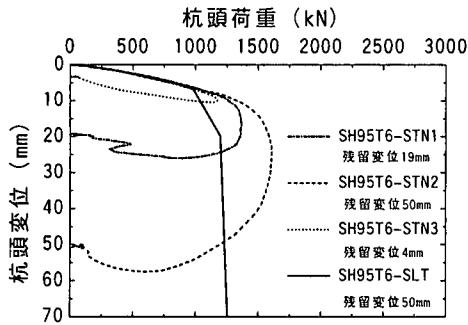


図-6 杭頭荷重～変位関係 (T6杭)

し載荷法により SLT を実施した。T1 および T5 杭では、SLT 実施直後に SLT の載荷装置を用いて荷重を 5 分程度で一気に加えるモノトニック試験（以後 MLT と略す）を行い、その後 STNを行った。一方、T6 杭では、STN を 3 回実施した後に SLTを行った。T1 杭、T5 杭では杭頭より 1.0, 4.0, 6.5m の位置で、T6 杭では杭頭より 1.5, 7.0, 12.5m の位置で軸力を計測した。各杭で実施した載荷試験における杭頭の荷重～変位関係および軸力分布を図-2～図-7 に示す。いずれの場合も、荷重～変位関係は、SLT, MLT, STN で異なっている。しかし、軸力分布は、SLT, MLT, STN で同じような形状を示している。

各杭について、載荷開始から最大変位点までの貫入抵抗力の発揮状況を図-8～図-10 に示す。これらの図において、周面抵抗力に対しては杭体中央部の変位を、先端抵抗力に対しては先端部の変位を用いた。図-8、図-9 によれば、周面抵抗力については、いずれの場合も MLT と SLT の同一変位での抵抗力は差がなく、STN と比べると小さくなっている。図-10 に示す T6 杭においても、SLT と STN の関係は、T1 杭、T5 杭とほぼ同じ傾向が見られる。また、先端抵抗力は、T1 杭、T5 杭では同一変位での抵抗力は $SLT < MLT < STN$ となっている。SLT と MLT の結果を比較することにより、周面抵抗力は載荷過程における荷重保持の有無による違いではなく、先端抵抗力においては荷重保持しない場合同一変位における抵抗力が大きくなることが解る。これは、載荷過程で杭先端地盤が排水の有無により体積変形を生じる場合と生じない場合の違いによると考えられる。また、T6 杭では地下水位が杭先端以下であったため、排水条件の影響がなく、T1 杭、T5 杭と比べると、STN と SLT の同一変位における先端抵抗力の差は小さい。いずれの杭でも SLT もしくは MLT と STN を比較すると、杭の貫入速度が大きい STN の場合は、周面抵抗力、先端抵抗力ともに同一変位での抵抗力に差が生じているため、貫入速度が大きいことによる地盤のひずみ速度効果と杭体の慣性力といった

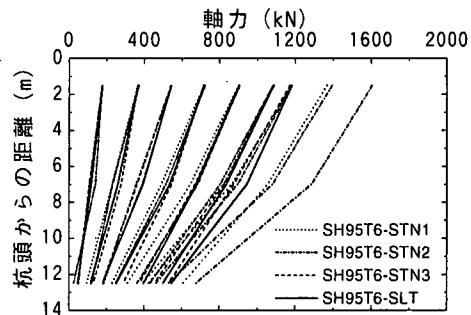


図-7 軸力分布 (T6杭)

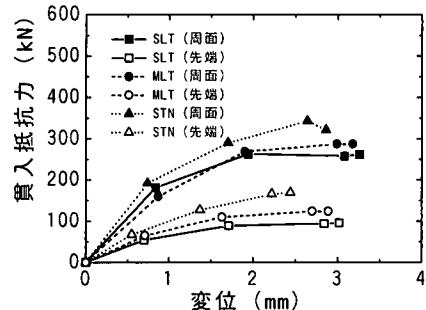


図-8 貫入抵抗力発揮状況 (T1杭)

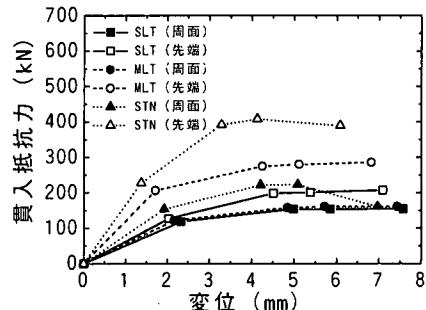


図-9 貫入抵抗力発揮状況 (T5杭)

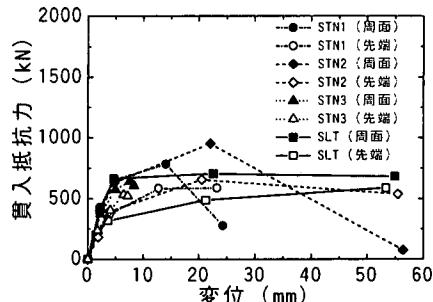


図-10 貫入抵抗力発揮状況 (T6杭)

動的効果が抵抗力に影響することが解る。

以上より、STN のデータを解釈して SLT を実施した場合と同様な結果を推定する方法では、荷重保持の有無による排水条件の違いの影響と、杭が速度お

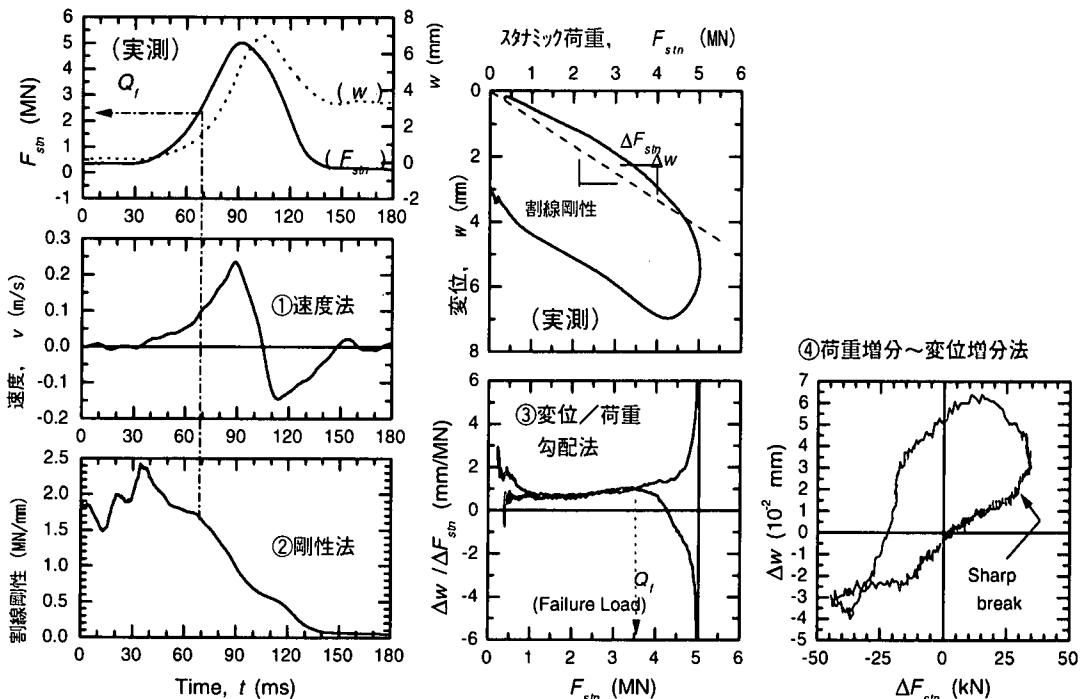


図-11 Horvathによる簡易解釈法概要説明図

より加速度を持って貫入することによって生じる動的効果の影響を考慮できるものであることが要求される。

3. 試験結果の解釈法

STN の試験結果の解釈に従来用いられている方法は、試験結果とそれから計算されるデータの変化点から荷重の特性値を読み取る簡易法、杭～地盤系を数学モデルにモデル化して載荷時の杭の挙動を解析し、荷重～変位関係を求める方法に大別される。数学モデルによる方法は、杭を一質点（剛体）とモデル化する方法、杭打解析と同様に杭を一次元棒モデルとし波動理論により解析する方法、杭～地盤を3次元FEMモデルとして解析する方法がある。これらの解釈法の概要と適用事例を以下に述べる。

(1) 簡易解釈法

STN の簡易解釈法としては、後述する4種類の方法が提案されている。以下に4種類の簡易解釈法⁶⁾を説明するとともに、Horvathによる簡易解釈法の概要説明図を図-11に示す。なお、これらの方針は、STN データから“Failure Load”と呼ばれる荷重値（以下 Q_f と略す）を読み取るものである。Failure Load は、「静的な荷重～変位曲線において、変位が初期の増加傾向をはずれ急激に増加し始める荷重」に対応するものである。

a) 速度法 (Velocity Method)

試験時に実測された杭頭変位を時間で微分して求めた速度の時刻歴から、載荷開始（図-11の①では 30ms）から最大荷重点までの間で速度が急激に増加する時刻（70ms）を読み取り、その時刻に計測された荷重を Q_f とする。

b) 剛性法 (Stiffness Method)

試験時の荷重～変位曲線の割線剛性（グラフの原点と各データ点を結ぶ直線の傾き）の経時変化図を作成し、この図において剛性が低下し始める時点に計測された荷重を Q_f とする。

c) 変位／荷重勾配法 (Disp./Load Slope Method)

荷重～変位曲線から隣り合うデータ点の勾配（変位増分／荷重増分）と荷重の関係のグラフを作成する。このグラフでは、図-11の③に示すようにラッパ状に開いた2本の曲線が得られるので、両者が離れる点の荷重を Q_f とする。

d) 荷重増分～変位増分法 (Δ Load- Δ Disp. Method)

荷重データおよび変位データの時刻歴について、隣り合うデータの差（荷重増分、変位増分）を求め、両者の関係を示すグラフを作成する。このグラフでは、図-11の④に示すよう曲線が得られるが、その曲線上に一番最初に現れる明確な変化点（sharp break）に対応する荷重を Q_f とする。

以上4つの方法は、その物理的意味やデータのサンプリング間隔、データから読み取る点の定義が明確でなく、解析者の主観が入りやすいものである。

ただし、簡易かつ迅速に行えるため、試験直後の結果の概略判断に用いることができると考えられる。

(2) 一質点系モデルによる方法

この方法は、杭を質量 M の一質点系の剛体と仮定し、質点、ダッシュポット、バネを有する一自由度系の運動として載荷時の杭の挙動をモデル化して解析するものである。このモデルでは、バネに生じる力は地盤の変形による静的抵抗力を、ダッシュポットに生じる力は地盤の動的抵抗力を表わす。図-12 に示すように、質点では杭頭に作用する荷重、慣性力と上記の静的抵抗力、動的抵抗力が釣り合っている。したがって、解析によって杭頭に作用する荷重を慣性力、静的地盤抵抗力および動的地盤抵抗力に分離することにより、STN の試験データから杭頭の静的な荷重～変位関係や静的支持力が推定できる。一質点系モデルの解析方法および解析に必要なパラメータの設定方法には、以下のようなものが提案されている。

a) 除荷点法⁷⁾

この方法では、バネは地盤および杭の変形を表す非線形ばねとし、ばねに生じる力を静的抵抗力 F_w 、また、ダッシュポットは杭の貫入速度 V に比例する動的抵抗力 F_v とする。このモデルでは、杭頭での載荷荷重 F_{sm} 、杭の慣性力 F_a および地盤抵抗力 F_{soil} の力の釣り合いは、式(1)で与えられる。

$$F_{sm}(t) = F_a(t) + F_{soil}(t) = M \cdot \alpha(t) + F_{soil}(t) \quad (1)$$

F_{soil} は、 F_w と F_v の和であり、 C を減衰定数として式(2)で表される。

$$F_{soil}(t) = F_w(t) + F_v(t) = F_w(t) + C \cdot v(t) \quad (2)$$

したがって、減衰定数 C が求めれば、これに杭の貫入速度 v を乗じて求まる動的抵抗力 $F_v = C \cdot v$ を F_{soil} から差し引いて、静的抵抗力 F_w を計算できる。除荷点法では、以下の通り C を決定する。

図-13 と図-14 に除荷点法の概要および減衰定数 C の定義を示す。まず、式(1)によって F_{soil} を計算する。 $F_{soil} \sim w$ 関係上の最大変位点を除荷点 (Unloading point) と呼ぶ。除荷点では速度 $v=0$ であるため $F_v=0$ となり、除荷点では $F_w=F_{soil}$ となる。すなわち、除荷点における F_{soil} は、STN から求まる静的最大荷重 $F_{w(max)}$ と解釈される。 F_{soil} の最大荷重点から除荷点の間は、 F_w が除荷点での値と等しく一定であると仮定して、次式より C を決定する。ただし、 v^* は F_{soil} の最大荷重点での杭頭速度を表わす。

$$C = \{F_{soil(max)} - F_{w(max)}\} / v^* \quad (3)$$

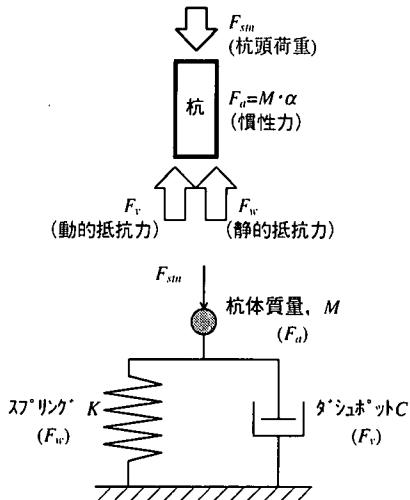


図-12 一質点系によるモデル化

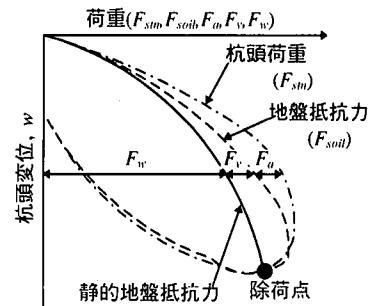


図-13 除荷点法の概要

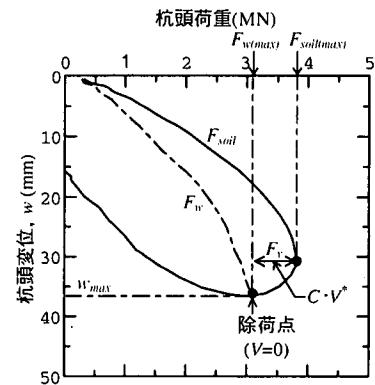


図-14 減衰定数の定義

このようにして求めた C を式(2)に用いることで、いずれの時刻 t での F_w を計算できる。

b) 等価減衰モデル法⁸⁾

この方法では、除荷点法のように計測データから直接解析パラメータを設定するものとは異なり、マッピング解析を行う。まず、減衰定数 C を振動論に基づき杭頭の荷重～変位曲線を等価減衰モデルとして定める。次に、バイリニア型でモデル化したバネ諸元を仮定し、杭頭で計測された荷重を入力として、釣り合いを表わす式(4)の微分方程式を解き、

質点の応答変位を求める。こうして得られた変位を用いて、解析による STN 時の荷重～変位曲線を描き、実測された曲線と一致するまでバネ諸元を変化させて計算を繰り返す。実測の曲線と一致した場合のバネ諸元を用い、静的な荷重～変位関係を求める。

$$M\ddot{w}(t) + C\dot{w}(t) + Kw(t) = F_{stn}(t) \quad (4)$$

等価減衰モデルによる減衰定数の設定方法を以下に述べる。STN における杭の運動は、載荷除荷過程の単調運動であるが、解析に用いる減衰定数は、これを周期運動と仮定して振動論を用いて求める。図-15 はその状況を示したものである。1 周期分の運動を想定して式(5)より等価減衰比 h_e を算定し、式(6)により減衰定数 C を求める。なお、 W_d 、 W_s は図-15 に示す面積を表わす。

$$h_e = 1/4\pi \times W_d / W_s \quad (5)$$

$$C = 2 \times h_e \times \sqrt{K \cdot M} \quad (6)$$

(3) 一次元波動解析による方法⁹⁾

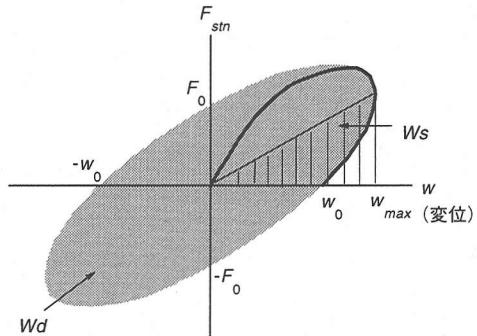
一質点系モデルに基づく解析法は簡便な方法であるが、杭を剛体と仮定していることなどから、解析上誤差の問題を含むことが考えられる。より詳細に現象を把握することを目的として、一次元波動理論に基づいた解析（シグナルマッチング）を実施する方法がある。この方法は、杭の動的載荷試験に用いられる波動解析を STN に適用したものである。

シグナルマッチングは、一次元波動方程式の特性曲線解に基づいた波動解析プログラムを用いて行われる。この方法では、杭を一元棒状の弾性体として取り扱い、図-16 に示すように地盤抵抗をモデル化する。この方法によれば、杭体の弾性変形や地盤の層構造を考慮できるため、詳細な現象把握が可能となる。地盤の抵抗モデルとしては、図-17 に示すように周面抵抗については Randolph and Simons (1986)¹⁰⁾ のモデル、先端抵抗については Randolph and Deeks (1992)¹¹⁾ のモデルが提案されている。ここで、スライダーは静的な最大周面摩擦力度 τ_{max} （または最大先端応力度 σ_{max} ）、ばねは地盤の弾性変形、ダッシュポットは杭の速度に比例する動的抵抗成分を表している。

Randolph and Simons モデルのばね値 k および逸散減衰定数 c_r は、Novak et al. (1977)¹²⁾ の提案の近似式として次式より決定することができる。

$$k = \frac{2.75G}{\pi d_o}, \quad c_r = \frac{G}{V_s} \quad (7)$$

ここで、 G は地盤のせん断剛性、 V_s はせん断波の



$$\text{等価減衰定数 } h_e = \frac{1}{4\pi} \frac{W_d}{W_s}$$

図-15 等価減衰定数 h_e の算出方法

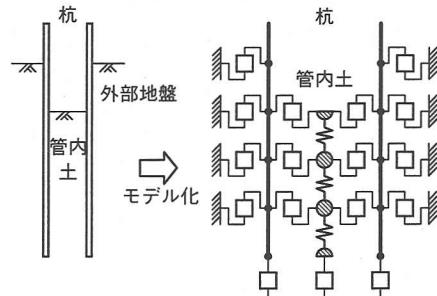


図-16 波動解析の杭-地盤モデル

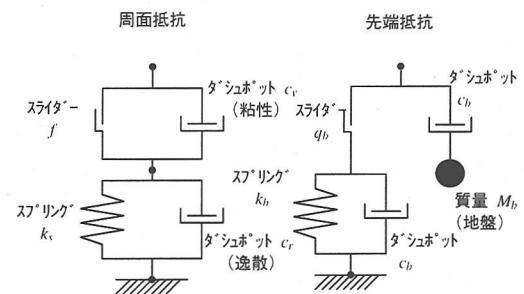


図-17 地盤抵抗モデル^{10),11)}

伝播速度 ($V_s = \sqrt{G/\rho}$, ρ は地盤の密度), d_o は杭外径である。せん断波速度が求まれば、ばね値 k および逸散減衰定数 c_r を決定することができる。せん断波速度は、P S 検層やサイスマックコーン貫入試験などにより求めることができる。

また、Randolph and Deeks モデルの各パラメータもせん断剛性 G 、せん断波速度 V_s 、ポアソン比 μ 、杭外径 d_o 、杭内径 d_i より次式で求められる。

$$k_b = \frac{8 \cdot G}{\pi(1-\mu)(d_o+d_i)}, \quad c_b = \frac{3.2G}{\pi(1-\nu)V_s}$$

$$M_b = 2(d_o^3 - d_i^3)\rho \frac{0.1 - \mu^4}{1 - \mu} \quad (8)$$

シグナルマッチングでは、杭頭で測定した動的測定シグナル（ひずみ、速度）から求めた杭頭での下降応力波 σ_d の時間的变化を杭頭での境界条件として与え、杭中の応力波伝播を特性曲線解析法によって計算する。そして、計算された応力波形および速度波形が実測波形とよく一致するまで、地盤パラメータ（最大周面摩擦力度 τ_{max} （または最大先端応力度 σ_{max} ）、ばね定数 k 、減衰定数 c ）を変化させて計算を繰り返す。両者が一致した場合の地盤パラメータを用いて図-18に示す荷重伝達法などにより、静的な杭頭荷重～変位曲線を計算することができる。

(4) FEM 解析による方法^[3]

スタナミック試験データの解釈法として最も汎用性の高いものは、FEMによる方法である。本方法は、前項の一次元波動解析（シグナルマッチング）と類似のものであるが、逆解析の際に有限要素モデルを用いることにより、次の特長を有する。

①地盤モデルに用いる土質パラメータは地盤調査および土質試験の結果に基づいて設定できる。

②杭周辺地盤へのエネルギー逸散は、地盤を弾塑性体もしくは弾性体と仮定した有限要素モデルにおいて波動伝播を許容する境界条件（無反射境界）を設けることにより、逸散減衰定数を設定することなく考慮できる。

③杭先端の地盤および杭周囲の地盤に作用する慣性力は、有限要素モデルにより考慮できる。

本方法の実用上の問題点としては、入力データの作成、計算そのものに要する時間を含めた解析時間が、一次元波動解析に比べて、かなり長くかかることがある。しかし、STNにおける周辺地盤の挙動を把握しようとする場合には、有効な解析法である。

本方法の杭および地盤のモデルでは、杭芯に対し軸対称の杭・地盤系の有限要素モデルを用いる場合が多い。杭と地盤の境界面には、ジョイント要素を配置し、杭と地盤間のすべり破壊を表現する。逸散減衰を考慮するため、地盤モデルの側面および底面を無反射境界とする。地盤パラメータの初期値は、地盤調査および土質試験の結果に基づいて設定し、弾性係数についてはPS検層やサイスミックコーン試験等から得られた微小ひずみレベルの値を参考にすることができる。

解析で与える杭頭荷重は、実測のスタナミック荷重を使用する。つぎに、解析で得られるSTN時の杭頭での荷重～変位曲線が実測曲線とほぼ一致する

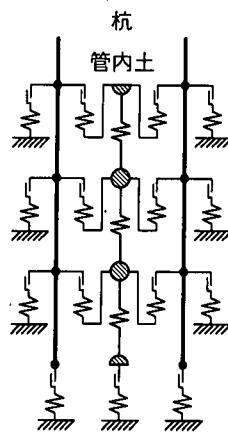


図-18 荷重伝達法モデル図

ように、地盤要素のせん断弾性係数をせん断ひずみに応じて低減し、かつ土のせん断強度を土質試験結果のばらつきの範囲内で増減させる。このとき、地中の杭体軸力と変位量（例えば杭先端）に関しても実測値があれば、杭頭での荷重～変位曲線と同時にマッチングすることにより、地盤パラメータの推定精度を上げることができる。

静的な荷重～変位関係は、マッチング解析で求めた地盤パラメータを用いて、杭頭に静的荷重を加えることにより計算することができる。

(5) 解釈法の適用事例

実杭で実施されたSTNの結果に対して、上述した解釈法により求めた静的な荷重～変位関係と SLT の結果を比較し、解釈法の適用性を検討する。解釈法を適用する試験としては、2章で検討を行ったT1杭、T5杭、T6杭の事例とする。本論文では、1つの試験に対して、一質点系モデルによる方法（除荷点法）、一次元波動解析による方法およびFEM解析による方法を適用する。

a) 除荷点法による解析結果

T1杭、T5杭、T6杭のSTN試験結果に対し一質点系モデルによる方法の中でも代表的な除荷点法を適用する。これらの試験では、杭頭でロードセルにより荷重とレーザー変位計により変位が計測されている。除荷点法では杭頭における速度および加速度の時刻歴が必要であるが、これらは計測された変位を時間に関して1階および2階微分したものを用いた。T1杭、T5杭、T6杭の試験結果に除荷点法を適用した結果を図-19～図-21に示す。これらの図には、杭頭荷重 F_{stn} 、静的と動的地盤抵抗力の合計値 F_{soil} および静的地盤抵抗力 F_s と杭頭変位の関係を示す曲線を描いている。図-19によれば、最大荷重近傍で F_{stn} 、 F_{soil} 、 F_s の曲線に大差がない。これ

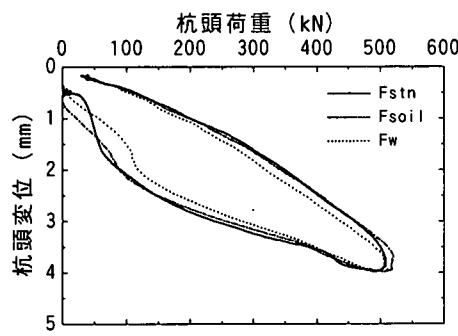


図-19 除荷点法適用結果 (T1杭)

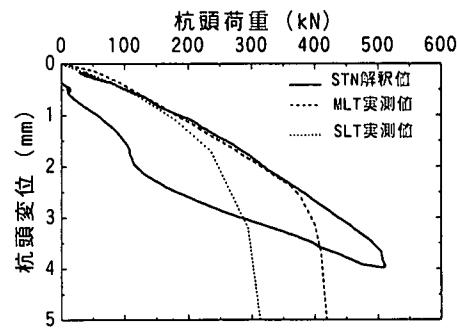


図-22 推定静的荷重～変位関係 (除荷点法 : T1杭)

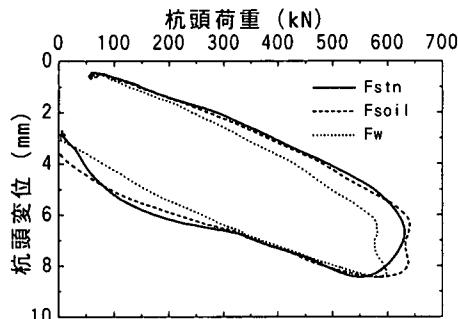


図-20 除荷点法適用結果 (T5杭)

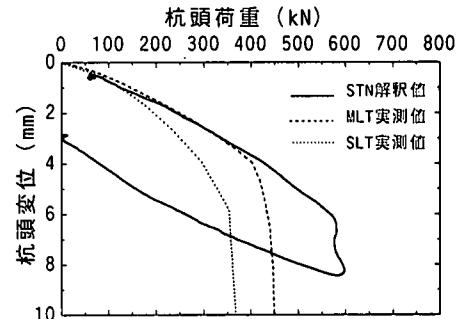


図-23 推定静的荷重～変位関係 (除荷点法 : T5杭)

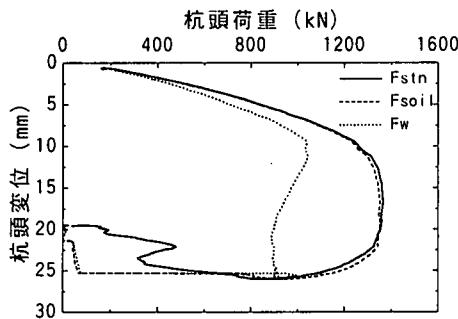


図-21 除荷点法適用結果 (T6杭)

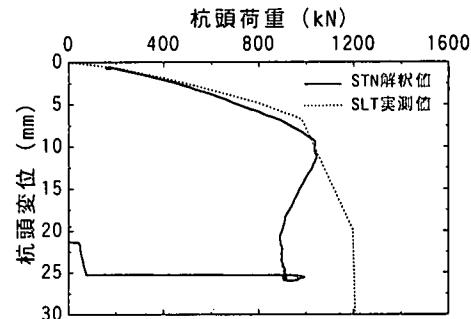


図-24 推定静的荷重～変位関係 (除荷点法 : T6杭)

は T1 杭の場合載荷時の杭体の速度、加速度が小さいことによると考えられる。この場合は、最大荷重時変位と最大変位の差が小さく、弾性範囲内の変位であると思われる。一方、図-20、図-21 では、最大荷重点から最大変位点の間の F_{soil} と F_w の曲線の差が大きく、載荷時の杭貫入速度の影響が大きいことが解る。また、この範囲での F_{stn} と F_{soil} の曲線は差が小さいので、T5 杭、T6 杭では加速度の影響は小さいと考えられる。

また、それぞれの杭において、除荷点法により求められた静的な荷重～変位関係と SLT および MLT の結果を比較したものを図-22～図-24 に示す。図-22、図-23 を見ると、降伏荷重が SLT、MLT、STN 解釈値の順に大きくなっている。これは、載荷試験が SLT、MLT、STN の順序で実施され、SLT、MLT で

それぞれ 30～40mm の沈下量を生じさせているため、繰り返し載荷による地盤強度の増加と杭先端が地盤強度の大きな層へ多く貫入したことによるものと考えられる。一方、図-24 に示した T6 杭では、STN、SLT の順に試験を実施したため、STN 解釈値の方が SLT よりも同一変位で荷重が小さくなっている。図-23、図-24 のように、STN において降伏荷重を超えて載荷された場合、STN の最大荷重時以降の変位における解釈値が増減する傾向が見られる。最大荷重時以降では、荷重の変化は小さいが、杭体速度が大きく変化するため、見かけ上荷重が大きく増減し推定精度が劣ると考えられる。したがって、除荷点法により静的な荷重～変位関係を類推する際には、 F_{stn} の最大荷重時変位までの値を採用すべきであると考えられる。

表-2 地盤モデル

| 深度 GL(m) | 地層 | V_s (m/s) | ρ (t/m ³) | G_0 (kPa) |
|---------------|-----|----------------|-------------------------------|----------------|
| 0.0 ~ -2.7 | ローム | 146 | 1.40 | 29900 |
| -2.7 ~ -4.0 | 粘土 | 148 | 1.33 | 28900 |
| -4.0 ~ -6.5 | 粘土 | 111 | 1.38 | 17000 |
| -6.5 ~ -14.0 | 細砂 | 252 | 2.00 | 12700 |
| -14.0 ~ -16.0 | 細砂 | 305 | 2.00 | 18600 |
| -16.0 ~ -18.0 | 細砂 | 247 | 2.00 | 12200 |
| -18.0 ~ -25.0 | 細砂 | 300 | 2.00 | 18000 |

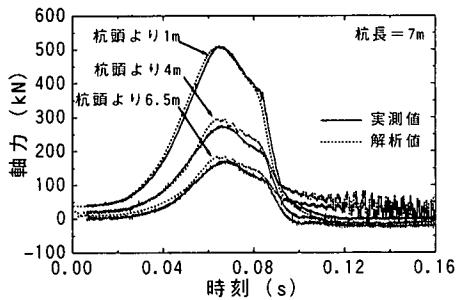


図-25 マッチング軸力時刻歴（波動解析：T1杭）

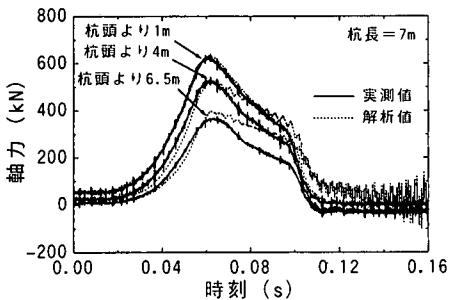


図-27 マッチング軸力時刻歴（波動解析：T5杭）

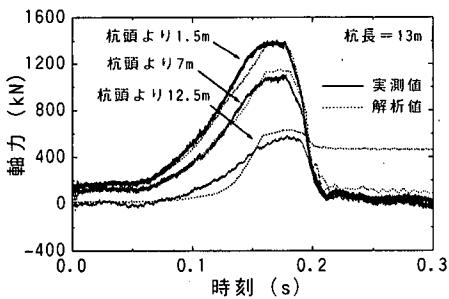


図-29 マッチング軸力時刻歴（波動解析：T6杭）

b) 一次元波動解析法による解析結果

土質柱状図やサイスマックコーン試験による V_s 分布等の地盤調査結果（図-1 参照）より、表-2 に示す通り地盤をモデル化し、T1杭、T5杭、T6杭に対し、一次元波動解析による波形マッチングを実施した。マッチングでは、地盤の剛性 G_0 と周面および先端の地盤強度 τ_{max} 、 σ_{max} を変化させて、STN

表-3 マッチング時初期剛性低減係数 η

| | 周面 | 先端 |
|-----|------|------|
| T1杭 | 0.40 | 0.40 |
| T5杭 | 0.40 | 0.60 |
| T6杭 | 0.15 | 0.30 |

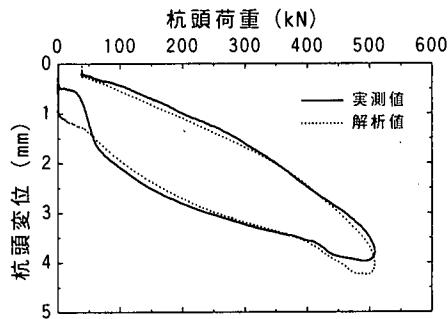


図-26 マッチング荷重～変位関係（波動解析：T1杭）

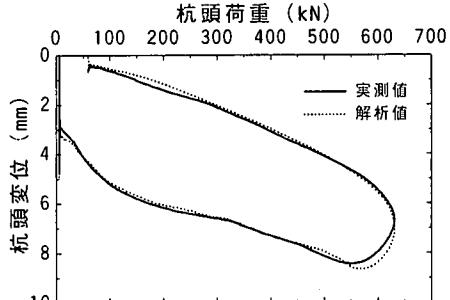


図-28 マッチング荷重～変位関係（波動解析：T5杭）

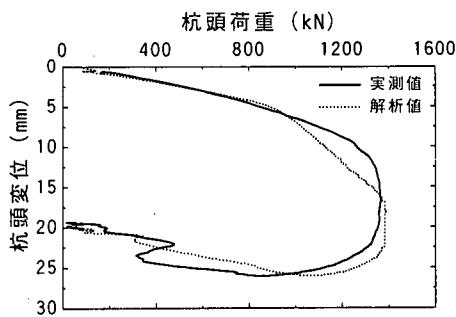


図-30 マッチング荷重～変位関係（波動解析：T6杭）

で実測された荷重～変位曲線と一致する場合を求めた。地盤の剛性は、 V_s から求められた G_0 に 1 より小さい低減係数 η を掛けるものとし、その値を変化させた。杭先端地盤の細砂のポアソン比 ν は、杭先端が地下水位以下の場合で 0.5（完全非排水（解析上は 0.49））、地下水位より上の場合で 0.3（排水）とした。また、地盤強度 τ_{max} 、 σ_{max} は、砂質土

では N 値、粘性土では q_u を参考に初期値を設定し、その値を変化させてマッチングさせた。実測値と一致した結果として、軸力の時刻歴と杭頭の荷重～変位関係を図-25～図-30 に示す。これらの図によれば、軸力および杭頭の荷重～変位関係とともに実測結果とよく一致しており、解析により試験状況が再現できていると考えられる。実測値と解析値がマッチングした場合の初期剛性低減係数 η を表-3 に示す。表-3 によれば、周面抵抗に関する η は T1 杭、T5 杭ともに同じ値であるが、先端抵抗に関するそれは T1 杭、T5 杭で異なっている。これは、T1 杭、T5 杭とも同一地盤に施工されているがその方法が異なり、T5 杭では最終打撃を行っているため、セメントミルク工法の T1 杭と比べ、杭先端の地盤剛性が大きいことによると考えられる。T6 杭も同一地盤に施工されているが、T1、T5 杭と異なり鋼管杭で杭長も長いことと、T6 杭の試験時には地下水位が杭先端以下まで低下したことにより、T1、T5 杭の場合の η とは異なったと思われる。実測値と解析値がマッチングした地盤パラメータを用い、荷重伝達法により求めた静的な杭頭の荷重～変位関係 (STN 解釈値) を図-31～図-33 に示す。なお、荷重伝達法による解析では、いずれの場合も載荷過程で地盤が排水するものとして、ポアソン比 $\mu=0.3$ を解析に用いた。これらの図には、SLT および MLT における試験結果も合わせて示す。また、STN 解釈値における杭頭の荷重～変位関係は、杭の全地盤抵抗力が発揮された変位までの関係を描いている。

図-31、図-32 によれば、降伏荷重が SLT、MLT、STN 解釈値の順に大きくなっている。除荷点法の場合と同様の傾向を示している。図-31～図-33 では、STN 解釈値の曲線は、いずれも降伏荷重までは SLT、MLT とほぼ同じ形状を示し、特に MLT の結果とよく一致している。MLT では、載荷過程において荷重を保持せず一気に増加させるため、STN の載荷状況と同じであり、STN 解釈値と近い結果になると考えられる。また、図-33 は、降伏荷重以降の性状が図-31、図-32 と異なっているが、これは閉端 PHC 杭である T1 杭、T5 杭の場合と比べ、開端鋼管杭である T6 杭では先端部の地盤破壊をうまくモデル化できていないことによると考えられる。

c) FEM 解析法による解析結果

本解析では、地盤を弾性体と仮定して図-34 (T1 杭、T5 杭の場合) に示す有限要素を用いて全応力解析を行った。杭-地盤間にのみジョイント要素を配置した。この場合、周面抵抗力が降伏後、杭体の変位は弾塑性的な挙動を示す。動的解析においては、地盤要素境界に無反射境界を配置した。地盤定数は、

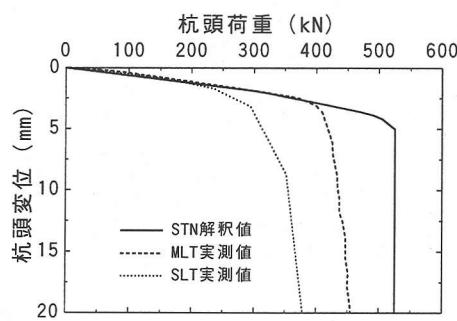


図-31 推定静的荷重～変位関係 (荷重伝達法:T1杭)

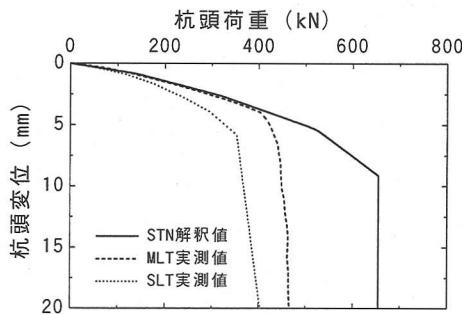


図-32 推定静的荷重～変位関係 (荷重伝達法:T5杭)

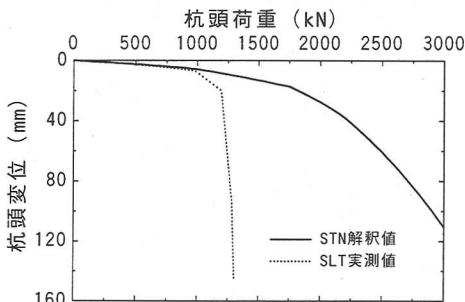


図-33 推定静的荷重～変位関係 (荷重伝達法:T6杭)

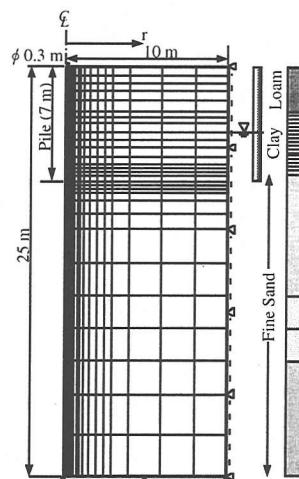


図-34 FEM 解析 メッシュ図

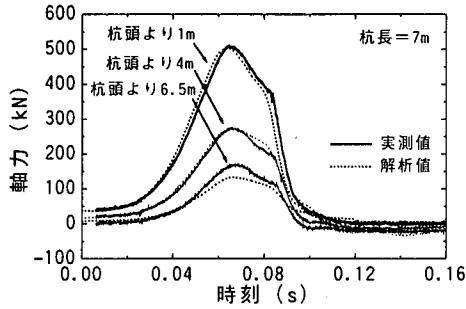


図-35 マッチング軸力時刻歴（動的FEM：T1杭）

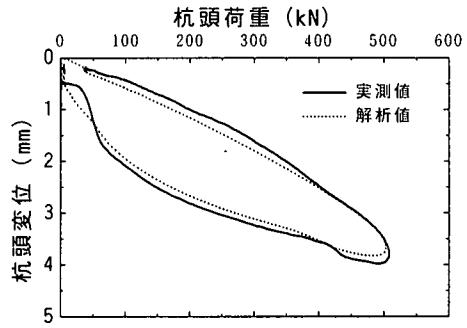


図-36 マッチング荷重～変位関係（動的FEM：T1杭）

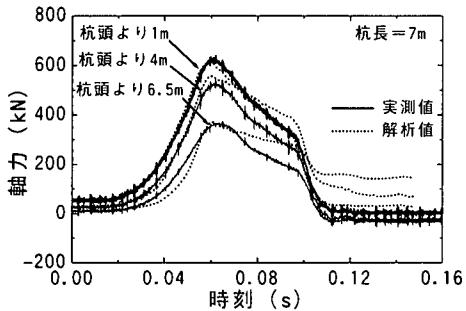


図-37 マッチング軸力時刻歴（動的FEM：T5杭）

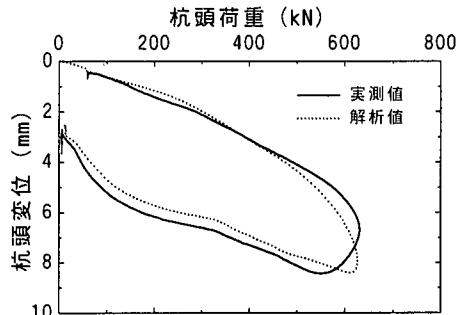


図-38 マッチング荷重～変位関係（動的FEM：T5杭）

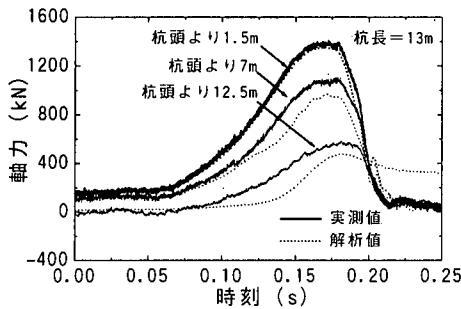


図-39 マッチング軸力時刻歴（動的FEM：T6杭）

一次元波動解析法と同様に表-2 に示すものを用いた。解析に際しては、一次元波動解析法と同様に、地盤の剛性として、 V_s から求められた G_0 に 1 より小さい係数 η を掛けた値を用いた。地盤の初期剛性に対する低減係数 η は、一次元波動解析法の結果を参考に、T1 杭、T5 杭の場合は 0.4、T6 杭の場合は 0.2とした。杭先端地盤のせん断剛性は、一次元波動解析法の結果によると杭周面地盤と異なる値となることが予想されるが、ここでは杭先端および周面の地盤とともに上記の値として解析した。また、STN 時における杭先端部以深に存在する細砂層の排水条件に関して未解明な点も多いが、STN 時の動的解析では細砂のボアソン比 μ を地下水位以下の地盤で 0.5 (完全非排水 (解析上は 0.49))、地下水位より上の地盤で 0.3 (排水) とした。実測値との波形

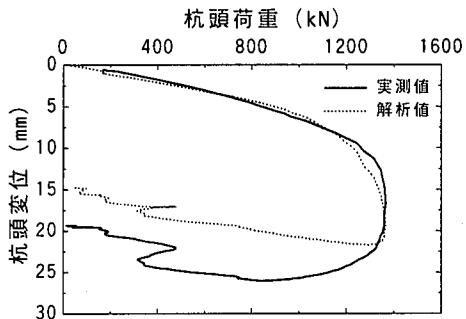


図-40 マッチング荷重～変位関係（動的FEM：T6杭）

マッチングは、ジョイント要素の最大周面摩擦応力分布のみを変化させて解析した。

図-35～図-40 に、T1 杭、T5 杭、T6 杭について、実測値と解析値が一致した場合の軸力の時刻歴と杭頭の荷重～変位関係を示す。これらの図より、地盤のモデル化を簡略化した解析ではあるが、実測値の傾向をうまく表現していることが解る。

地盤の初期剛性に対する低減係数 η は、一次元波動解析法における周面地盤の値とほぼ等しい値用いたが、FEM 解析法と一次元波動解析法では、ほぼ等しい結果が選られることが解る。解析で用いた低減係数 η から求まる地盤のせん断弾性係数は、粘性土地盤では非排水強度の約 1000 倍であり、参考文献¹⁴⁾で示されている関係とほぼ対応している。

図-41～図-43 は、動的解析の結果得られた地盤

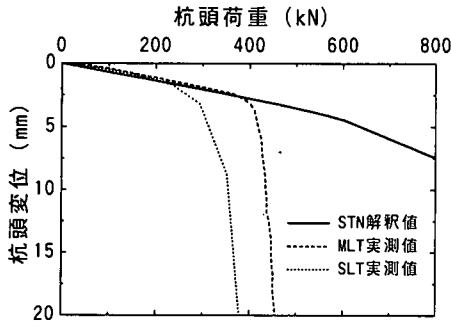


図-41 推定静的荷重～変位関係（静的FEM：T1杭）

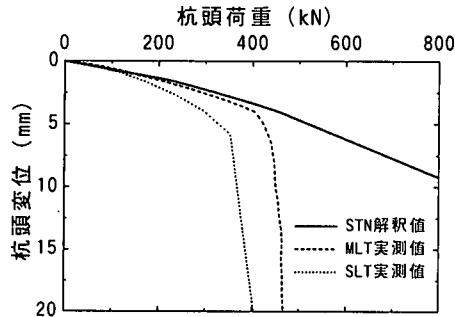


図-42 推定静的荷重～変位関係（静的FEM：T5杭）

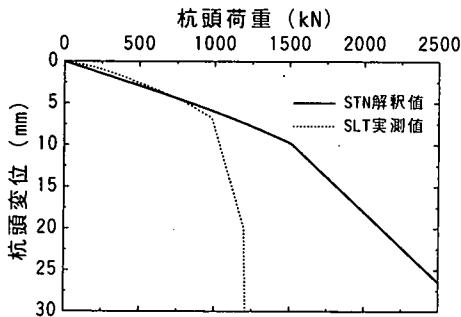


図-43 推定静的荷重～変位関係（静的FEM：T6杭）

パラメータ（ポアソン比 μ は荷重伝達法と同様に0.3を仮定）を用いて、杭の静的な荷重～変位関係をFEM解析により推定したものである。SLT, MLTから得られた実測結果を併せて示したが、FEM解析では、降伏荷重を越える範囲については実測で得られた性状を表現することができなかった。これは、本解析では杭先端地盤を弾性体でモデル化しており、実測値に見られるような先端地盤の破壊性状を十分に表現できていないためである。

d) 解釈結果の比較

T1杭, T5杭, T6杭について、除荷点法、波動解析による方法、FEM解析による方法の3つの解釈法による静的な杭頭荷重～変位関係とSLT, MLTの結果を比較して、図-44～図-46に示す。

これらの図によれば、いずれの杭の場合も3つの解釈法とも降伏荷重点までの曲線形状にはほとん

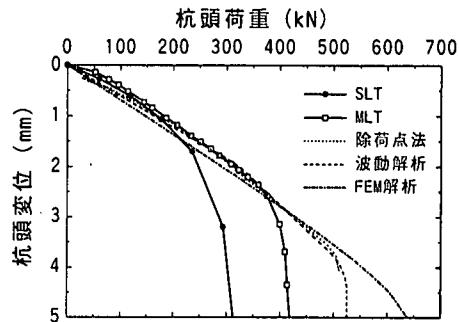


図-44 解釈値の比較（T1杭）

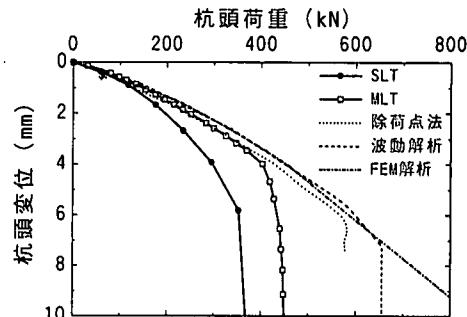


図-45 解釈値の比較（T5杭）

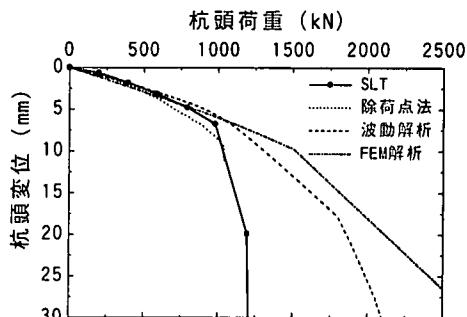


図-46 解釈値の比較（T6杭）

ど差は見られない。しかし、降伏荷重点以後では、3つの解釈法の曲線形状が異なっている。特に、FEM解析による方法は、極限荷重が他の方法と比べかなり大きくなっている。また、波動解析による方法でも、T6杭においてSLTに比べて大きな極限荷重となっている。これは、FEM解析および波動解析における先端地盤モデルが、降伏荷重点以降の性状をうまく表現できていないことによると思われる。これらの方針により降伏荷重以後の評価精度を向上するためには、杭先端の地盤の破壊性状を表現できるモデルの検討が必要であろう。

4. 新しい一質点モデル解析法の提案

杭長が極端に長く波動伝播の影響を受ける杭を除き、今回適用事例に取り上げたような杭では、杭

体を一質点としたモデルと連続体としたモデル(一次元波動解析, FEM 解析)の解析結果には有意な差はない。また、FEM 解析では杭先端地盤の土質により用いるべき構成式が異なり、その設定には工学的な知見が必要であり、かつ、現在のところ、弾塑性パラメータを決定できる土質試験、地盤調査が実施されることは少ない。一方、除荷点法における地盤抵抗パラメータは、地盤の力学的定数との関係が明確でない。そこで、実用上の見地から、杭体を一質点と仮定し、地盤抵抗を物理的意味が比較的明確な周面モデルと先端モデルで表す新しい一質点モデル解析法を提案する。

本モデルは、図-47に示すように、杭を一質点の剛体とし、地盤抵抗は周面については Randolph and Simons モデル、先端については Randolph and Deeks モデルとした。これらの地盤抵抗モデルの各パラメータの初期値は、「3章(3)一次元波動解析による方法」で述べたと同様である。本法では、まず地盤抵抗モデルの各パラメータを土質調査結果に基づき仮定し、STNにおいて杭頭で計測された時刻歴の荷重を図-47のモデルの入力値として、差分法により剛体(杭)の応答変位を計算する。その差分式を以下に示す。ただし、 Δt は差分時間間隔を、 n は差分ステップを表す。

$$\begin{aligned} F_{sm(n)} &= M_1 a_{1(n)} + (C_v + C_r) v_{1(n)} \\ &\quad + C_b (v_{1(n)} - v_{2(n)}) + (K_s + K_b) w_{1(n)} \\ M_2 a_{2(n)} &= C_b (v_{1(n)} - v_{2(n)}) \\ v_{1(n)} &= (w_{1(n)} - w_{1(n-1)}) / \Delta t \\ a_{1(n)} &= (v_{1(n)} - v_{1(n-1)}) / \Delta t \\ v_{2(n)} &= (w_{2(n)} - w_{2(n-1)}) / \Delta t \\ a_{2(n)} &= (v_{2(n)} - v_{2(n-1)}) / \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

こうして得られた変位 w_i を用いて、解析による荷重～変位曲線を描き、実測された曲線と一致するまで地盤抵抗モデルのパラメータを変更して計算を繰り返すマッチング解析を行う。さらに、実測の曲線と一致した場合の地盤抵抗モデルのバネおよびスライダーのパラメータを用い、静的な荷重～変位関係を求める。

本方法では、周面と先端に分け地盤バネを設定するので、STN から得られた静的な先端地盤バネ定数 K_{bd} (非排水条件での値) から非排水条件および排水条件のポアソン比 μ_{ud} , μ_d 用い、排水条件における先端地盤バネ K_{bd} が次式より求められる。

$$K_{bd} = K_{bd} \frac{1 - \mu_{ud}}{1 - \mu_d} \quad (10)$$

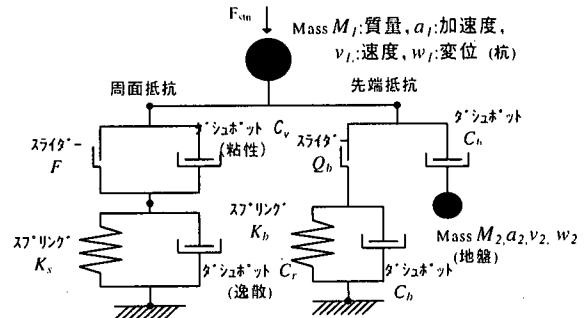


図-47 一質点系提案モデル

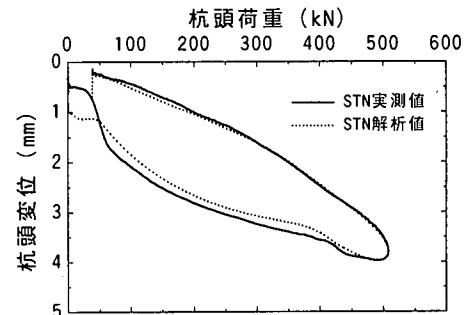


図-48 マッチング荷重～変位関係 (提案法: T1杭)

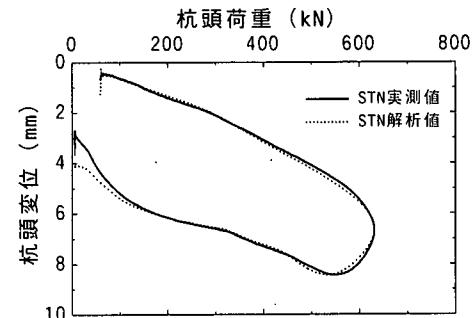


図-49 マッチング荷重～変位関係 (提案法: T5杭)

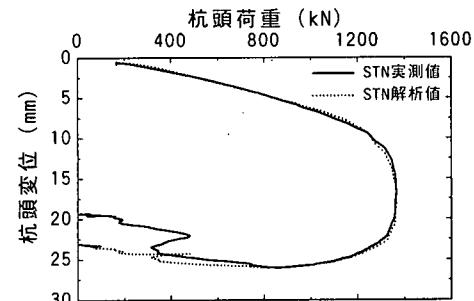


図-50 マッチング荷重～変位関係 (提案法: T6杭)

周面地盤バネ定数は、排水条件に左右されないので、この値と上記の通り求めた排水条件の先端地盤バネ定数から、SLT のように載荷段階で荷重を保持する場合(排水条件での)の荷重～変位関係が推定

できる。また、載荷試験を実施した杭と異なる諸元の杭の同一地盤での荷重～変位関係も推定できる。

本方法による解析を3章の適用事例で示した試験杭に対して実施し、マッチングした結果を図-48～図-50に示す。これらの図によれば、載荷後の残留変位量については、実測値と解析値の差が見られるが、全体的には解析結果は実測結果と良く一致している。

図-51～図-53は、本方法によって推定した静的荷重～変位関係とSLT, MLTの結果および他の解釈法による結果と比較したものである。いずれの図も、本方法による結果は降伏荷重までは一次元波動解析やFEM解析による場合と大差なく、またSLT, MLTともよく一致していることを示している。しかし、極限荷重を比較すると、本方法による場合でも他の方法と同様にSLT, MLTの結果と差がある。今回の結果からは、本方法は一次元波動解析、FEM解析による方法と同程度に杭頭の荷重～変位関係を推定できると言える。本方法は、他の方法と比べ解析時間が非常に短くて済み、現時点では、実用的に有益な方法である。

5. 解釈法の適用分類

STNの試験データの解釈法には、試験後現場で結果を評価できる簡易解釈法から、FEM解析を実施し詳細に検討するものまで、種々の方法があるが、その適用には試験の目的や解釈を実施して得られる結果や解釈法の特徴を考慮して、解釈法を選定する必要がある。そこで、簡易解釈法、除荷点法、一元波動解析法、FEM解析法および本文で提案した一質点系解析法について、それぞれの解釈法の解析モデル、長所、短所、解析を実施するために必要なデータ、解釈の結果得られる情報を比較して作成した解釈法の適用分類を表-4に示す。

簡易解釈法は、物理的意味が明確でなく、どちらかと言えば直感的な手法で、得られる結果もこの方法独自に定義された荷重値で降伏荷重に近いものであるが、静的な荷重～変位関係を得ることはできない。しかし、簡易かつ迅速に結果が得られ、試験現場での結果の概略評価に有用であると考えられる。

除荷点法は、比較的簡易かつ迅速に静的な荷重～変位関係を求めることができるために、試験現場で結果を評価する場合や多数の試験データの解釈には、非常に有用な手法と言える。しかし、杭体を一質点でモデル化しているため、長尺で杭体の弾性変形が大きい場合には、解析結果の誤差が大きくなる。

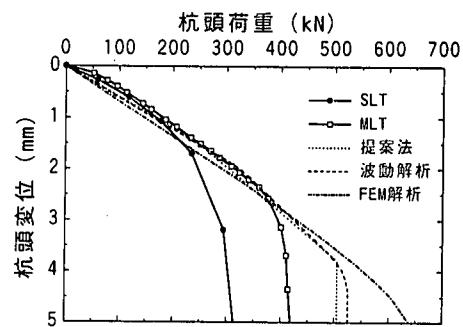


図-51 提案解釈法との比較 (T1杭)

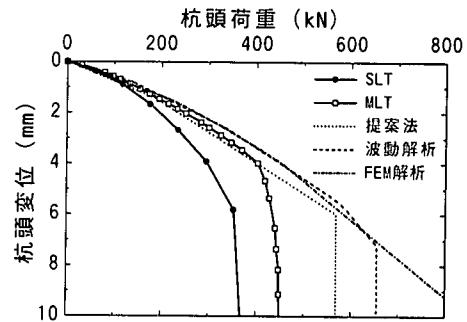


図-52 提案解釈法との比較 (T5杭)

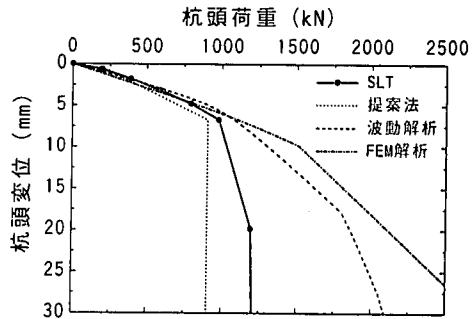


図-53 提案解釈法との比較 (T6杭)

一次元波動解析法は、杭体を一次元弾性連続体でモデル化するため、杭体の弾性変形の大きい長尺杭に対しても適用可能である。また、この方法では杭体の軸力分布が算出できる。載荷試験において軸力を測定している場合には、軸力分布もマッチングできるので更に推定精度を向上できる。

FEM解析法は最も詳細な解釈法であり、載荷時の杭体の挙動だけではなく、周辺地盤の挙動も評価できる。しかし、入力データの作成、計算に要する時間とを含めた解析に時間がかかる。

本論文で提案した解釈法は、杭体を一質点としているが、杭体に作用する地盤抵抗を周面と先端に分けてモデル化しているので、除荷点法と比べ一次元波動解析法およびFEM解析法との関連性が明確で

表-4 解釈法適用分類一覧表

| 解釈法 | 簡易解釈法 | 除荷点法 | 一次元波動解析法 | FEM解析法 | 一質点系提案解釈法 |
|-------|---|--|--|---|---|
| 解析モデル | 物理モデルなし | モデル図：図-12参照 杭：一質点 地盤： ・バネ・スライダーモデル、クランク・リンクモデルで周面抵抗と先端抵抗を含んだ全地盤抵抗を表す。 | モデル図：図-16, 17参照 杭：1次元弾性体 地盤： ・周面抵抗：バネ・スライダーモデル、クランク・リンクモデルを各杭節点に配置。 （Randolphモデル等） ・先端抵抗：バネ・スライダーモデル、クランク・リンクモデルを杭先端に配置。 （Deeksモデル等） | モデル図：図-34参照 杭：弾性体 地盤：連続体 （要素分割し、各地盤要素に弹性又は弾塑性構成モデルと破壊条件を与える） | モデル図：図-47参照 杭：一質点 地盤： ・周面抵抗：バネ・スライダーモデル、クランク・リンクモデルで全周面抵抗を表す。 （Randolphモデル） ・先端抵抗：バネ・スライダーモデル、クランク・リンクモデルで先端抵抗を表す。 （Deeksモデル） |
| 長 所 | ・簡易かつ迅速に結果を求められる。 | ・比較的簡易かつ迅速に結果を求められる。 | ・長尺杭にも適用できる。 (杭体の波動伝播の影響を考慮できる) | ・最も詳細な解析である。 ・長尺杭にも適用できる。 (杭体の波動伝播の影響を考慮できる) ・地盤の逸散減衰を考慮できる。 | ・波形マッピングを行う解析では、パラメータ数が最も少なく容易に行える。 ・波動解析、FEM解析と解析モデル間に連通性がある。 |
| 短 所 | ・解釈法の物理的意味が明確でない。 ・動的効果を結果から分離できない。 ・解析者の先入観が入りやすい。 | ・長尺で弹性変形の大きい杭の場合誤差が大きい。 (杭体の波動伝播の影響を考慮できない) ・最大荷重点以降の解釈値に誤差が大きい。 | ・波形マッピングで波形一致の明確な判断基準がない。 | ・波形マッピングで波形一致の明確な判断基準がない。 ・FEM解析の知識を必要とする。 ・解析に時間がかかる。 | ・長尺で弹性変形の大きい杭の場合誤差が大きい。 (杭体の波動伝播の影響を考慮できない) ・波形マッピングで波形一致の明確な判断基準がない。 ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 ・杭体質量 |
| 必要データ | ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 | ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 ・杭体質量 | ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 ・軸力の時刻歴 ・杭体密度、断面積、弹性係数、弹性波速度 ・地盤調査データ（せん断剛性、密度） | ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 ・軸力の時刻歴 ・杭体密度、弹性係数、弹性波速度 ・地盤調査データ（せん断剛性、密度） | ・杭頭の荷重、変位の時刻歴 ・杭体質量 ・地盤調査データ（せん断剛性、密度） |
| 算出結果 | ・Failure Load (荷重～変位曲線において変位が急激に増加する荷重) | ・杭頭の荷重～変位関係 (荷重保持しない場合) | ・杭頭の荷重～変位関係 (荷重保持する場合、しない場合) ・軸力分布 ・杭体の応答 | ・杭頭の荷重～変位関係 (荷重保持する場合、しない場合) ・軸力分布 ・杭体の応答 ・地盤の応答、応力状態 | ・杭頭の荷重～変位関係 (荷重保持する場合、しない場合) |
| 適用分類 | ・現場での試験結果の概略把握および試験の速報として利用。 | ・現場での試験結果の評価、 ・杭頭の荷重～変位関係の把握、(杭長が長くない場合) ・多数の試験データの整理。 | ・杭長が長い場合の解釈、 (波動伝播の影響が大きい場合) ・試験結果より杭諸元を変えて設計する場合。 ・軸力分布の把握 | ・杭長が長い場合の解釈、 (波動伝播の影響が大きい場合) ・試験結果より杭諸元を変えて設計する場合。 ・軸力分布の把握 ・地盤応答、応力状態の評価 (他構造物への影響の検討) | ・杭頭の荷重～変位関係の把握、(杭長が長くない場合) ・試験結果より杭諸元を変えて設計する場合。 |

ある。この方法では、周面と先端の抵抗力が分離して求められるため、一次元波動解析法やFEM解析法と同様に、設計に際し載荷試験と諸元が異なる杭に対しても荷重～変位関係の推定が可能である。

一次元波動解析法、FEM解析法および本論文で提案した一質点系解析法では、土質調査データを参考にして、地盤パラメータの設定が可能となる。したがって、載荷試験前にPS検層やサイスマックコンによる地盤のせん断波速度の測定や標準貫入試験等による地盤強度の調査を行うことが求められる。

6.まとめ

本研究は、STNの試験データから静的な荷重～変位関係を推定するために行うSTNの解釈法の適用方法を体系化することを目的とした。

まず、同一杭に実施されたSTNとSLTの試験結果を比較することにより、両者における貫入抵抗力の

発揮状況の違いから解釈法に考慮すべき事項を検討した。その結果、STNにおける杭周面の貫入抵抗力は、杭が動的に貫入することによる地盤の動的効果の影響を受けることが解った。また、杭先端の貫入抵抗力は、周面と同様の地盤の動的効果に加え、載荷過程での荷重保持の有無による排水条件の違いの影響があることが明らかになった。

次に、種々のSTNの解釈法を同一の実試験データに対して適用し、結果をSLTと比較することにより、それぞれの特性と適用性を検討した。それによれば、除荷点法、一次元波動解析法、FEM解析法とともに、推定した杭頭の静的な荷重～変位関係は、降伏荷重まではSLTとほぼ一致している。しかし、それ以降の極限荷重までの間は、SLTの曲線形状とかなり異なる。これは一次元波動解析法およびFEM解析法について、杭先端の地盤モデルが降伏以降の性状をうまく表現できていないことによると考えられ、今後の検討課題であることが解った。

さらに、杭を一質点とし地盤抵抗力を周面と先端に分離したモデルによる新しい解釈法を考案し、実試験データに適用した結果、降伏荷重までは SLT の荷重～変位関係とよい一致を示した。本提案法は、一次元波動解析法や FEM 解析法と比べ、解析が簡易かつ迅速であることから、実用上の利用価値が高いものと考えられる。

以上の検討結果から、各解釈法の特徴と解釈の結果得られる情報を整理し、解釈法の適用分類をまとめた。今後は、急速載荷試験を杭の鉛直載荷試験として広く使用するため、各解釈法の適用範囲について、定量的な規範を定めるための研究が必要である。

謝辞：本研究は「地盤工学会 急速載荷試験法研究委員会（岡原美知夫委員長）」および「杭の急速載荷試験法研究会（日下部治委員長）」の活動成果の一部をまとめたものである。執筆に際し御指導を頂いた研究委員会委員および研究会会員各位に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会：基礎構造物における限界状態、土と基礎、Vol. 42, No. 9, pp. 9-14, 1994.
- 2) 青木一二三：杭の載荷試験の最近の動向、土と基礎、Vol. 43, No. 5, pp. 13-18, 1995.
- 3) Bermingham, P. and Janes, M.: An innovation approach to load testing of high capacity piles, *Proc. of the International Conference on Piling and Deep Foundations*, pp. 409-413, 1989.
- 4) 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/I-42, pp. 155-166, 1998.
- 5) 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荷重～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. 1431-1434, 1994.
- 6) Horvath, R.G. : STATNAMIC Load Tests on Drilled Shaft Foundations in Sand, Prepared for Bering-hammer Co. Ltd. (Report #9209), October, 1992.
- 7) 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.
- 8) Kato, K., Uno, K., Maeda, Y., Matsuda, T. and Tsuzuki, M.: Application of vibration analysis of lumped parameter model to statnamic load test on a steel pipe pile, *Proc. of 1st Statnamic Seminar*, pp. 35-44, 1995.
- 9) Nishimura, S. and Matsumoto, T.: Wave propagation analysis during statnamic loading of a steel pipe pile, *Proc. of 1st Statnamic Seminar*, pp. 23-33, 1995.
- 10) Randolph, M.F. and Simons, H.A.: An improved soil models for one-dimensional pile driving analysis, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Offshore Piling*, pp. 1-17, 1986.
- 11) Randolph, M.F. and Deeks, A.J.: Dynamic and static soil models for axial pile response, *Proc. of 4th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, pp. 3-14, 1992.
- 12) Novak, M., Nogami, T. and Aboul-Ella, F.: Dynamic soil reactions for plane strain case, *J. Mech. Eng. Div., ASCE*, 104(EM4) pp. 953-959, 1978.
- 13) 椿原康則、山下清、加倉井正昭：場所打ちコンクリート杭の急速載荷試験例、土と基礎、Vol. 43, No. 5, pp. 22-24, 1995.
- 14) 柴田徹、八嶋厚、江見晋、堀越研一：大口径場所打ち杭の周面摩擦抵抗の推定、第 32 回土質工学シンポジウム、pp. 7-10, 1987.

(1998.9.24 受付)

INTERPRETATION METHODS OF STATNAMIC LOAD TEST RESULTS

Kazushi KATO, Kenichi HORIKOSHI, Tatsunori MATSUMOTO and Osamu KUSAKABE

The Statnamic load test is a kind of rapid load test and its loading duration is within about 200 ms. This test has several advantages such that no reaction beams and no reaction piles are required, and that time for testing is very short compared to the static load test without a delay in pile construction work. However, the Statnamic load test results include dynamic effects such as inertial effect and penetration rate effect. When we use the Statnamic load test instead of the static load test, it is necessary to remove dynamic effects from the test results. This paper studies the interpretation methods of the Statnamic load test results, and systematizes their applicability in practice.