本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の水平抵抗に関する研究

渡	邉	康	司	水 (本	本 :社建第	译本部)	実
荒	Л		真	榎	本	浩	之
(7	本社建瓴	築本部))	(7	は 社設書	計本部)	

Study on Horizontal Resistance of Soil-Cement Mixing Wall Used as Permanent Piles

Koji Watanabe Minoru Mizumoto

Makoto Arakawa Hiroyuki Enomoto

Abstract

An examination is performed on the use of soil-cement mixing walls that were treated previously as temporary structures left buried in the ground, as permanent piles to rationalize foundation structures and reduce environmental burdens. This study aims at utilizing the embedded portion of the soil-cement mixing wall as a permanent pile, and evaluates the horizontal resistance in a full-scale load test. This paper first describes the background and the previous studies, followed by the full-scale load tests to evaluate the horizontal resistance on the single pile. Subsequently, the rapid load tests to estimate the bearing capacity on the injured pile are presented. Finally, the evaluation method of the horizontal resistance on the soil-cement mixing wall pile is discussed.

概 要

ソイルセメント柱列壁は、従来、掘削工事の際の山留め壁として用いられ、仮設構造物として取り扱われて きた。しかしながら、近年、基礎構造の合理化や環境負荷の低減などのニーズが高まりつつあり、ソイルセメ ント柱列壁を本設杭として利用するための検討を進めてきた。基礎底以深の根入れ部分を本設杭として利用す る際のソイルセメント柱列壁の水平抵抗は、水平耐力および水平地盤反力係数の評価式を適用する際の杭幅の 設定を確認する必要がある。また、水平力が作用しソイルセメント柱列壁に損傷が生じた場合の鉛直支持特性 を把握することが必要となる。本報では、仮設構造物として用いられる一般的な施工方法を用いて構築したソ イルセメント柱列壁を対象として、水平抵抗を確認するために実施した単杭および壁杭の実大載荷試験結果に ついて報告するとともに、本設杭として使用するソイルセメント柱列壁に水平力が作用して損傷が生じた場合 の鉛直支持力の評価を示す。

1. はじめに

ソイルセメント柱列壁は,原位置でセメントミルクを 注入しながら地盤を攪拌・混合することによって造成し たソイルセメントに、応力伝達材となる芯材としてH形 鋼を挿入し構築される。ソイルセメント柱列壁は,従来, 掘削工事の際の山留め壁として用いられ、仮設構造物と して取り扱われてきた。したがって、建物本体の荷重を 負担させることやそのような場合を想定した水平抵抗の 評価方法は確立されていない。しかしながら、近年、基 礎構造に対する合理化や環境負荷の低減などのニーズが 高まりつつあり, Fig. 1に示すように仮設構造物として扱 われてきたソイルセメント柱列壁を本設杭として利用す るための検討を進めてきた^{1), 2), 3)}。また, このように仮 設構造物として使用されていたソイルセメント柱列壁を 本設杭として利用することで、新たに施工される本設杭 が削減できるため、杭工事の工期短縮や合理化も期待で きる。ここで、ソイルセメント柱列壁と本設杭では、支



Fig. 1 ソイルセメント柱列壁の本設杭利用 Utilization for Permanent Pile of Soil-Cement Mixing Wall

持機構や杭体の応力伝達に違いがあるため,適用の際に は基礎全体としての個別の検討が必要となる。

山留め壁を本設杭として利用した場合の検討は,実大 載荷試験や施工試験が数例ある。金子⁴は,本設杭とし て利用するため,高強度のソイルセメント柱列壁を用い る工法を開発し,その鉛直支持力や引抜き抵抗の評価を 行っている。田屋ら⁵,吉岡ら⁶は,ソイルセメント柱列 壁に対して,鉛直支持力や引抜き抵抗の評価を実施して いる。いずれの研究も,一般的に用いられるソイルセメ ント柱列壁と異なり,施工方法を改善し高品質なソイル セメント柱列壁を構築することを前提としている。また, 上述の研究は鉛直支持力や引抜き抵抗を主としたもので, 水平抵抗に関する研究の事例は極めて少ない。尻無濱ら ⁷⁾は,水平力作用時の耐力を模型実験で確認するととも に,原位置での水平載荷試験により水平地盤反力係数の 設定に関して検討を実施している。

基礎底以深の根入れ部分を本設杭として利用する場合 のソイルセメント柱列壁の水平抵抗は,加力方向の違い による水平耐力および水平地盤反力係数の評価式を適用 する際の杭幅の設定を確認する必要がある。ここで,本 設杭として利用する範囲を基礎底以深に限定したのは, ソイルセメント柱列壁以外に施工する本設杭と利用する 杭長の範囲を同じくするためである。また,地震等によ り水平力が作用しソイルセメント柱列壁に損傷が生じた 場合の鉛直支持特性を把握することが必要となる。

本報では、仮設構造物として用いられる一般的な圧縮 強度の範囲(500~2,000kN/m²程度)および施工方法を 用いて構築されたソイルセメント柱列壁を対象として、 水平抵抗の評価方法を構築するために実施した実大載荷 試験結果について報告するとともに、水平力が作用し損 傷した後の鉛直支持力の評価を示す。

2. 単杭の水平載荷試験と損傷後の鉛直支持力

本章では、ソイルセメント柱列壁に水平力が作用した 場合の水平抵抗を評価するために実施した単杭の実大載 荷試験および水平力が作用して損傷を生じた後の鉛直支 持性能に関して述べる。なお、実大載荷試験は、2つのサ イトで実施した。

2.1 載荷試験条件

サイトAおよびサイトBの地盤条件および試験杭を Fig.2およびFig.4に示す。サイトAの試験地盤はGL-7.0m 程度までがロームおよび凝灰質粘土,GL-7.0m以深が主 に粘土質細砂および細砂で構成されている。水平載荷試 験杭は,杭先端をN値30程度の地盤に根入れした。サイ トAの水平載荷試験杭は,H形鋼の方向(弱軸H-1,強軸 H-2)をパラメータとした2本である。また,サイトBの試 験地盤はGL-7.0m程度までがロームおよび凝灰質粘土, GL-7.0~12.0mが主に細砂および中砂,GL-12.0~15.0mが シルトおよび粘土,GL-15.0m以深が細砂で構成されてい



Fig. 3 試験杭配置図(サイトA) Arrangement of Test Piles (Site A)

Table 1 試験杭諸元(サイトA) Specification of Test Piles (Site A)

試験杭	杭径 (mm)	杭径 杭長 (mm) (m)		ソイルセメント設 計強度 (N/mm ²)	加力方向
H1	600	16	15.5	0.5	弱軸
H2	000				強軸

る。水平載荷試験杭は,杭先端をN値50程度の地盤に根 入れした。水平載荷試験杭は,H形鋼の加力方向(弱軸H-1, 強軸H-2)をパラメータとした2本である。

Fig.3およびFig.5に試験杭の配置を示す。試験杭が周辺 地盤に影響を及ぼす影響範囲は、地盤工学会基準"杭の 水平載荷試験方法・同解説"⁸に準拠し設定した。具体



Fig. 4 地盤条件および試験杭 (サイトB) Soil Profile and Test Piles (Site B)



Arrangement of Test Piles (Site B)

Table 2 試験杭諸元(サイトB) Specification of Test Piles (Site B)

	杭径 (mm)	杭長 (m)	芯材長 (m)	ソイルセメント設 計強度 (N/mm ²)	加力 方向
H-1	(00)	19.5	17.5	0.5	弱軸
H-2	000				強軸

的には,試験杭前面の影響範囲を杭径の5倍以上,試験杭 の背面の影響範囲を杭径の2倍以上となるように設定し た。



Fig. 6 水平荷重-地表面変位関係 (サイトA) Relationships between Horizontal Load-Displacement at Ground Surface (Site A)



Fig. 7 水平荷重-地表面変位関係 (サイトB) Relationships between Horizontal Load-Displacement at Ground Surface (Site B)

試験杭の諸元をTable 1およびTable 2に示す。試験杭の ソイルセメント改良体径(杭径)は、サイトAおよびサイト BともにD=600mmを用いた。H形鋼は、サイトA、サイト BともにH-440×300×11×18を用いた。ソイルセメント改良 体の設計強度は、500kN/m²である。載荷試験後に実施し たコア抜き試料の圧縮試験結果より、ソイルセメント改 良体の強度が設計強度500kN/m²を満足していることを 確認しており、その強度の範囲は概ね500~2,500kN/m² であった。ソイルセメントの強度に与える脱水効果の影 響が生じやすい砂質土地盤において、大きな強度が得ら れた。

2本の試験杭には、芯材全長にわたりスタッド(軸部径 19mm,長さ100mm)を打設した。これは、水平載荷試験



後に損傷を受けた杭に対して,鉛直支持力を確認する鉛 直載荷試験を実施するためである。各サイトのスタッド (¢19mm)の打設ピッチは,サイトAで400mm,サイトBで 600mmである。

本章で示す実大載荷試験は、水平載荷試験は、地盤工 学会基準"杭の水平載荷試験方法・同解説"⁸⁾に準拠し て実施した。載荷方法は、段階載荷・多サイクル方式を 採用し、新規荷重保持時間2分、履歴荷重保持時間2分、 ゼロ荷重保持時間を14分とした。測定項目は、杭頭にお ける荷重および変位、H形鋼のひずみである。なお、H 形鋼のひずみゲージは、水平力に支配的な影響を与える 範囲で細かく設置した。サイトAでは、GL-5.5mまでは 1000mmピッチで、それ以深は1500mmピッチで設置した。 また、サイトBでは、GL-6.0mまでは1000mmピッチで、 それ以深は2000mmピッチで設置した。

2.2 載荷試験結果

サイトAおよびサイトBにおける水平荷重と地表面変 位の関係をFig. 6およびFig. 7に示す。これらの図より, 載荷初期から曲線が立ち上がり最大水平荷重に到達して いる。特に,いずれのサイトにおいても,杭体の曲げ剛 性が大きいH-2において初期勾配が大きくなることがわ かる。また、地表面変位の増大に伴い、同一変位におけ る水平荷重の負担がH-2で大きくなることが確認できる。 これは、杭体の曲げ剛性が大きいH-2において、水平力 に対して抵抗する範囲が大きくなることに起因すると考 えられる。

Fig. 8には、サイトAで得られた水平荷重H=40, 80, 120, 160kN時におけるH形鋼が負担する曲げモーメントの深 度分布を示す。ここで、曲げモーメントは、実測したH 形鋼杭の曲げひずみとH形鋼のみの曲げ剛性を考慮して 算出した。Fig. 8より、最大曲げモーメントの位置は、両 者ともにH形鋼の上方で発生しており、地中部の深い位 置まで及んでいない傾向がある。しかしながら、前述の ように杭体の曲げ剛性が大きいH-2において、H-1より深 い位置まで曲げモーメントが発生しており水平力に対し て抵抗する範囲が大きくなっていることがわかる。Fig. 9 には、サイトBで得られた水平荷重H=20, 40, 80, 150kN時 においてH形鋼が負担する曲げモーメントの深度分布を 示す。ここで、曲げモーメントは、サイトAと同様に実 測したH形鋼杭の曲げひずみとH形鋼のみの曲げ剛性を 考慮して算出した。Fig. 9より、最大曲げモーメントの位 置は、両者ともにH形鋼の上方で発生しており、地中部 の深い位置まで及んでいない傾向がある。しかしながら、 前述のように杭体の曲げ剛性が大きいH-2において、H-1 より深い位置まで曲げモーメントが発生しており水平力 に対して抵抗する範囲が大きくなっていることがわかる。

地表面変位 $y_0=10$ mmにおける実測値から求めた水平地 盤反力係数 k_h と基準水平地盤反力係数 k_{h0} ⁹の比較を Fig.10およびFig.11に示す。実測値からの水平地盤反力係 数の算出には、Changによる一様地盤中の弾性支承梁理 論より、式(1)~(3)を用いた。算定に際して、杭径はH形 鋼の見付幅を、曲げ剛性はH形鋼のみを考慮した。

$$k_{ha} = \alpha E_0 \overline{B}^{-3/4} \tag{1}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \tag{2}$$

$$y_0 = \frac{1 + \beta h}{2EI\beta^3} H \tag{3}$$

ここで、 k_{h0} : 基準水平地盤反力係数 (kN/m³)、 α : 評 価法によって定まる定数 (m⁻¹)、 E_0 :変形係数 (kN/m²)、 \overline{B} : 無次元化杭径(杭径をcmで表した無次元数値)、 β : 杭の特性値 (m⁻¹)、E: 杭体のヤング係数 (kN/m²)、I: 杭 体の断面2次モーメント (m⁴)、B: 杭径 (m)、 k_h : 水平地 盤反力係数 (kN/m³)、 y_0 : 地表面変位 (m)、h: 加力点高 さ (m)、H: 水平荷重 (kN)

基準水平地盤反力係数khoの算出に用いる変形係数は, 平均N値から推定した値(E₀=700N)および一軸圧縮試験 による値(E₀=E₅₀)を用いた。この際,平均N値の算定は, 試験結果のkh値から求めた1/βの範囲の平均値とした。Fig. 10およびFig. 11において,塗りつぶしプロットが平均N 値から推定した値,白抜きプロットが変形係数E₅₀を用い て基準水平地盤反力係数を算定した結果であり,両者の 比較を示す。Fig. 10より,サイトAで得られたkhとkhoの比 率は1.4~2.4程度となり,既往の評価式による値を満足す ることが確認できた。さらに,Fig. 11より,サイトBに おいて得られたkhとkhoの比率は1.9~3.5程度となり,サイ トBにおいても既往の評価式による値を満足することが 確認できた。したがって,水平地盤反力係数を算定する 際の杭径にH形鋼の見付幅を用いることで,既往の評価 式を適用して安全側の設計が可能であると考えられる。

2.3 損傷後の鉛直支持力

本節では、地震等によりソイルセメント柱列壁に水平 力が作用し、ソイルセメント柱列壁が損傷を受けた場合 の鉛直支持特性の評価を行なった。2.2節で示した水平載 荷試験後の試験杭に対して、鉛直支持特性を確認するた めに実施した急速載荷試験結果について示す。なお、本 節では、水平抵抗に支配的な影響を与える特性長(1/*β*)を 損傷部として、その範囲の周面摩擦力を除いた検討を行 なう。

急速載荷試験は,地盤工学会基準"杭の鉛直載荷試験 方法・同解説¹⁰"に準拠して実施した。載荷方法は,重



Fig. 10 水平地盤反力係数の比較 (サイトA) Comparison of Coefficient of Horizontal Subgrade







Fig. 12 急速載荷試験の計測システム Measurement System for Rapid Load Test

錘落下方式の急速載荷試験で、本載荷試験には20kNの重 錘を用いた。急速載荷試験の相対載荷時間T_rは、式(4)で



Displacement (Site A)





 $T_r = T_I / (2L/c) \ge 5$

(4)

ここで, *T_L*:載荷時間,*L*:杭長,*c*:縦波伝搬速度 本載荷試験は,サイトAおよびサイトBにおいて,式(4) を満足しているため波動現象の影響を無視できる¹⁰。測 定項目は,杭頭における荷重,変位および加速度である。 急速載荷試験の計測システムをFig. 12に示す。急速載荷 試験では,杭頭における荷重の測定にロードセル,変位 の測定に光学式変位計を用いた。静的荷重の算出方法に は除荷点法を採用した¹⁰。除荷点法は得られた荷重から 動的抵抗成分を除去することにより静的荷重を算出する 方法である。

Fig. 13には、サイトAで得られた杭頭荷重-変位関係を 示す。ここで、同図中には比較のために同一サイト・同 一条件で実施した静的載荷試験で得られた杭頭荷重-変 位関係も合わせて示す。Fig. 13より、載荷初期において 静的載荷試験結果と急速載荷試験結果はほぼ一致しいる。



Fig. 15 地盤条件および試験杭 Soil Profile and Test Piles

Table 3 試験杭諸元 Specification of Test Piles

試験杭	杭径 (mm)	杭長 (m)	芯材長 (m)	ソイルセメント設 計強度 (kN/mm ²)	加力 方向
H-1	600	19.5	17.5	500	面内
H-2	000			500	面外





さらに,急速載荷試験のピーク荷重に至るまでは静的載 荷試験結果とほぼ対応していることが分かる。急速載荷



試験の最大荷重は,H-1で2500kN,H-2で2200kNとなった。Fig. 13中には,H-1およびH-2の1/βの範囲の周面摩擦 力を静的載荷試験の極限荷重から差し引いた荷重を点線 で示した。急速載荷試験のピーク荷重と比較するとほぼ 対応していることが分かる。

サイトBで得られた杭頭荷重-変位関係をFig. 14に示す。 ここで、同図中には比較のために同一サイトで実施した 静的載荷試験のフリクションカット下端(GL-10.0m)にお ける荷重-変位関係も合わせて示す。Fig. 14より、載荷初 期において静的載荷試験結果と急速載荷試験結果はほぼ 一致しているが、載荷が進むにつれて静的載荷試験と差 異が生じている。これは、比較として用いた静的載荷試 験の荷重-変位関係がフリクションカット下端での結果 であるためであると推察される。急速載荷試験の最大荷 重は、H-1(強軸)で3160kN、H-2(弱軸)で3330kNとなり、 静的載荷試験時のフリクションカット下端(GL-10.0m)で の極限荷重(変位量0.1D=60mm時)を上回った。さらに、 Fig. 14中にはH-1およびH-2の水平抵抗に支配的な影響を 与える特性長(1/β)の範囲以深の周面摩擦力を静的載荷試 験の極限荷重(変位量0.1D=60mm時)に加算した荷重を実 線で示した。急速載荷試験のピーク荷重が1/βの範囲以深 の周面摩擦力を考慮して算出した最大荷重を上回ること が分かる。このことから、損傷を受けた後も鉛直支持力 が確保できていると考えられる。

したがって、ソイルセメント柱列壁が水平力により損 傷を受けた後も1/βの範囲の周面摩擦力を無視すること で鉛直支持力を確保できると考えられる。

3. 壁杭の水平載荷試験

ソイルセメント柱列壁を本設杭として利用する場合に は、壁杭として利用することとなる。そこで、本章では 壁杭(三連杭)に対して実施した、面内方向および面外方 向の実大水平載荷試験に関して述べる。



3.1 載荷試験条件

本載荷試験の地盤条件および試験杭をFig. 15に示す。 試験地盤は、2.1で示したサイトBと同一である。水平載 荷試験は、H形鋼の加力方向(面内方向H-1,面外方向H-2) をパラメータとして同一の壁杭に対して実施した。試験 杭の諸元をTable 3に示す。試験杭は、杭先端をN値50程 度の地盤に根入れした。また、試験杭のソイルセメント 径(杭径)は、1コラムD=600mmであり、H形鋼には H-440×300×11×18を用いた。なお、H形鋼の設置間隔は、 450mmとした。ソイルセメントの設計強度は、500kN/m² である。載荷試験後に実施したコア抜き試料の圧縮試験 結果より、ソイルセメント改良体の強度が設計強度 500kN/m²を満足していることを確認した。試験杭には、 GL-10.0m以深の芯材にスタッド(*¢*19mm)を打設した。

水平載荷試験は,地盤工学会基準"杭の水平載荷試験 方法・同解説"⁸⁾に準拠して実施した。載荷方法は,2.1 で示した単杭の載荷試験と同一の方法を用いた。測定項 目は,杭頭における荷重および変位,H形鋼のひずみで ある。なお,H形鋼のひずみは水平力に支配的な影響を 与えるGL-6.0mまでは1000mmピッチで,それ以深は 2000mmピッチで計測した。

3.2 壁杭の水平載荷試験結果

水平荷重と地表面変位の関係をFig. 16に示す。水平荷 重と地表面変位の関係より、載荷初期から曲線が立ち上 がり最大水平荷重に到達している。特に、水平力に抵抗 する杭幅および曲げ剛性が大きいH-2において初期勾配 が大きくなることがわかる。また、同一変位における水 平荷重の負担がH-2で大きくなることが確認できた。こ れは、 H-2において杭幅および杭の曲げ剛性が大きいた め、水平力に対して抵抗する範囲が大きくなることに起 因すると考えられる。Fig. 17には、水平荷重H=100, 150, 200, 250kN時においてH形鋼が負担する曲げモーメント の深度分布を示す。ここで、曲げモーメントは、単杭の 場合と同様に、実測したH形鋼杭の曲げひずみとH形鋼の みの曲げ剛性を考慮して算出した。Fig. 17より,最大曲 げモーメントは, H-1, H-2ともに壁杭の上方で発生して おり、地中部の深い位置まで達していない。しかしなが ら,前述のように水平力に抵抗する杭幅および曲げ剛性 が大きいH-2において、水平力に対して抵抗する範囲が 大きくなることを確認できた。また、一般的な強度を用 いて構築したソイルセメント柱列壁の場合、ソイルセメ ントの強度が小さいため,加力時に杭体に生じるクラッ クの影響が大きくなり, 面内方向における周面摩擦の抵 抗が小さくなると推察される。したがって、壁杭の水平 抵抗に関しては、杭前面の受働抵抗および杭体の曲げ剛 性の影響が支配的になると考えられる。

Fig. 18には、地表面変位y₀=10mmにおいて実測値から 求めた水平地盤反力係数khと基準水平地盤反力係数kh0の 比較を示す。実測値から算出した水平地盤反力係数は、 Changによる一様地盤中の弾性支承梁理論より、式(1)~ (3)を用いて算定した。ここで、杭径はH形鋼の見付幅を、 曲げ剛性はH形鋼のみを考慮した。基準水平地盤反力係 数khoの算出に用いる変形係数は、単杭と同様に平均N値 から推定した値(E0=700N)および一軸圧縮試験による値 (E₀=E₅₀)とした。Fig. 18において,塗りつぶしプロット が平均N値, 白抜きプロットが変形係数E₅₀を用いて基準 水平地盤反力係数を算定した結果を示しており、実測値 との比較を示す。水平載荷試験から得られたkhとkhoの比 率は2.4~5.4程度となり、既往の評価式による値以上とな ることを確認した。以上より、水平地盤反力係数を算定 する際の杭径にH形鋼の見付幅を用いることで、既往の 評価式を適用できると考えられる。

4. まとめ

ー般的に仮設構造物として用いられるソイルセメント 柱列壁を本設杭として利用するために,実大載荷試験を 実施し,水平抵抗を確認した。さらに,水平力が作用し て損傷を受けた場合のソイルセメント柱列壁の鉛直支持 力を評価した。以下に、得られた知見を示す。

- 単杭の水平抵抗は、杭体の曲げ剛性が大きい強軸 方向で大きくなることがわかった。また、壁杭の 水平抵抗は、杭体の曲げ剛性が大きく、杭幅が大 きい面外方向で大きくなることがわかった。
- ソイルセメント柱列壁に水平力が作用した場合の 水平地盤反力係数の算定に既往の評価式を適用で きることがわかった。
- 水平地盤反力係数の算定に用いる杭幅は、H形鋼の見付幅を用いることで安全側の設計が可能であると考えられる。
- 4) 水平力が作用してソイルセメント柱列壁が損傷を 受けた場合の鉛直支持力を評価した。その結果, 静的載荷試験より得られた杭頭荷重から1/βの範 囲の周面摩擦を差し引いた鉛直支持力と水平力が 作用し損傷を受けた後の鉛直支持力が対応するこ とがわかった。したがって、ソイルセメント柱列 壁が大きな損傷を受けた後も1/βの範囲の周面摩 擦力を無視することで鉛直支持力を確保できると 考えられる。

参考文献

- 渡邉康司,他:ソイルセメント柱列壁の実大載荷試 験,日本建築学会学術講演梗概集,構造I, pp.487-488,2013.9
- 渡邉康司,他:本設杭利用するソイルセメント柱列 壁の付着挙動に関する研究,日本建築学会学術講演 梗概集,構造-I,pp.437-438,2014.9
- 渡邉康司,他:本設杭として利用するソイルセメン ト柱列壁の実大鉛直載荷試験,日本建築学会学術講 演梗概集,構造-I,pp.451-452,2015.9
- 金子治:ソイルセメントH形鋼合成杭工法の荷重-変 位特性,第49回地盤工学シンポジウム論文集,pp. 127-132,2004.11
- 5) 田屋裕司,他:ソイルセメント壁の杭利用に関する 研究(その1),日本建築学会大会学術講演梗概集,構造-I,pp.667-668,2009.8
- 6) 吉岡典哉,他:ソイルセメント壁の杭利用に関する 研究(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,構造-I,pp.669-670,2009.8
- 7) 尻無濱昭三,他:ソイルセメント本設杭工法の開発 (その8 室内および原位置水平載荷試験),日本建築 学会大会学術講演梗概集,構造-I,pp.685-686, 2003.9
- 地盤工学会:地盤工学会基準,杭の水平載荷試験方法・同解説,2010
- 9) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,2001
- 10) 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,2002