

鋼管杭における動的水平載荷試験法の開発

北海道開発土木研究所

○国際会員 富澤 幸一

北海道大学大学院工学研究科

国際会員 三浦 清一

ジャパンパイル(株)技術開発部

正会員 小嶋 英治

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、杭の変形挙動をより正確に予測することが重要となる。設計時には杭変形・地盤反力を地盤調査データから解析するが、杭の実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、従来の静的載荷試験は一般に比較的大きな費用および時間を要する。そのため、杭の鉛直載荷試験法では静的試験に対して簡便な衝撃載荷試験¹⁾が既に確立されている。ただし、杭の水平載荷試験には動的試験に該当するものがない。

そこで筆者らは、共同研究により、試験費用が安価となり試験時間を短くできる新たな手法として、杭の動的水平載荷試験の試験システムを開発した。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。本報では、動的水平載荷試験の鋼管杭への適用を試み、同時に実施した静的水平載荷試験成果との対比から開発した試験システムの妥当性を検討した。さらに、本試験システムの活用性について展望した。

2. 研究の背景と動的水平載荷試験の実用化

杭の鉛直載荷試験法については、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、衝撃載荷試験法が基準化された。この試験法は、リバウンド管理法とは異なるものの、杭打込み時に杭頭に与えた打撃力を波動解析し杭支持力を算定するものである。静的な押し込み試験に対して安価かつ簡便となることから、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、静的水平載荷試験方法のみがあり動的システムに対応する技術が無い。この理由として、既成杭の打撃施工法には杭リバウンド量による支持力算定方法があり、鉛直方向の動的載荷試験方法が開発され易い土壌にあったのではないかと想像する。

そこで、一連の研究から、杭にハンマ打撃などの水平衝撃力を作用させ、波動解析により杭水平抵抗を求める杭の動的載荷試験システムを開発³⁾⁴⁾し実用化した。この試験法の活用により、従来試験法に対して試験費用・試験時間を約1/3程度に大幅に縮小することが可能となる。この開発のテーマは、解析システムと同時に、打撃装置を開発しなければならない点にある。この際、杭頭に過大な水平方向の打撃を与えると杭頭破壊の問題が生じるが、北海道の道路橋の既成杭には鋼管杭の採用が比較的多いという理由から対象を鋼管杭に絞り、動的水平載荷試験の全体システムの開発を急務とした。開発研究のために、実現場の鋼管杭を用いてまず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、主に静的および動的試験で得られた荷重～杭水平変位量の試験成果の比較をすることで、開発システムの妥当性を検討した。

3. 試験現場概要と試験杭

鋼管杭の静的および動的水平載荷試験を実施した現場は、一般国道337号 道央圏連絡道路 千歳市 キウス川橋 (A2橋台) である。図1に地盤柱状および橋台基礎杭を示す。当該現場には支笏火山灰が深く介在しており、静的水平載荷試験の目的は破砕性地盤である火山灰土の砂質土と対比した水平地盤反力を検証することである。地盤柱状は、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=5～7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=10～20の砂質土およびシルト層で構成されている。

A2橋台は、図示するようにN=4×10=40本の鋼管杭が採用されている。その際、鋼管杭は概ね摩擦杭として設計されている。鋼管杭はW=10tonの油圧ハンマで打込み施工した。杭の諸元はφ800mm・L=30mで、杭厚は=15m(上杭6m)からt=12mm(中杭12m、下杭12m)に変化させている。

杭の静的および動的水平載荷試験は橋台の実杭を用いて実施した。図2に杭伏図を示す。静的水平載荷試験は試験杭としてH-37杭を用い、反力杭はH-27杭とH-17杭とした。動的水平載荷試験は静的試験の杭と近いH-36杭で実施した。荷重に対する杭変位量の計測は、それぞれ載荷点位置としている。さらに、動的水平載荷試験の再現性を見極めるため杭径φ500mm、長さL=12m、杭厚t=12mm T-01を打設し、細径杭での動的水平載荷試験も同時に実施した。

Development of method for dynamic horizontal load test using steel-pipe piles

Kouichi TOMISAWA (Geotechnical Division, Civil Engineering Research Institute of Hokkaido)

Seiichi MIURA (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

Eiji KOJIMA (JAPANPILE Corporation, Engineering Development Division)

4. 静的水平載荷試験の概要・試験結果

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」⁵⁾ に準拠した正負交番の多サイクル方式で実施した。試験杭 H-37 は、全長 L=30.0m の本杭を試験時の地表から h=800mm 露出した状態で行った。また、橋台のフーチング下面は杭頭から 100mm 下の箇所であるが、静的水平載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。

静的水平載荷試験は、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 に対する杭頭変位量 y の関係を得る。また、試験時の杭応力を知るために設置したひずみゲージの計測位置は、垂直方向に載荷試験時の地表面から ①0.0m, ②-1.2m, ③-3.2m, ④-4.9m, ⑤-8.2m, ⑥-11.2m の深さとした（図 1）。油圧ジャッキによる計画最大荷重 Hmax は、基準変位量 8mm(杭径 1%)以上の水平挙動についても確認するため、杭径 4%=32mm に対応する Hmax ≒ 600kN とした。

静的水平載荷試験の結果では、水平荷重 H～杭変位量 y の関係から、現設計法に従い弾性地盤反力法で逆算した基準変位量相当の実測水平地盤反力係数 k' は $k' = 26000\text{kN/m}^3$ であった。これは、設計時に 1/β 区間（深さ約 3～4m）の地盤定数から設定されている設計水平地盤反力係数 $k = 14330\text{kN/m}^3$ の約 1.8 倍である。この結果、火山灰土中の本橋台基礎杭は設計に対し過大でない範囲で、安定性を確保しているものと判断される。

5. 杭の動的水平載荷試験法

5. 1 試験システム

杭の動的水平載荷試験システムを写真 1 および図 3 に示す。開発したシステムは、図示するように質量 2,140kg の重錘を、I 型鋼を用いたモノレール方式で吊り、人力で重錘を加速し、杭頭部に衝突させて衝撃荷重を与える比較的簡便な手法である。レールの走行距離により衝撃荷重を変化させる。重錘を吊すレールは、H 鋼を地中に打設し反力梁として設置する。本システムは、杭径 φ1000mm 以下の鋼管杭を対象としたものである。

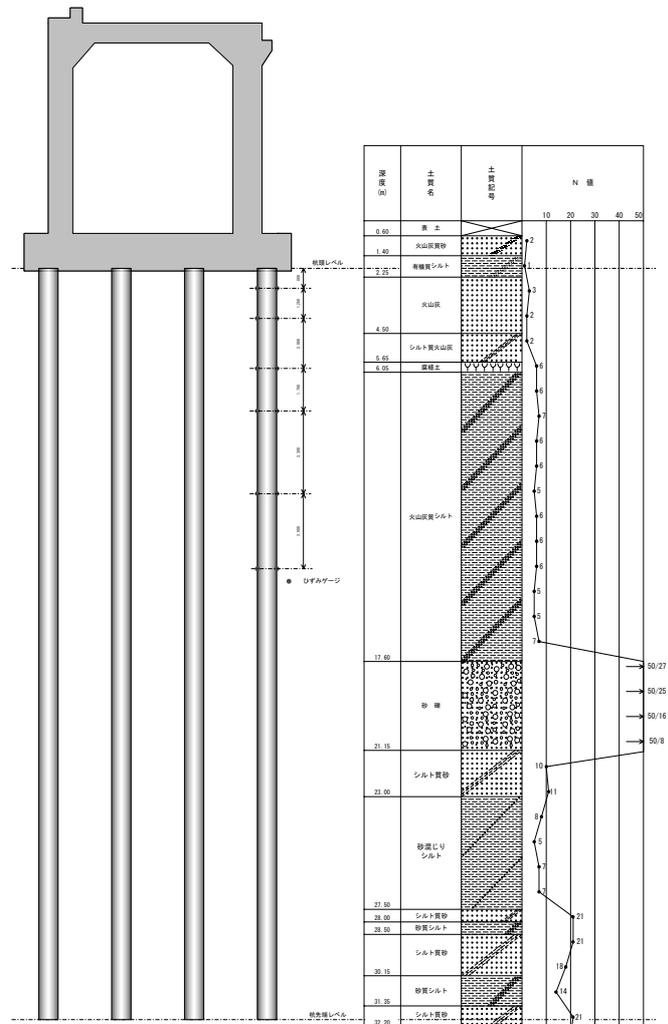


図 1 地盤柱状図

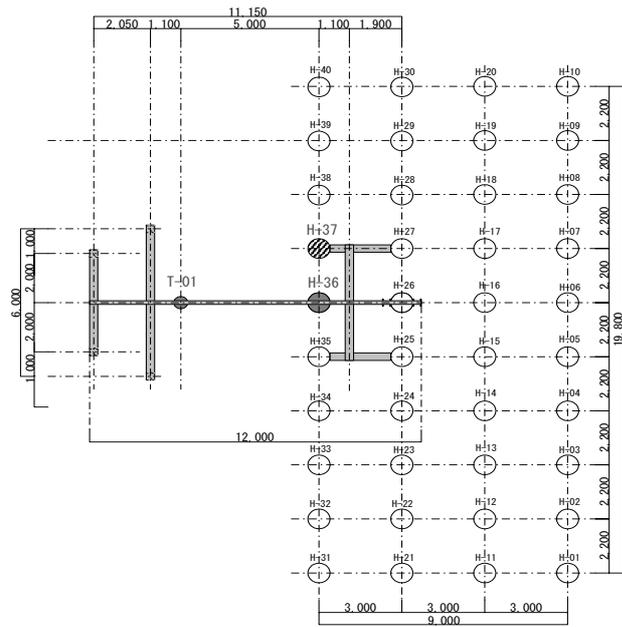


図 2 杭伏図

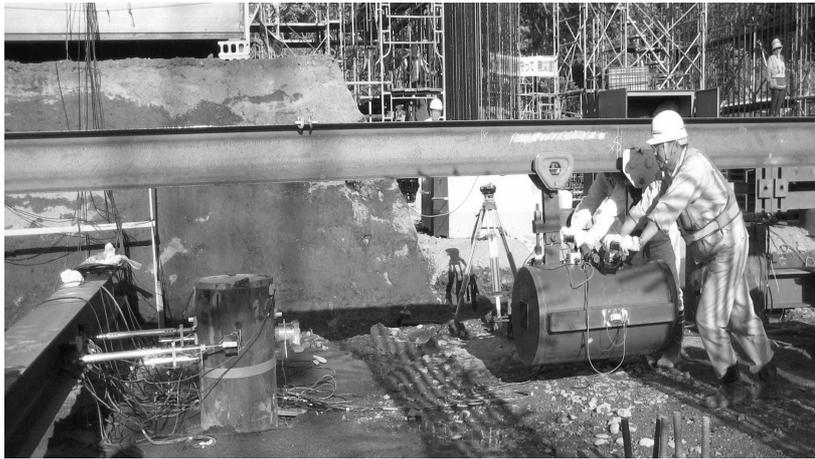


写真1 動的水平載荷試験の状況

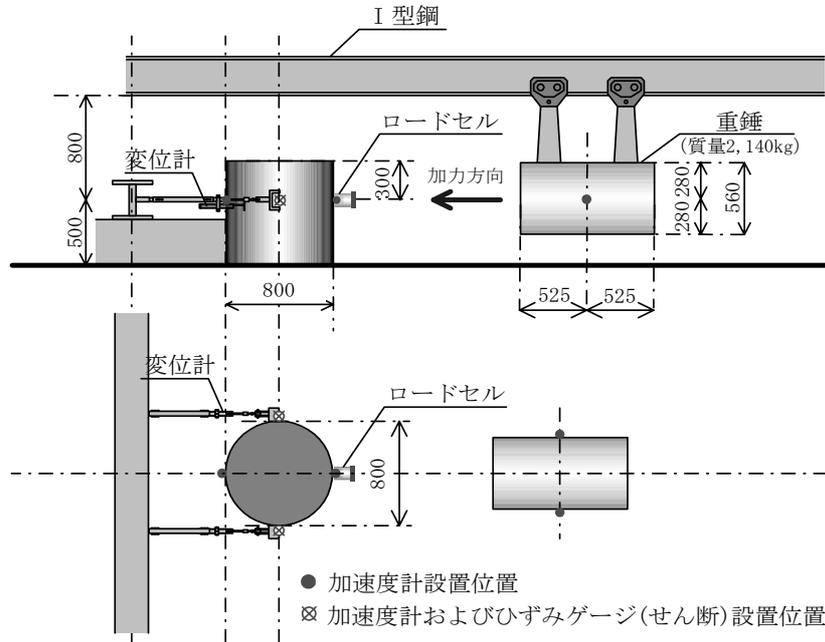


図3 試験システム（試験杭・重錘とセンサー）

表1 計測機器一覧表

名称	型式	周波数特性	開発元	
センサー	ひずみゲージ(軸)	KFW-5-120-C1-11	DC~300kHz	(株)共和電業
	加速度計	353B02	0.7Hz~10.0kHz ^{※2}	PCB社(米国)
	ロードセル	KCM-200KNA	DC~1.7kHz	(株)東京測器研究所
	変位計	DLT-50	DC~20.0Hz	(株)共和電業
アンプ	ひずみゲージ用	HITTOP-8 ^{※1}	0.1Hz~6.0kHz(加速度) DC~6.0kHz(ひずみ)	ジャパンパイル(株) (株)東京測振
	加速度計用			
	ロードセル用 変位計用	DPM-11A	DC~2.5kHz	(株)共和電業
データ集録装置	Libretto L3/060TN2L	—	(株)東芝	
	Inspiron4000	—	DELL(株)	

動的水平荷重試験は、静的水平荷重試験と同様に、本杭を試験時の地表から一定長を突出した状態で実施する。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およびせん断のひずみである。つまり、重錘の杭に与える衝撃力は、杭に設置したロードセルで計測する。ただし、重錘を衝突す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。

今回、当該現場で実施した動的水平荷重試験は、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も振動が計測方向のみであるならば変位計に曲げは生じないが、実際には計測方向外の振動が生じる。そこで、計測方向以外の変位が生じても変位計に曲げが発生しないように、両端ピンの治具に変位計を設置して計測した。また、不動梁は2本のH型鋼の杭を柱として打設して門型とした。充分な不動梁となるよう柱・梁の部材については、H-300mm×300mm×10.0mm/15.0mmを用いた。なお、水平変位の計測位置は杭の打撃高さ（杭頭から300mm下）とした。また、杭の水平方向の加速度の計測位置は変位と同じにし、加速度計は圧電方式で最大計測加速度250Gのものを用いた。

杭のせん断ひずみおよび変位、重錘の加速度は左右の2点で計測し平均で評価した。表1に計測機器一覧を示す。ロードセル周波数領域はDC~1.7kHz、変位計はアンプを含めるとDC~20Hz、加速度計は0.7Hz~6.0kHzであり、本荷重試験の計測に用いるには充分な周波数範囲の計測器である。

5. 2 時系データの零調およびフィルター処理

杭の動的水平荷重試験で測定した、力・変位・ひずみの全ての時系列データは、サンプリング時間を15μsecの高速で行った。このため、アンプおよびセンサーを含めた計測器システムの高周波数帯域まで保障できる。また、データの零調整は、初期部分のデータ個数100個（1500μsec）の相加平均値を求めデータから差し引くことにより評価した。

加速度を2回積分した変位波形と変位計から計測された変位波形とを比較し、加速度と変位に掛けるフィルターの諸元を決定した。なお、ひずみは圧縮側が正值、引張側が負値である。

5. 3 動的水平荷重試験成果

H-36 杭の動的水平荷重試験で得られた時刻歴波形を図4に示す。図4(a), (b), (c)が、それぞれ、ロードセルで計測された動的荷重波形、変位計で計測された杭の変位波形、3軸ひずみゲージで計測された杭のせん断ひずみ波形である。図4から動的水平荷重、変位およびせん断ひずみ間には若干の時間遅れが生じていることが確認できる。ただし、本システムで重錘がロードセルを介して鋼管杭に生じた力の伝達は、スムーズに伝達しているものと推定される。

動的水平荷重の荷重時間は70msで、荷重の最大ピーク値の20%程度を荷重時間と定義すれば40ms程度であった。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だけに振れるが、杭は最初押された側に変形し動的水平荷重が減少し0になると押された側とは逆方向に振れ、最後に0に戻ることが確認された。この理由は杭に生じる慣性力のためと推定される。

H-36 杭のひずみの計測点は杭頭のみであるため、打撃時の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、本杭に対して細径杭φ500mmのT-01杭で実施した試験では、地表面から、①GL.-1.2m、②-3.2m、③-5.2m、④-8.2mの計測点で鉛直方向のひずみを計測した。図5にT-01杭の深さ方向の軸ひずみ分布を示す。この結果から、杭長12.0mのT-01杭において、GL.-5.2mまでは杭の曲げが確認できる。T-01杭およびH-37杭の水平抵抗の関与深さ $1/\beta$ （杭特性長）が、それぞれ2.82m、3.79mであることを考慮すれば、本杭のH-37杭においても、本試験装置で充分な杭の

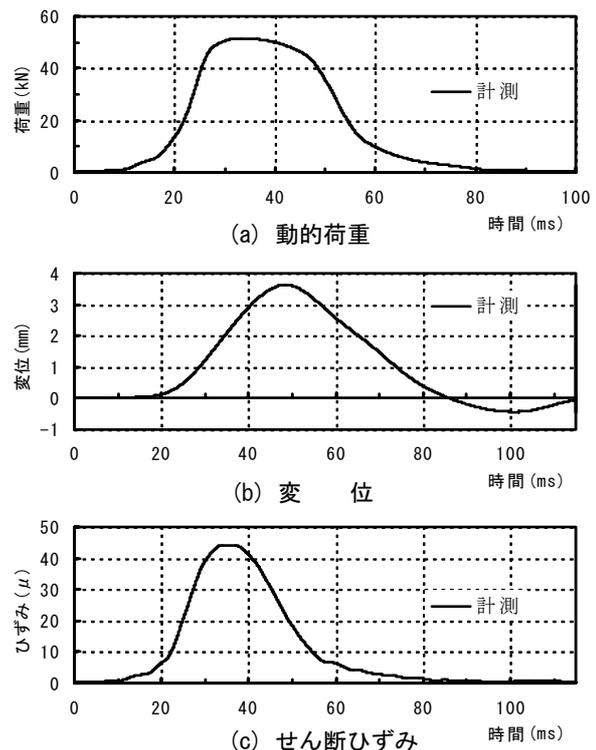


図4 動的水平荷重試験における時刻歴波形

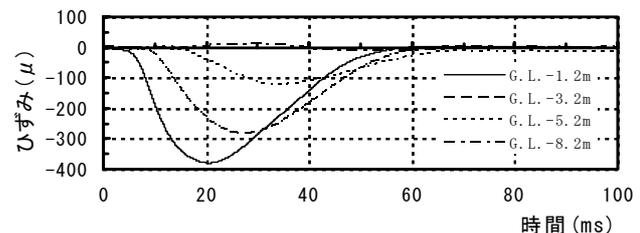


図5 細径杭の鉛直方向の軸ひずみ時刻歴波形

曲げを生じさせたものと推定できる。

図6に本杭における動的水平載荷試験の結果から得られた、水平荷重～杭水平変位曲線を示す。打撃力は、重錘の走行距離を変化させ小さい打撃力から順次大きくなるように実験を行った。図中の数字は、杭に衝撃荷重を与えた順番を示す。ここで、杭の変位が増加している領域を往路、減少している領域を復路と定義する。この荷重－変位曲線から、概ね以下のことが明らかになった。

- ① 小さな衝撃の動的荷重では、弾性挙動を示すと推定される。
- ② 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。
- ③ 衝撃荷重の増加時と減少時で荷重と水平変位の勾配が異なっているが、塑性域が大きくなるに従い顕著となる。
- ④ 一度、地盤が大きな塑性域の変形を経験すると塑性域内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。

この際に、③の荷重の増加時と減少時で荷重と水平変位の勾配が異なる理由として、杭の変形が大きくなると地盤が塑性領域に入り、杭の復路では杭と地盤間に隙間が生じるためと推定される。この地盤の剛性を評価するモデルとしては、地盤の大変形の復路において地盤のばねを切るモデルなどが考えられる。また、④の理由として、地盤が何回か変形すると地盤の耐力が低下するためと推定される。

6. 動的水平載荷試験のマッチング解析

本動的水平載荷試験のマッチングには KwaveHybrid⁷⁾を用いた。図7に、マッチング解析における杭と地盤のモデルを示す。杭は梁要素、地盤は杭節点に連結されたばねとダッシュポットで表現する。各節点には鉛直方向および水平方向2の計3つのばねと3つのダッシュポットが連結されている。ここに、杭の運動方程式は(1)式で表される。

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

ここに、 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ 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、鉛直方向および水平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ている。また、 $[M]$ は杭の質量と先端地盤の付加質量が含まれている。

杭の運動方程式が非線形であるため、(1)式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(2)式を得る。

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

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 $t=t+\Delta t$ の間の節点変位増分である。なお、数値解析には Newmark の β 法を用いた。

図8に杭周面の鉛直および水平抵抗地盤モデル⁸⁾を示す。ここで、地盤を等方弾性体と仮定し、杭周面における鉛直ばね k^v 、鉛直ダッシュポット(逸散減衰) c^v 、2方向の水平ばね k^h 、2方向の水平ダッシュポット(逸散減衰) c^h を(3)、(4)式で近似的に与えた⁹⁾。

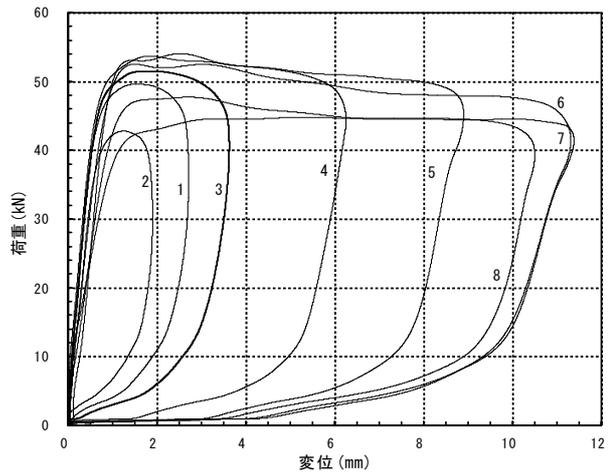


図6 加振点の動的荷重－杭変位量関係

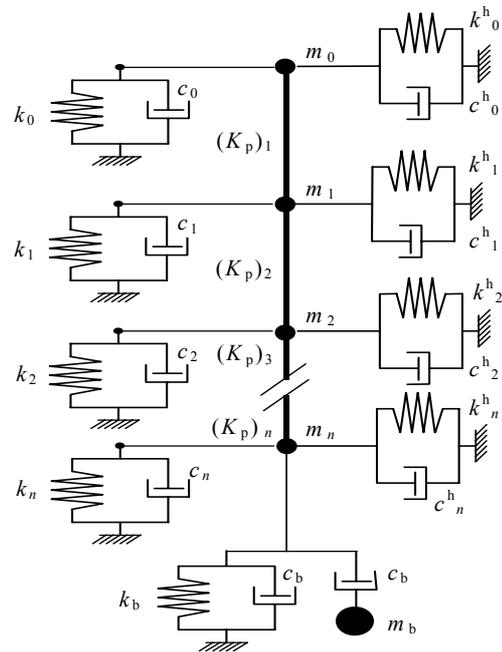


図7 杭と地盤のモデル化

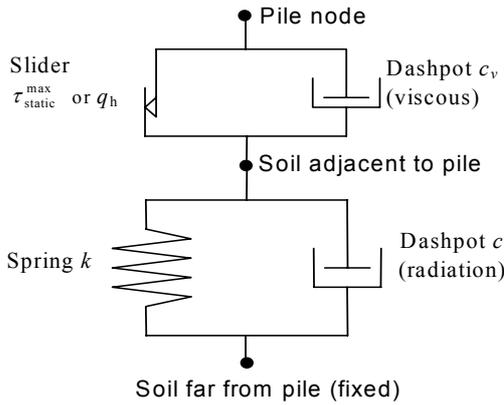


図8 杭周囲の鉛直・水平抵抗地盤モデル

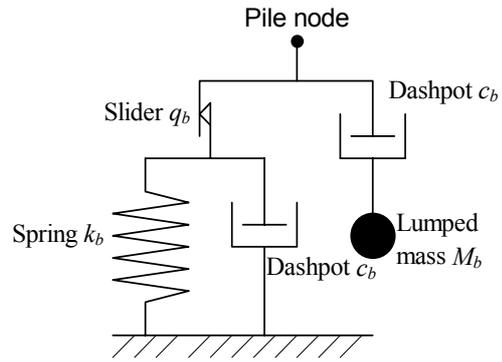


図9 鉛直先端地盤モデル

$$k^z = \frac{2.75G_s}{\pi d}, k^x = k^y = \frac{4G_s}{d} \quad (3)$$

$$c^z = \frac{G_s}{V_s}, c^x = c^y = \frac{4.5G_s}{V_s} \quad (4)$$

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。

図9に鉛直先端地盤モデルを示す。杭先端における鉛直ばね k_b 、鉛直ダッシュポット c_b 、鉛直付加質量 m_b は、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$k_b = \frac{8G_s}{\pi d(1-\nu_s)}, c_b = \frac{3.4}{\pi(1-\nu_s)} \frac{G_s}{V_s}, m_b = 8d\rho_s \frac{0.1-\nu_s^4}{\pi(1-\nu_s)} \quad (5)$$

ここで、 ρ_s は地盤の密度である。なお、上式の詳細は参考文献7)による。

7. 波形マッチング解析

マッチング解析では、地盤パラメータの初期値を地盤柱状図のN値を参考にして設定した。表2にマッチング解析で同定された最終の地盤パラメータを示す。

マッチング解析は、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て行った。なお、マッチングに用いた入力データは、図6に示す3番目の波である。

図10(a)が入力とした動的水平荷重で、図10(b)の実線が計測波形、一点差線がマッチングソフト出力による載荷点変位である。図10(b)の計測波とマッチングした変位波形を比較すると、入力した動的水平荷重の時刻歴が最大値頭打ちの波形になっているのに対し、計測された変位の時刻歴波形はなだらかに増減する波形で、明らかに入力波形とマッチング目的の波形では形状が異なっている。しかし、除荷点を過ぎるあたりまでは比較的良く一致していることが確認できる。

図10(c)は載荷点における荷重-変位量関係の計測結果とマッチング解析結果を示したものである。この結果、良好なマッチング成果が得られたことが確認された。ただし、マッチング解析の変位波形は、変位が0に戻っておらず残留変位が生じている。これは、荷重減少時における地盤ばねの性状を荷重増加時と同じとしているためで、例えば、荷重増加時にある変位を超えた場合、荷重減少時における地盤ばねの剛性を部分的に切れるモデルとするなどの剛性評価に検討を要する。

図11に、静的水平載荷試験(H-37)から得られた荷重～水平変位履歴に対する、動的水平載荷試験(H-36)から算定した地盤の初期剛性の関係を示した。この結果、動的水平載荷試験のマッチング解析から得られた地盤の初期剛性(図右上の点線)は、静的水平載荷試験の結果と比較的良好な互換性を示していることが分かる。

表2 マッチングで同定された地盤パラメータ

測定項目	パスバンド振動数 (Hz)	ストップバンド振動数 (Hz)
杭体加速度	1,500	2,000
杭体水平変位	50	75
杭体軸ひずみ	200	300
杭体せん断ひずみ	200	300
動的荷重	200	300

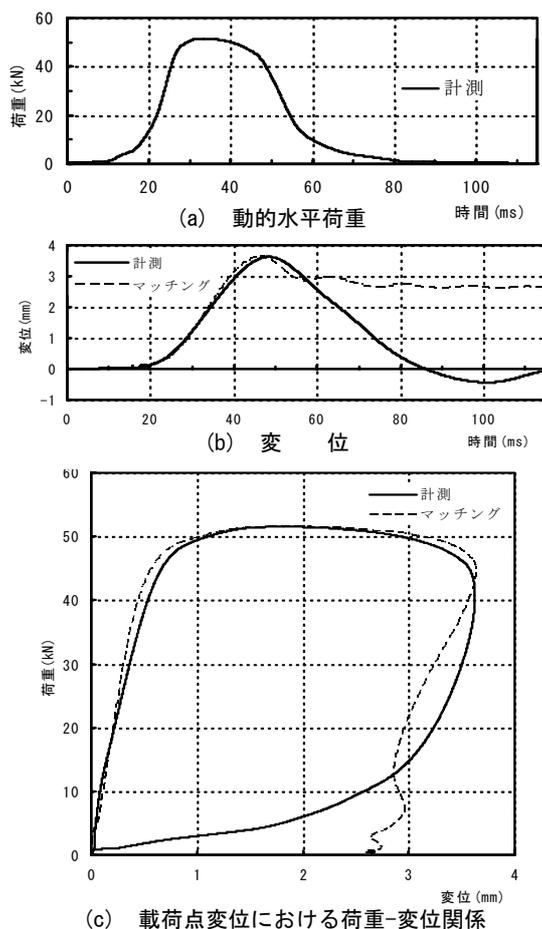


図 10 動的水平載荷試験結果とマッチング結果

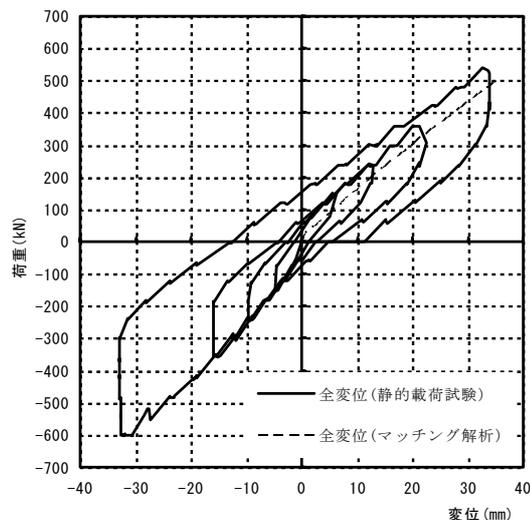


図 11 荷重—杭変位量結果（静的・動的）

8. 結論

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

- ①動的水平載荷試験は新たな杭試験法であり、従来試験法に比べ試験費用・試験時間を縮小（約 1/3）することが可能な現場実務に有用な手法と考えられる。
- ②動的水平載荷試験の計測された加速度・ひずみ値より、動的水平荷重に対する杭の動的水平挙動の全体系を把握することが可能である。
- ③動的水平載荷試験値は概ね深さ $1/\beta$ 区間の地盤反力を代表しているものと考えられる。その際、動的水平荷重に対応した地盤性状（弾性域～塑性域）は、増加させた衝撃力に対する杭変位の履歴から推定が可能である。
- ④動的水平載荷試験の地盤—杭バネ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～杭水平変位量の関係に比較的良好な互換性を示した（図 10・11）。その結果、動的水平載荷試験システムの妥当性が確認され、今後の実現場への活用性が窺われた。

9. 今後の展望

一連の研究より、杭の動的水平載荷試験法は従来の静的水平載荷試験に代わる一手法として、一定の成果を得たものとする。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していく考えである。

その際、杭の動的水平載荷試験には、以下のことが展望される。

- ①杭の動的水平載荷試験は簡便手法であることから、試験回数を増やすことで、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である。
- ②事前に細径（ $\phi 500\text{mm}$ 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、設計時に実杭に対する水平地盤反力の設定ができる。
- ③動的水平載荷試験で得られる波動には静的（載荷試験値）と動的成分とがある。その際、動的成分を考察することで、杭への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。

謝辞

本研究において、動的水平載荷試験の波動解析に当たり、金沢大学大学院自然科学研究科 松本樹典教授より多大なる御指導を頂いた。末筆ながら、記して謝意を表します。

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 日付け）
- 2) 地盤工学会(2002)：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.
- 3) 小嶋英治, 松本樹典, 富澤幸一, 西本聡, Kitiyodom P.(2005)：杭の動的水平載荷試験システムの開発（その 1 実大杭を用いた実験概要および実験結果）, 第 60 回土木学会年次学術講演会.
- 4) 松本樹典, 小嶋英治, 富澤幸一, 西本聡, Kitiyodom P.(2005)：杭の動的水平載荷試験システムの開発（その 2 波動解析による静的な荷重－変位関係の推定）, 第 60 回土木学会年次学術講演会.
- 5) 土質工学会(1993)：土質工学基準 杭の水平載荷試験方法・同解説,pp.21-52.
- 6) Tomisawa, K., Nishimoto, S., Fukushima, A., Kojima, E. and Matsumoto, T., (2006)： Static alternative cyclic horizontal load test on a driven steel pipe pile in the foundation for a highway bridge. *Proceedings of 10th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Amsterdam (to be presented).
- 7) 小嶋英治, 松本樹典, Kitiyodom P.(2005)：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.
- 8) Randolph MF & Deeks AJ (1992)： Dynamic and static soil models for axial pile response. *Proc. of 4th Int. Conf. on Application of Stress-Wave Theory to Piles*, The Hague: 3-14.
- 9) Novak M, Nogami T & Aboul-Ella F (1978)： Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of Mechanical Engineering ASCE*, 104(EM4), 953-959.
- 10) Deeks AJ & Randolph MF (1995)： A simple model for inelastic footing response to transient loading. *Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 19, 307-329.