

杭の動的水平載荷試験システムの開発

杭 試験方法 地盤反力係数

土木研究所 寒地土木研究所 国際会員 ○富澤幸一
ジャパンパイル 技術開発本部 正会員 小嶋英治
ジャパンパイル 基礎設計部 正会員 熊谷裕道
金沢大学大学院 自然科学研究科 国際会員 松本樹典

1. はじめに

基礎構造物設計法の性能規定化に伴い、地盤性状を的確に把握し基礎の挙動をより正確に予測することが重要となる。そこで、新たな現場載荷試験法として杭の動的水平載荷試験システムを研究開発した¹⁾。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²⁾に対し、試験費用および時間を約 1/3 に低減可能となる。開発した試験法は、動的水平載荷システム、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^{3,4,5,6)}。本報では、最初と同試験システムを紹介し、実現場の鋼管杭に対する動的水平載荷試験の検証事例を示す。同時に、同位置で実施した静的水平載荷試験値との対比から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する。

2. 動的水平載荷試験システム

研究開発したシステムは、動的水平載荷システム、同計測システムおよび同マッチング解析システムから構成される。以下にその概要を示す。

2. 1 載荷システム

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。試験対象は曲げ引張り破壊が生じにくい鋼杭とする。今回開発した動的水平載荷試験法では、最大杭径 1,200 mm 程度、最大杭長 50 m 程度の鋼管杭を想定している。載荷（打撃）方法として、人力方式および電動方式を開発した。人力方式では、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重錘を人力により加速させ、杭頭部に衝突させて水平荷重を与える手法とした。荷重の大きさは、重錘の走行距離や人力の増加などによりコントロールする。写真-2 には最近開発した電動方式のシステムを示す。これは、電動モーターで自走する重錘によって杭に水平荷重を作用させる方式である。

2. 2 計測システム

本計測システムでは荷重、加速度、変位、ひずみの時系列を計測する。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⁶⁾。荷重を測定するロードセルと杭の間にコイルばねを挟在させて、打撃力を杭に伝達させている。

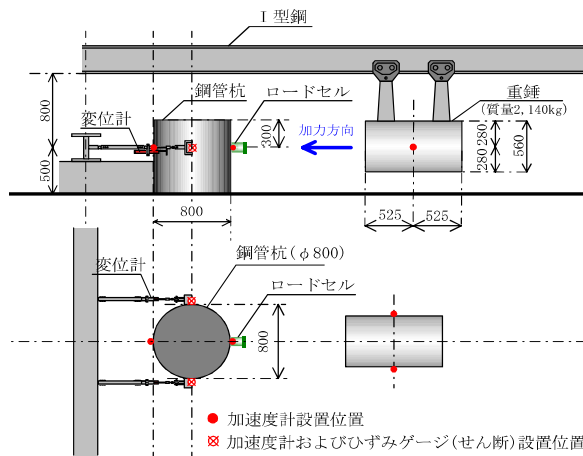


図-1 動的水平載荷システムと計測センサー



写真-1 人力方式による水平載荷システム



写真-2 電動方式による水平載荷システム

Development of method for horizontal dynamic load test system using piles.

Kouichi TOMISAWA (Geotechnical Division, Civil Engineering Research Institute for Cold Region)

Eiji KOJIMA and Hiromichi Kumagai (JAPANPILE Corporation)

Tatsunori MATSUMOTO (Graduate School of Engineering, Kanazawa University)

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、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、32 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 12 bit、サンプリングタイム 15 μs ～8 ms 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 $\pm 5,000\text{G}$ 、 $\pm 500\text{G}$ および $\pm 250\text{G}$ ）を用いる。

現場で実施した動的水平載荷試験では、杭の水平方向の変位の計測に不動点を必要とするインダクタンス式の変位計を用いた。

ロードセル周波数領域は DC～1.7 kHz で、変位計はアンプを含めると DC～20 Hz、加速度計は 0.7 Hz～6.0 kHz であるため、動的水平載荷試験に用いるのに十分な周波数範囲の計測システムである。

2. 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ための KwaveHybrid プログラム⁵⁾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、入力波にロードセルで計測した荷重の時刻歴を用い、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を行える。

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。杭は質点 m_i を有する梁要素、地盤は杭節点に連結された、地盤は杭節点に連結されたばね ξk とダッシュポット ξc 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、 ξk は $x k$ 、 $y k$ および $z k$ 、 ξc 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 ξ 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。

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

ここに、 $\{w\}$ 、 $\{\dot{w}\}$ 、 $\{\ddot{w}\}$ は節点の変位、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。

地盤抵抗が非線形であるため、式(1)を式(2)の増分形式で取り扱う。

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

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 β 法⁷⁾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・減衰は、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） $x c$ 、 $y c$ 、および鉛直ばね $z k$ 、鉛直ダッシュポット（逸散減衰） $z c$ を式(3)、(4)で与える⁸⁾。

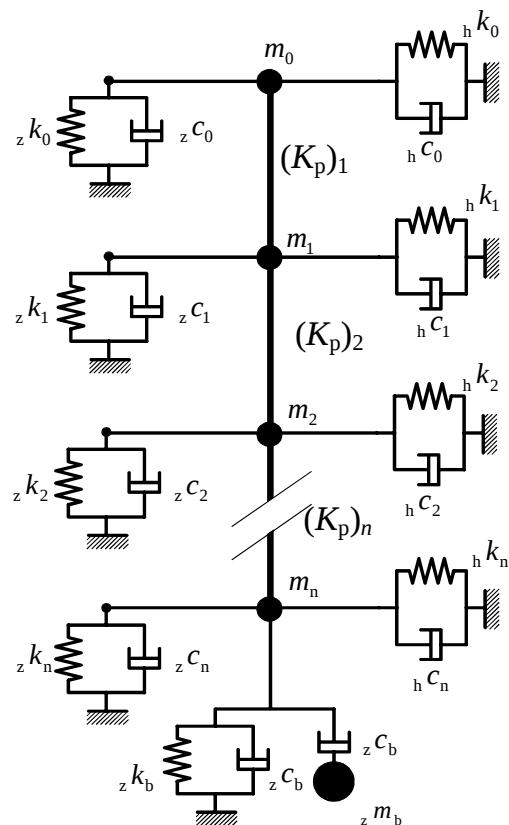


図-2 杭と地盤のモデル

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

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

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 、せん断波速度 V_s 、ポアソン比 ν_s 、密度 ρ_s の関係には式(5)を用いた。

$$V_s = \sqrt{G_s / \rho_s} \quad G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \quad (5)$$

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⁹⁾。

$${}_z \tau_{total} = {}_z \tau_{static}^{max} \left[1 + \alpha (\Delta v / v_0)^\beta \right] \quad (6)$$

ここに、式(6)における α は砂で 0.1、粘土で 1.0、 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¹⁰⁾。

$$\Delta w_s = \left\{ {}_z Q - w_s(t) \right\} \left[1 - \exp \left(- \frac{{}_z k \Delta t}{{}_z c} \right) \right] \quad (7)$$

ここに、 ${}_z Q = {}_z \tau_{total} / {}_z k$ 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。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)で与えられる¹¹⁾。ここに、 ρ_s は地盤の密度である。ただし、杭先端における水平抵抗は考慮していない。

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

(3) 静的地盤ばね

静的水平荷重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、Mindlin 式¹²⁾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 13), 14) に詳しい。静的な杭周面の鉛直ばねは、式(9)で表す¹⁰⁾。

$${}_z k_{static} = (2\pi / 2.75\zeta) \cdot {}_z k, \quad \zeta = \ln \left[\frac{5.0(1 - \nu_s) \cdot l_d}{d} \right] \quad (9)$$

以上の荷重・計測・解析システムにより、動的な水平荷重試験の実施および水平地盤反力の判定が可能となる。同時に本システムの活用により、従来の静的試験法に対し試験費用および時間を縮小（約 1/3）することができる。

3. 実杭による動的な水平荷重試験

動的な水平試験システムの妥当性を検証するため、現場の実杭を用いた試験を実施した。ここでは数件実施した試験の内、その代表的な一例を示す。同現場では事前に静的な水平荷重試験を実施し、動的システムによる試験結果と対比した。なお、本動的試験法で、人力方式による荷重を行った。

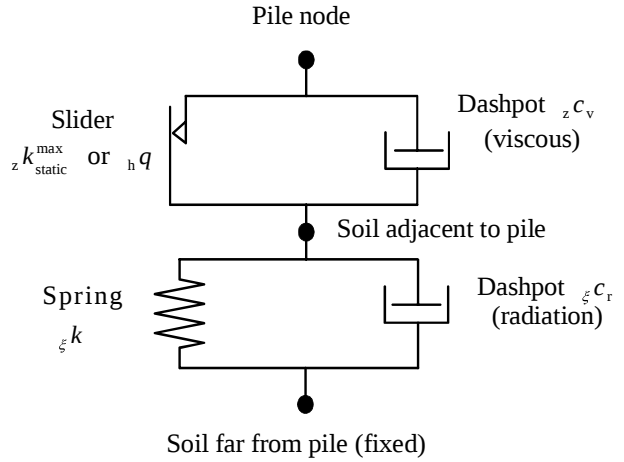


図-3 杭周面の鉛直・水平抵抗地盤モデル

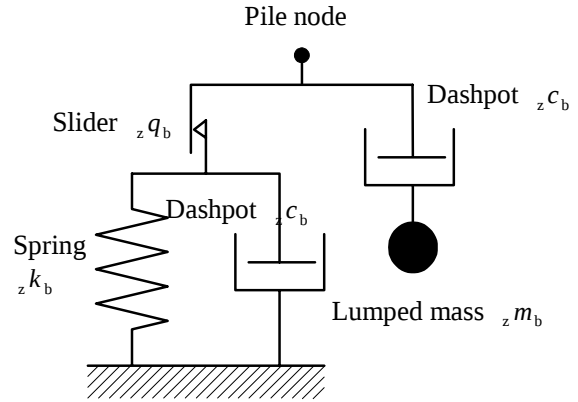


図-4 鉛直先端地盤モデル

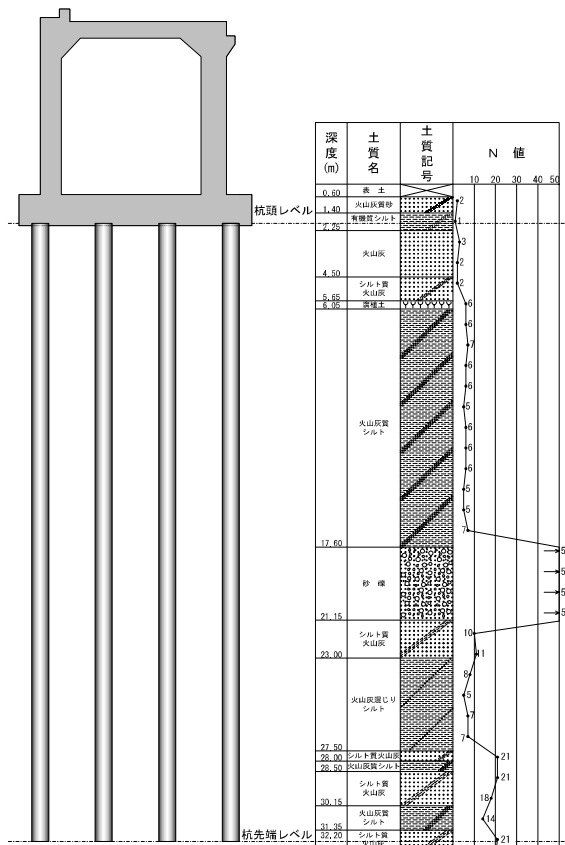


図-5 地盤柱状図

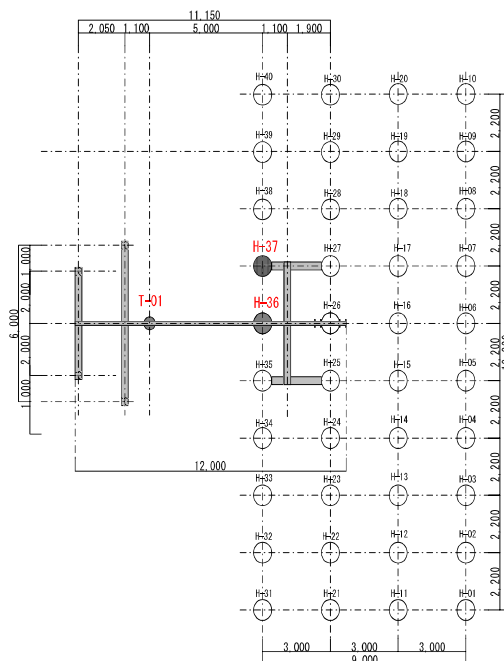


図-6 杭伏図

3. 1 現場概要と静的および動的的水平載荷試験

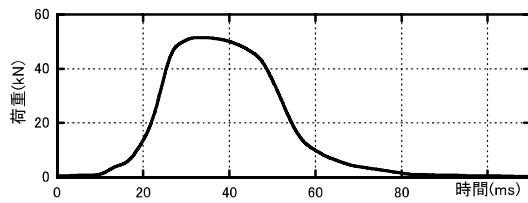
北海道管内の橋台基礎の鋼管杭に対して静的および動的的水平載荷試験を実施した。図-5 に地盤柱状および杭基礎姿図を示す。地盤は、G.L.-6.0 m 程度までが N 値 2 程度の火山灰土・シルト、G.L.-6.0～-18.0 m までが $N=5\sim7$ 程度の火山灰質シルト、それ以深が N 値 50 以上の砂礫中間層および $N=5\sim20$ の火山灰質シルト層で構成されている。

図-6 に橋台の杭伏を図示したが、 $4\times10=40$ 本の鋼管杭を採用している。鋼管杭の諸元は、杭径 $d=800$ mm、 $L=30$ m であり、板厚は $t=15$ mm (上杭 6m) から $t=12$ mm (下杭 24m) である。杭伏図に示すように、静的水平載荷試験の試験杭として H-37 杭を用い、動的的水平載荷試験では静的試験杭の隣の H-36 杭を用いた。水平荷重 H に対する杭変位量 u の計測は、それぞれ載荷点位置とした。

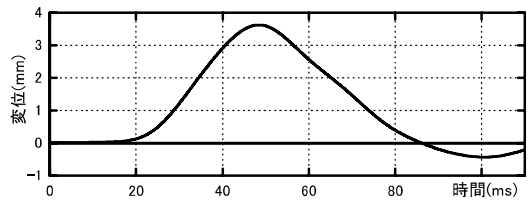
H-37 杭の静的水平載荷試験は、土質工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説²⁾に準拠した正負交番の多サイクル方式とした。試験は、全長 $L=30.0$ m の本杭を試験時の地表から $h=0.8$ m 露出した状態で実施した。現設計では、鋼管杭の水平地盤反力係数 k_h は、深さ $1/\beta$ 区間 ($0\sim3.79$ m 間) の地盤定数より、杭地表面変位量が杭径 1% 相当 ($u=8$ mm) の地盤反力として $k_h=14,330$ kN/m³ に設定されている。これに対して、静的水平載荷試験の荷重 H -変位量 u の関係から弾性地盤反力法で逆算した実測水平地盤反力係数は $k_h'=19,000$ kN/m³ であった。この結果、実測値は設計値に対し約 1.3 倍 ($k_h'/k=19,000$ kN/m³/14,330 kN/m³) の関係にある¹⁵⁾。

3. 2 動的的水平載荷試験結果

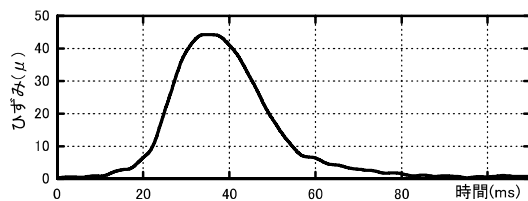
杭の動的的水平載荷試験で得られた動的シグナルを図-7 に示した。図-7(a), (b), (c) は、それぞれロードセルによる動的荷重波形、変位計による変位波形、2 軸ひずみゲージによるせん断ひずみ波形である。図-7 では、動的荷重に対し、変位には時間遅れが生じるがせん断ひずみには時間遅れが見られない。変位に時間遅れが生じるのは、地盤の減衰などの影響による動的効果が生じているためである。一方、せん断ひずみに時間遅れが生じない理由は、打撃荷重が鋼管杭に直に伝播したためである。図-7(a) の計測波形からわかるように、水平打撃力には高周波成分が見られず、荷重が立ち上がりから 0 に戻るまでの時間は約 70 ms 程度であり、荷重のピーク値の 20% 以上の力の載荷継続時間は約 40 ms 程度である。重錘による動的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。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、0 に戻り、次に最初とは反対方向に振れ、最終的に 0 に戻っている。これは杭に生じる慣性力のためである。



(a) 水平荷重

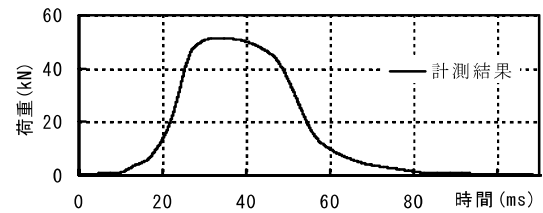


(b) 水平変位

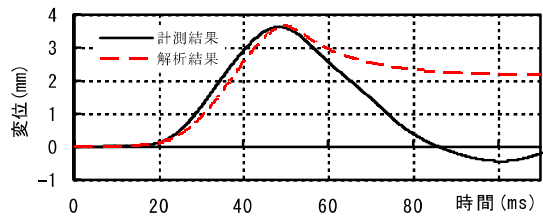


(c) せん断ひずみ

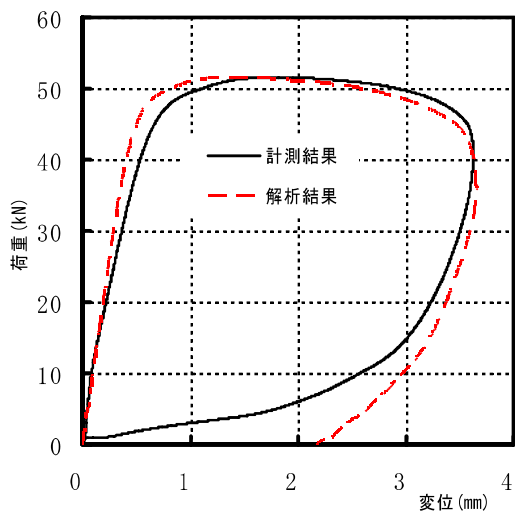
図-7 動的水平載荷試験の時刻歴波形



(a) 水平荷重 (入力波として使用)



(b) 水平変位 (試験および波形マッチング結果)



(c) 荷重-杭変位量関係

(試験および波形マッチング結果)

図-9 動的水平載荷試験結果とマッチング解析結果

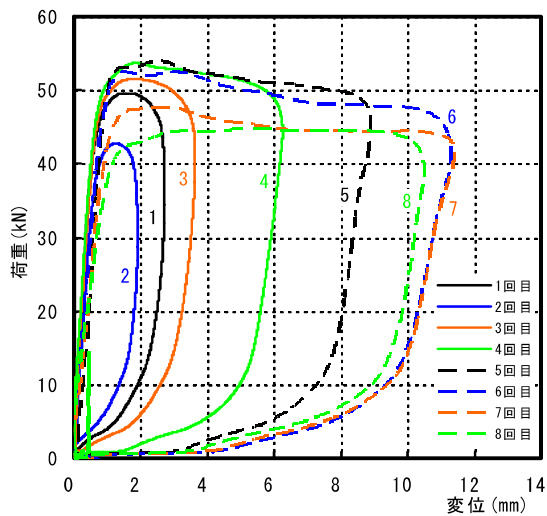


図-8 加振点の動的荷重-杭変位量曲線

図-8 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、基本的には、荷重を少しずつ大きくしながら行なった。4 回目以上は、錘重の衝突速度を大きくしたが荷重は増加せず杭頭の変位のみが増加した。

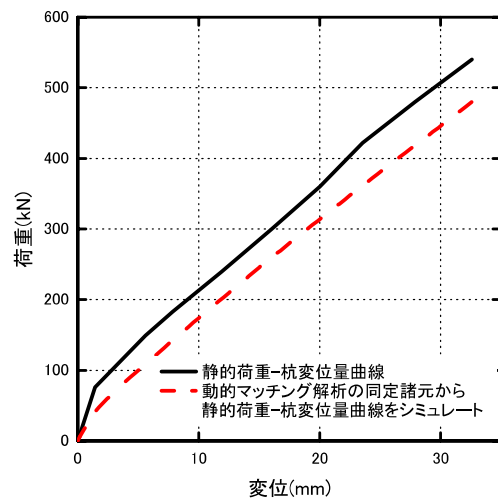


図-10 静的載荷試験における荷重-杭変位量曲線結果とシミュレーション

4. 波形マッチング解析

図-9 に 3 目荷重の計測値に対する動的水平載荷試験のマッチング解析を示した。図-9(a)の実線が入力した動的水平荷重である。図-9(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、杭が衝撃荷重を与えられて振動し、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。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される。図-9(c)は、載荷点における荷重—変位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-10 は、本杭の静的水平載荷試験と動的水平載荷試験から得られた荷重—杭変位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、破線は動的水平載荷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したものである。シミュレーションは、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。図より、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 0.8 の安全値であり、実用範囲内にあると判断された。

5. 結論

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

- 1) 動的水平載荷試験法は、従来の静的試験法に比べ試験費用・時間を縮小（約 1/3）することのできる有用な杭試験法と考えられる。
- 2) 動的水平載荷システムは工学的研究から成り立ち、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から構成される。
- 3) 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、杭の水平地盤反力の把握が可能である。
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、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。

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)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.
- 3)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.
- 4)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.
- 5)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.
- 6)富澤幸一，三浦清一，松本樹典，Pastsakorn Kitiyodom，小嶋英治，熊谷裕道：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，土木学会 応用力学論文集，Vol.10, CD-ROM, 2007.
- 7)Newmark, N. M.: A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, 85(EM3), pp.67-94, 1959.
- 8)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.
- 9)Litkouhi, S. & Poskitt, T.J. : Damping constant for pile driveability calculations. *Geotechnique*, 30(1), pp.77-86, 1980.
- 10)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.
- 11)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.
- 12)Mindlin, R. D.: Force at a point interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 7, pp.195-202, 1936.
- 13)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.
- 14)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.
- 15)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.