

鋼管杭の動的水平載荷試験法 (その 1 - システム開発)

載荷試験、杭、試験方法

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 国際会員 三浦清一
ジャパンパイル技術開発部 正会員 小嶋英治
金沢大学大学院 国際会員 松本樹典

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¹⁾は一般に比較的大きな費用および時間を要するため改良が望まれる。

そこで筆者らは、試験費用を安価にし試験時間を短くできる新たな試験手法として、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 月に特許出願²⁾した。本報(その 1)では開発した鋼管杭の動的水平載荷試験の試験システムおよびその有用性について示す。

2. 動的水平載荷試験システム

試験開発のテーマは、解析システムと同時に、試験装置を開発しなければならない点にある。杭の動的水平載荷試験システムを写真 1 および図 1 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。重錘の走行距離により衝撃荷重を変化させることが可能である。本試験では重錘を滑らす距離は約 3m とした。本試験システムは、杭径 ϕ 1000mm 程度の鋼管杭を対象としている。動的水平載荷試験は、静的水平載荷試験と同様に、試験杭を地表から一定長を突出した状態で行う。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方向のひずみである。重錘が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。

杭の水平方向の変位の計測にインダクタンズ式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する。不動梁は 2 本の H-300mm×300mm×10mm の H 型鋼を柱として門型に設置する。杭水平変位量の計測位置は杭の打撃高さ(概ね杭頭から 300mm 下)とする。杭の水平方向の加速度の計測位置は杭変位測定点と同じとし、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 点で計測しそれらの平均で評価する。また、動的水平載荷試験の計測システムは、ロードセル周波数領域は DC ~ 1.7kHz で、変位計はアンプを含めると DC ~ 20Hz、加速度計は 0.7Hz ~ 6.0kHz として十分な周波数範囲の計測器を用いる。

3. 動的水平載荷試験のマッチング解析法

鋼管杭の動的水平載荷試験で杭水平抵抗を把握するためのマッチング解析には *KwaveHybrid*³⁾を用いる。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 2 方向の計 3 つのばねと 3 つのダッシュポットを連結する。その際に、杭の運動方程式

Method for dynamic horizontal load test of steel-pipe-piles (part1-Development of the system)

Kouchi TOMISAWA (Civil Engineering Reserch Institute of Hokkaido), Seiichi MIURA (Hokkaido University),
Eiji KOJIMA (JAPAN PILE Corporation), Tatusnori MATSUMOTO (Kanazawa University)

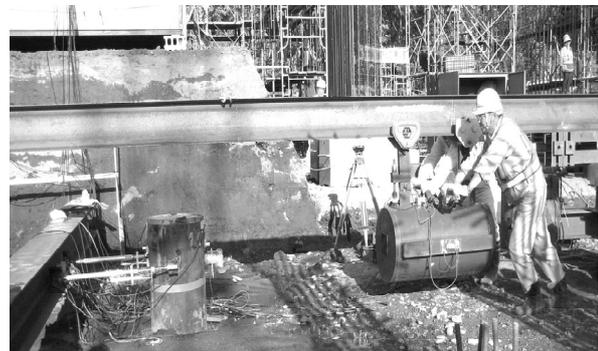


写真 1 動的水平載荷試験法

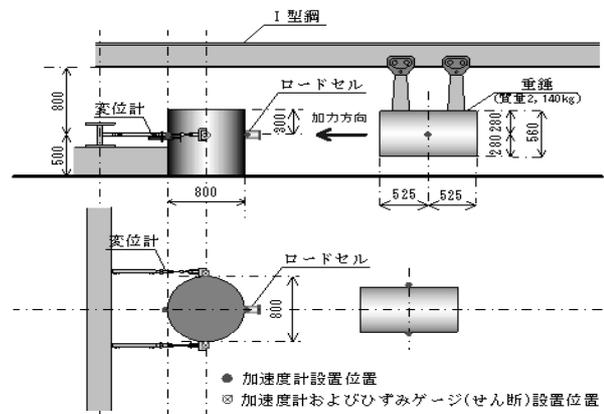


図 1 動的水平載荷試験システム

は式(1)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る。また、 $[M]$ は杭の質量と先端地盤の付加質量が含まれる。また、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)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 法を用いる。

図3に杭周囲の鉛直および水平抵抗地盤モデル⁴⁾を示す。つまり、地盤を等方弾性体と仮定し、杭周囲における鉛直ばね k 、鉛直ダッシュポット(逸散減衰) c 、2方向の水平ばね k' 、 k'' 、2方向の水平ダッシュポット(逸散減衰) c' 、 c'' を式(3)、(4)で近似的に与える⁹⁾。

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

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

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4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 は式(5)で与えられる⁹⁾。ここで ρ_s は地盤の密度である。

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

鋼管杭の動的水平載荷試験の入出力波形を、上記式のモデルで解析することで杭水平抵抗の把握が可能となる。

4. まとめ

杭の水平載荷試験の実現場への有効活用を目的に、動的水平載荷試験システムを開発した。一連の研究の結果、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、従来の静

的水平載荷試験法に比べ試験費用・試験時間を縮小(約1/3)することができる現場実務に有用な手法と考える。

②動的水平載荷試験で得られた加速度・ひずみ値を示したマッチング解析をすることで、杭の水平抵抗を含めた衝撃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。

開発した動的水平載荷試験システムの妥当性の検証は、(その2-実杭の試験検証)に示す。今後は、動的水平載荷試験の実施で多くの情報が得られることから、地震時の地盤の減衰定数などについても検討していく考えである。

参考文献 1)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. 2)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 3)松本樹典, Kitiyodom P.,小嶋英治(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. 4)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. 5)Novak M, Nogami T & Aboul-Ella F(1978):Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of Mechanical Engineering ASCE*, 104(EM4), 953-959. 6)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.

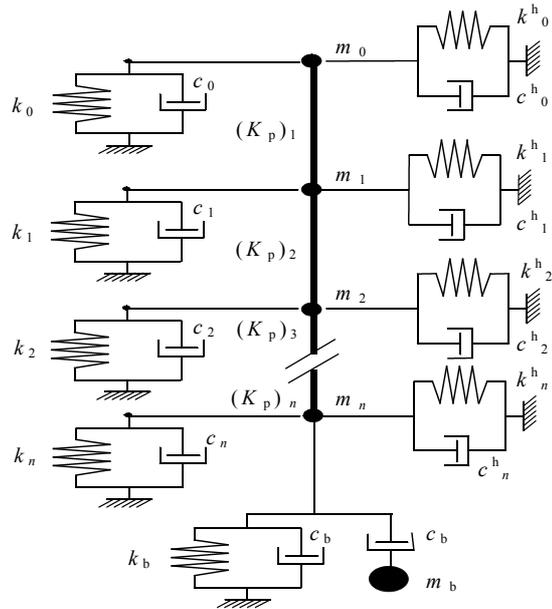


図2 杭と地盤のモデル化

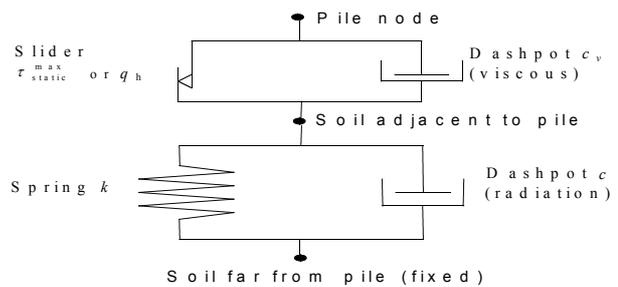


図3 杭周囲の鉛直・水平抵抗地盤モデル

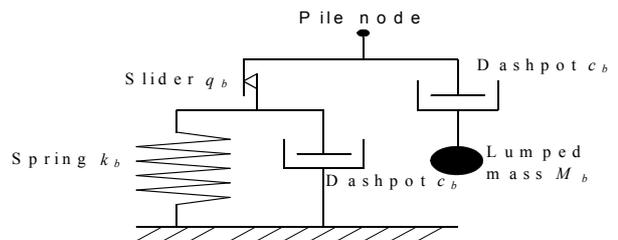


図4 鉛直先端地盤モデル