

動的水平載荷試験システムによる鋼管杭の地盤反力評価

Evaluation of subgrade reaction of steel-pipe piles using a dynamic horizontal loading test system

富澤幸一¹⁾・三浦清一²⁾・松本樹典³⁾・Pastsakorn Kitiyodom⁴⁾・小嶋英治⁵⁾・熊谷裕道⁶⁾

Kouichi Tomisawa・Seiichi Miura・Tatsunori Matsumoto・Pastsakorn Kitiyodom・Eiji Kojima and Hiromichi Kumagai

¹⁾ 寒地土木研究所主任研究員, 寒地地盤チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²⁾ 工博 北海道大学大学院教授, 工学研究科 (〒160-0004 札幌市北区北13条西8丁目)

³⁾ 工博 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

⁴⁾ 工博 金沢大学大学院助手, 自然科学研究科 (〒920-1192 金沢市角間町)

⁵⁾ 工博 ジャパンパイル主席研究員, 技術開発部 (〒104-0007 東京都中央区日本橋浜町2-1-1)

⁶⁾ ジャパンパイル主任研究員, 技術開発部 (〒104-0007 東京都中央区日本橋浜町2-1-1)

A dynamic horizontal loading system based on the wave theory was developed as a new on-site pile testing method. In this test method, the horizontal resistance of piles is calculated by applying an impact load in the horizontal direction to the pile heads using a hammer and conducting wave motion analysis of the measured acceleration and strain. A series of dynamic horizontal loading tests of steel-pipe piles was conducted and results were compared with those of a static horizontal loading test conducted at the same site. It was shown that the relationship between the load and pile displacement and the coefficient of horizontal subgrade reaction obtained by the dynamic horizontal loading test has relatively favorable compatibility with the values from the static test.

Key Words: horizontal loading test, dynamic, development, steel pipe pile, subgrade reaction

キーワード: 水平載荷試験 動的, 開発 鋼管杭 地盤反力

1. はじめに

杭基礎設計法の性能規定化に伴い, 地盤性状を的確に把握し, 杭の挙動をより正確に予測することが重要となる。設計時には杭基礎の支持力を地盤調査データから解析するが, 杭の力学挙動を知る最も信頼性が高い方法は実杭の載荷試験である。しかしながら, 一般に実施される静的載荷試験は比較的大きな費用および時間を要する。

そこで筆者らは, 新たな現場杭載荷試験法として, 杭の動的水平載荷試験システムを開発した。本法を現場で活用することで従来の静的水平載荷試験法に対し, 試験費用および時間を縮小できる。本試験システムは「杭の動的水平載荷試験法及び動的水平載荷試験装置」として平成17年11月に特許申請¹⁾した。開発した試験法は, 動的水平載荷装置システム, 同計測システム, 同マッチング解析システムから構成される。

本研究では, 実現場の鋼管杭で動的水平載荷試験を実施し, 杭基礎の水平支持機構を検証した。同時に, 同位置で実施した静的水平載荷試験値と対比し, 開発した試験システムの妥当性を確認し, 今後の活用法について展望した。

2. 動的水平載荷試験法の実用化

平成14年5月に「地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説」²⁾が改訂され, 杭の衝撃載荷試験法が基準化された。この試験法は, 杭打込み時に杭頭に与えた鉛直方向の打撃力を波動解析し, 杭支持力を算定するものである。近年, 打込み杭の載荷試験法として実現場で活用されている。一方, 杭の水平載荷試験方法については静的な方法³⁾のみがあり動的試験法に対応する技術がない。

そこで, 一連の研究により, 新たな杭の動的水平載荷試験法として, 動的水平載荷装置システム, 同計測システムおよび同マッチング解析システムを開発した^{4), 5), 6)}。この試験法の活用により, 鉛直の衝撃試験と同様に, 試験費用・時間を概ね1/3程度に縮小することが可能となる。

杭の動的水平載荷試験法は, 鋼管杭を対象に杭に直接重錘を水平打撃する手法とした。研究手法は, まず現場において鋼管杭の静的水平載荷試験を行い, 次に開発したシステムを用いて動的水平載荷試験を実施し, 静的および動的試験で得られた荷重～杭水平変位量および水平地盤反力係数の結果を対比し, システムの実用性を検証した。

3. システム開発

開発したシステムは、動的水平載荷装置システム、同計測システムおよび同マッチング解析システムである。以下にその概要を示す。

3.1 載荷装置システム

動的水平載荷システムは杭を水平に打撃する装置である。試験対象は剛性の高い鋼管杭とする。他の杭を対象にする場合、例えば、コンクリート既成杭では杭頭破壊の対策として杭と重錘間にダンパーを設ける必要があり、現場打ち杭のように重量の大きい杭では、今回開発した載荷装置よりかなり大きな水平打撃力が必要で、場所打ち杭では衝撃荷重に杭の損傷も懸念される。

今回開発した動的水平載荷試験法の対象の杭種は、最大杭径 1,200mm 程度、最大杭長 50m 程度の鋼管杭を想定している。試験方法は写真 - 1 および図 - 1 に示すように、I 型鋼を用いたモノレールに滑車でぶら下げた質量 2.14t の重錘を人力により加速させ、杭頭部に衝突させて衝撃荷重を与える手法とした。

また、重錘を衝突させるロードセル側には、高い振動数の力が生じないようにコイルバネを介して打撃力を伝達させる。なお、衝撃荷重の変化は、レールの走行距離や人力の増加などにより行う。

3.2 計測システム

本計測システムでは動荷重、加速度、変位、動ひずみを計測する。また、コントローラとしてパソコンを用い、各センサーのアンプ倍率、AD 変換の諸元を設定するシステムとした⁷⁾。したがって、センサー感度のばらつきはチャンネルごとに校正値で補正可能である。

試験の必要最小限の計測物理量は、杭に与えた打撃力とその応答変位の時系列データであるが、地中の杭のひずみや杭および重錘の加速度の時系列データを計測することを考慮し、24 チャンネルの同時計測可能なシステムとした。必要最小限の計測であれば、8 チャンネル仕様で可能である。

AD 変換は 1 チャンネル当たり、分解能 12bit、サンプリングタイム 15 μ s ~ 8ms である。計測終了後、コントローラとして使用しているパソコンに AD 変換したデータを吸い上げる方式を採用している。また、加速度計は圧電方式（最大容量 \pm 5,000G、 \pm 500G および \pm 250G）を用いる。

現場で実施した動的水平載荷試験は、杭の水平方向の変位の計測にインダクタンス式の不動点を必要とするタイプの変位計を用いた。このタイプの変位計は、振動が計測方向のみであれば変位計に曲げは生じないが、杭に大変形を与えるため、計測方向外の振動が生じる。そこで、計測方向外の振動が生じた場合でも変位計の曲げ発生を防ぐため、両端ピンの治具を用いて変位計を設置する。

ロードセル周波数領域は DC ~ 1.7kHz で、変位計はアン



写真 - 1 動的水平載荷試験の状況

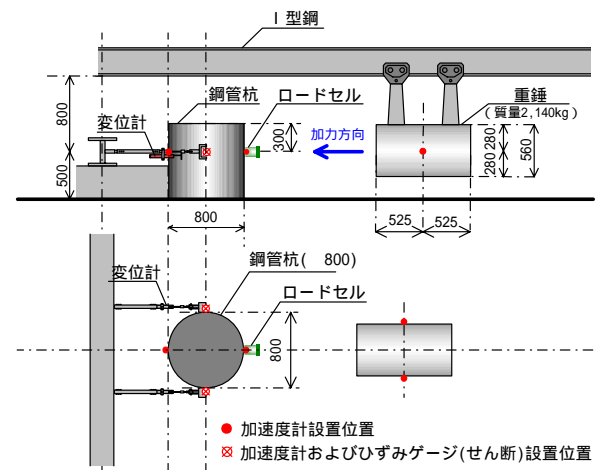


図 - 1 動的水平載荷装置システムとセンサー
(試験杭・重錘・センサー)

プを含めると DC ~ 20Hz、加速度計は 0.7Hz ~ 6.0kHz であるため、動的水平載荷試験に用いるには十分な周波数範囲の計測システムを有する。

3.3 マッチング解析システム

(1) 杭 地盤モデル

試験システムのために開発したソフトは、動的載荷試験を対象とした、水平および鉛直方向の波形マッチング解析の KwaveHybrid⁴⁾ プログラムである。本論文のマッチング解析は、杭頭の荷重を入力として杭頭の変位を求める応答解析である。すなわち、入力波に計測したロードセルの荷重を用い、計測した杭頭の変位に対し解析した杭頭の応答変位がマッチングするように地盤諸元を同定する。地盤諸元の初期値は地盤柱状図の N 値を参考にするが、計測した杭頭の変位に、数値解析の変位応答がマッチングするように地盤諸元を決めるものである。

ただし、同ソフトは動的載荷試験のマッチング解析のみでなく、杭および地盤の諸元が与えられれば、静的載荷試験のシミュレーション解析も可能である。そのため、動的水平載荷試験値のマッチング解析で得られた地盤諸元を用いて静的水平載荷試験のシミュレーションも実施した。

図-2にマッチング解析における杭と地盤のモデルを示す。杭と地盤のモデルは質量 m_i ，杭の剛性は梁要素 $(K_p)_i$ ，地盤は杭節点に連結されたばね ${}_z k$ とダッシュポット ${}_z c$ で表現する。各節点には鉛直方向および水平方向2点の計3点のばねと3つのダッシュポットが連結されている。ただし、動的モデルでは、剛性および減衰ともに、水平方向間、鉛直方向間および水平鉛直間の相互作用は全て考慮していないが、静的モデルでは水平地盤ばねの相互作用を考慮した。ここで、 ${}_x k$ は ${}_x k$ ， ${}_y k$ および ${}_z k$ ， ${}_h k$ は ${}_x k$ および ${}_y k$ ， ${}_z c$ は ${}_x c$ ， ${}_y c$ および ${}_z c$ ， ${}_h c$ は ${}_x c$ および ${}_y c$ の総称である。(以下、添え字の z は x, y, z 方向の総称であり、添え字の h は x, y 方向の総称とする。)

図-2より、杭の運動方程式は式(1)で表される。

$$[K]\{w\} + [C]\{\dot{w}\} + [M]\{\ddot{w}\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに、 $\{w\}$ ， $\{\dot{w}\}$ ， $\{\ddot{w}\}$ は接点の変位，速度，加速度ベクトル， $[K]$ ， $[C]$ ， $[M]$ は剛性，減衰および質量マトリックスであり， $\{F\}$ は外力ベクトルである。 $[K]$ および $[C]$ は、水平および鉛直方向の杭の剛性と地盤ばね剛性および地盤の逸散減衰係数で構成される。また $[M]$ は、杭の質量と鉛直方向の先端地盤の付加質量が含まれる。

杭の運動方程式が非線形であるため、式(1)を増分形式のマトリックス法を用いて3次元の杭・地盤の運動方程式を組み立て式(2)が得られる。

$$\{F\}_t + [K]_t \{\Delta w\}_{t+\Delta t} + [C]_t \{\dot{w}\}_{t+\Delta t} + [M]_t \{\ddot{w}\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

ここに、 $\{F\}_t$ は時刻 $t=t$ における節点外力ベクトルであり、 $\{\Delta w\}_{t+\Delta t}$ は時刻 $t=t$ と時刻 $t=t+\Delta t$ の間の節点変位の増分である。なお、数値解析にはNewmarkの法⁸⁾を用いた。

(2) 動的剛性・減衰のモデル化

図-3に杭周囲の水平および鉛直抵抗地盤モデルを示す。動的な剛性・減衰の初期値の第一次近似値として、地盤を等方弾性体と仮定し、杭周囲における2方向の水平ばね ${}_x k$ ， ${}_y k$ ，水平ダッシュポット(逸散減衰) ${}_x c_r$ ， ${}_y c_r$ ，および鉛直ばね ${}_z k$ ，鉛直ダッシュポット(逸散減衰) ${}_z c_r$ を式(3),(4)で与える⁹⁾。

$${}_x k = {}_y k = \frac{4.0G_s}{d}, {}_z k = \frac{2.75G_s}{\pi d} \quad (3)$$

$${}_x c_r = {}_y c_r = \frac{4.5G_s}{V_s}, {}_z c_r = \frac{G_s}{V_s} \quad (4)$$

ここに、 G_s と V_s は地盤のせん断剛性とせん断波速度、 d は杭の直径である。また、地盤のヤング係数 E_s ，せん断弾性係数 G_s ，せん断速度 V_s ，ポアソン比 ν_s ，密度 ρ_s の関係には式(5)を用いた。

$$V_s = \sqrt{G_s / \rho_s}, \quad G_s = \frac{E_s}{2.0(1.0 + \nu_s)} \quad (5)$$

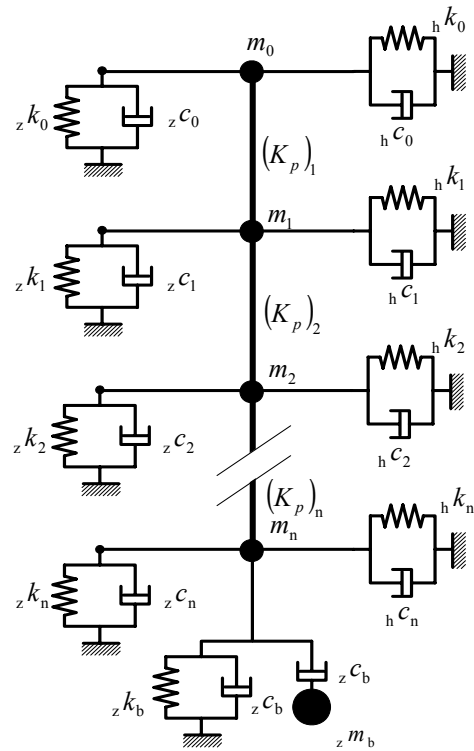


図-2 杭と地盤のモデル

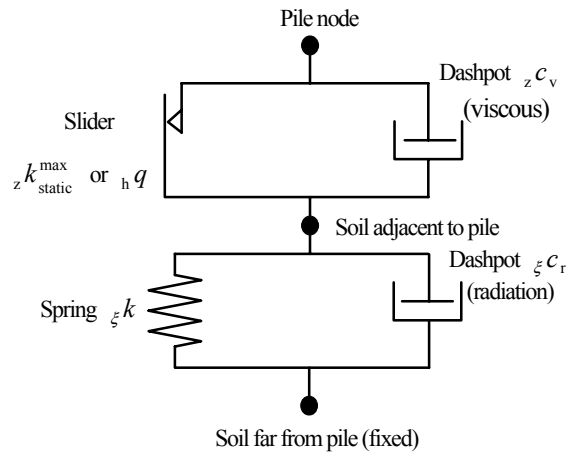


図-3 杭周囲の鉛直・水平抵抗地盤モデル

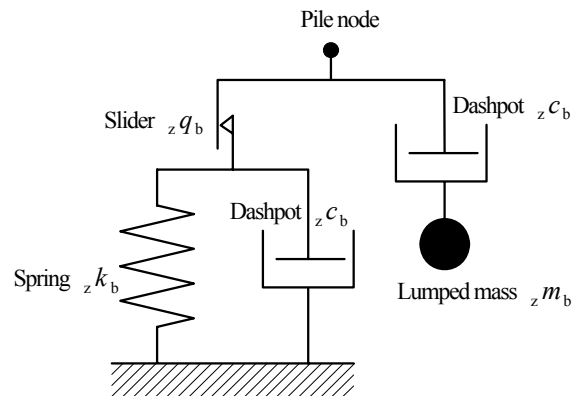


図-4 鉛直先端地盤モデル

スライダは、鉛直方向では最大周面摩擦 $z\tau_{static}^{max}$ 、水平方向では最大水平抵抗 h_q を表す。スライダと並列なダッシュポットは、水平抵抗に用いる場合考慮しないが、鉛直抵抗に用いる場合は考慮する。すなわち、鉛直抵抗に用いる場合は、鉛直周面摩擦が $z\tau_{static}^{max}$ に達した後、杭と地盤の鉛直方向相対速度 Δv が生じているときの周面摩擦の速度効果を表し、杭と地盤に鉛直相対速度 Δv を生じている時の周面摩擦 $z\tau_{total}$ は式(6)で与えられる¹⁰⁾。

$$z\tau_{total} = z\tau_{static}^{max} \left[1.0 + \alpha(\Delta v/v_0)^\beta \right] \quad (v_0 = 1.0 \text{ m/s}) \quad (6)$$

ここに、式(6)における α は砂で 0.1、粘土で 1、 β は砂と粘土で 0.2 程度である。

杭周面と地盤の鉛直方向のスリップが生じた後は、鉛直地盤変位増分 Δw_s を式(7)で定める¹¹⁾。

$$\Delta w_s = \left\{ Q - w_s(t) \right\} \left[1.0 - \exp\left(-\frac{z k \Delta t}{z c}\right) \right] \quad (7)$$

ここに、 $zQ = z\tau_{total} / z k$ であり、 $w_s(t)$ はその時点の地盤変位、 Δt は計算時間間隔である。杭と地盤の相対速度が 0 に戻った時点で杭と地盤は再結合する。

図 - 4 に動的な鉛直先端地盤モデルを示す。第一次近似値として、杭先端における鉛直ばね $z k_b$ 、鉛直ダッシュポット $z c_b$ 、鉛直付加質量 $z m_b$ は式(8)で与える¹²⁾。

$$z k_b = \frac{8G_s}{\pi d(1-\nu_s)} z c_b = \frac{3.4}{\pi(1-\nu_s)} \frac{G_s}{V_s} z m_b = 8d\rho_s \frac{0.1-\nu_s^4}{\pi d(1-\nu_s)} \quad (8)$$

ここに、 ρ_s は地盤の密度である。ただし、水平方向では変位の影響は小さいため、杭先端における水平のばね、ダッシュポット、付加質量は考慮していない。

(3) 静的剛性・減衰のモデル化

静的水平荷を受ける場合の水平地盤ばねと水平地盤ばね間の相互作用には、弾性解の Mindlin 式¹³⁾を用いた。これらの静的解析手法の詳細については、参考文献 14)、15) に詳しい。

また、静的な杭周面の鉛直ばねは、式(9)と式(10)で表す¹²⁾。

$$z k_{static} = (2\pi / 2.75\zeta) \cdot z k \quad (9)$$

$$\zeta = \ln \left[\frac{5.0(1-\nu_s) \cdot l_d}{d} \right] \quad (10)$$

ここに、式(10)の l_d は杭長、 ν_s は地盤のポアソン比である。なお、静的解析では、初期剛性を上記したように弾性解の Mindlin 式で与え、かつ、スライダを考慮することにより、剛性を完全弾塑性として扱う。また、先端地盤モデルでは、変位の影響は過小なため、特別な水平および鉛直の先端地盤モデルは考慮しない。

4. 試験現場概要

鋼管杭の静的水平荷試験および動的水平荷試験を実施した現場は、北海道 道央圏連絡道路 キウス川橋 (A2 橋台) である。橋台基礎に鋼管杭を採用している。図 - 5 に地盤柱状および杭諸元を示す。当該現場には支笏火山灰が介在しており、静的水平荷試験は破碎性の特殊土地盤である火山灰土の水平地盤反力の検証を目的とした。

地盤柱状は、G.L.-6.00m 程度までが N 値 2 程度の火山灰土・シルト、G.L.-6.00 ~ -18.00 までが $N=5 \sim 7$ 程度の火山灰質シルト、それ以深が N 値 50 以上の強層の砂礫中間層および $N=10 \sim 20$ の砂質土層で構成されている。

A2 橋台は、杭伏図を図 - 6 に示したが、 $4 \times 10 = 40$ 本の鋼管杭を採用している。その際、杭は概ね摩擦杭として設計されている。鋼管杭は質量 10t の油圧ハンマを用いて施工した。鋼管杭の諸元は表 - 1 に示すように、800mm、 $L=30\text{m}$ であり、板厚は $t=15\text{mm}$ (上杭 6m) から $t=12\text{mm}$ (下杭 24m) に変化させている。

杭の静的水平荷試験および動的水平荷試験は橋台本杭の鋼管杭を用いて実施した。図 - 6 の杭伏図に示すように、静的水平荷試験は試験杭として H-37 杭を用い、動的水平荷試験には静的試験の隣の杭の H-36 杭を用いた。水平荷重 H に対する杭変位量 y の計測は、それぞれ載荷点位置とした。さらに、動的水平荷試験法の再現性を見極めるため、本杭より細径の T-01 (杭径 500mm、長さ $L=12\text{m}$ 、板厚 $t=12\text{mm}$) を打設し、細径杭での動的水平荷試験も同時に実施した。

5. 杭の静的水平荷試験

H-37 杭の静的水平荷試験は、「土質工学会基準 杭の水平荷試験方法・同解説」³⁾ に準拠した正負交番の多サイクル方式とした。試験は、全長 $L=30.0\text{m}$ の本杭を試験時の地表から $h=800\text{mm}$ 露出した状態で実施した。また、橋台フーチング下面は杭頭から 100mm 下の箇所であるが、静的水平荷試験ではジャッキ位置を杭頭から 300mm 下 (地盤面から 500mm 上) とした。なお、試験は杭頭自由の条件で行なった。

静的水平荷試験は、試験杭 H-37 を、H-27・H-17 を反力杭として油圧ジャッキ加力により載荷する一般的な方式である。試験では、水平荷重 H に対する杭変位量 y 、杭傾斜角 θ の関係を得る。また、試験時の杭応力を確認するために設置したひずみゲージの計測位置は、深さ方向に載荷試験時の地表面から 0.0m、-1.2m、-3.2m、-4.9m、-8.2m、-11.2m である。

現設計では、鋼管杭の水平地盤反力係数 k_h は、深さ 1/ 区間 (0 ~ 3.79m 間) 地盤定数より、杭変位量が杭径 1% 相当 ($y=8\text{mm}$) の地盤反力として $k_h=14,330 \text{ kN/m}^3$ に設定されている。これに対して、静的水平荷試験の水平荷重 H - 杭頭変位量 y の関係から弾性地盤反力法で逆算した実測水平地盤反力係数は $k_h'=19,000 \text{ kN/m}^3$ であった。この結果、実測値は設計値に対して約 1.3 倍

表 - 1 鋼管杭の諸元

杭種	杭長 (m)	杭径 (mm)	板厚 (mm)	ヤング係数 (kPa)	ポアソン比	密度 (t/m ³)
上杭	6.0	800	15	2.06×10 ⁸	0.3	7.8
下杭	24.0		9			

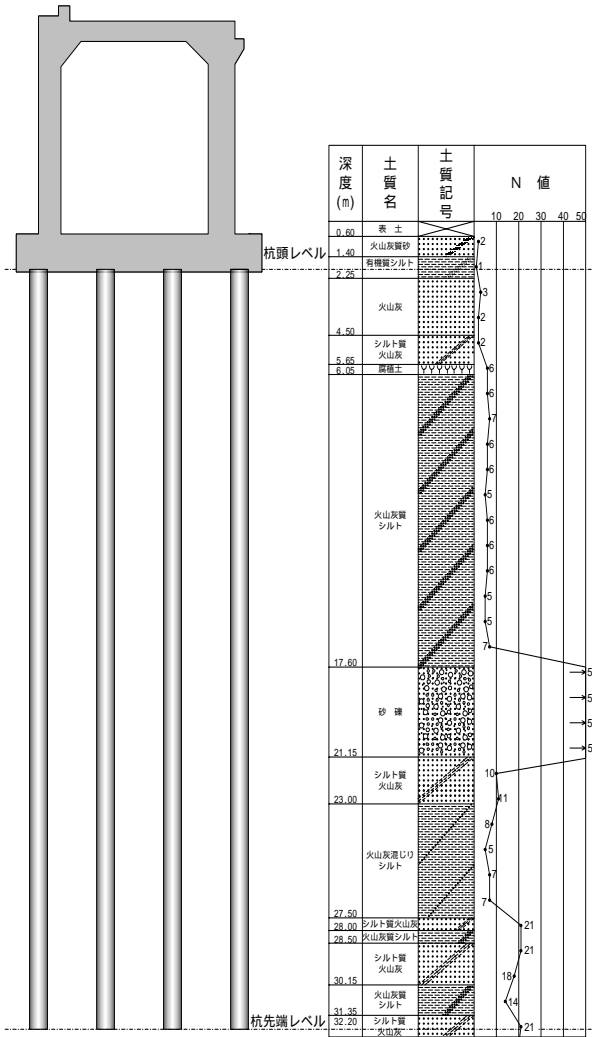


図 - 5 地盤柱状図

($k_b=19,000 \text{ kN/m}^3$ / $k_f=14,330 \text{ kN/m}^3$) の関係にある。
 このため、破砕性の性質をもつ火山灰土であっても当該の鋼管杭は、設計値に対し過大でない範囲で、一定の水平抵抗を確保しているものと判断された¹⁶⁾。

6. 杭の動的水平載荷試験法

6.1 杭の動的水平載荷試験概要

鋼管杭の動的水平載荷試験は、静的水平載荷試験と同様に、本杭を試験時の地表から一定長を突出した状態で実施した。計測する物理量は、重錘の杭に与える衝撃力、杭の水平方向の変位・加速度および杭の縦方向とせん断のひずみである。なお、試験は静的水平載荷試験と同様に、杭頭自由の条件で行なった。

重錘の杭に与える衝撃力は、杭に設置したロードセルに重錘を衝突させて計測した。また、不動梁は2本のH型鋼の杭を柱として打設する門型とした。なお、杭の水平変位の計測高さは静的水平載荷試験と同位置の杭の打撃高さ（杭頭から300mm下、地盤面から500mm上）とした。また、杭の水平方向の加速度の計測位置も変位と同一とした。杭のせん断ひずみ・変位・加速度、重錘の加速度は左右の2点で計測し、相加平均で評価した。なお、加速度計は最大計測±250Gのものを用いた（図 - 1）。

6.2 動的水平載荷試験結果

杭の動的水平載荷試験で得られた杭の時刻歴の計測波形を図 - 7 に示した。図 - 7(a), (b), (c) が、それぞれロードセルによる動的荷重波形、変位計による変位波形、2軸ひずみゲージ杭によるせん断ひずみ波形である。図 - 7 では、動的荷重に対し、変位には時間遅れが生じるがせん断ひずみには時間遅れが見られない。変位に時間遅れが生じるのは、動的効果が生じているためと考えられる。そのため、動的解析が必要となる。一方、せん断ひずみに時間遅れが生じない理由は、打撃荷重が鋼管杭に直に伝播したためである。ただし、計測波形からは、重錘がロードセルを介して鋼管杭に生じた力の伝達は比較的スムーズであったと判断される。

図 - 7(a)におけるロードセルで計測された動荷重の波形は、荷重が立ち上がりから零に戻るまでの時間は約70ms程度であり、荷重の最大ピーク値の20%程度の載荷時間は約40ms程度である。重錘による動的水平荷重および杭のせん断ひずみの時刻歴波形は片側のみに振れる。

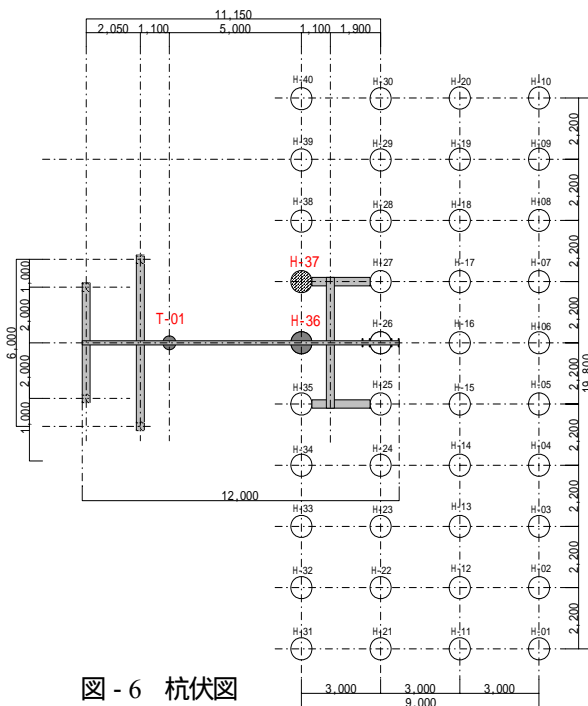


図 - 6 杭伏図

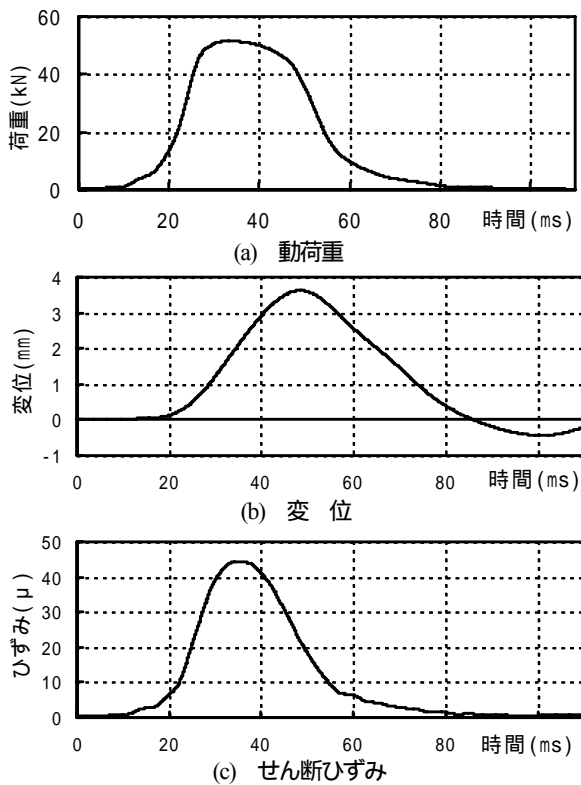


図-7 動的水平載荷試験の時刻歴波形

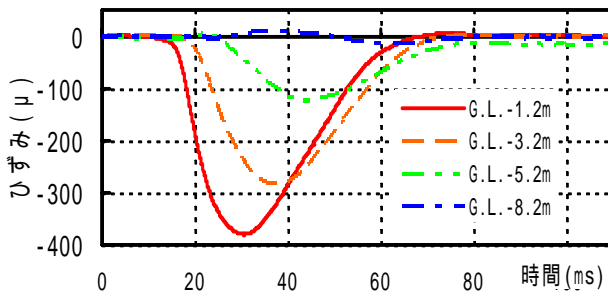


図-8 細径杭の鉛直方向の軸ひずみ時刻歴波形

しかし、杭頭の変位は最初に押された側に変位するが、最大変位後、徐々に変位が減少し、零に戻り、次に最初とは反対方向に振れ、その後、零に戻っている。これは杭に生じる慣性力のためと推定される。

本杭ひずみの計測点は杭頭のみであるため、打撃時の直杭の曲げ応力がどの深さまで生じているかは不明である。ただし、細径杭 (T-01: 500mm, 杭長 12.0m) では、地表面から、G.L.-1.2m, -3.2m, -5.2m, -8.2m に鉛直方向のひずみを計測した。図-8 に細径杭の深さ方向の軸ひずみ分布を示す。この結果、G.L.-1.2m, -3.2m, -5.2m と計測点が深くなるにつれて鉛直方向の軸ひずみが小さくなっており、-8.2m では位相の反転が確認できる。この結果から、細径の地中部第一不動点は-5.2m より以深にあると推定できる。本杭および細径杭の杭特性長 $1/\lambda$ が、それぞれ、3.79m, 2.82mであることを考慮すれば、本杭および細径杭において、本試験装置で充分な杭の曲げを生じさせたものと推定できる。

また、軸ひずみは、深い計測点ほど時間遅れが大きくな

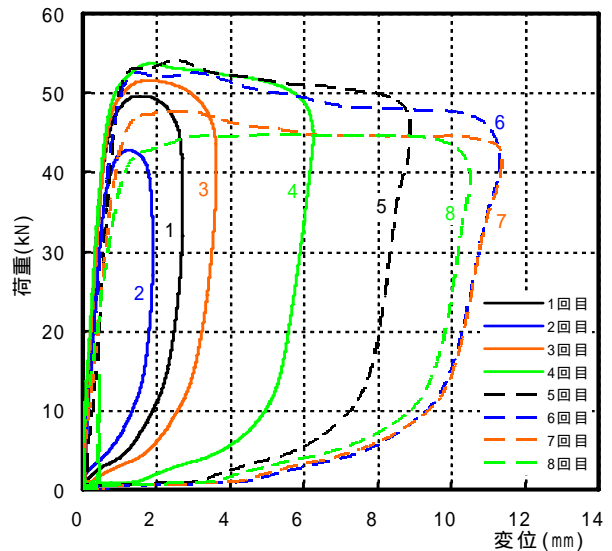


図-9 加振点の動的荷重 - 杭変位量曲線

っており、深いほど動的効果の大きいことが確認できる。なお、細径杭の変位波形では、太径と同様に荷重に対して変位に時間遅れが認められた。

図-9 に動的水平載荷試験の結果から得た、荷重 - 杭水平変位曲線を示す。試験は、打撃力をロードセルで計測し、荷重を少しずつ大きくしながら行なったが、1回目と2回目の荷重の大きさは逆になった。4回目以上は、人数および走行距離で打撃力を大きくしても、荷重は増加せず杭頭の変位のみが増加するようになった。なお、7, 8 回目は人員および走行距離を大きくしたが、荷重は大きくななかった。図中の数字は杭を加振した順番を示す。

この荷重 - 変位量曲線から、以下のことが明らかになった。

小さな衝撃の動的荷重では、明らかな弾性挙動を示す。杭への衝撃の動的荷重が大きくなると徐々に弾塑性的な挙動を示す。

杭の変位の増加域と減少域では荷重 / 水平変位の勾配が異なっている。塑性域が大きくなるに従い、更に顕著となる。

一度、地盤が大きな塑性域の変形を経験すると塑性域の最大荷重が低下し、経験したループをたどる傾向が確認される。

に示した杭の変位増加域と減少域で荷重 / 水平変位の勾配が異なる理由として、杭が増加域では地盤間に隙間が生じるが、減少域ではその隙間が戻るため、地盤の剛性が異なってくると推定される。この地盤の剛性を評価するモデルとしては、変位減少域において地盤ばねを小さく設定するモデルなどが考えられる。

また、の理由として、地盤が何回か塑性域に入ると地盤の剛性が低下し、一度履歴した変位までは小さい力で到達するためと考えられる。

図-9 で杭は明らかに弾塑性的ループを描いているが、図-9, 10 で、杭には残留変位の生じないことが確認できる。この理由として、地盤の地表面付近は塑性領域に達し

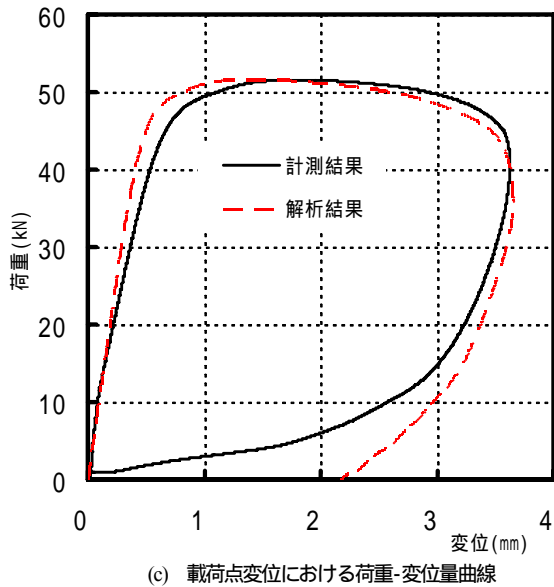
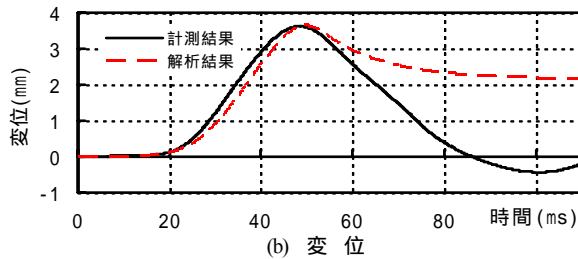
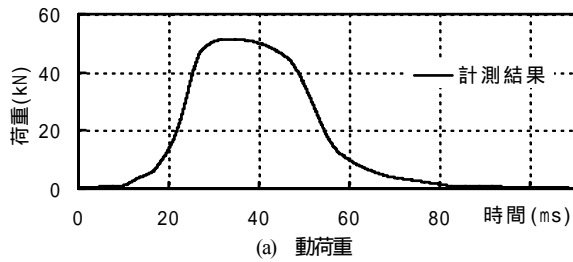


図 - 10 動的的水平載荷試験結果とマッチング結果

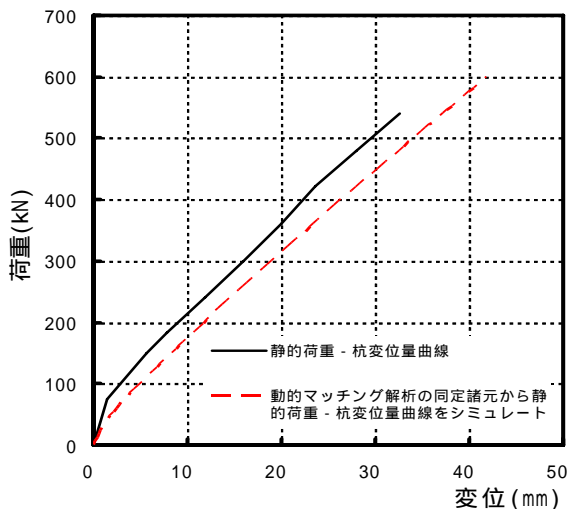


図 - 11 荷重 - 杭変位置量曲線

表 - 2 マッチングで同定した地盤諸元

深 さ (m)	ヤング係数 (kPa)	ポアソン比	最大水平抵抗 (kPa)	密度 (t/m ³)
0.0 ~ 3.6	20,000	0.300	18.1	1.70
3.6 ~ 15.6	24,000	0.300	弾性範囲	1.40
15.6 ~	140,000	0.300	弾性範囲	2.00

注) 図 - 2 のボーリング柱状図の GL は事前調査時の地表を基準としているが、表 - 2 の GL はそれ以下の載荷試験時の地表を基準とした。

ているが、鋼管杭が弾性領域で、かつ、鋼管杭の剛性が地盤の剛性より大きいいため 杭に残留変位が生じないものと推定される。

7. 波形マッチング解析

解析の杭の分割長は 0.40m とした。また、解析モデルは載荷試験の地表を基準に、杭の分割長を考慮し表 - 2 示すように、砂層を 0 ~ 3.6m、シルト層を 3.6 ~ 15.6m、砂礫層を 15.6m 以下とした。深い層の地盤剛性は杭頭の水平変位に影響しないと判断したためである。

杭頭の変位波形の立ち上がりのマッチングで第 1 層の地盤のヤング係数を決定し、変位の最大振幅で地盤の最大水平抵抗を設定した。杭の水平変位は、地表面で大きく地中深くなるにつれて小さくなるため、第 2 層、第 3 層は弾性範囲とし、マッチングするよう地盤のヤング係数を決めた。表 - 2 にマッチング解析で同定された最終の地盤諸元を示す。

マッチング解析では、杭の動的水平荷重を入力とし、出力に杭の載荷点の変位波形を求め、変位計で計測した杭の変位波形と比較した。なお、マッチングに用いた動的荷重のデータは図 - 9 に示す 3 番目の波である。

図 - 10 に動的的水平載荷試験のマッチング解析を示した。図 - 10(a)の実線が入力した動的的水平荷重である。図 - 10(b)に計測および解析の両方の変位波形を示す。実線が計測波形、破線が解析波形であるが、最大変位後にマッチング結果にずれが生じている。これは、杭が衝撃荷重を与られて振動し、杭が最大変位に達してから、杭と地盤間に隙間が生じ、地盤の剛性が変化するためと推定される。この対処法として、変位が減少域に入った時点で、地盤ばねの剛性を切るモデルとするなどの評価の検討が考えられる。しかし、変位の時刻歴は最大変位まで良い対応を示していることからマッチングは良好と判断した。

図 - 10(c)は、載荷点における荷重 - 変位置量関係を計測結果とマッチング解析結果で比較したものである。実線が計測結果、破線がマッチング解析結果であるが、ほぼ等しい曲線であることから、杭水平抵抗すなわち地盤剛性の評価は妥当と考えられる。

図 - 11 は、本杭の静的水平載荷試験と動的レベル試験とから得られた荷重 - 杭変位置量関係を対比したものである。実線は静的載荷試験の計測結果、破線は動的レベル試験のマッチング解析から静的荷重 杭変位をシミュレーション

ョンしたものである。シミュレーションは、表-2に示す同定された地盤諸元と杭の諸元を用いて、KwaveHybridにより行った。その結果、静的水平載荷試験の結果と動的水平載荷試験から算定した荷重-杭変位量関係との互換性は高く、開発した杭の動的水平載荷試験システムの妥当性が検証されたものと考えられる。

図-11より、動的水平載荷試験値に相当する水平地盤反力係数を弾性地盤反力法で算定した。その結果、杭径1%変位($y=8\text{mm}$)の水平地盤反力係数は $k_h''=15,570\text{kN/m}^3$ と算定される。これは、静的水平載荷試験から求めた水平地盤反力係数 $k_h''=19,000\text{kN/m}^3$ に対し0.7の安全値であり、実用範囲内にあると判断された。

8. 結論

杭の動的水平載荷システムを開発し、実現場への適用性を検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 動的水平載荷試験は、従来の方法に比べ試験費用・時間を縮小(約1/3)することのできる、有用性のある新たな杭試験法と考えられる。
- 2) 動的水平載荷試験で得られた、杭に与えた衝撃荷重および杭の応答変位より、衝撃荷重に対する杭の動的水平挙動を把握することが可能である。
- 3) 動的水平載荷試験値は深さ l/β 区間の水平地盤反力を代表しているものと判断される。その際、動的荷重に対応した地盤性状(弾性域~塑性域)は、動的荷重に対する杭変位のマッチング解析から判定される。

- 4) 動的水平載荷試験の地盤・杭ばねモデルを用いた波動解析によるマッチングの結果、静的水平載荷試験値の荷重-杭水平変位量の良い互換性を示した。また、動的水平載荷試験から同定された地盤諸元を用いた静的水平載荷試験のシミュレーションの結果、算定された水平地盤反力係数は実用範囲内にあることが検証された。

9. 今後の展望

一連の研究より、開発した動的水平載荷システムの妥当性が概ね検証され、今後の実現場への適用性が窺われた。今後、試験事例を増やすことにより、同試験法をより精度の高い簡便なシステムとして確立し、通常の施工管理法として実用化する考えである。

その際、杭の動的水平載荷試験には以下が展望される。

- 1) 杭の動的水平載荷試験は、従来の静的水平載荷試験に対し簡便手法であることから、試験杭本数を増やすことで、杭の品質管理や安全性をより精度高く検証することが可能となる。
- 2) 杭基礎の設計前に細径(500mm以下)の試験杭を用いて動的水平載荷試験を実施することで、橋梁設計時において、より適正な杭の水平地盤反力が設定できる。
- 3) 動的水平載荷試験で得られる波動には静的成分(載荷試験値)と動的成分がある。その際、動的成分の考察から、地震時作用力に対する地盤の減衰定数の把握が可能と考えられる。

参考文献

- 1) 特願 2005-335844 号：杭の動的水平載荷試験法及び動的水平載荷試験装置(平成17年11月21日付)
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説(第一回改訂版), pp.227-244, 2002.
- 3) 土質工学会：土質工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説, pp.21-52, 1993.
- 4) 松本樹典, Kitiyodom, P., 小嶋英治：鉛直および水平方向の動的・静的杭載荷試験の解析プログラム開発, 2005年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.479-480, 2005.
- 5) 富澤幸一, 三浦清一, 小嶋英治, 松本樹典：鋼管杭の動的水平載荷試験法(その1-システム開発), 第41回地盤工学研究発表会, pp.1563-1564, 2006.
- 6) 小嶋英治, 松本樹典, 富澤幸一, 三浦清一：鋼管杭の動的水平載荷試験法(その2-実杭の試験検証), 第41回地盤工学研究発表会, pp.1565-1566, 2006.
- 7) 小嶋英治, 桑山晋一：杭の鉛直載荷試験の開発と実験による検証, 第48回地盤工学シンポジウム, pp.99-106, 2003.
- 8) Newmark, N. M.: A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, 85(EM3), pp.67-94, 1959.
- 9) Novak, M., Nogami, T., & Aboul-Ella, F.: Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of Mechanical Engineering ASCE*, 104(EM4), pp.953-959, 1978.
- 10) Litkouhi, S. & Poskitt, T.J.: Damping constant for pile driveability calculations. *Geotechnique*, 30(1), pp.77-86, 1980.
- 11) Simons, H.A. & Randolph, M.F.: A New Approach to one Dimensional pile driving analysis. *5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, pp.1-5, 1985.
- 12) Deeks, A.J. & Randolph, M.F.: A Simple Model for Inelastic Footing Response to Transient Loading. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, 19, pp.307-329, 1995.
- 13) Mindlin, R. D.: Force at a point interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 7, pp.195-202, 1936.
- 14) Kitiyodom, P. & Matsumoto, T.: A simplified analysis method for piled raft and pile group foundations with batter piles. *Int. Jour. for Num. and Anal. Methods in Geomechanics*, 26, pp.1349-1369, 2002.
- 15) Kitiyodom, P. & Matsumoto, T.: A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, pp.85-109, 2003.
- 16) 富澤幸一, 三浦清一：火山灰地盤における杭基礎の支持力特性に関する検討, 土木学会論文集 C, vol.63, No.1, pp.125-139, 2007.

(2007年4月10日 受付)