

I S S N 0836-7858

土木研究所資料第 4106 号

土木研究所資料

杭の地震時の鉛直支持力特性 に関する研究

平成20年3月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎チーム

Copyright © (2008) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

杭の地震時の鉛直支持力特性に関する研究

基礎チーム 上席研究員 福井 次郎^{*1}
主任研究員 大塚 雅裕^{*2}
研 究 員 秋田 直樹^{*3}
〃 野々村佳哲
交流研究員 喜多 直之^{*4}

要 旨

現行の杭基礎の設計法では、静的な一方向の荷重を載荷させた試験の結果により杭の鉛直支持力特性を評価している。しかし、地震時の杭の鉛直支持力は、作用する荷重が正負繰り返されることや速度を持つことにより動的な特性を有するが、基礎の動態観測データや地震時を再現した荷重による載荷試験例が無いことから、その実態が不明である。そのため、動的な載荷試験を実施した場合でも解析的に動的な効果を除去し、静的な支持力特性として評価しているのが実情である。

本研究では、地震時の杭の鉛直支持力特性を把握するとともに、各種載荷方法を用いて実施されている載荷試験により得られる支持力特性から地震時の支持力特性を推定する方法を検討するために、同一の模型地盤内に複数の杭を配置し、異なる載荷方法による鉛直載荷試験を実施した。

キーワード：杭基礎、動的支持力特性、杭の鉛直載荷試験、正負交番載荷、速度効果

- * 1 (現・独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ長)
- * 2 (現・本州四国連絡高速道路株式会社 企画部企画課)
- * 3 (現・国土交通省関東地方整備局 千葉国道事務所 交通対策課)
- * 4 (現・(株)大林組 土木技術本部設計第一部)

目 次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的と概要	2
第2章 実験方法	3
2.1 小型模型実験	3
2.1.1 実験土槽および地盤作成	3
2.1.2 模型杭	4
2.1.3 計測項目	5
2.1.4 載荷方法	6
2.2 大型模型実験	7
2.2.1 実験土槽および地盤作成	7
2.2.2 模型杭	8
2.2.3 計測項目	9
2.2.4 載荷方法	10
第3章 実験結果	12
3.1 小型模型試験結果のバラつきについて	12
3.2 正負交番載荷試験結果	14
3.2.1 杭頭荷重	14
3.2.2 周面抵抗力特性	16
3.2.3 先端抵抗力特性	18
3.2.4 載荷速度の影響	19
3.2.5 周面抵抗の減衰特性	20
3.3 大型模型試験による正負交番載荷試験と押込み試験との比較	23
3.3.1 杭頭荷重	23
3.3.2 周面抵抗力	24
3.3.3 先端抵抗力特性	25
3.3.4 杭頭ばね定数	26
3.4 急速載荷試験	27
3.5 実験結果のまとめと考察	28

第4章 まとめ	30
参考文献	32
付録	
1. 小型模型実験結果	33
1.1 押込み試験	33
1.2 引抜き試験	36
1.3 交番载荷試験	38
1.4 急速载荷試験	50
2. 大型模型実験結果	60
2.1 押込み試験	60
2.2 交番载荷試験	63
2.3 急速载荷試験	72

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

近年、新しい試験装置の開発が行われ、杭の鉛直載荷試験方法は多様化し、これまで一般的に行われてきた押込み試験や引抜き試験に加え、先端載荷試験、急速載荷試験、衝撃載荷試験などの新しい載荷試験方法が普及してきた。先端載荷試験は、杭の先端にジャッキを配置し、周面抵抗力を反力として杭の支持力特性を調べる試験である。急速載荷試験は、火薬の燃焼ガス圧等を利用して0.1～0.2秒程度の動的荷重を載荷する試験である。また、衝撃載荷試験は、従来「動的載荷試験」と呼ばれていた試験方法で、ハンマの打撃による杭体内の波動伝播現象を解析することにより支持力特性を調べる試験である。平成14年、地盤工学会において、これら5つの試験方法に加え、今後地震時の杭の性能を評価するために有効と考えられる鉛直交番載荷試験を含めた6つの試験方法の基準が制定されるに至った¹⁾。基準には、得られた試験結果の解釈法に関する研究成果も数多く盛り込まれ、性能設計時代における杭の性能検証法等に積極的に利用されること、さらには、より合理的な設計を行うために新たな設計法を確立するという意味での研究も積極的に行われることが望まれている。

しかし、現状の基礎の設計では、動的解析を実施する場合においても支持力特性は静的な特性値により評価されている。前述の急速載荷試験や衝撃載荷試験の結果から得られる支持力特性には動的な抵抗成分が含まれるが、設計に用いる際に解析的にその動的成分を取り除いて用いられているのが実態である。これは、実際の地震時荷重など動的な作用を受けた基礎の鉛直支持力特性が明確になっていないためである。

したがって、これらの試験方法を用いた合理的な設計方法を確立するためには、動的荷重に対する実際の支持力特性を把握し、その結果を動的解析へ直接的に反映させることが不可欠である。

1.2 研究の目的と概要

基礎構造物は設置される地盤の条件や施工法によりその支持特性が変わるため、現状の設計基準における杭の鉛直支持力は、載荷試験の結果に基づいた支持力推定式あるいは実際に載荷試験を実施することにより評価することが基本となっている。しかし、これまでに行われている載荷試験は静的荷重を一方向に載荷する試験であり、基礎の設計に支配的となる地震時荷重を想定した載荷とはなっておらず、現状の支持力評価法の妥当性については検討の余地がある。

一方、近年、動的な荷重を載荷する試験の実施例が増えつつあるが、そのような載荷試験により得られる動的な支持力特性は設計に直接反映されていないのが実情である。試験結果を直接動的設計に反映することができれば設計の合理化につながる。また、逆に、静的載荷試験結果から動的支持力特性を把握できれば、膨大なデータが蓄積されている静的試験のデータを耐震設計に有効に活用することが可能であり、基礎の設計の合理化につながると考えられる。

そこで、本研究では、各種載荷試験方法による杭の軸方向抵抗特性を把握することおよび、従来の杭の載荷試験で得られた支持力特性から地震時の支持力特性を推定する方法を検討することを目的として、複数の異なる載荷方法による模型杭の鉛直載荷実験を実施した。

実験を行うにあたり、模型杭はできるだけ実物に近い大型のものをを用いるのが望ましい。一方、各種載荷試験方法により得られる支持力特性を比較検討するためには、多くの載荷方法による載荷試験の実施が必要となり、費用、労力、期間の面で問題である。そこで最初のステップとして、小型の模型杭を用いて、各種載荷方法による載荷試験を実施して異なる載荷方法により得られる支持力特性の違いを調べ、次ステップとして、得られた特性のうち設計に大きな影響を与えると思われるものについて、さらに大型の模型杭を用いて各種載荷方法による載荷試験を行い、より詳細なデータを収集するという手順で実験を行った。

本資料では、実施した小型模型実験および大型模型実験について、実験方法および実験により得られた知見を報告する。

第2章 実験方法

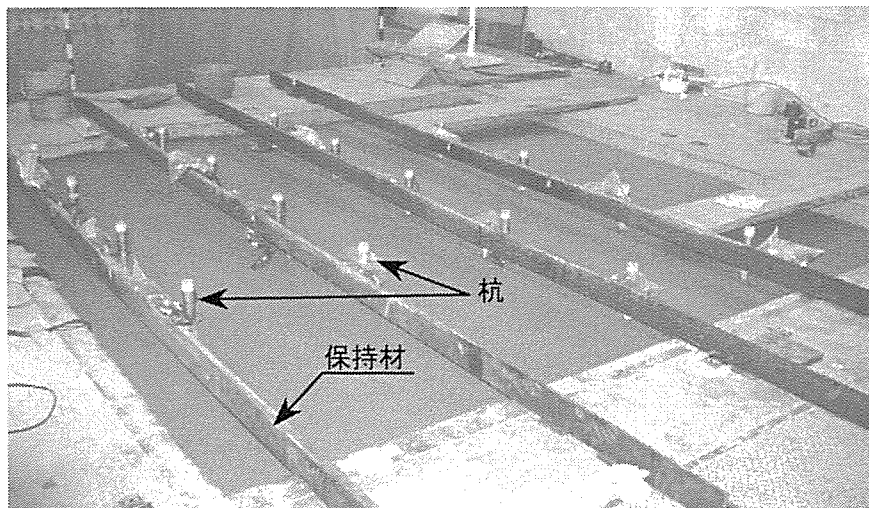
2.1 小型模型実験

2.1.1 実験土槽および地盤作成

本実験は、数種類の載荷方法における支持力特性の違いを調べるために、多本数の模型杭を同一地盤内に設置して行った。使用した土槽の大きさは、幅および奥行きが 3.5m、深さが 3.0m である（写真－2.1）。

地盤材料には鹿島砂を使用した。地盤の作成は、層厚 30cm 毎に人力による締固めを行い、10 層を積み重ねた（最上層は 20cm で全層厚 2.9m）。目標とする相対密度を 70% とし、各層の締固めにあたり、含水比 8% の砂を厚さ 34cm（最上層は 22.7cm）に撒き出し、これを所定の層厚 30cm（最上層は 20cm）まで突き固めることにより一定の相対密度を確保するように管理した。杭は地盤作成後に打設するのではなく、所定のレベルまで地盤を作成した後、杭を保持材により固定し、杭の側面の地盤を造成した。

地盤作成に使用した鹿島砂の物理特性表－2.1 に、また、上記の作成方法による地盤の密度および三軸試験結果を表－2.2 および表－2.3 に示す。



写真－2.1 小型模型実験に使用した土槽（地盤作成後）

表－2.1 地盤材料の物理特性一覧

土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.720
粒 度	礫 分 2～75mm %	1.3
	砂 分 75 μ m～2mm %	97.6
	シルト 分 5～75 μ m %	1.1
	粘土 分 5 μ m 未満 %	0.0
均 等 係 数	Uc	2.73
	曲 率 係 数 Uc $\sim$	1.09
最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm ³		1.759
最小乾燥密度 ρ_{dmin} g/cm ³		1.461

表－2.2 地盤の密度

	密 度 (g/cm^3)	相対密度 (%)
表 層 部	1.752	74
杭中間部	1.767	76
杭先端部	1.757	74

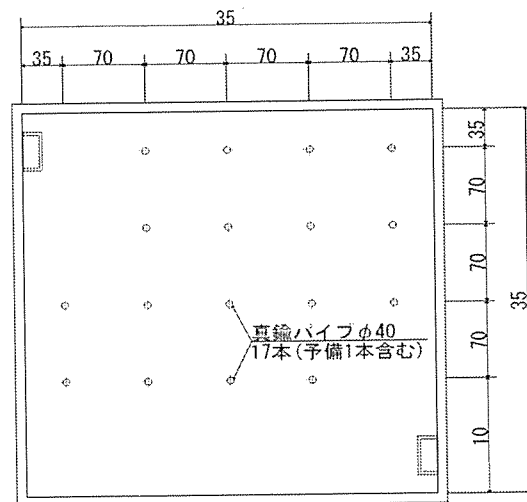
表－2.3 三軸試験結果

試験条件	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (度)
CD	1.57	34.3

2.1.2 模型杭

模型杭には、径 40mm、長さ 2.5m（根入れ長 2.32m）、肉厚 2mm の真鍮管 16 本を使用した。杭の軸方向剛性 EA は、26,800kN である。杭先端は閉塞とした。なお、杭材には深さ方向数カ所にひずみゲージを貼付け、ゲージ周りをコーティング材で保護しているため、杭表面には若干の凹凸を有する。

各杭は、70cm の間隔を確保して配置した。杭配置の平面図を図 2.1 に示す。



図－2.1 杭の平面配置図

2.1.3 計測項目

計測項目は、全ての杭を対象に杭頭荷重、杭頭変位量、杭体ひずみ5断面（各断面2点）とし、急速载荷については杭頭および杭先端の加速度の計測も実施した。また、16本配置したうちの3本（静的交番载荷、動的交番载荷、急速载荷それぞれ1本ずつ）については、杭先端近傍の鉛直方向の土圧変動を計測した。図-2.3に計測機器の配置状況を示す。

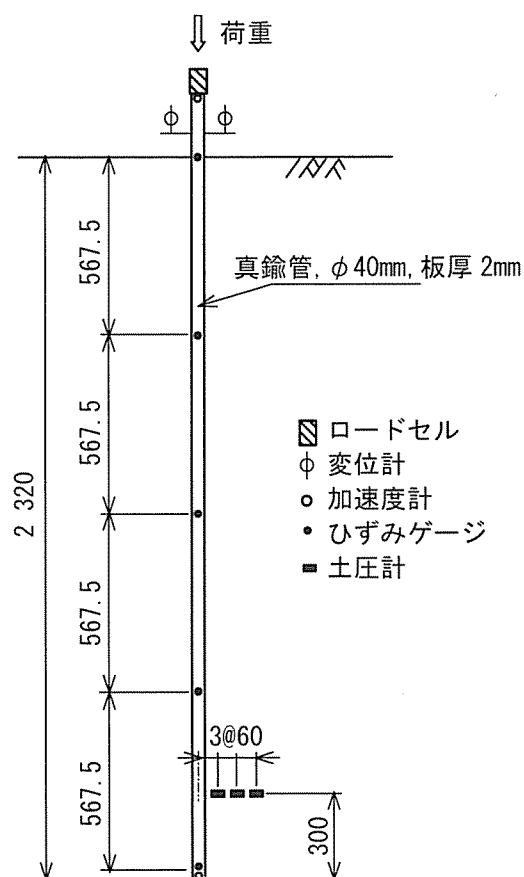


図-2.3 計測機器の配置

2.1.4 載荷方法

載荷には、パーソナルコンピュータにより変位量および載荷速度が制御できる 10kN 油圧ジャッキを使用し、載荷は連続載荷方式を、載荷の制御方法は変位制御を基本とした。本試験では、試験の再現性を確認するために、各載荷ケースについて最大 3 本の杭を用いて同一の載荷を行っている。載荷の種類および載荷した本数は表-2.4 のとおりである。また、ケース 1-3～1-6 の交番載荷試験の載荷パターンは図-2.2 のとおりである。

表-2.4 載荷ケース一覧

ケース	載荷方法	載荷速度	制御方法	本数
1-1	押込み	0.05mm/s	35mm まで単調押込み	3
1-2	引抜き	0.05mm/s	35mm まで単調引抜き	2
1-3	静的交番載荷 1	0.05mm/s	3 (サイクル/ステップ) × 6 ステップ 計 18 サイクル, $\pm 0.5, 1, 2, 3, 4, 8\text{mm}$	3
1-4	静的交番載荷 2	0.05mm/s	5 (サイクル/ステップ) × 9 ステップ 計 45 サイクル $\pm 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4\text{mm}$	1
1-5	動的交番載荷 1	2～32mm/s (1Hz)	3 (サイクル/ステップ) × 6 ステップ 計 18 サイクル, $\pm 0.5, 1, 2, 3, 4, 8\text{mm}$	3
1-6	動的交番載荷 2	2～20mm/s (1Hz)	5 (サイクル/ステップ) × 10 ステップ 計 50 サイクル $\pm 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5\text{mm}$	1
1-7	急速載荷	150mm/s	5 ステップ, 4, 8, 12, 16, 20mm	3

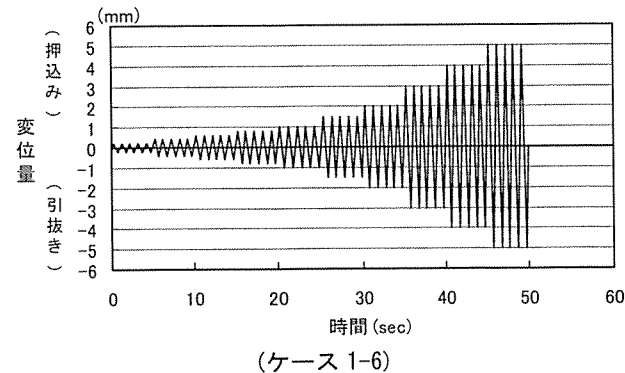
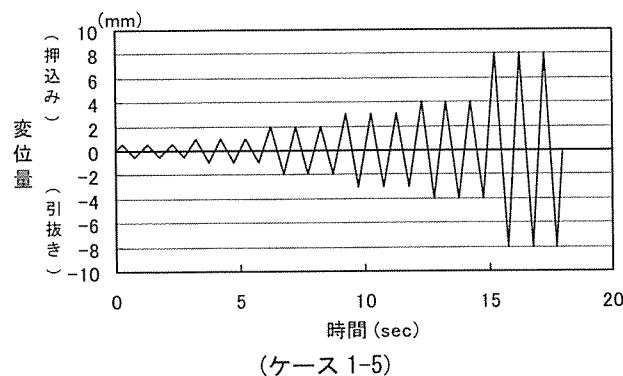
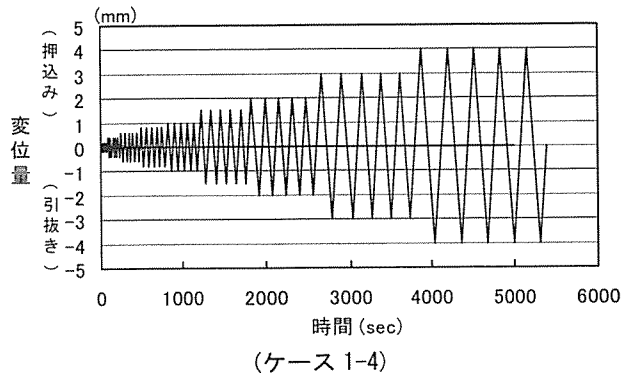
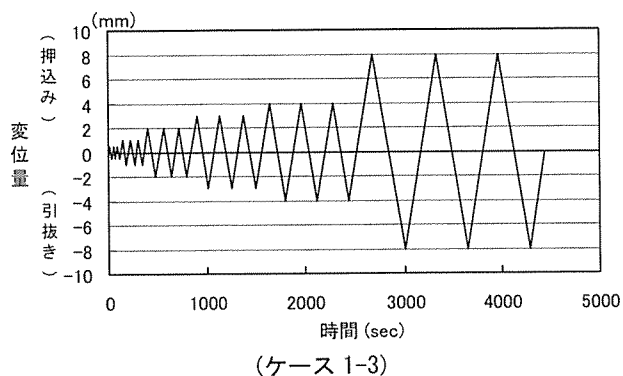


図-2.2 載荷パターン

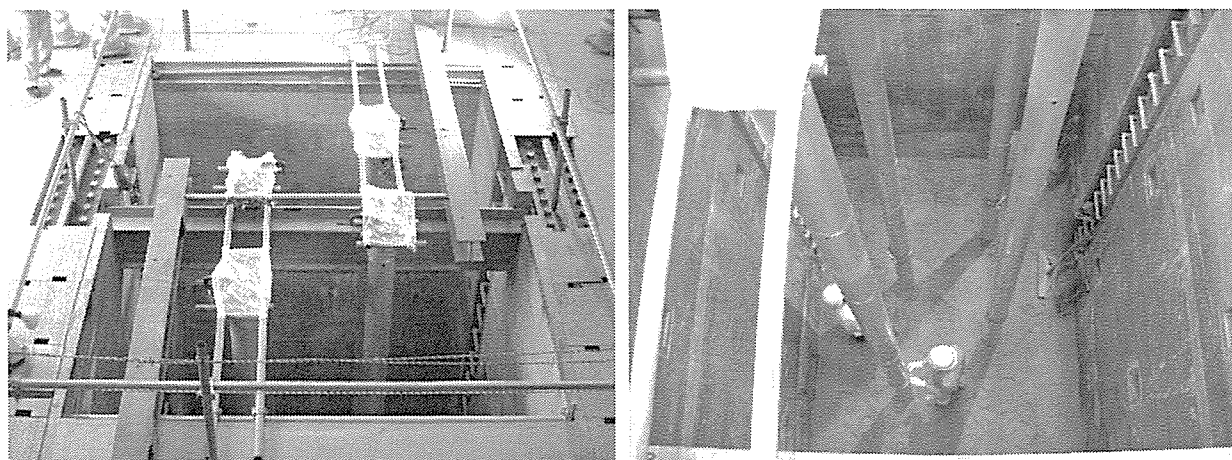
2.2 大型模型実験

2.2.1 実験土槽および地盤作成

本実験は、小型模型実験の結果を受け、検討の対象とする杭の支持力特性を押込み試験、静的交番载荷試験および急速载荷試験により得られる支持力特性の違いなど特定のものに限定し、4本の大型模型杭（根入れ長8m）を幅4m、奥行き3m、深さ11mの土槽（写真－2.2）に設置して行った。

地盤材料には小型模型実験と同様に鹿島砂を使用し、地盤の作成についても、層厚30cm毎に人力による締固めを行う方法とした。目標とする相対密度を土槽底面より杭先端から上1層まで（下層部）は80%、それ以上（上層部）は40%とし、各層の締固めにあたり、含水比5%の砂を下層部では厚さ34cm、上層部では31cm撒き出し、これを30cmまで突き固めることにより所定の相対密度を確保するように管理した。

杭先端レベルまで地盤を作成した後、杭頭を保持材により固定して杭を鉛直に設置し、その後に杭側面の地盤を造成した。地盤の密度を表－2.5に、上記の作成方法による地盤の三軸試験結果を表－2.6に示す。また、動的コーン貫入試験（オートマチックラムサウンディング試験）の結果より換算したN値の分布を図－2.4に示す。



写真－2.2 大型模型実験に使用した土槽（杭立込み後）

表－2.5 地盤の土質条件

	密度 (g/cm^3)	相対密度 (%)
上層部	1.581	37
下層部	1.781	81

表－2.6 三軸試験結果

	試験条件	粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (度)
上層部	CD	4.2	34.3
下層部	CD	3.6	37.5

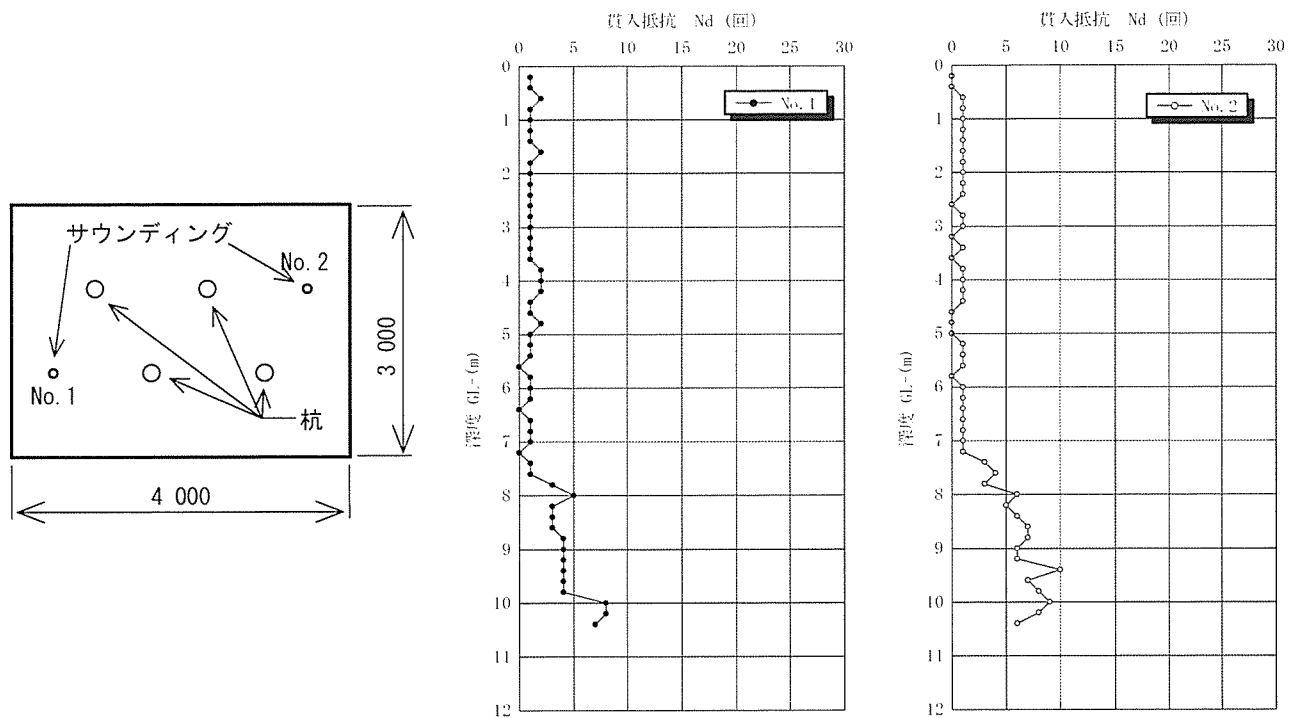


図-2.4 N 値の分布

2.2.2 模型杭

模型杭には、径 200mm、長さ 8.5m（根入れ長 8m）、肉厚 5mm のアルミニウム管を使用した。杭の軸方向剛性 EA は、214,000kN である。杭先端は鋼板により閉塞した。各杭は、杭間隔 120cm 以上（杭径の 6 倍以上）を確保して配置した。

2.2.3 計測項目

計測は、全ての杭を対象に杭頭荷重、杭頭変位量、杭体ひずみ9断面（各断面4点）、鉛直方向の土圧について行った。土圧計は、G.L. -4m および G.L. -6m にそれぞれ3～4点配置した。急速載荷試験については、杭頭および杭先端の加速度も計測した。図-2.7 に計測機器の配置状況を示す。

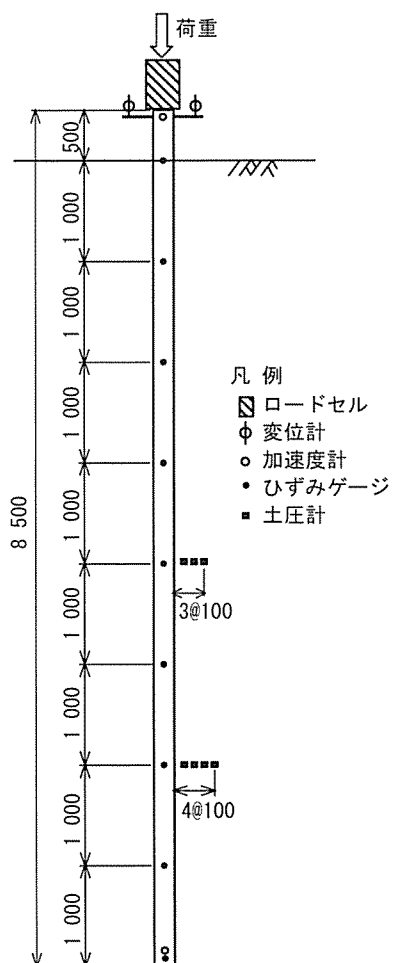


図-2.7 計測機器配置図

2.2.4 載荷方法

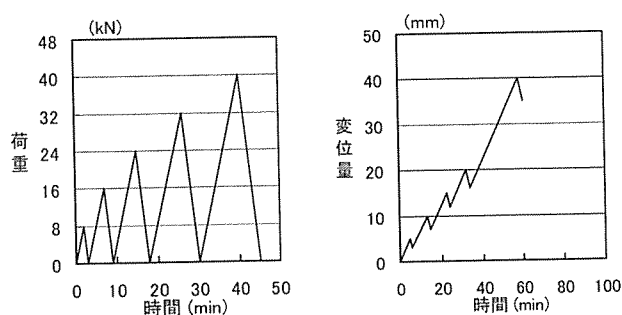
載荷の種類と載荷方法は表-2.7のとおりである。

押込み試験および交番載荷試験における載荷は、容量 500kN の複動式油圧ジャッキを使用した。なお、小型模型実験の結果、静的交番載荷試験と動的交番載荷試験とでは支持力特性に明確な差がみられなかったことから、交番載荷試験は静的のみ実施した。押込み試験および交番載荷試験は最初は荷重制御により行い、変位が急増し始めた段階で変位制御に切り替えた。なお、押込み試験では除荷時の変位制御は荷重がゼロになるまでとした。押込み試験および交番載荷試験の載荷パターンをそれぞれ図-2.5、図-2.6に示す。

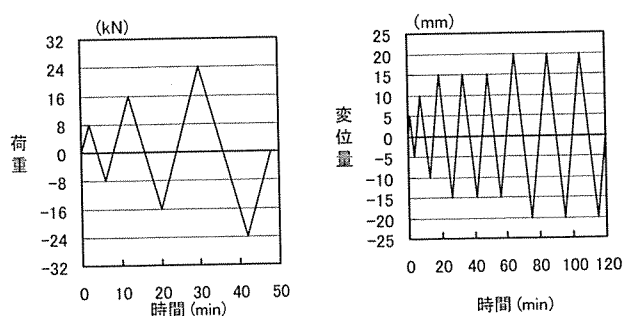
表-2.7 載荷ケース一覧

ケース	載荷方法	載荷速度・時間	制御方法
2-1	押込み	荷重制御：4kN/min ^{*)} 変位制御：1mm/min ^{*)}	荷重：8, 16, 24, 32, 40kN(1 サイクル/ステップ) 変位：5, 10, 15, 20, 40mm(1 サイクル/ステップ)
2-2	静的交番載荷	荷重制御：4kN/min 変位制御：1mm/min	荷重：±8, 16, 24kN(1 サイクル/ステップ) 変位：±5, 10mm(1 サイクル/ステップ), ±15, 20mm(3 サイクル/ステップ)
2-3	急速載荷	約 0.05sec	エネルギー：0.12, 0.24, 0.36, 0.6, 0.84kN・m (1 サイクル/ステップ), 1.2kN・m(2 サイクル/ステップ), 2.4kN・m(3 サイクル/ステップ)

*) ケース 2-1 の速度は載荷時の速度であり、除荷時は載荷時の 2 倍の速度とした

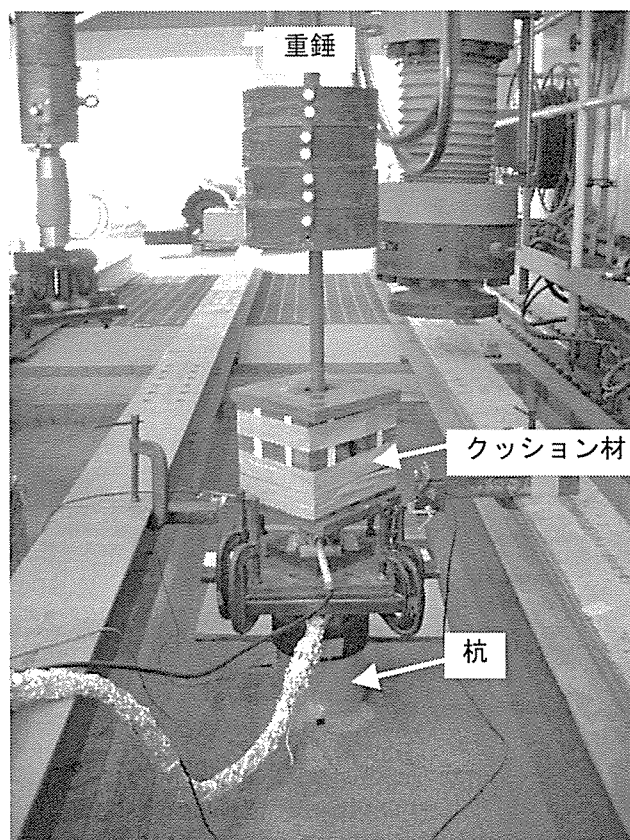


(荷重制御) (変位制御)
図-2.5 押込み試験の載荷パターン



(荷重制御) (変位制御)
図-2.6 交番載荷試験の載荷パターン

急速載荷試験は、杭頭にクッション材を載せ、そこに重錘を落下させる方法により載荷を行った（写真－2.3）。クッション材にはウレタンゴムを使用し、クッション材の厚さにより載荷時間が調整でき、また重錘の質量および落下高さにより載荷荷重の大きさが調整できる。表－2.7 に示した急速載荷におけるエネルギーとは重錘の重量と落下高さの積であり、重錘は質量 120kg および 300kg の 2 種類を使用した。



写真－2.3 急速載荷試験の載荷方法

3 章 実験結果

3.1 小型模型試験結果のバラつきについて

小型模型実験において複数回の载荷を行ったケース 1-1 (押込み), ケース 1-2 (引抜き), ケース 1-3 (静的交番载荷試験 1) およびケース 1-5 (動的交番载荷試験 1) の杭頭荷重 P ~ 杭頭変位量 S 関係をそれぞれ図-3.1~図-3.4 に示す (以降, これらの関係は押込み側を正として示す)。どの载荷パターンでも大まかな傾向は一致するものの, 同一変位地点における荷重の値にはバラつきが見られ, 最大と最小とでおよそ 1~2 割程度の差が生じていた。そのため, 小型模型実験結果を用いて定量的な評価をすることは難しいと考えられることから, 以降の実験結果の整理においては, 小型模型実験結果は定性的な評価にのみ用いることにした。なお, 次節以降および付属資料においては, 複数回の载荷を行った実験ケースについて, 特に明示していない限り 2 本目の試験結果を図示している。

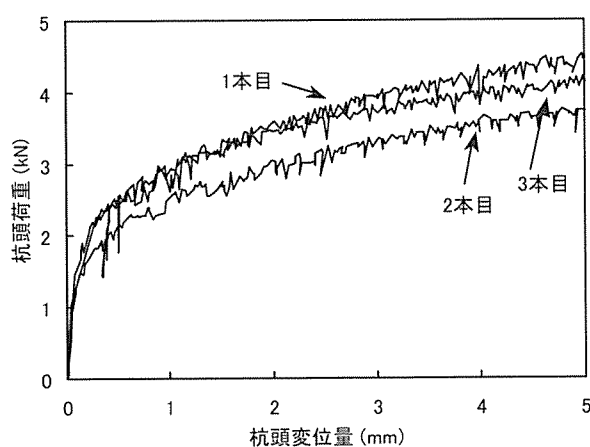


図-3.1 ケース 1-1 (押込み試験)

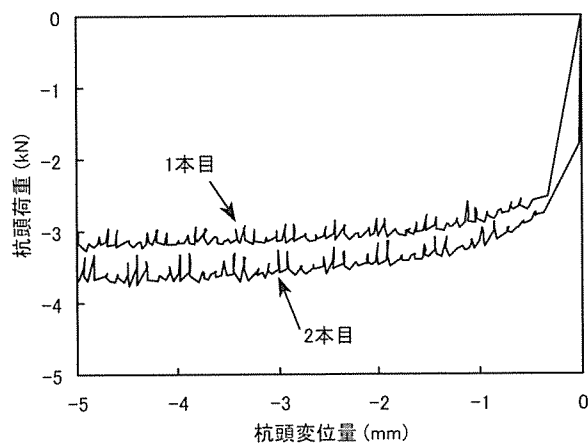
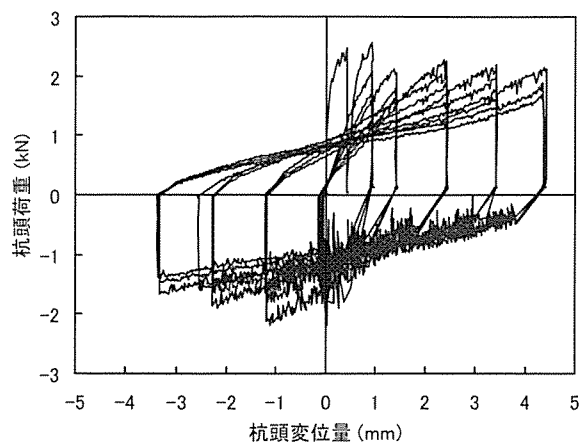
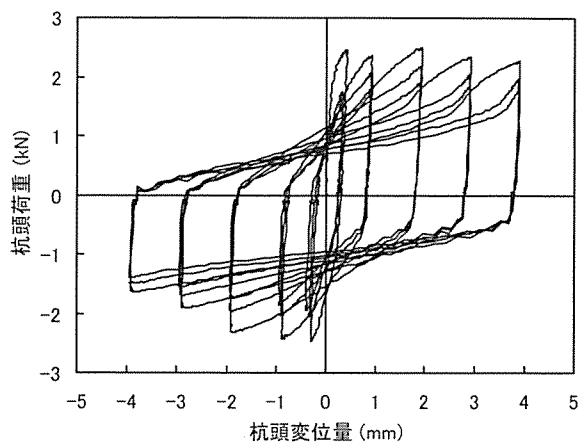


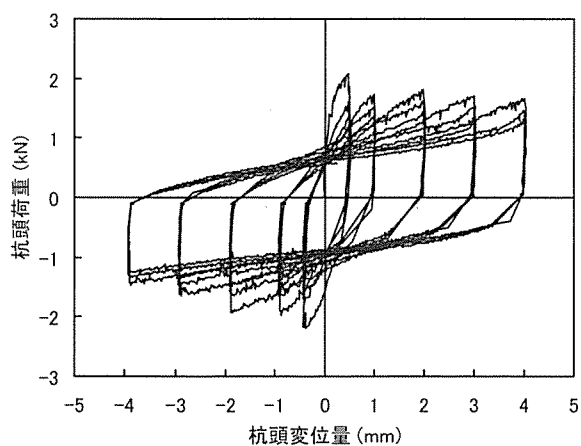
図-3.2 ケース 1-2 (引抜き試験)



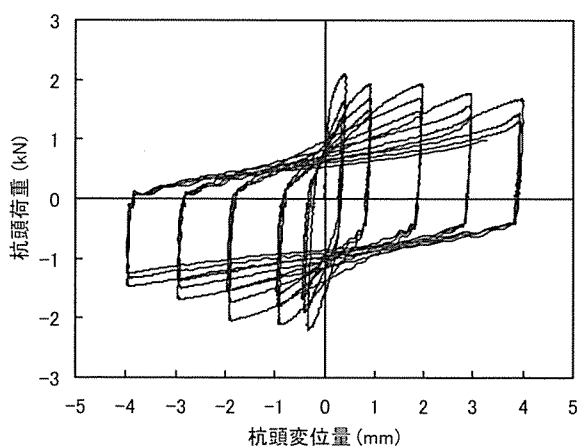
(a) 1 本目



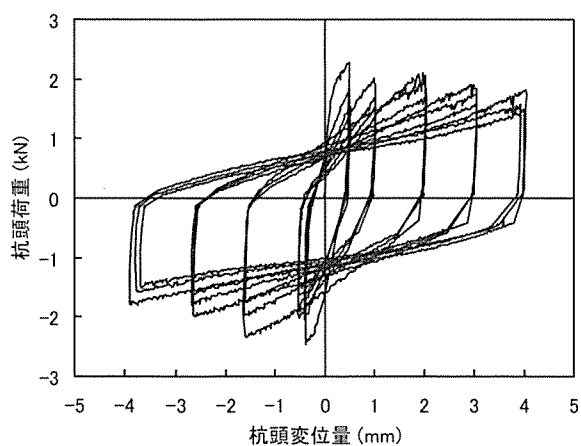
(a) 1 本目



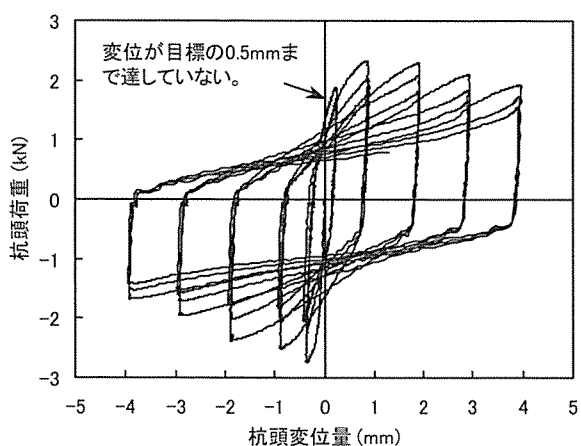
(b) 2 本目



(b) 2 本目



(c) 3 本目



(c) 3 本目

図-3.3 ケース 1-3 (静的交番载荷 1)

図-3.4 ケース 1-5 (動的交番载荷 1)

3.2 正負交番載荷試験結果

3.2.1 杭頭荷重

小型模型実験において、地震時荷重を想定し、周波数を一定とした正負繰返し荷重を載荷したケース 1-5 および 1-6 の杭頭荷重 P ～ 杭頭変位量 S の関係をそれぞれ図-3.5 および図-3.6 に示す。降伏点の判定は、 $\log P \sim \log S$ 曲線における折れ点により行った。いずれのケースも原点を中心として対称に近い履歴となっている。ケース 1-5 は最初のステップから降伏点（押込み側降伏荷重 1.6kN）を超えた大変位域に達するケースであり、ケース 1-6 は微小変位領域において弾性的挙動を再現したケースである。図-3.6 (b) には初めの 2 ステップ (10 サイクル) を拡大した $P \sim S$ 関係図を添付している。

ケース 1-5 では、降伏点に達する第 1 ステップ第 1 サイクル以降には、同一変位時の杭頭荷重が第 1 ステップ 1 サイクル目の杭頭荷重を下回っており（引抜き側は上回る）、同様にケース 1-6 では第 2 ステップ 2 サイクル目以降の荷重が第 2 ステップ 1 サイクル目より下回る結果となっている。これらのことから、降伏に達した以降には、繰返し荷重により軸方向抵抗力が低下すると考えられる。

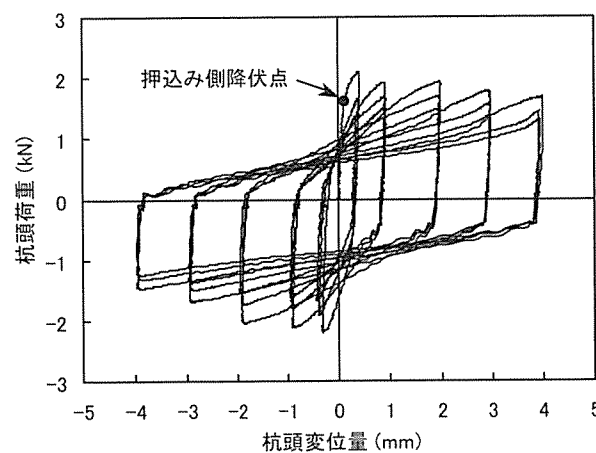
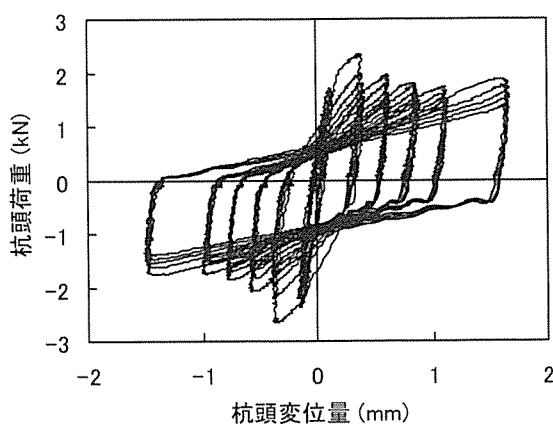
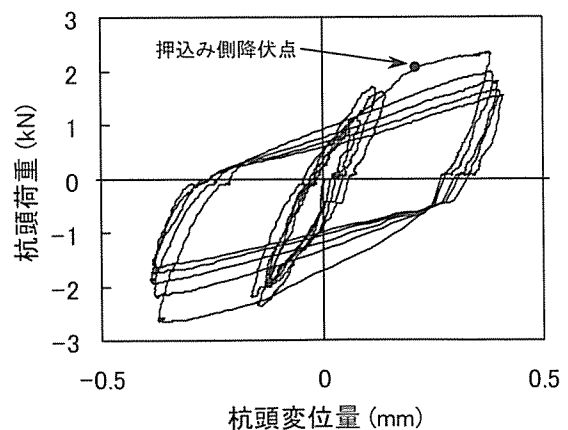


図-3.6 動的交番載荷（ケース 1-5）の $P \sim S$ 関係（1～5 ステップ）



(a) 1～6 ステップ



(b) 1～2 ステップ

図-3.6 動的交番載荷（ケース 1-6）の $P \sim S$ 関係

次に大型模型実験の結果を示す。後述するが、小型模型実験における押し込み試験と交番载荷試験との間に顕著な差が見られたのに比べて、静的交番载荷試験と動的交番载荷試験とは明確な差が見られなかったことや、载荷装置の問題等を理由に、大型模型実験では動的交番载荷試験を行わず、交番载荷試験として静的交番载荷試験のみを実施している。図-3.7に、ケース 2-2 の杭頭荷重 P ～ 杭頭変位量 S の関係を示す。ケース 1-5 および 1-6 のそれとは異なり、押し込み側と引抜き側で非対称となっている。引抜き側については、上記と同様に降伏した第 4 ステップ以降の同一変位時における抵抗力は低下する傾向にある。

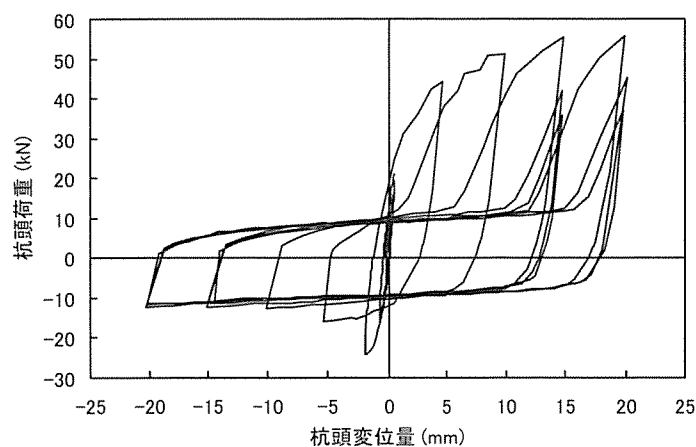


図-3.7 大型模型交番载荷(ケース 2-2)の $P \sim S$ 関係

3.2.2 周面抵抗力特性

図-3.8 および図-3.9 に杭体に作用する軸力の深度方向分布図を示す。グラフは交番载荷試験の各サイクル中における最初のステップで変位が最大となった時刻における軸力である。軸力はひずみゲージより算出した。図を見ると軸力は地表面から杭先端までほぼ一様に変化しており、各ひずみゲージ間の周面抵抗力度は区間ごとに特異な性質は見られない。よって本報告では、周面抵抗力は区間分けすることなく杭全体の周面抵抗力として取り扱う。

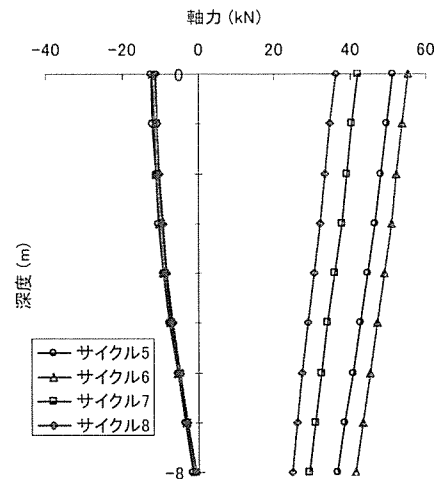
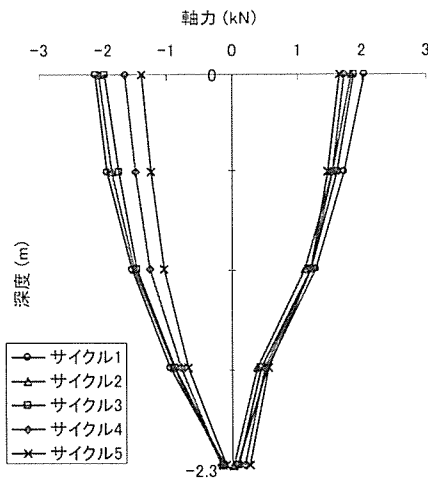


図-3.8 動的交番载荷(ケース 1-5)の軸力分布

図-3.9 大型模型交番载荷(ケース 2-2)の軸力分布

図-3.10 および図-3.11 にそれぞれケース 1-5 の第 1~5 ステップおよびケース 2-2 の周面抵抗
 P_s ~杭頭変位量 S の関係を示す。

ケース 1-5 は原点を中心として対称な履歴となっているのに対し、ケース 2-2 は押込み側と引抜き
 側で抵抗特性が若干異なっている。ケース 2-2 において降伏に至るまでのサイクルの抵抗力が正負非
 対称となっているのは、荷重で制御を行っており、押込み荷重に対してはその一部を杭先端地盤が支
 持しているためである。

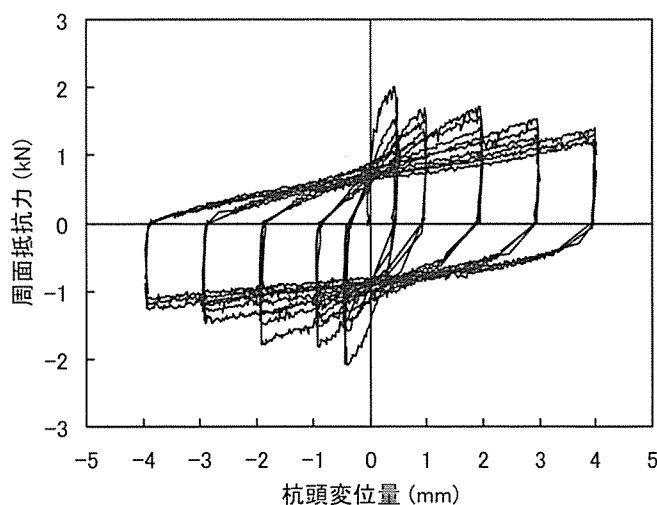


図-3.10 小型模型動的交番载荷(ケース 1-5)の P_s ~ S 関係

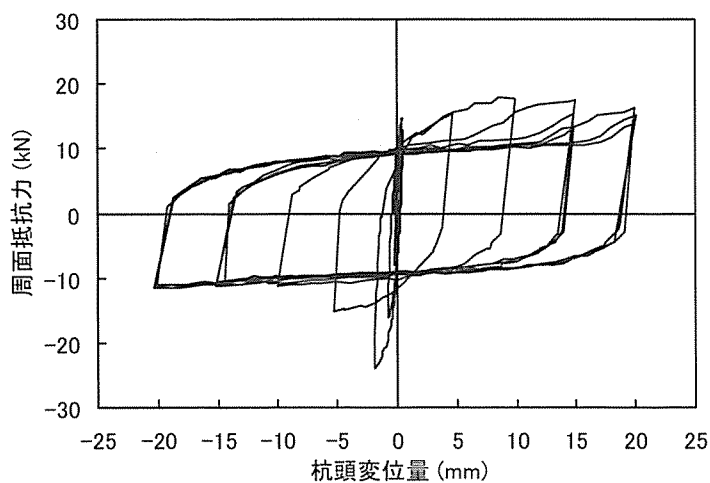


図-3.11 大型模型交番载荷(ケース 2-2)の P_s ~ S 関係

3.2.3 先端抵抗力特性

図-3.12 にケース 2-2 の先端抵抗力 P_p ～先端変位量 S_p の関係を示す。

押し込み荷重により生じた沈下量のほとんどが残留変位量として残るため、その後の繰返し载荷の過程でより大きな下向きの変位量が生じるまでは先端抵抗が期待できない。変位制御をしており、引抜き時には杭先端が地盤から浮き上がった状態となり、図の横軸の負側では抵抗力が発揮されていない。

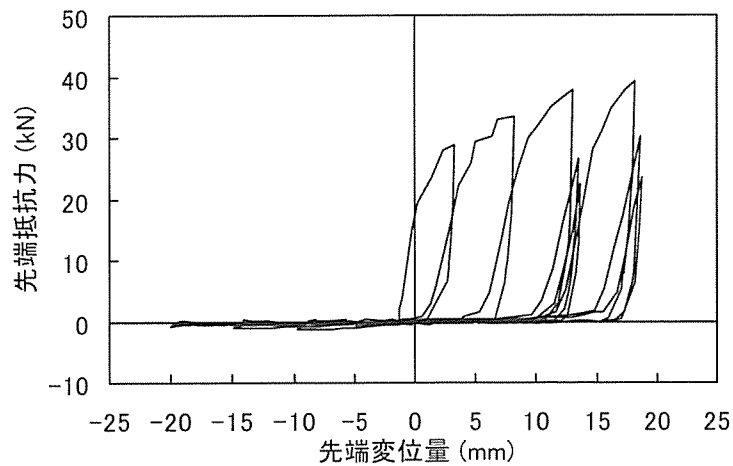


図-3.12 大型模型交番载荷(ケース 2-2)の $P_p \sim S_p$ 関係 (4 ステップ以降)

3.2.4 載荷速度の影響

図-3.13 は、ケース 1-3（静的交番載荷 1）とケース 1-5（動的交番載荷 1）の各サイクルにおける 1 ステップ目のピーク点を抜き出してプロットしたものである。正側および負側の初期のサイクルにおいて動的交番載荷の方が若干上回るものの、全体的な傾向として明確な差は見られなかった。

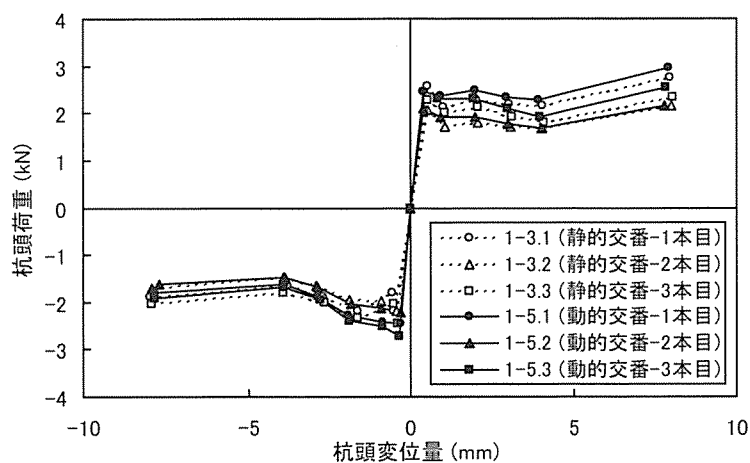


図-3.13 小型模型交番載荷試験における速度の影響

3.2.5 周面抵抗の減衰特性

交番载荷試験による減衰定数は基準¹⁾に示されている鉛直減衰定数 h_{vc} の考え方と同様に, 図-3.14 に示す履歴ループの面積と三角形の面積より次式で求めている。

$$h_{vc} = \frac{1}{2\pi} \frac{\triangle W}{W} \times 100 (\%) \quad (2.a)$$

ここに, $\triangle W$: 履歴面積 (図-3.14 の網掛け)
 W : $\triangle oab$ の面積 + $\triangle ocd$ の面積
 P_d : 押込み側の最大荷重
 P_u : 引抜き側の最大荷重
 S_d : 押込み側の最大荷重時の変位置
 S_u : 引抜き側の最大荷重時の変位置

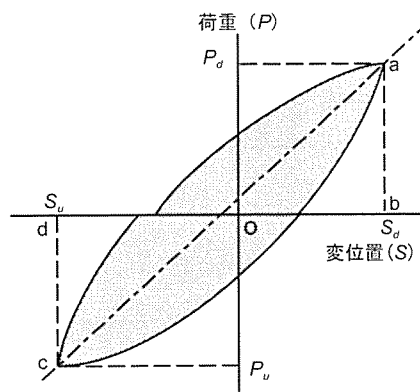


図-3.14 鉛直減衰定数の求め方

図-3.15 に小型模型実験と大型模型実験の交番载荷試験 (ケース 1-3~1-6, 2-2) における周面抵抗の減衰定数を示す。杭頭変位置の増大に応じて減衰定数は大きくなる傾向がある。図を見ると, 変位置と減衰定数に相関関係があるものと考えられる。また, 小型模型実験における静的交番载荷と動的交番载荷とは顕著な差が見られず, 減衰定数に関しても動的荷重と静的荷重とで差がないものと考えられる。

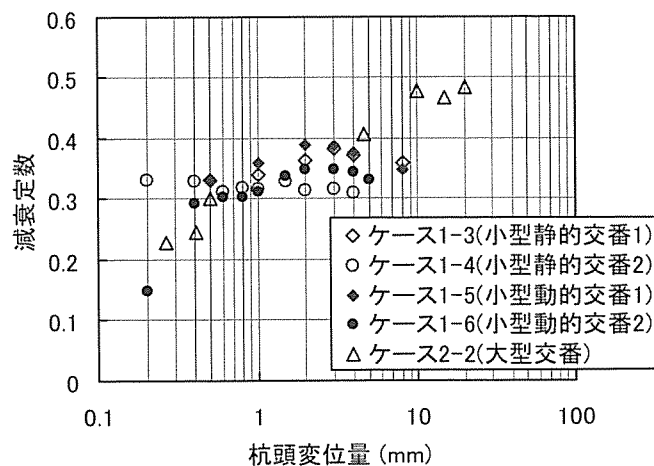


図-3.15 周面抵抗の減衰定数と変位置の関係

図-3.16 には周面抵抗の減衰定数と降伏前後のサイクル数との関係を示している。ケース 1-3（静的交番载荷 1）およびケース 1-5（動的交番载荷 1）は 1 サイクル目、ケース 1-6（動的交番载荷 2）は 6 サイクル目、ケース 2-2（大型実験の交番载荷）は 4 サイクル目で降伏している。ケース 1-4（静的交番载荷 2）は、データ点がまばらなため降伏点の判定が困難であったが、杭頭荷重が最大を記録したのが 1 サイクル目であったことから、ケース 1-4 では 1 サイクル目に降伏したものと仮定して図-3.16 にプロットした。それぞれのケースにおける降伏以降の各サイクルの減衰定数はほぼ一定の値で推移している。図中に示したサイクル数の範囲において制御している変位量は、小型模型実験の交番 2 で $\pm 0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$ 、交番 1 で $\pm 0.5 \sim 8 \text{ mm}$ 、大型模型実験の交番で $\pm 20 \text{ mm}$ までであり、減衰定数の収束値は、制御した変位量の大きさに依存していると考えられる。

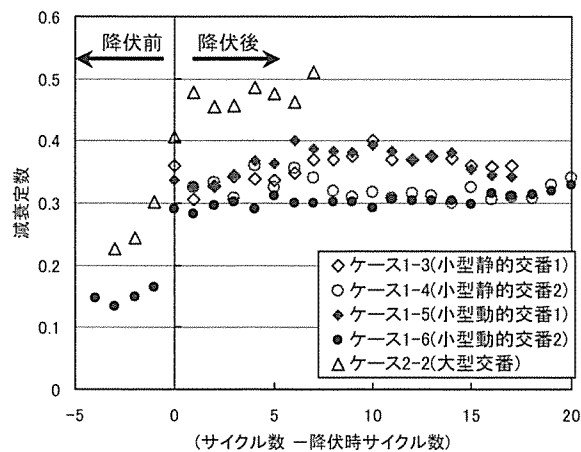


図-3.16 周面抵抗の減衰定数とサイクル数の関係

次に、地盤の拘束圧の違いの影響を見るために、ケース 2-2 の区間 2-3 (G.L. -1～2m)および区間 7-8 (G.L.-6～7m)の周面抵抗力に対する減衰定数を図-3.17 に示す。例えば、両区間における 9 サイクル目（制御変位量 $\pm 20\text{mm}$ ）の正の周面抵抗力と負の周面抵抗力の絶対値の和は、区間 2-3 で 2.1kN 、区間 7-8 で 3.9kN であり、拘束圧が 2 倍程度異なるが、減衰定数はそれほど顕著な差がない。また、図-3.17 では、杭長、杭径や地盤の密度等の条件が異なる小型模型実験と大型模型実験の結果において、 $0.5\sim 5\text{mm}$ の領域の減衰定数の傾向に顕著な差が見られないことから、周面抵抗の減衰定数は地盤の拘束圧にそれほど依存しないものと考えられる。

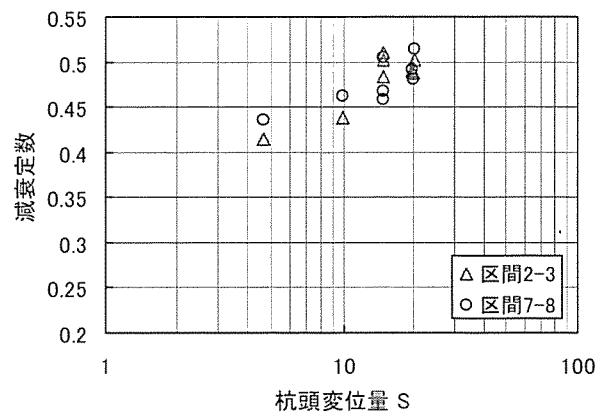


図-3.17 深度方向の減衰定数の違い

3.3 大型模型試験による正負交番载荷試験と押込み試験との比較

3.3.1 杭頭荷重

図-3.18 に大型模型実験におけるケース 2-1 (押込み) とケース 2-2 (交番载荷) の杭頭荷重 P ~ 杭頭変位量 S の関係を重ねて示す。図中の右側のグラフには、変位領域の小さいステップを抜き出して示している。グラフ中の数字はステップ数である。押込み試験は第 5 ステップ目に降伏に達し、降伏荷重は 36kN, 交番载荷試験は第 3 ステップの引抜き荷重载荷時に降伏に達し、降伏荷重は引抜き側で 19kN である。交番载荷の押込み側の降伏荷重は 21kN である。ここで、これらの降伏荷重は、 $\log P \sim \log S$ 曲線における折れ点により判定している。

交番载荷の押込み側の抵抗力和押込み試験の抵抗力の差は降伏前にはあまり見られないが、降伏後、徐々に大きくなっている。杭径の 10% の杭頭変位量 (= 20mm) での荷重を極限荷重と定義すれば、押込み試験の極限荷重が 79.1kN であるのに対し、交番载荷試験では 55.6kN であり、3 割程度低下している。

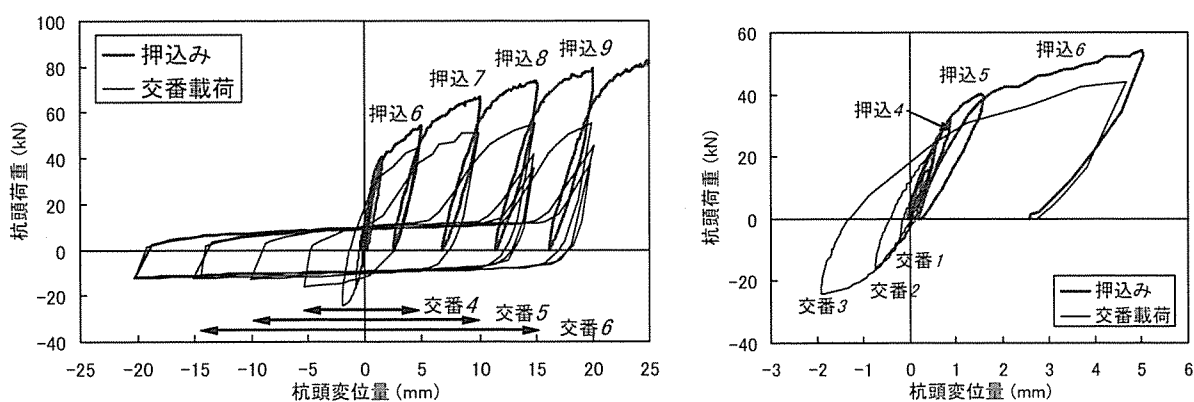


図-3.18 押込みと交番载荷の $P \sim S$ 関係

3.3.2 周面抵抗

図-3.19 に押込み試験と交番载荷試験の周面抵抗 P_s ～ 杭頭変位量 S の関係を示す。押込み試験では第5ステップで周面抵抗が最大となった後、概ね 30kN の抵抗力で残留している（図中(A)）のに対し、交番载荷試験では 10～15kN で、押込み試験の残留値の 1/2 程度にまで低下している（図中(B)）。押込み試験は杭および周囲の地盤の移動が一方向であるのに対し、交番载荷試験では押込み・引抜きを繰り返す。荷重が一方向からのみ加わる場合には土粒子の噛み合わせ状態が変化せずに抵抗力が十分に発揮されるが、逆方向の力が作用することで土粒子の噛み合わせ状態が乱されたため抵抗力が弱くなり、このような差が見られたのではないかと考えられ、载荷方法の違いが抵抗性に大きな差を与えていると言える。また、交番载荷試験では载荷サイクルが増えるのに伴い、発揮される周面抵抗は一定値に収束していき（図中(C)）、押込み側と引抜き側で収束の速さに若干差があるものの、いずれも押込み試験の最大周面抵抗性に対し 0.3 程度にまで低下した。地盤条件や杭の施工条件等により、押込みと交番载荷の抵抗性の差の程度は異なることが予想されるが、既往の交番载荷試験の結果を見る限りにおいてもこの载荷方法による抵抗特性の違いは表れているものと考えられる。

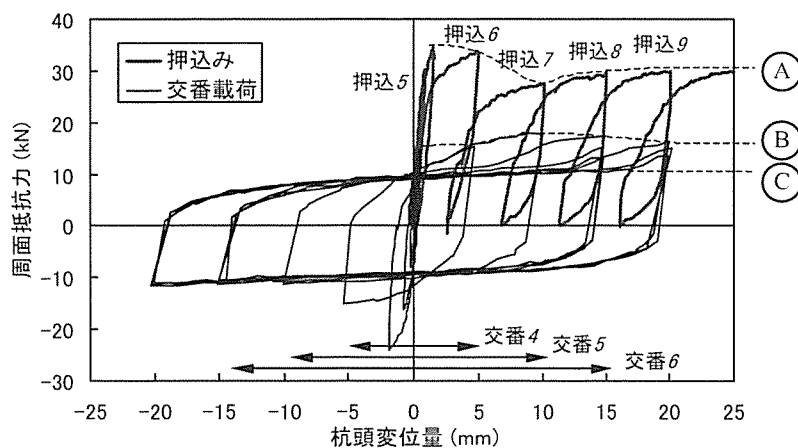


図-3.19 押込みと交番载荷の P_s ～ S 関係

3.3.3 先端抵抗力

図-3.20 にケース 2-1 およびケース 2-2 の先端抵抗力 P_p ～先端変位量 S_p の関係を示す。押込み変位が大きいほど交番载荷の先端抵抗力が押込みのそれを下回っている。この差の原因には、作成地盤のばらつきのほかに、押込みでは杭先端が常に地盤に接しているのに対し、交番载荷では杭先端が地盤から浮上り、杭先端の地盤内応力が局部的に解放された影響が考えられる。

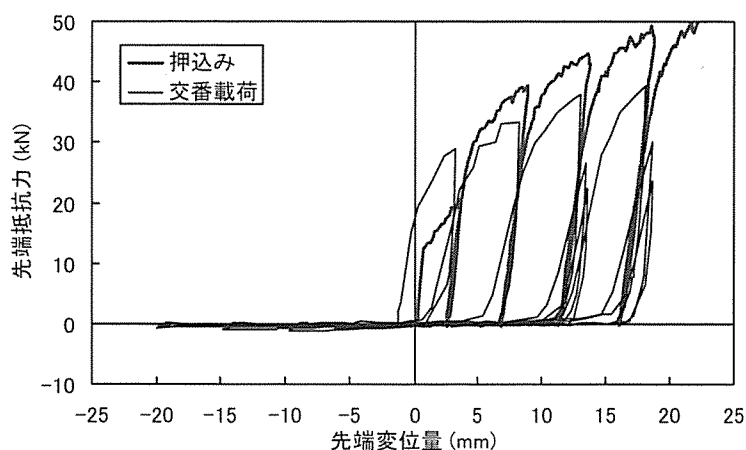


図-3.20 押込み(2-1)と交番载荷(2-2)の $P_p \sim S_p$ 関係

3.3.4 杭頭ばね定数

図-3.21 にケース 2-1（押込み）およびケース 2-2（交番载荷）における杭頭ばね定数 K_v の推移を示す。押込み試験のばね定数は、杭頭荷重 P ～ 杭頭変位量 S 関係において各サイクルの最大荷重点とゼロ荷重点を結んだ直線の勾配であり、図中の最も右の点は降伏荷重点（ $P_v=36\text{kN}$ ）に対する勾配である。交番载荷試験のばね定数は、 P ～ S 関係において降伏に至るまでの各サイクルの最大荷重点および最小荷重点を結んだ直線の勾配である。

図-3.21 における交番载荷の 3 サイクル目については、1～2 サイクル間のばね定数の低下に比べて低下の度合いが大きい、これは降伏後の変位の進行によるものと考えられる。交番载荷の降伏時ばね定数を厳密に判定するのは難しいが、道路橋示方書に規定される降伏点（ $\log P \sim \log S$ 曲線における折れ点などで判定される荷重）における杭頭ばね定数を交番载荷試験の結果について評価する場合、図-3.21 の降伏後（交番载荷の 3 サイクル目以降）のサイクルにおける両ケースのばね定数の推移から、交番载荷試験の杭頭ばね定数は押込み試験でのその 1/2 程度と考えられる。降伏時の杭の支持力は、押込み試験では約 8.5 割程度、交番载荷試験で約 7 割程度と、そのほとんどを周面抵抗力が負担していることや、交番载荷試験のばね定数が引抜き側の影響も加味されてより周面摩擦力が支配的になっていることを考えれば、前述したように、交番载荷試験の降伏後の周面抵抗力が押込み試験のそれに比べ 1/2 程度となっていることに対応するものである。

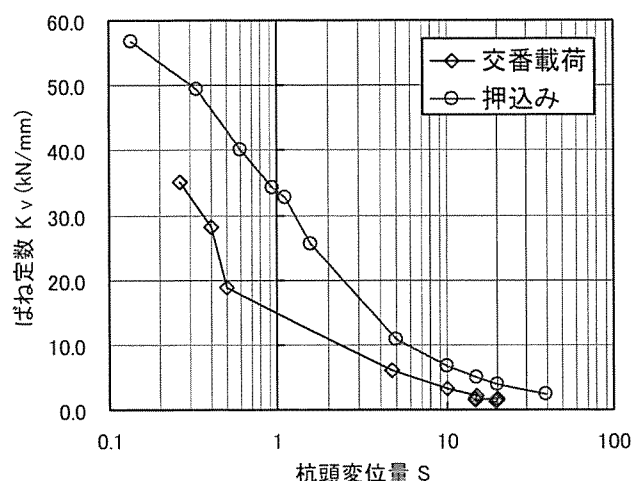


図-3.21 杭頭ばね定数の比較

3.4 急速载荷試験

急速载荷試験等の動的载荷試験の結果の解釈において、杭体の慣性力（加速度）に起因する抵抗力の他に杭体の速度に起因した動的抵抗力を考慮する必要がある。この速度に依存した抵抗力 R_v は、減衰定数を c 、杭体の速度を v として、

$$R_v = cv \quad (2.1)$$

で表される¹⁾。しかし、本研究において実施した実験の結果や、平成9年度に土木研究所において実施した鉛直载荷模型実験²⁾（以下「H9 実験」と呼ぶ）の結果では、動的载荷試験において速度が低下した後にも静的な試験における抵抗力を大きく超える抵抗力が発揮されているものや、急速载荷より速度が小さいにも関わらず急速载荷と同程度の抵抗力が発揮されている試験結果等が得られている。

図-3.22 にはケース 2-1（押込み）およびケース 2-3（急速）の杭頭荷重 P ～杭頭変位量 S 関係（2-1 は 5 サイクル目以降、2-3 は 6 サイクル目以降）を示す。また、杭頭位置の加速度計より推定される鉛直下向き方向の最大速度を表-3.1 にまとめた。杭体の速度が低いケース 2-3 の 6 サイクル目および 7 サイクル目では、ケース 2-1 よりも大きな抵抗力が、また 8～10 サイクル目では速度が低下する最大変位付近でケース 2-1 より大きな抵抗力が発揮されていた。

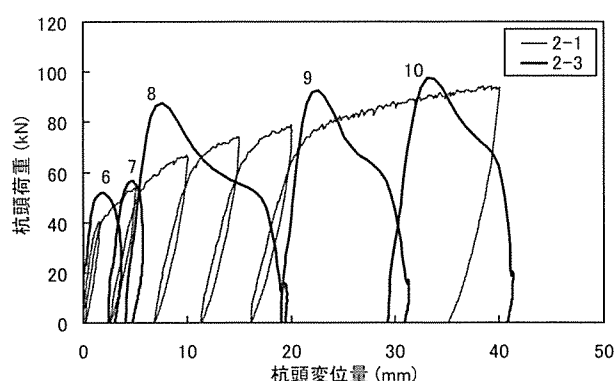


表-3.1 ケース 2-3 の最大速度

サイクル	最大速度 (m/s)
6	0.29
7	0.20
8	1.39
9	1.28
10	1.21

図-3.22 ケース 2-1 および 2-3 の P ～ S 関係

3.5 実験結果のまとめと考察

各種の載荷方法による模型杭の鉛直載荷実験から得られた抵抗力特性をまとめると以下のとおりである。

- ① 正負繰返し荷重を受けた杭の周面抵抗力は、降伏に達した後では押込み試験で発揮される周面抵抗力に比べて大きく低下する。
- ② 杭先端抵抗特性は、引抜きには抵抗せず、押込みに対しては一度与えられた変位量を超える大きな変位量に達するまでは抵抗が発揮されない非対称のスリップバイリニア型（図-3.23 参照）の特性を示す。
- ③ 押込み試験により得られる杭頭ばね定数に対し、交番載荷で得られる杭頭ばね定数は小さくなる。これは、地表面付近の周面抵抗力に①の特性が表れるためと考えられる。
- ④ 正負繰返し荷重を受ける杭の周面抵抗の減衰定数は、変位の振幅の大きさに依存し、降伏に達した後は頭打ちとなる。

これらの抵抗力特性は、杭種や杭の施工法、地盤条件等によって発揮される程度が異なると思われる。したがって、様々な条件に対し、これらの特性に着目した実杭載荷試験が実施されることが望まれる。

一方で、現行の道路橋の設計法における杭の軸方向抵抗力特性には、図-3.24 に示すような押込み抵抗および引抜き抵抗の上限値を有するバイリニア型の抵抗力特性が用いられており、図中の初期のばね定数 K_{IE} は押込み試験における降伏点の勾配で評価され、押込み支持力または引抜き支持力の上限値は、押込み試験や引抜き試験の極限荷重（荷重～変位量曲線が変位量軸にほぼ平行となる時の荷重あるいは杭径の 10% の変位量時の荷重）等で評価される。大規模地震時の設計では、一般にこのようなモデルを用いた静的解析（プッシュオーバー解析）が行われ、正負繰返し荷重による影響は評価されていない。動的解析を実施する場合、押込み試験や引抜き試験から得られる支持力の上限値を持つ抵抗特性を用いたモデル化がなされ、また、抵抗モデルについても、周面抵抗力特性については非線形弾性モデル（図-3.25 参照）やバイリニアモデル（図-3.26 参照）が、先端抵抗力特性については非線形弾性モデル（非対称）が用いられ、①や②の特性は現状で一般的に使用されている解析ツールでは表現できない。これらが現行設計の実情であり、地震時の杭の軸方向抵抗力特性を精度良く評価することにより基礎設計に影響が現れるものと考えられる。

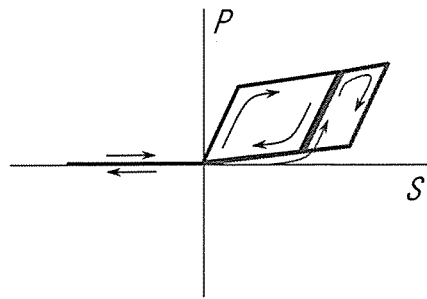


図-3.23 非対称スリップバイリニアモデル

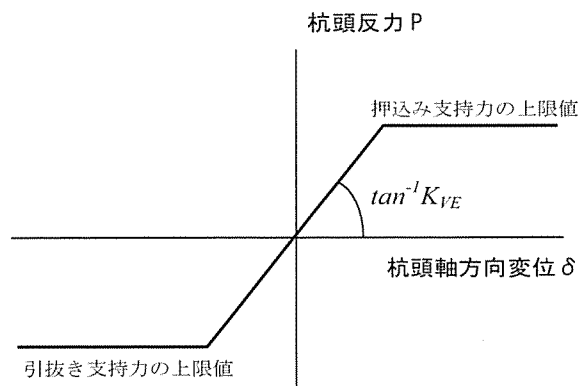


図-3.24 杭の軸方向の抵抗特性

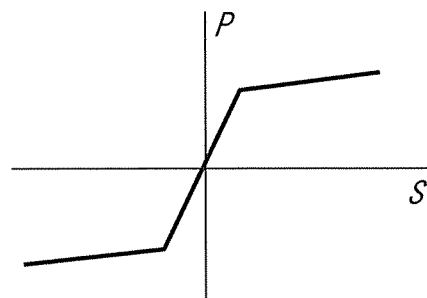


図-3.25 非線形弾性モデル

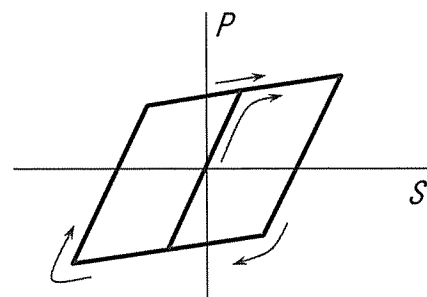


図-3.26 バイリニアモデル

第4章 まとめ

冒頭に述べたように、杭の鉛直載荷試験方法の多様化が進む中、杭基礎の地震時の挙動に関しては、水平抵抗特性に対する多くの研究がなされているものの、杭の軸方向抵抗特性については明確にされていない点が多く、その評価法が課題となっている。

本研究では、異なる載荷方法による模型杭の載荷試験を実施した。従来、支持力評価のベースとしていた押し込み試験、引抜き試験により得られる支持力特性と大規模地震時の杭の支持力特性とは大きく異なるであろうということが、鉛直交番載荷試験との対比により明らかになった。正負交番荷重を受ける杭では、その荷重が降伏荷重を上回ると周面抵抗力の著しい低下が見られるようになり、押し込み試験や引抜き試験などの一方向荷重の載荷試験により得られる極限支持力を期待できないことが判明した。

交番載荷試験の結果が押し込み試験などと異なる特性（抵抗力）を示すのは、降伏点に至った後である。現行設計における杭の軸方向抵抗特性は極限支持力と杭頭ばね定数の2つの特性値により表現されるが、模型実験における交番載荷試験において、支持力が降伏に至るステップまでは押し込み試験に近い特性を示し、降伏荷重を超える大きな荷重が繰返し作用する場合に支持力が押し込み試験よりも低下する特性が確認されたため、杭基礎の地震時応答特性を検討するにあたっては、降伏荷重の大きさに着目しておく必要がある。図-4.1に示すような同じ極限荷重を有する杭Aおよび杭Bの軸方向抵抗特性は、現行の道路橋示方書では同じ特性として評価されるが、杭Bは杭Aに比べて降伏荷重が小さく、比較的小さな杭頭荷重が繰返し作用しても周面抵抗力の低下につながると考えられる。逆に、杭Aは極限荷重に近い荷重が繰返し作用するまでは周面抵抗力の低下が起こらない。したがって、杭の降伏荷重 P_y と極限荷重（極限支持力） P_u との比 P_y/P_u の大きさが杭基礎の設計に与える影響を考慮できるモデルを用いる必要があるかもしれない。また、壁式橋脚の橋軸直角方向のように躯体の耐力が大きい場合には、基礎の降伏を許容する設計が行われるが、その際、正負交番荷重による周面抵抗力の低下を考慮することで得られる基礎の応答変位が大きく評価されることから、杭の降伏以降の支持力特性を適切に評価する必要がある。

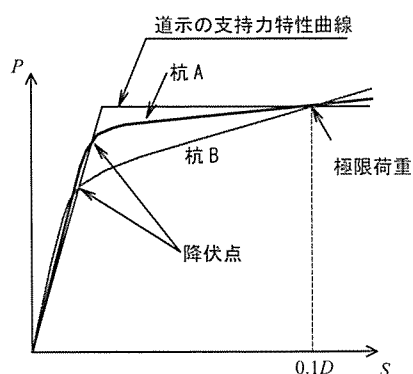


図-4.1 降伏荷重と極限荷重の関係

その一方で、降伏支持力に達した後、周面抵抗に関わる減衰効果は増大する傾向が見られた。したがって、杭頭作用力の静的成分は小さくなる可能性がある。

基礎の耐震設計を行うにあたり、地震時の作用力に近い荷重を載荷する鉛直交番載荷試験は、杭の支持力特性を評価するのに非常に有効な手段となり得ると考えられるが、鉛直交番載荷試験の実施例が非常に少ないのが実状であり、実地盤条件における周面抵抗力の低下の度合いなどの情報を収集するために、データの蓄積を行っていく必要がある。

また、地震時に杭基礎がロッキング挙動を起こす場合の外縁杭における杭頭の鉛直方向変位速度で押込まれる杭の軸方向抵抗力は、静的な載荷試験で確認される支持力より大きくなることも予想される。本研究内では、この抵抗特性についてその機構の解明を行うことができなかったため、定量的な評価を行うまでに至っておらず、現状の課題として残された。この結果を設計に見込むことができれば、杭基礎の設計の合理化につながるものと思われ、引き続きメカニズムの解明およびこの抵抗の定量的評価法の構築を行っていく必要がある。

以上のとおり、これまでの基礎の設計では取り扱われていない杭の支持力特性が模型実験において確認されたが、今後、新たな載荷試験方法による試験のデータの蓄積を行って、これらの特性を明らかにし、設計の精度の向上や合理化を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説―第一回改訂版―，2002.5
- 2) 建設省土木研究所：載荷速度を変化させた杭の鉛直載荷実験，土木研究所資料第 3626 号，1999.3
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2002.3

1. 小型模型実験結果

1.1 押し込み（ケース 1-1）

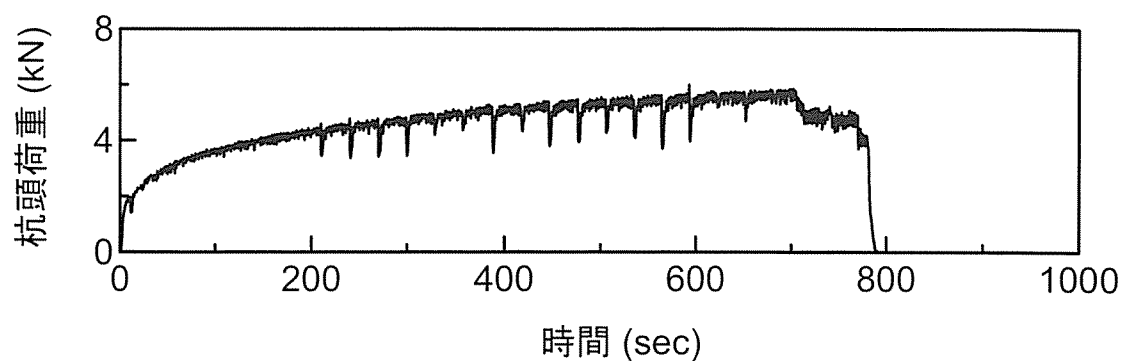


図-付 1.1. a ケース 1-1 : 杭頭荷重～時間

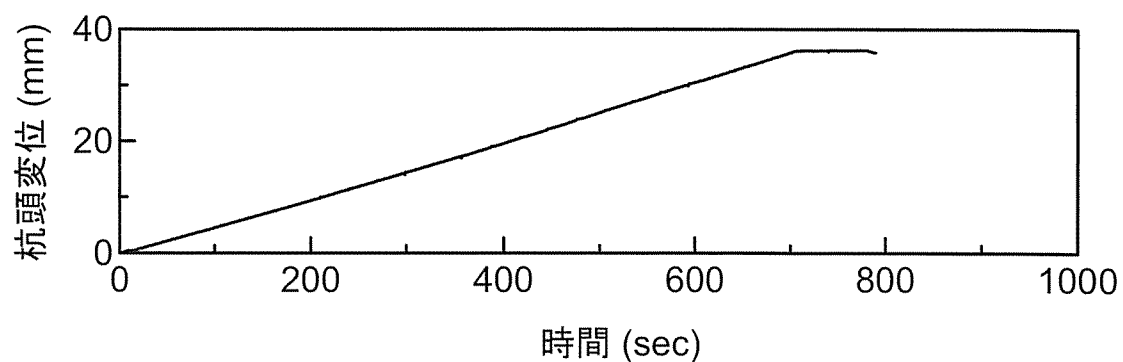


図-付 1.1. b ケース 1-1 : 杭頭変位～時間

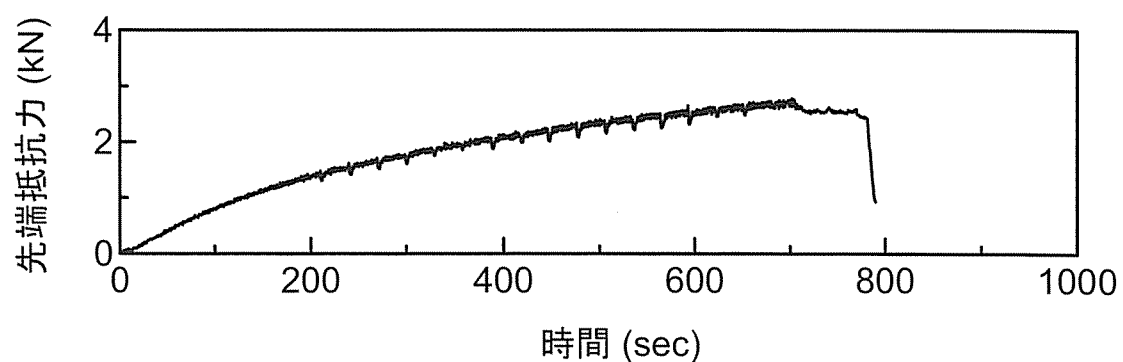


図-付 1.1. c ケース 1-1 : 先端抵抗力～時間

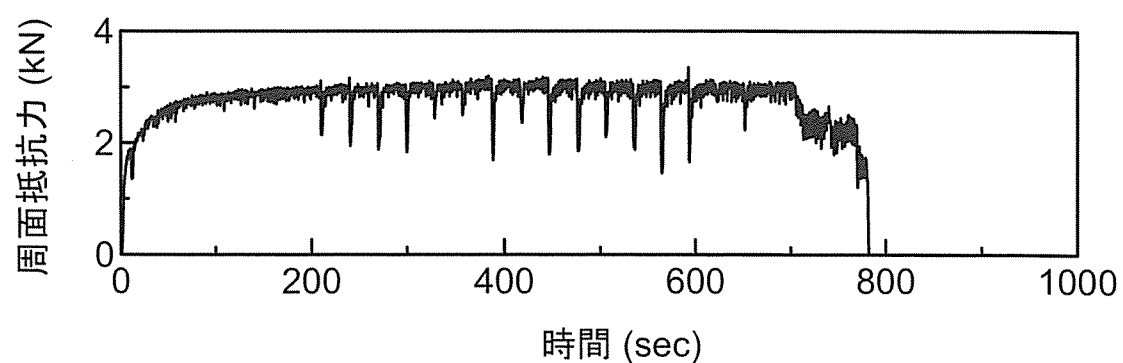
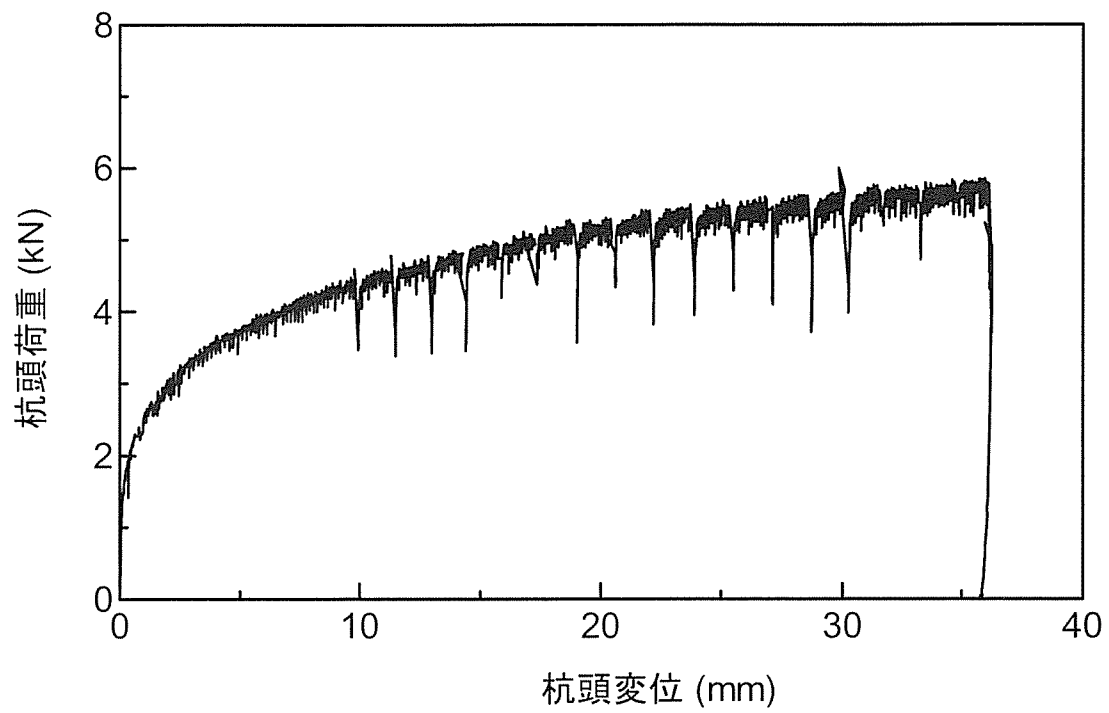
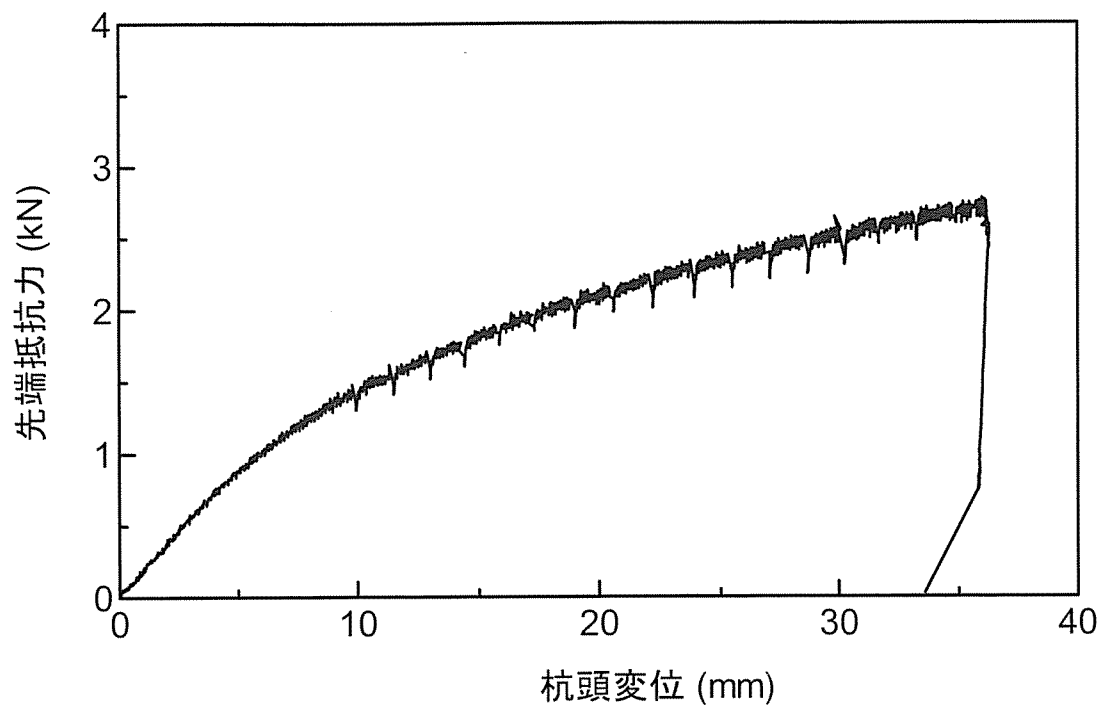


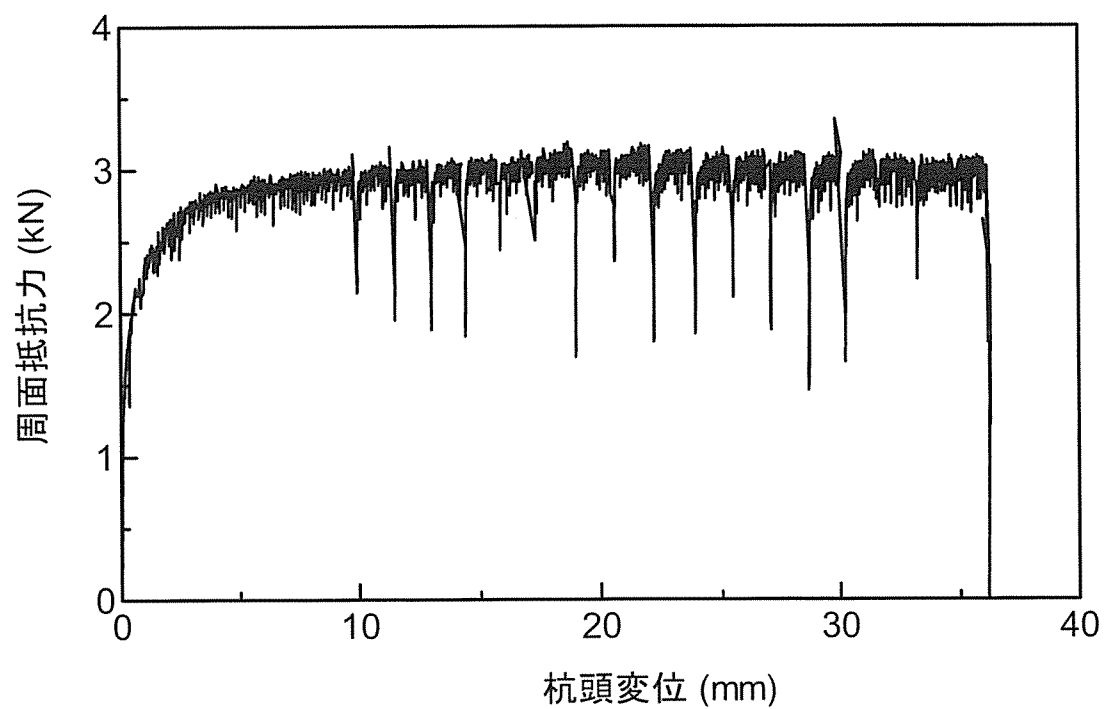
図-付 1.1. d ケース 1-1 : 周面抵抗力～時間



図一付 1.1.e ケース 1-1 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.1.f ケース 1-1 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 1.1.g ケース 1-1 : 周面抵抗力～杭頭変位

1.2 引抜き（ケース 1-2）

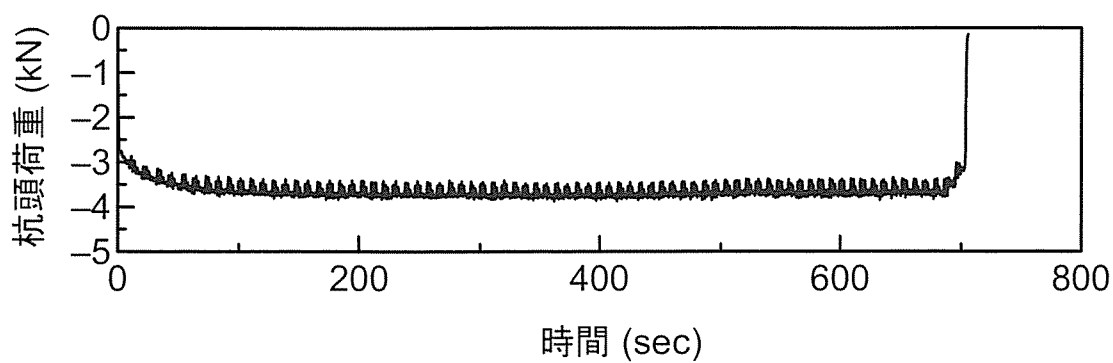


図-付 1.2. a ケース 1-2 : 杭頭荷重～時間

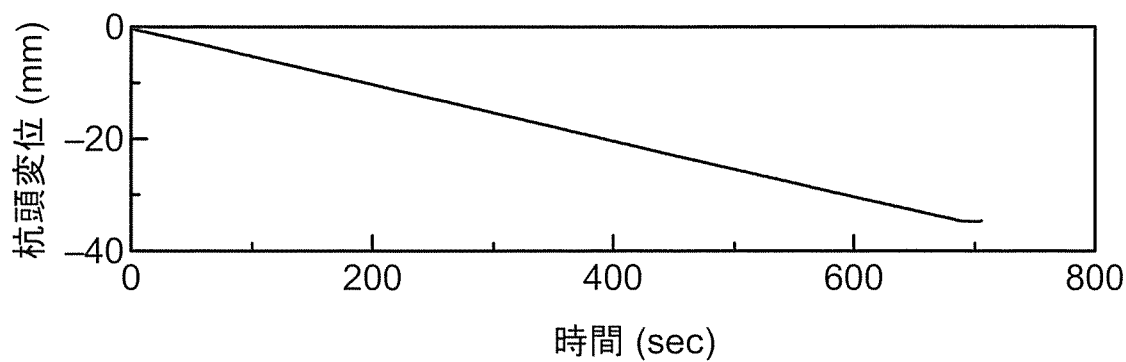


図-付 1.2. b ケース 1-2 : 杭頭変位～時間

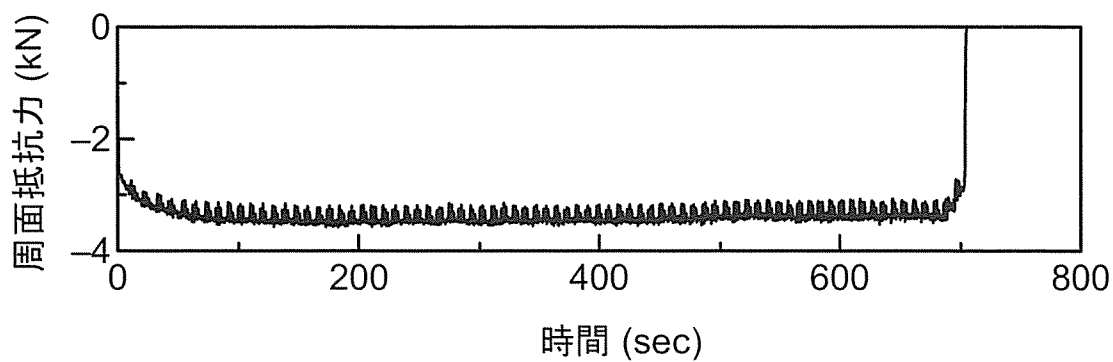
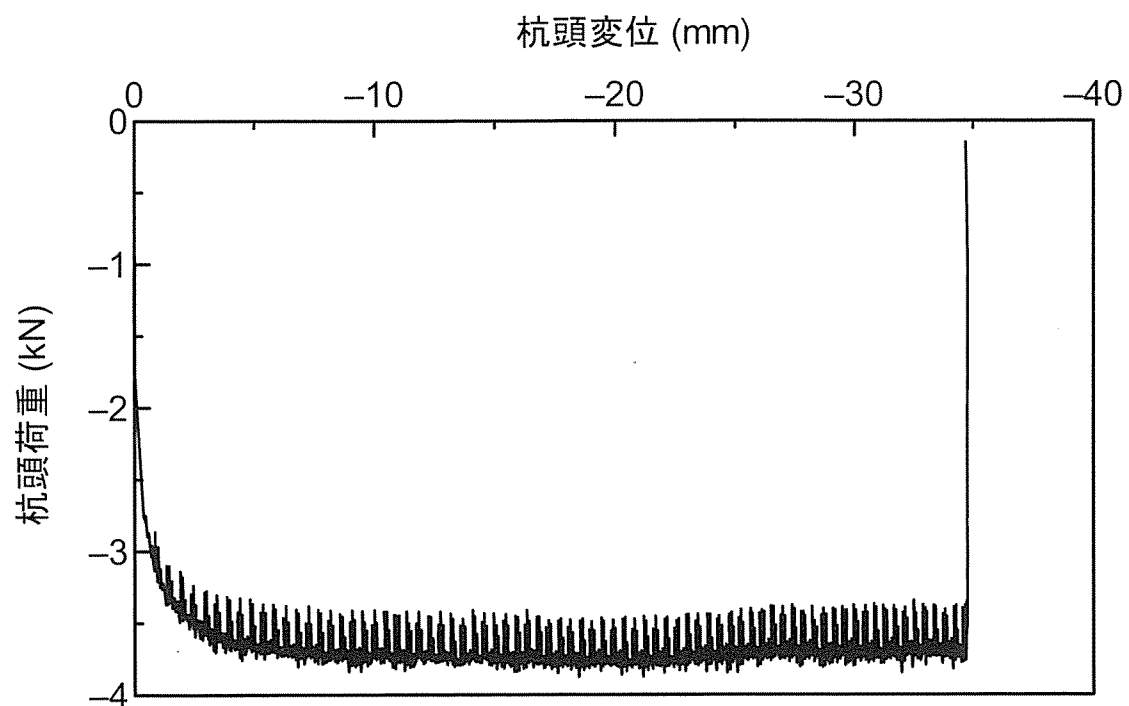
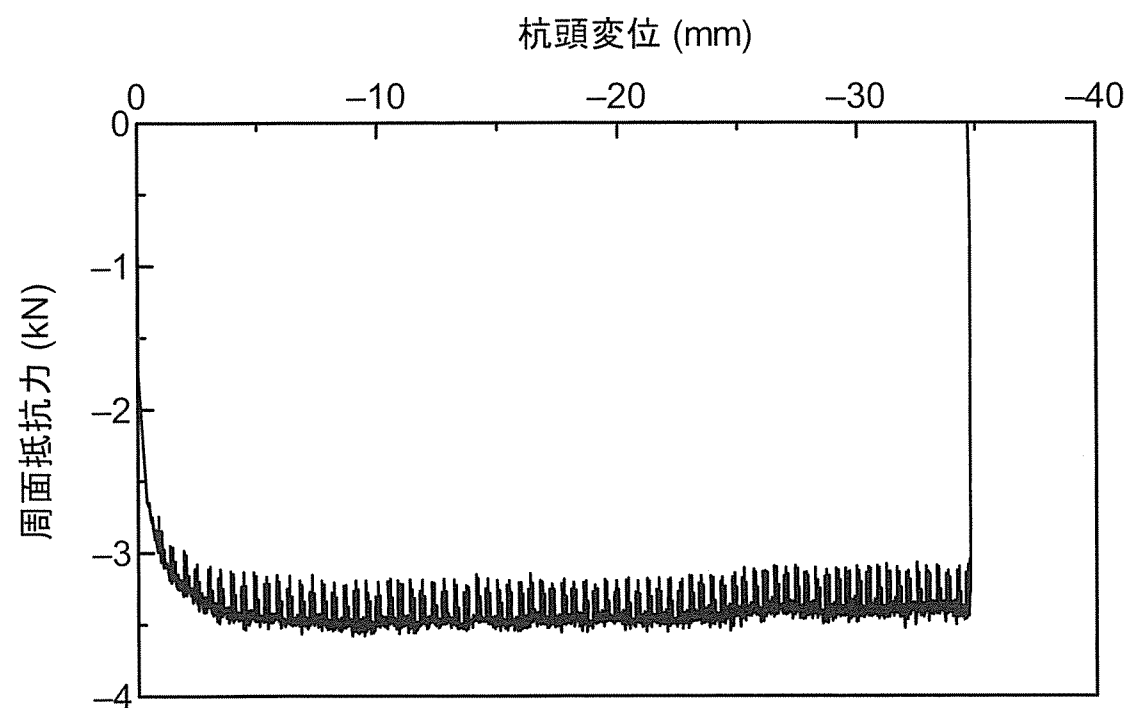


図-付 1.2. c ケース 1-2 : 周面抵抗力～時間



図一付 1.2. d ケース 1-2 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.2. e ケース 1-2 : 周面抵抗力～杭頭変位

1.3 交番载荷 (ケース 1-3~1.6)

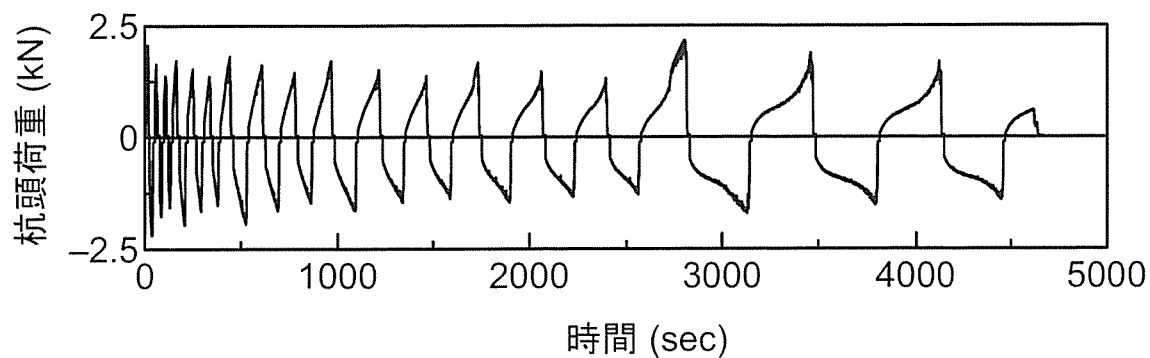


図-付 1.3.1.a ケース 1-3 : 杭頭荷重～時間

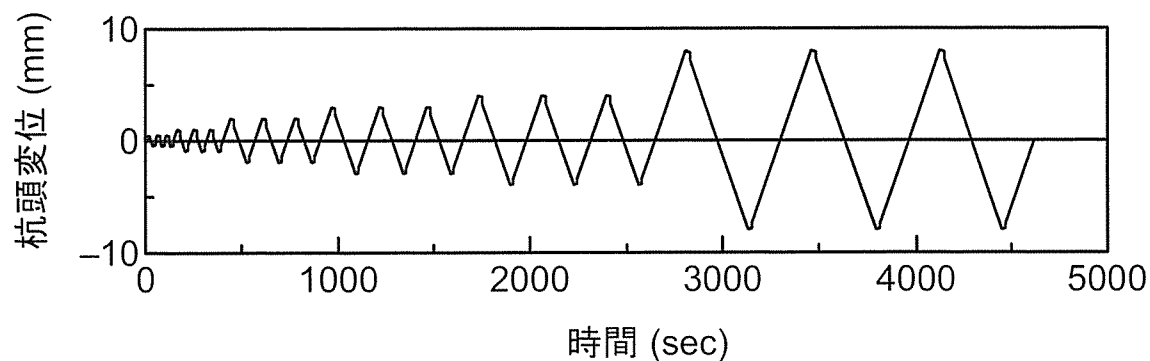


図-付 1.3.1.b ケース 1-3 : 杭頭変位～時間

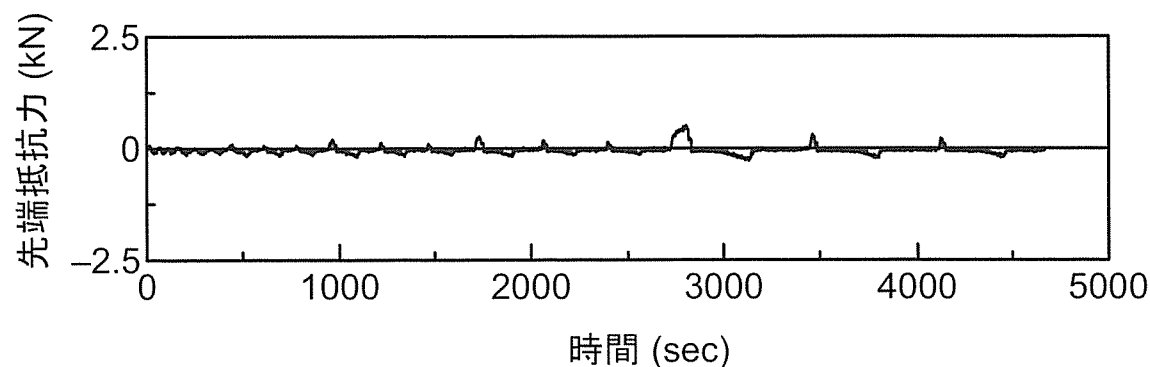


図-付 1.3.1.c ケース 1-3 : 先端抵抗力～時間

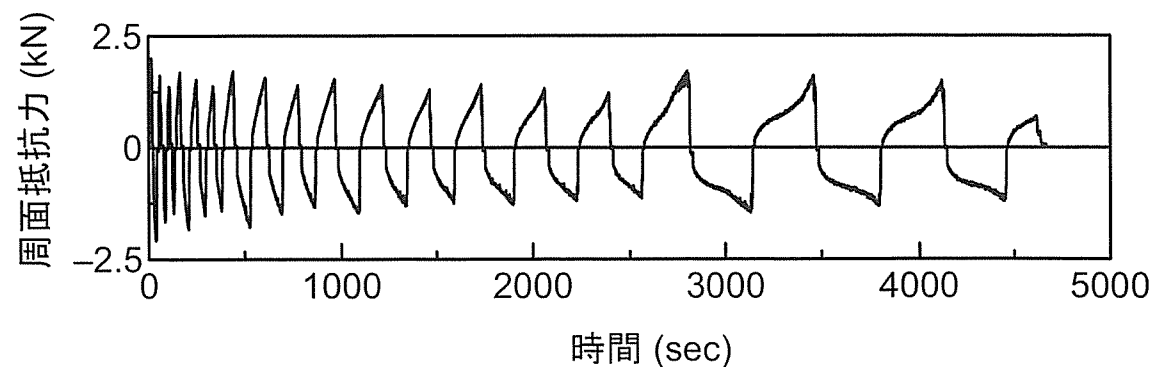
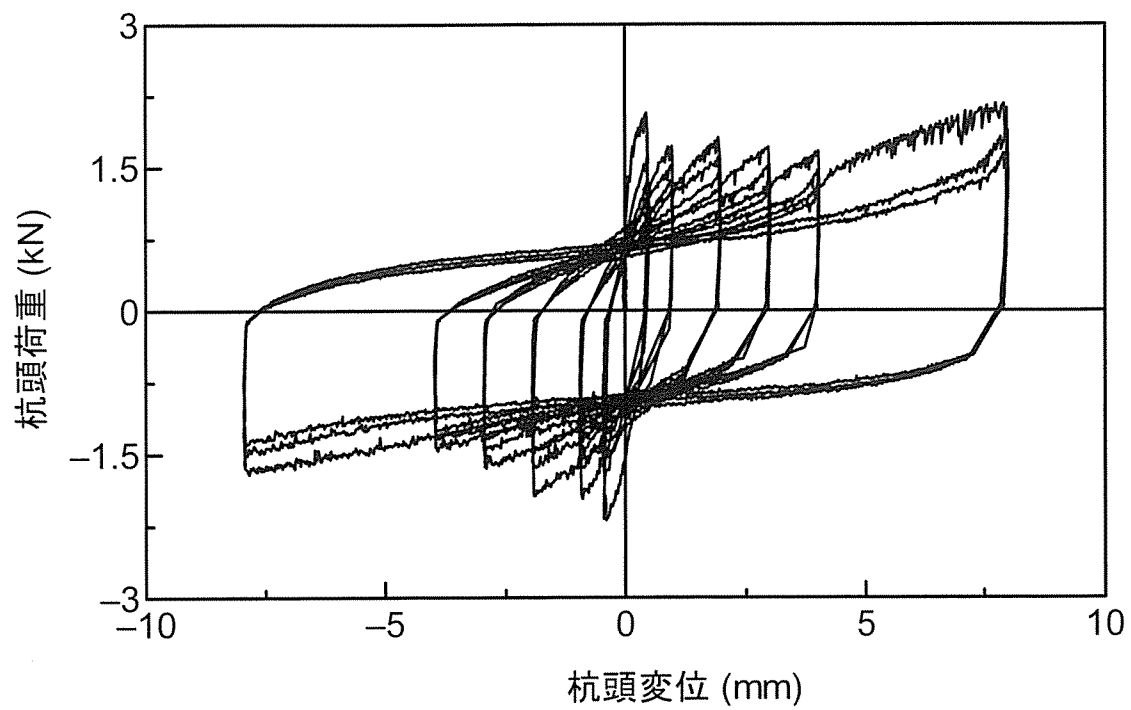
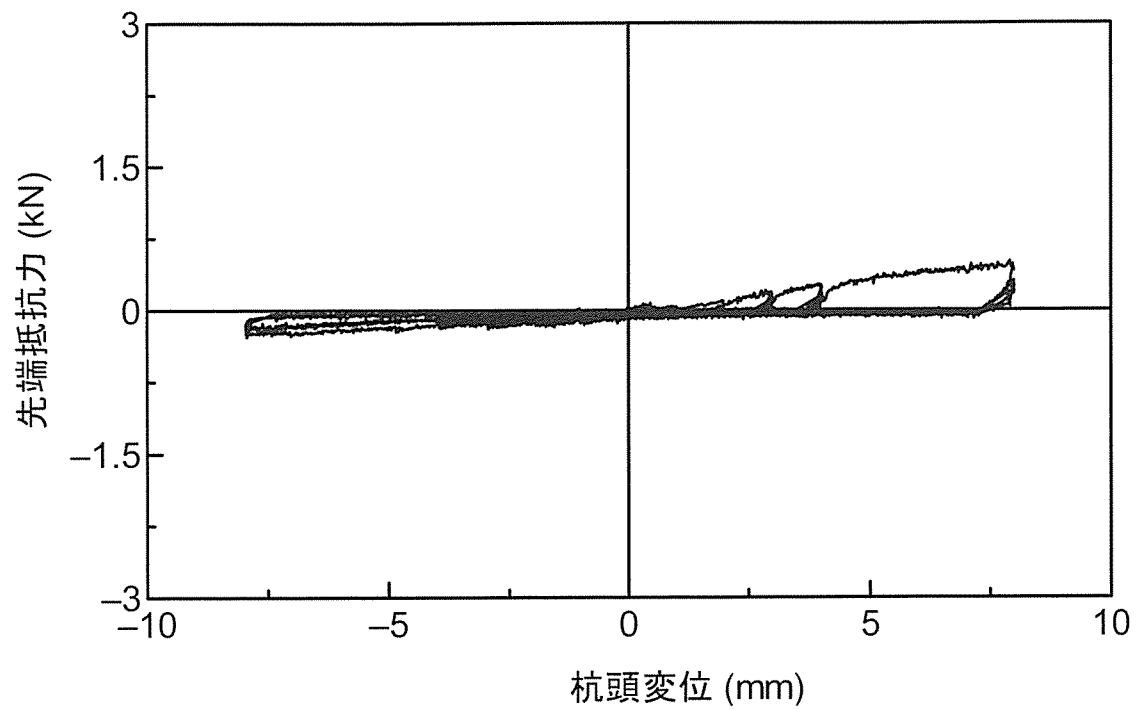


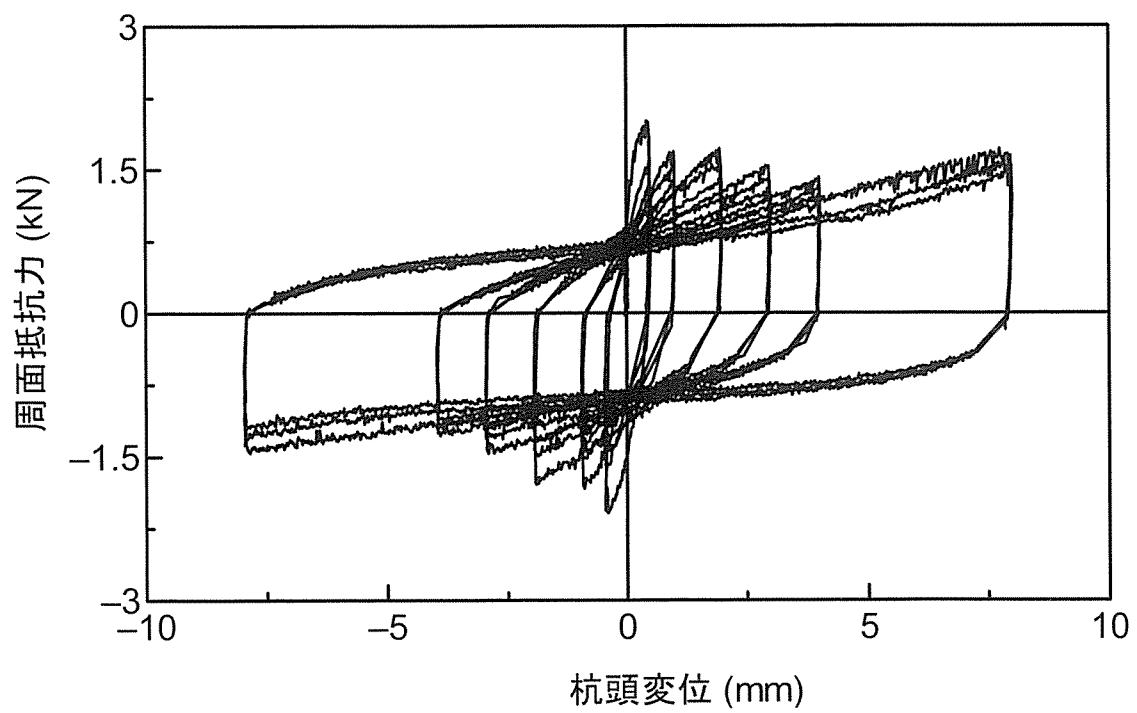
図-付 1.3.1.d ケース 1-3 : 周面抵抗力～時間



図一付 1.3.1.e ケース 1-3 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.3.1.f ケース 1-3 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 1.3.1.g ケース 1-3 : 周面抵抗力～杭頭変位

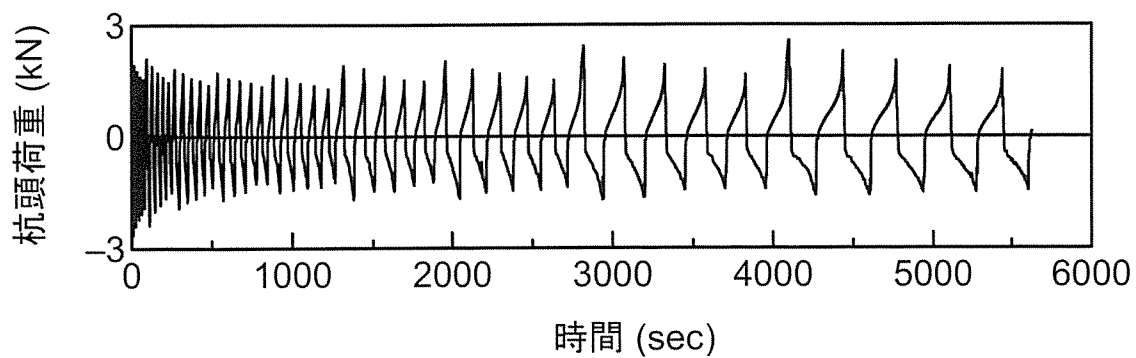


図-付 1.3.2. a ケース 1-4 : 杭頭荷重～時間

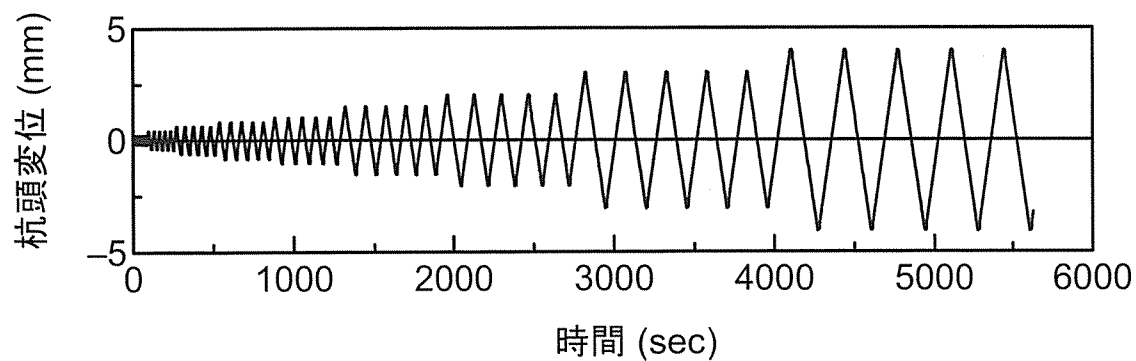


図-付 1.3.2. b ケース 1-4 : 杭頭変位～時間

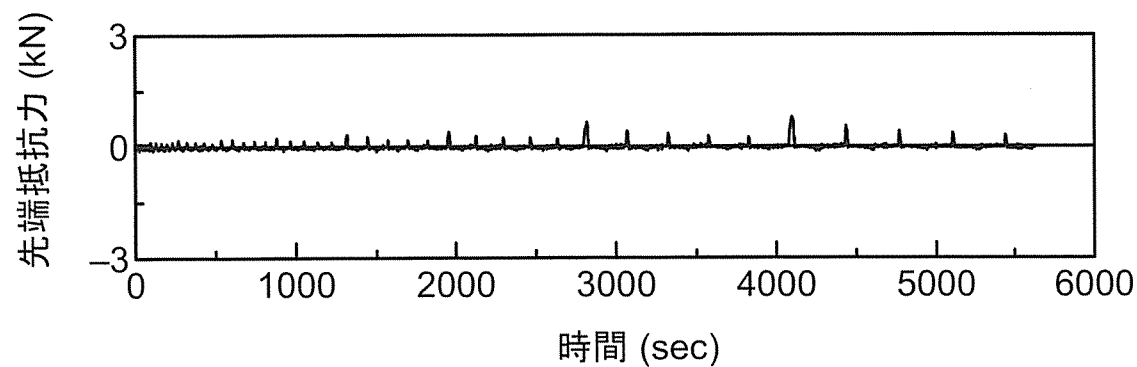


図-付 1.3.2. c ケース 1-4 : 先端抵抗力～時間

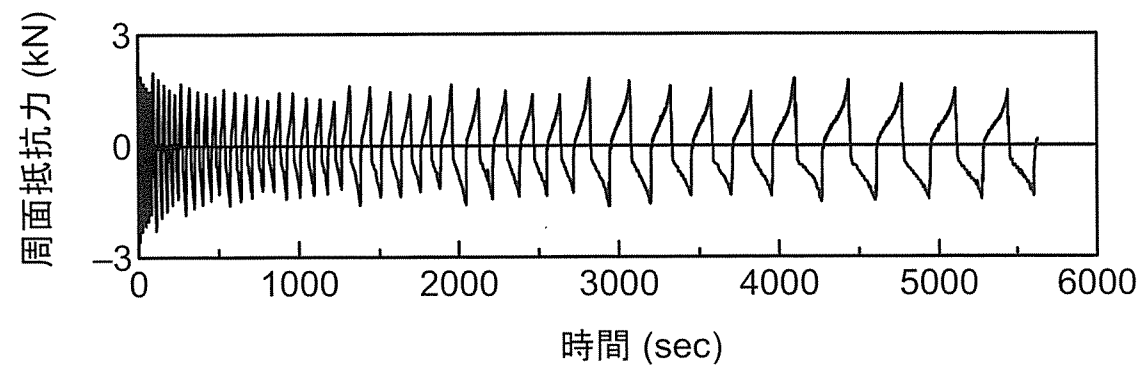
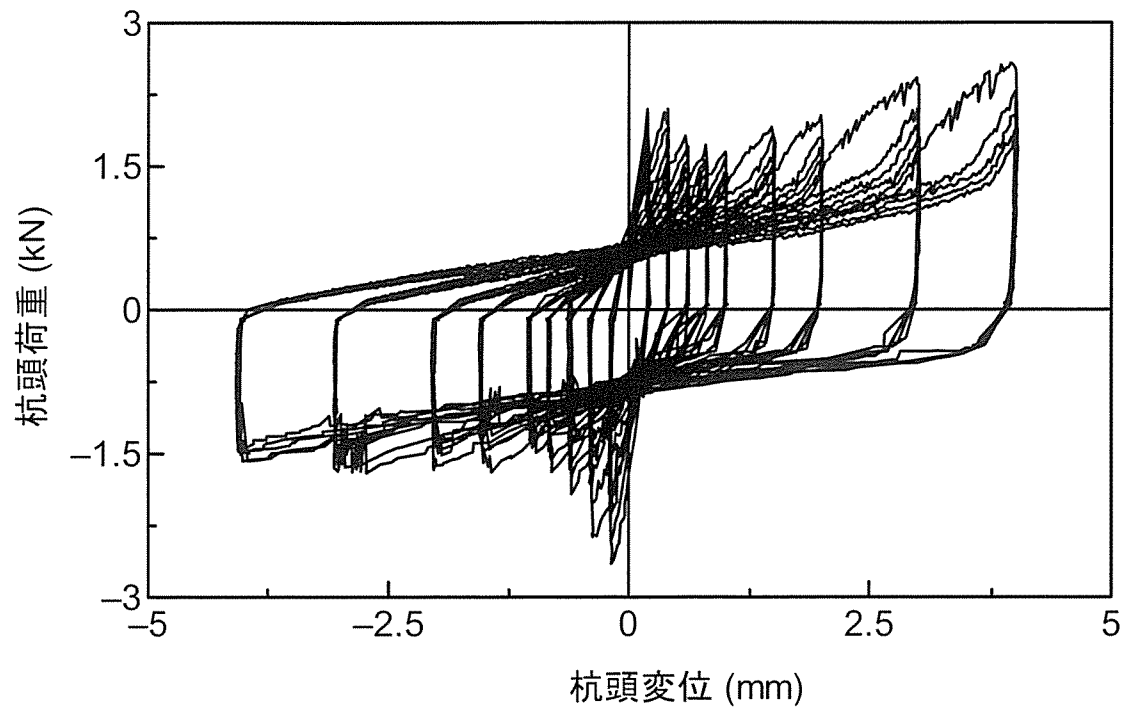
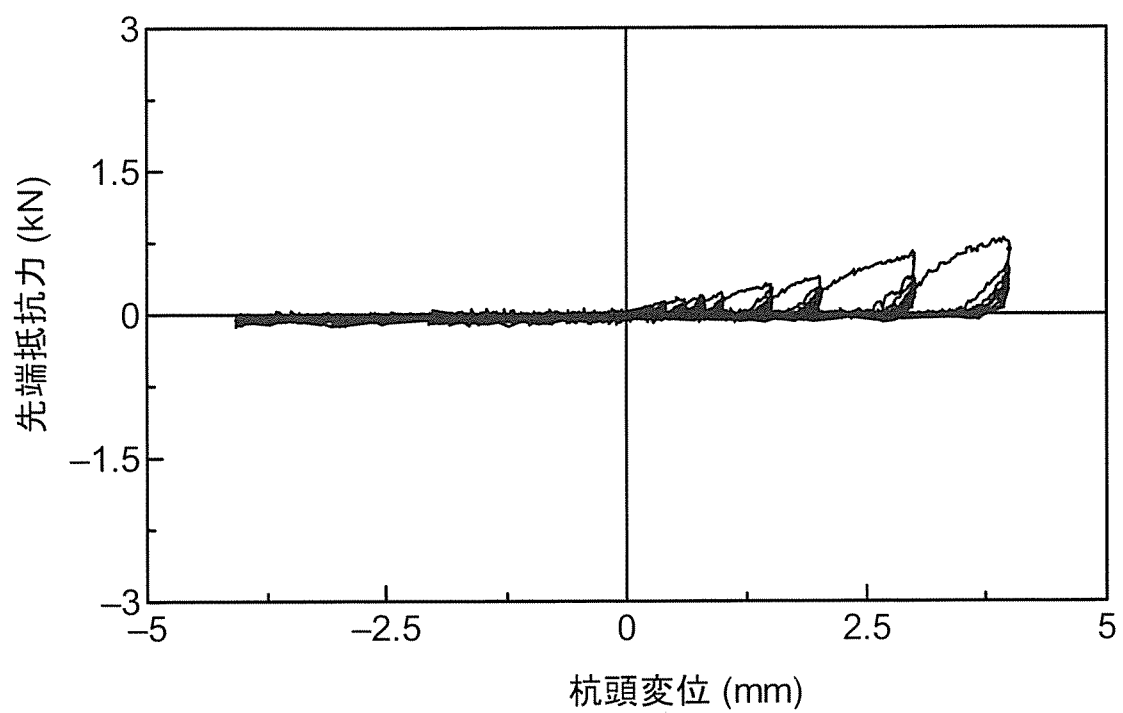


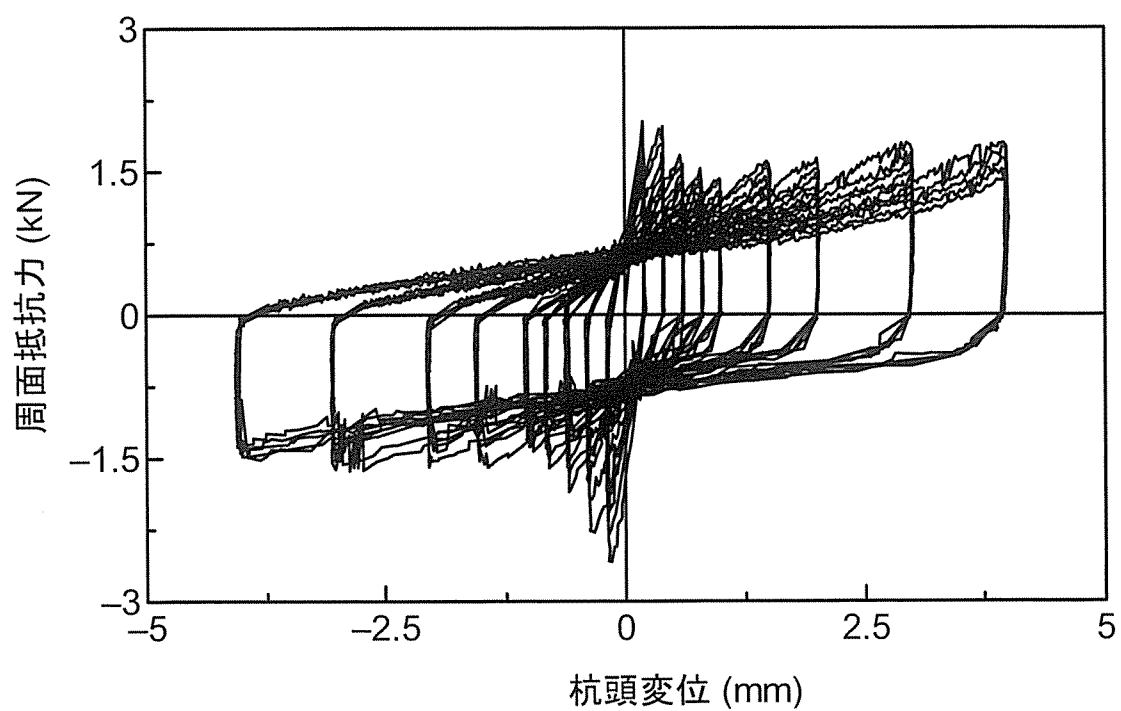
図-付 1.3.2. d ケース 1-4 : 周面抵抗力～時間



図一付 1.3.2.e ケース 1-4 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.3.2.f ケース 1-4 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 1.3.2.g ケース 1-4 : 周面抵抗力～杭頭変位

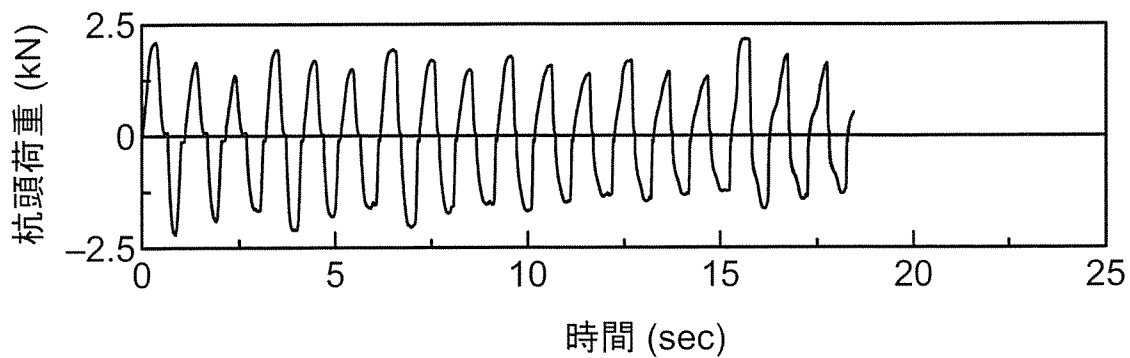


図-付 1.3.3.a ケース 1-5 : 杭頭荷重～時間

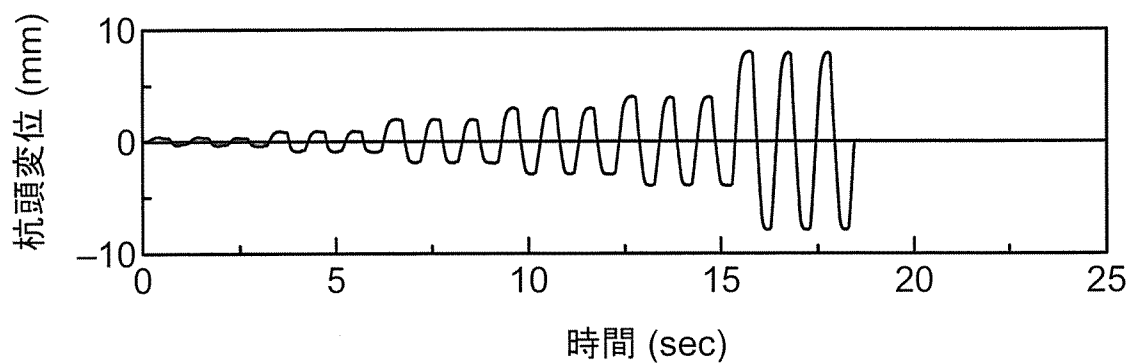


図-付 1.3.3.b ケース 1-5 : 杭頭変位～時間

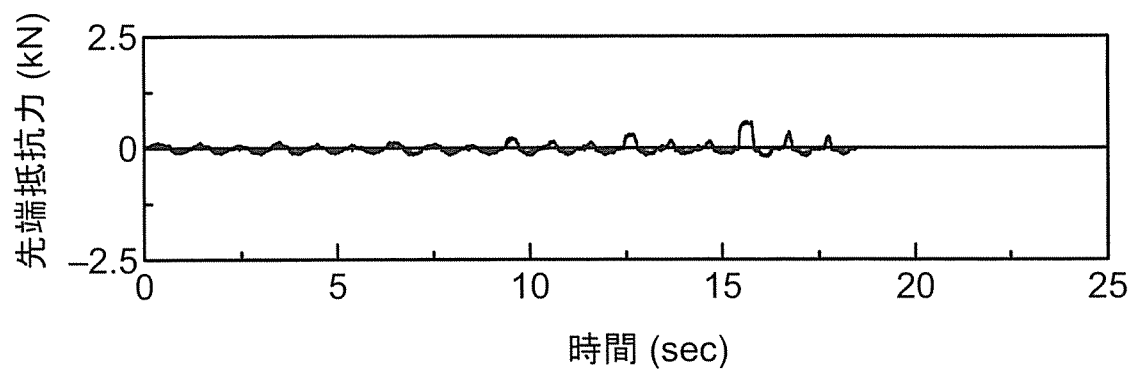


図-付 1.3.3.c ケース 1-5 : 先端抵抗力～時間

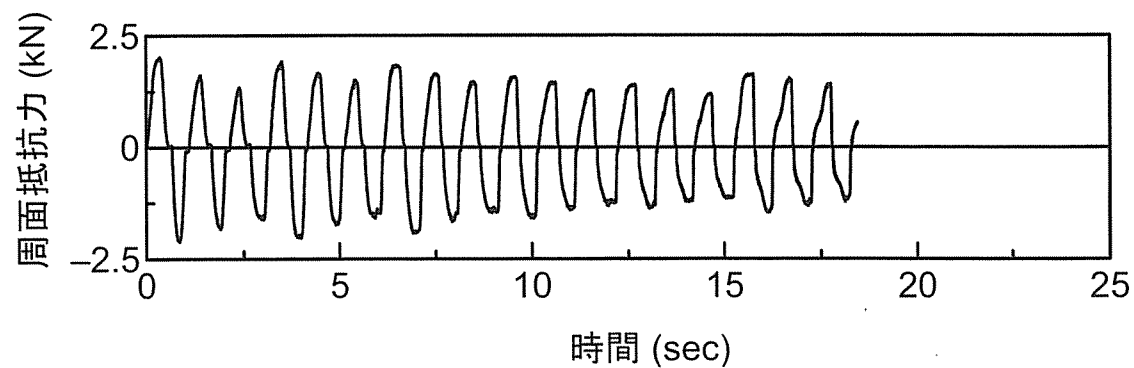


図-付 1.3.3.d ケース 1-5 : 周面抵抗力～時間

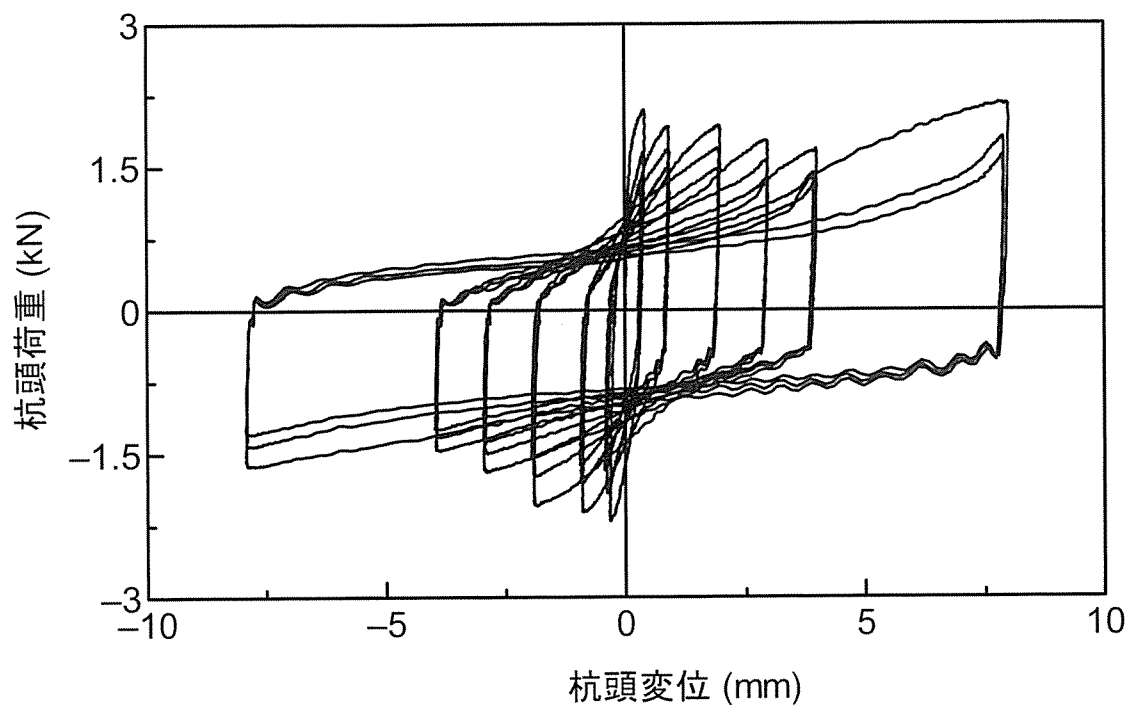
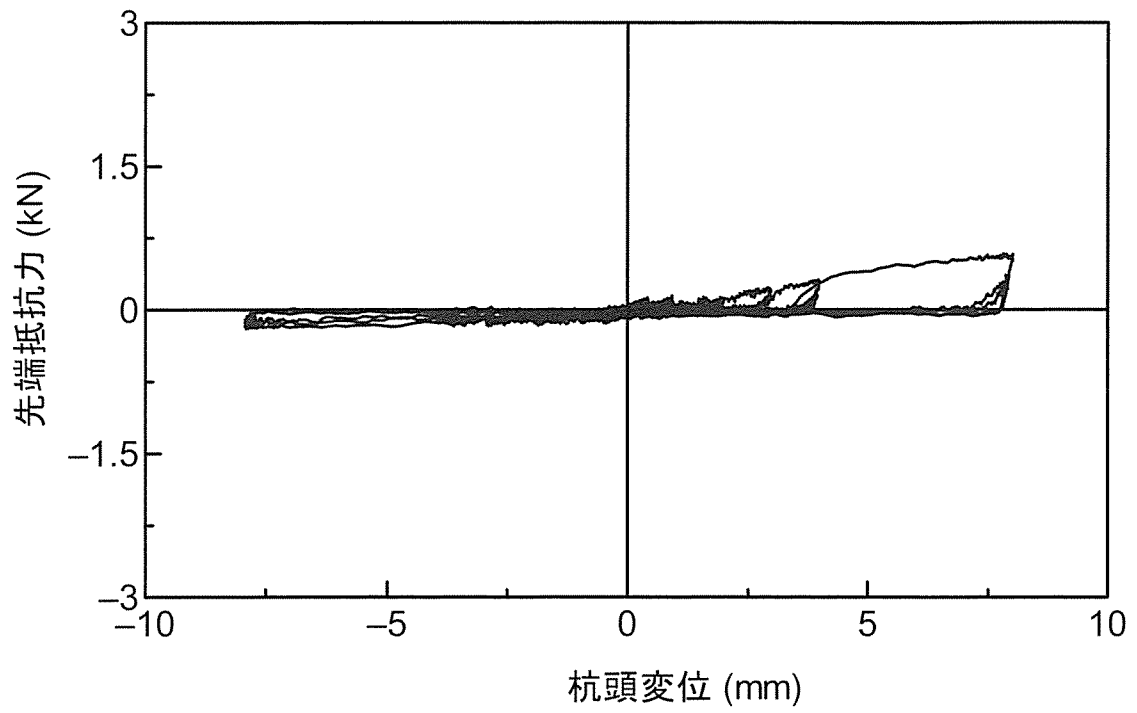
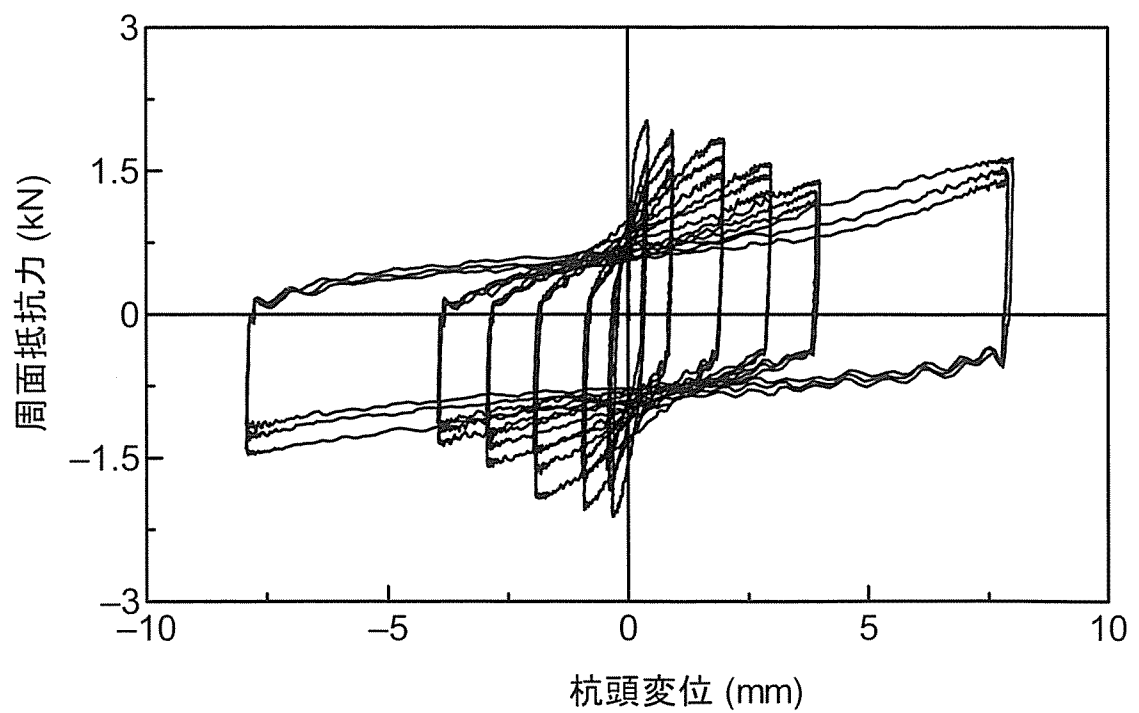


図-付 1.3.3.e ケース 1-5 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.3.3. f ケース 1-5 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 1.3.3. g ケース 1-5 : 周面抵抗力～杭頭変位

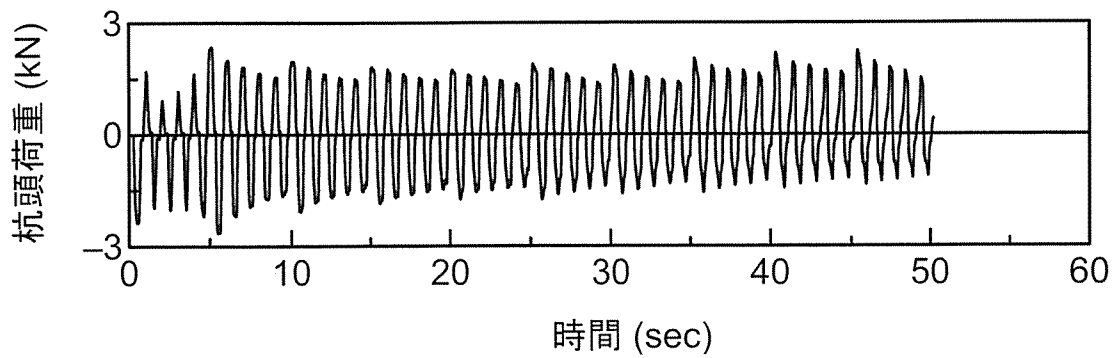


図-付 1. 3. 4. a ケース 1-6 : 杭頭荷重～時間

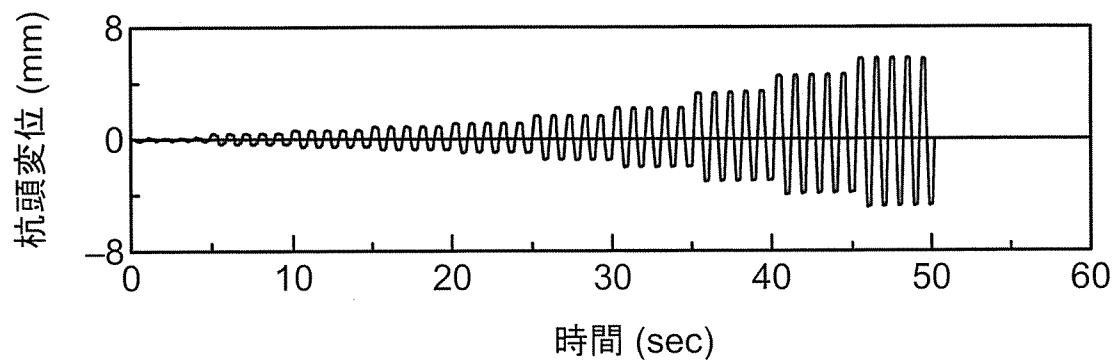


図-付 1. 3. 4. b ケース 1-6 : 杭頭変位～時間

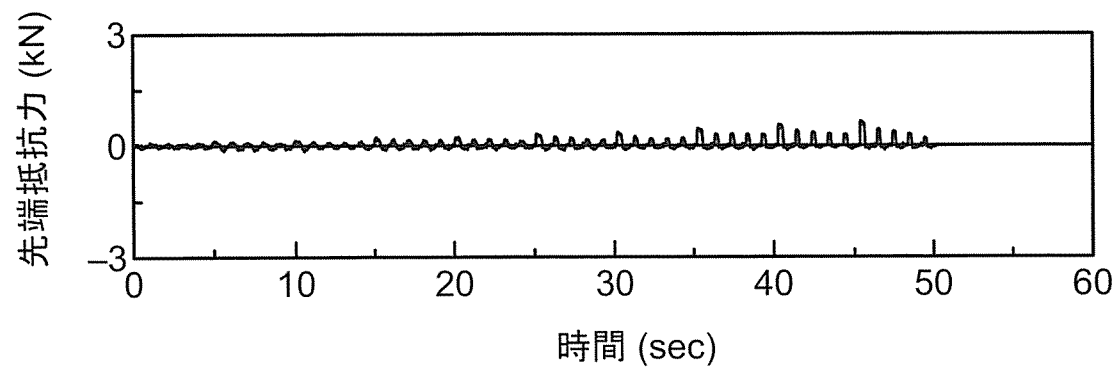


図-付 1. 3. 4. c ケース 1-6 : 先端抵抗力～時間

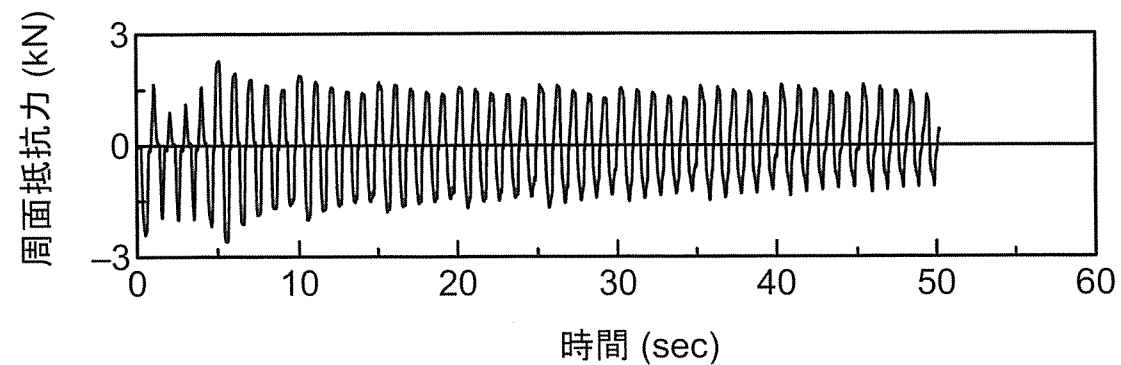
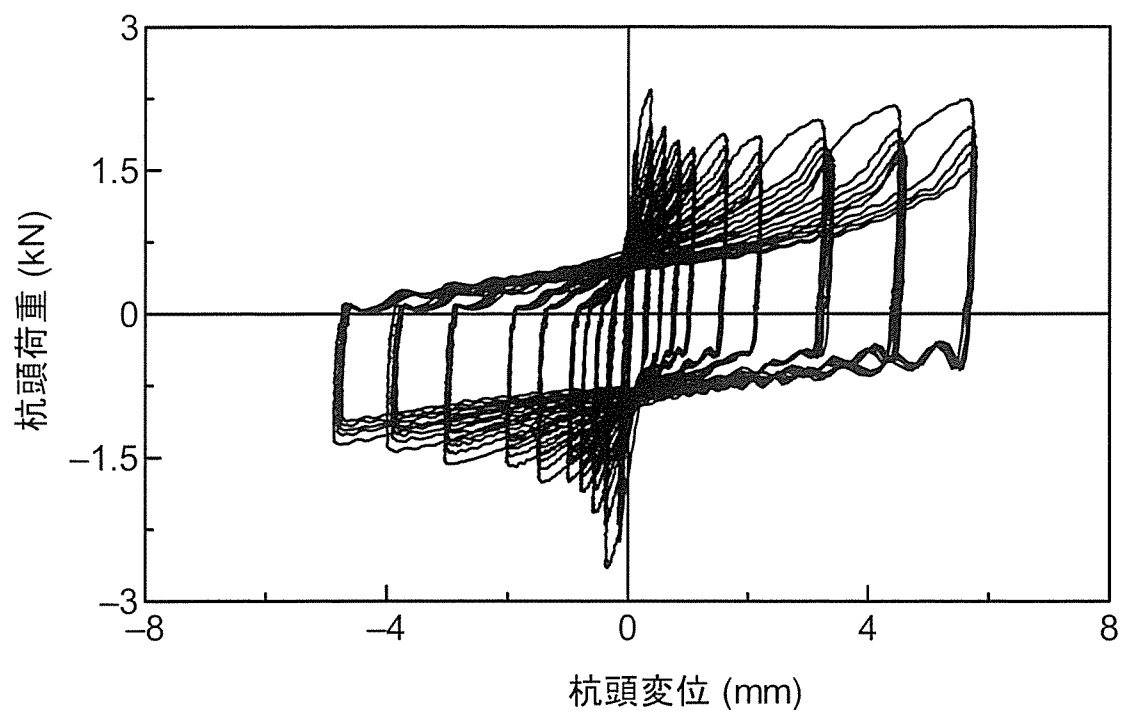
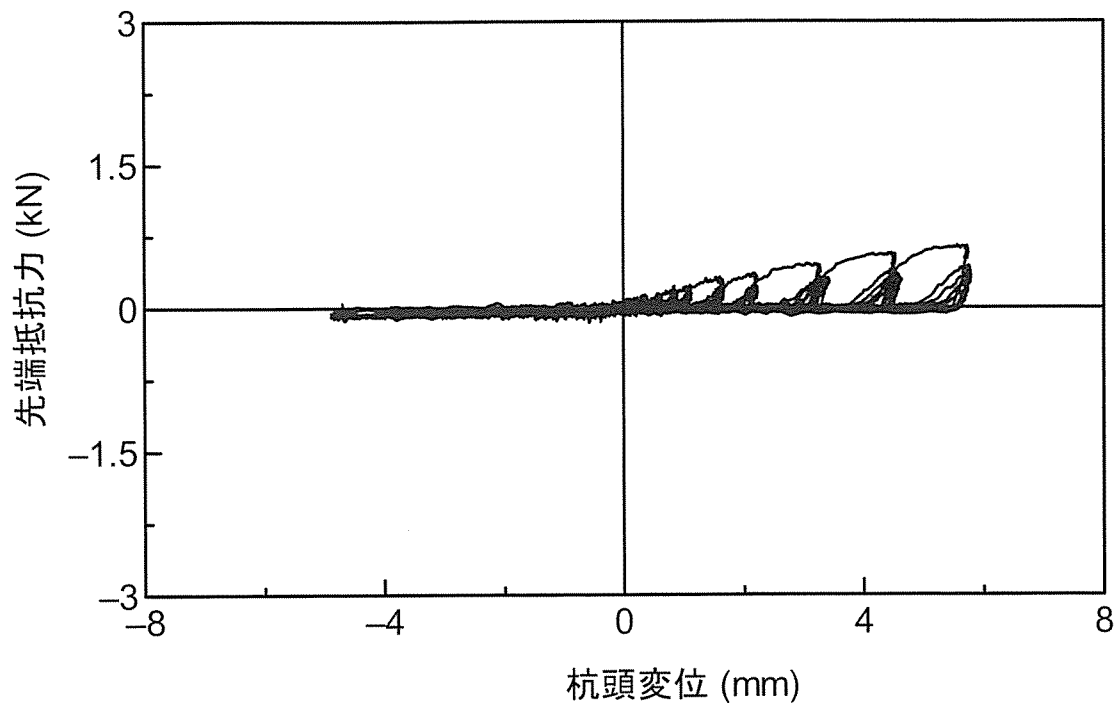


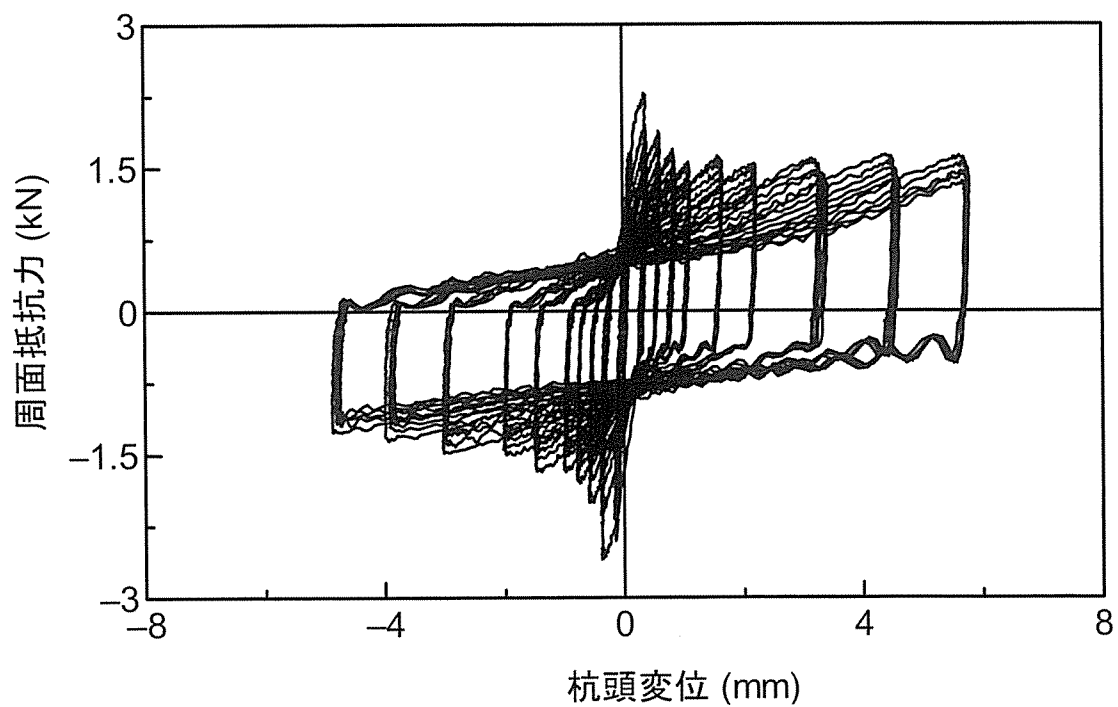
図-付 1. 3. 4. d ケース 1-6 : 周面抵抗力～時間



図一付 1.3.4.e ケース 1-6 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 1.3.4. f ケース 1-6 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 1.3.4. g ケース 1-6 : 周面抵抗力～杭頭変位

1.4 急速載荷 (ケース 1-7)

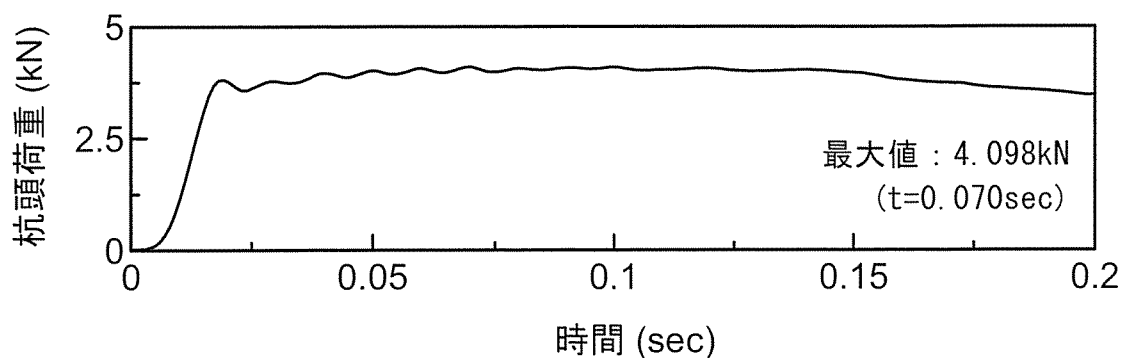


図-付 1.4.1.a ケース 1-7(1 ステップ) : 杭頭荷重～時間

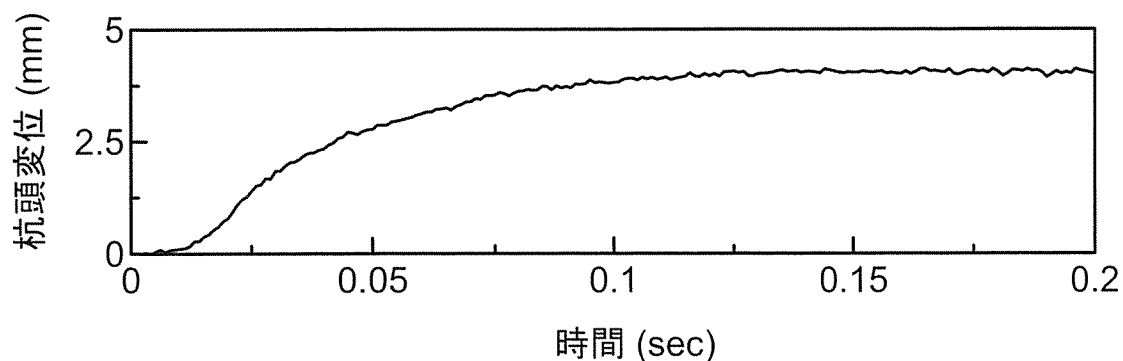


図-付 1.4.1.b ケース 1-7(1 ステップ) : 杭頭変位～時間

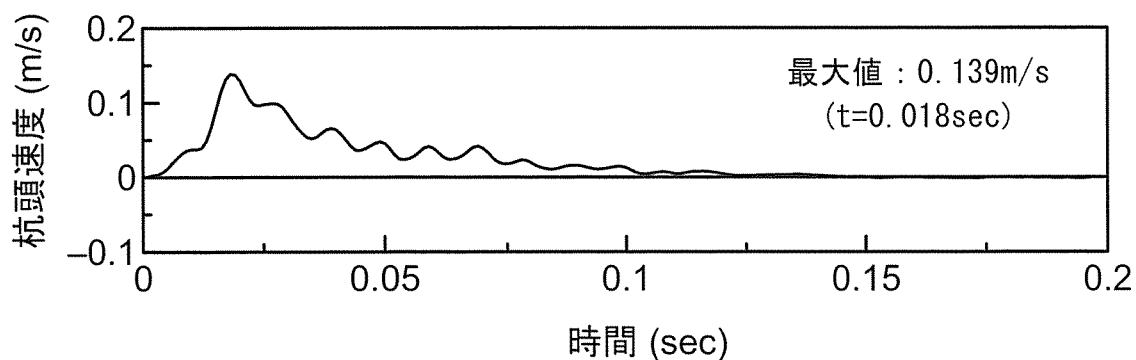


図-付 1.4.1.c ケース 1-7(1 ステップ) : 杭頭速度～時間

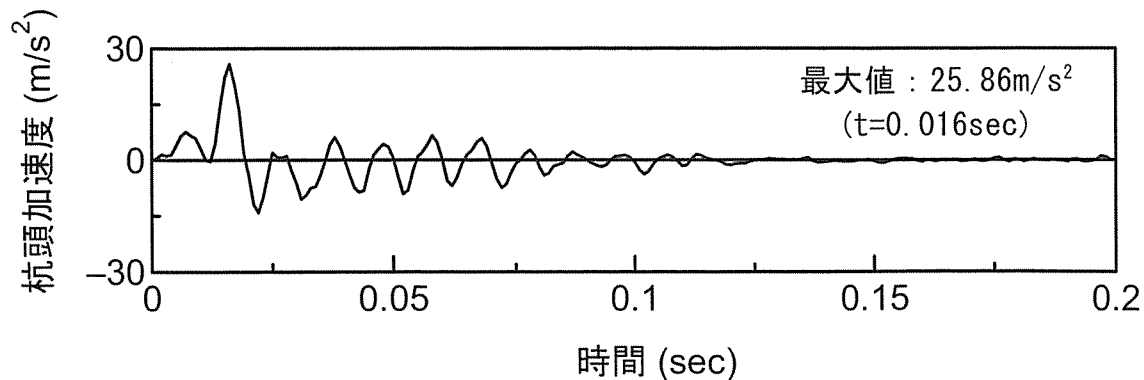
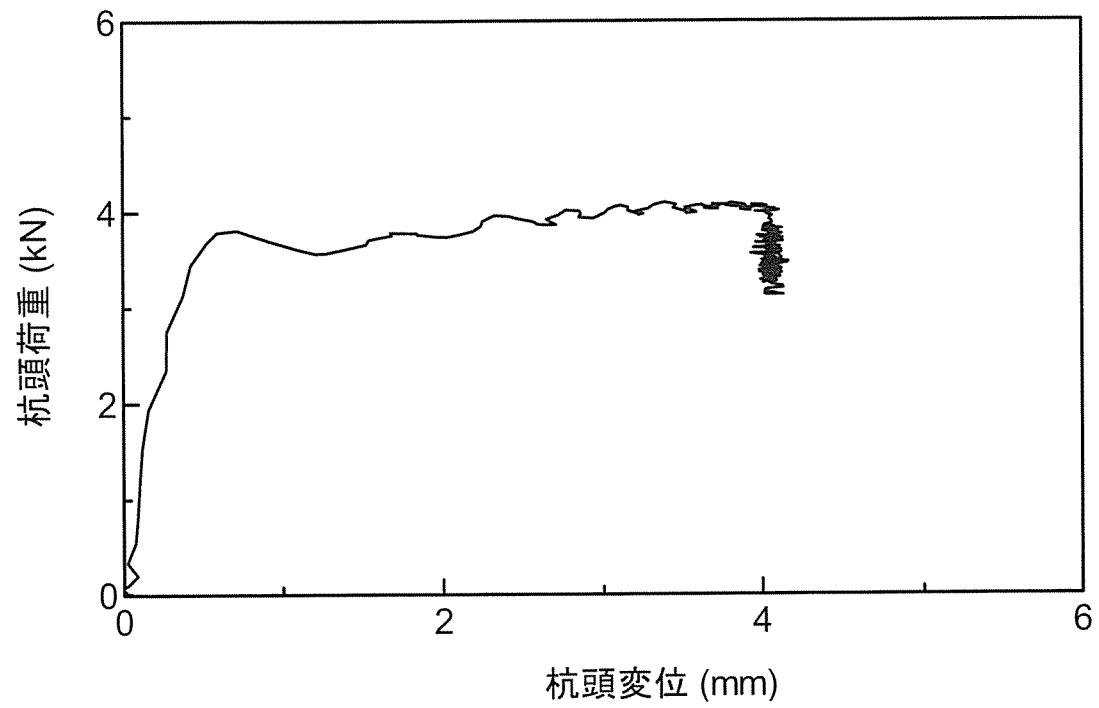


図-付 1.4.1.d ケース 1-7(1 ステップ) : 杭頭加速度～時間



図一付 1.4.1.e ケース 1-7(1 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

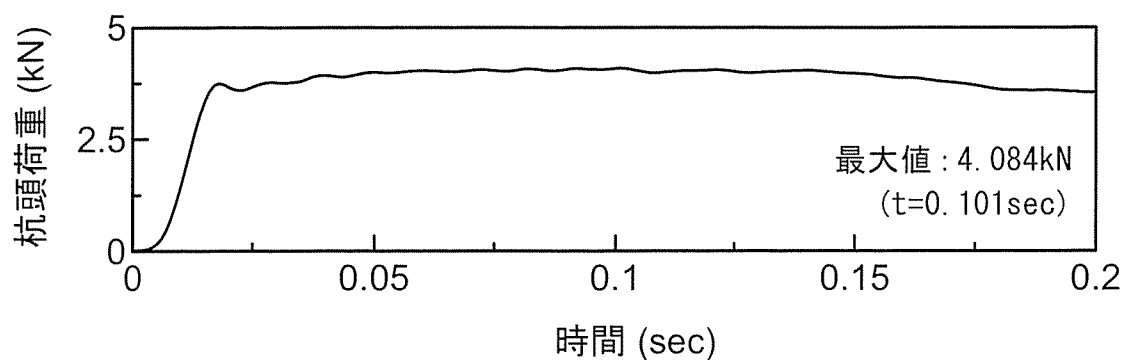


図-付 1.4.2. a ケース 1-7 (2 ステップ) : 杭頭荷重～時間

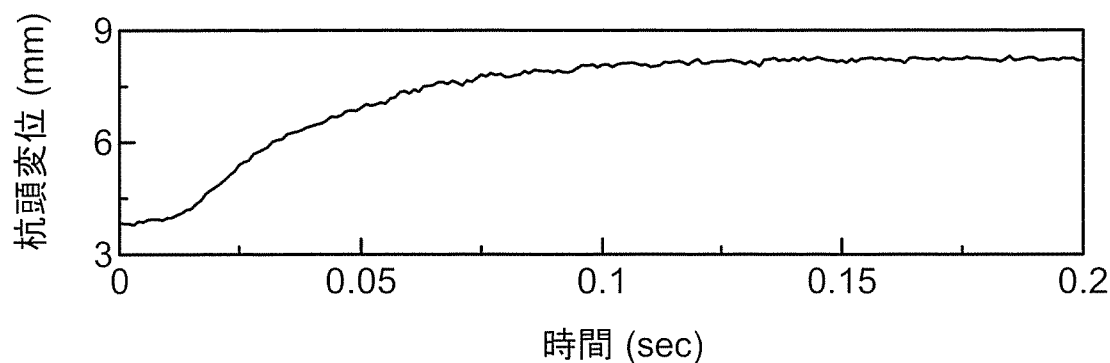


図-付 1.4.2. b ケース 1-7 (2 ステップ) : 杭頭変位～時間

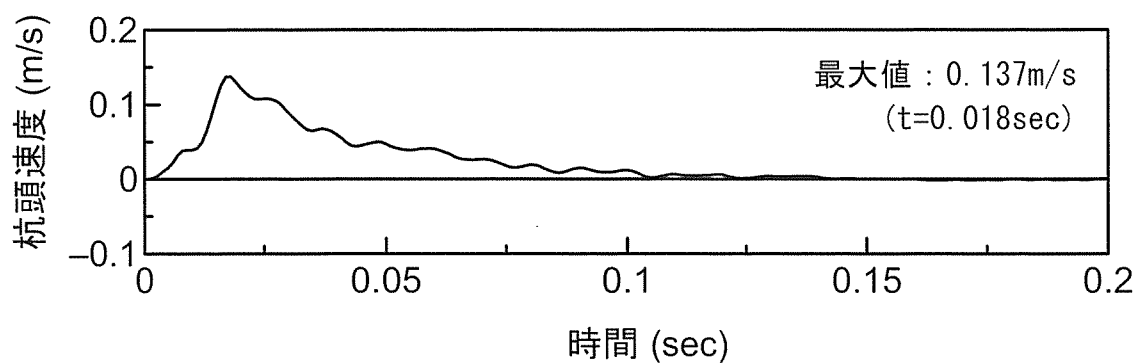


図-付 1.4.2. c ケース 1-7 (2 ステップ) : 杭頭速度～時間

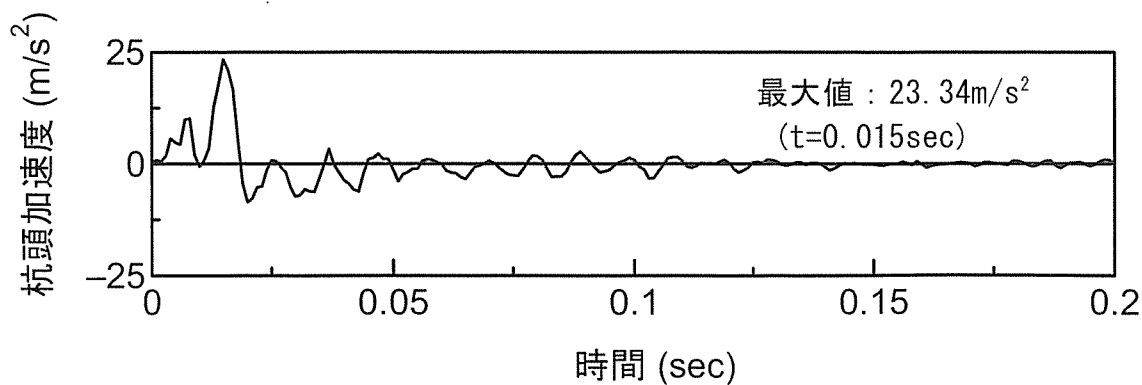
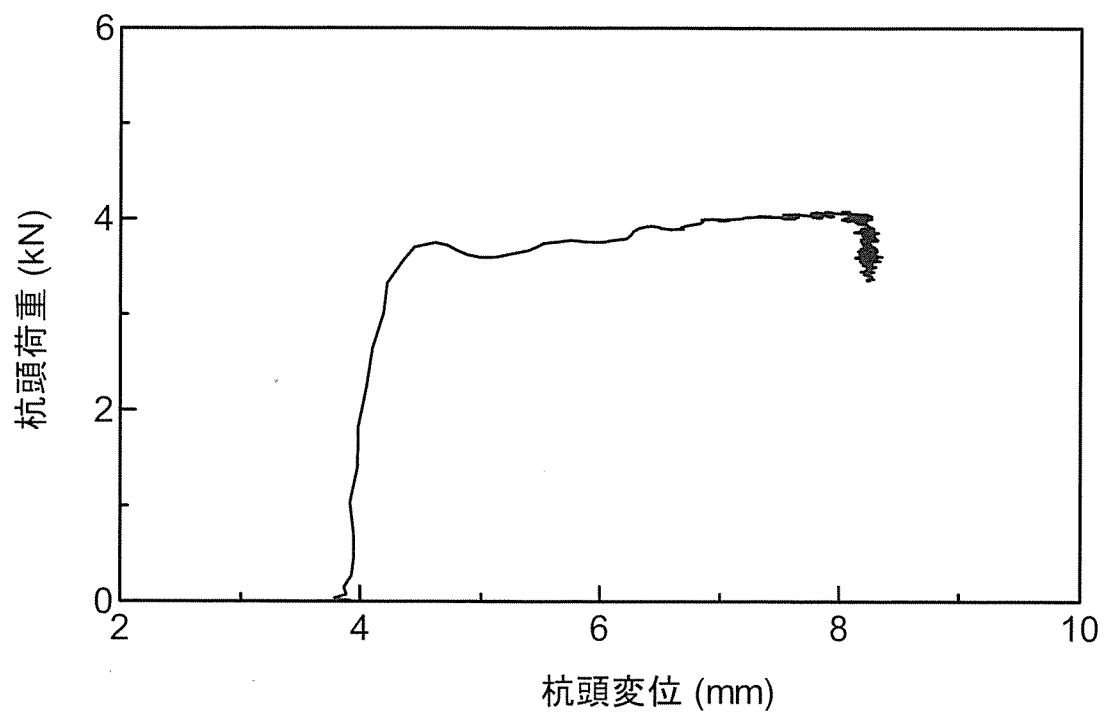


図-付 1.4.2. d ケース 1-7 (2 ステップ) : 杭頭加速度～時間



図一付 1.4.2.e ケース 1-7(2 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

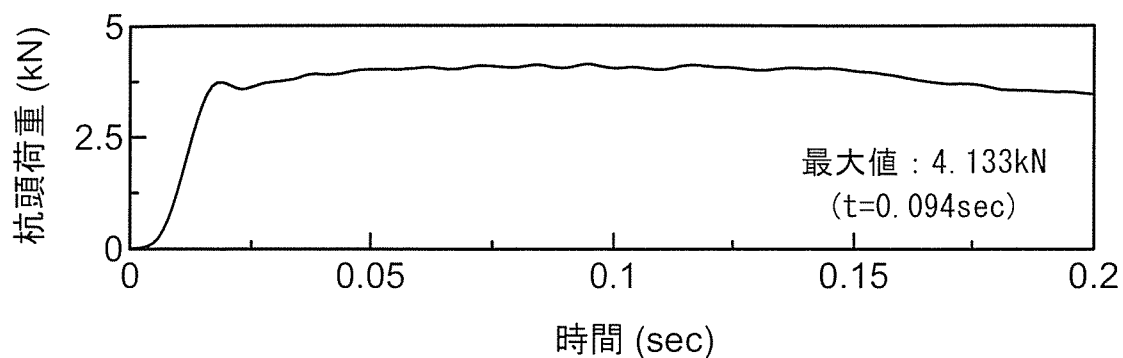


図-付 1.4.3. a ケース 1-7 (3 ステップ) : 杭頭荷重～時間

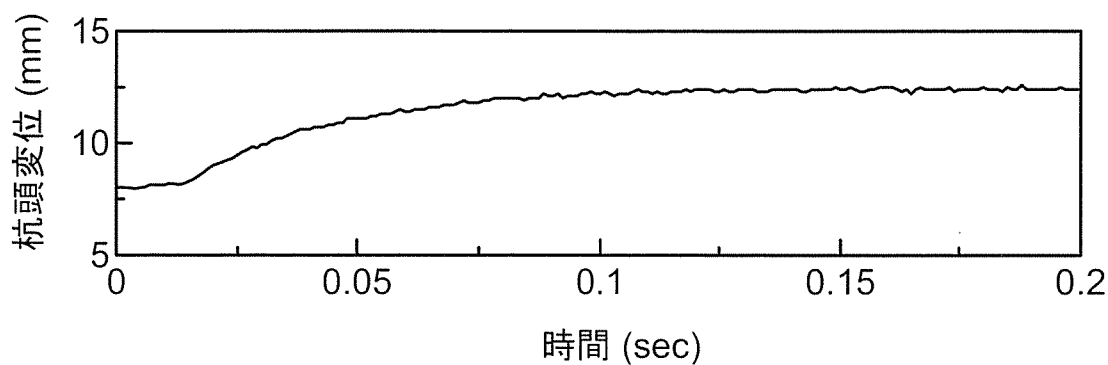


図-付 1.4.3. b ケース 1-7 (3 ステップ) : 杭頭変位～時間

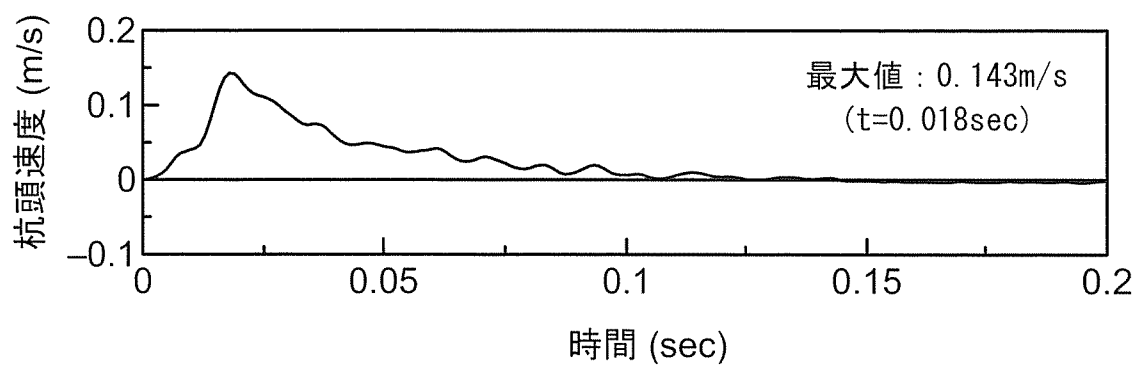


図-付 1.4.3. c ケース 1-7 (3 ステップ) : 杭頭速度～時間

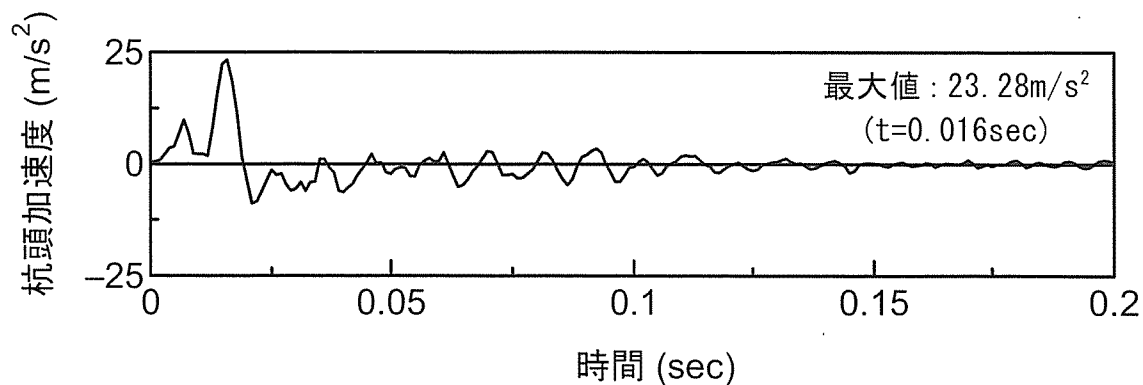


図-付 1.4.3. d ケース 1-7 (3 ステップ) : 杭頭加速度～時間

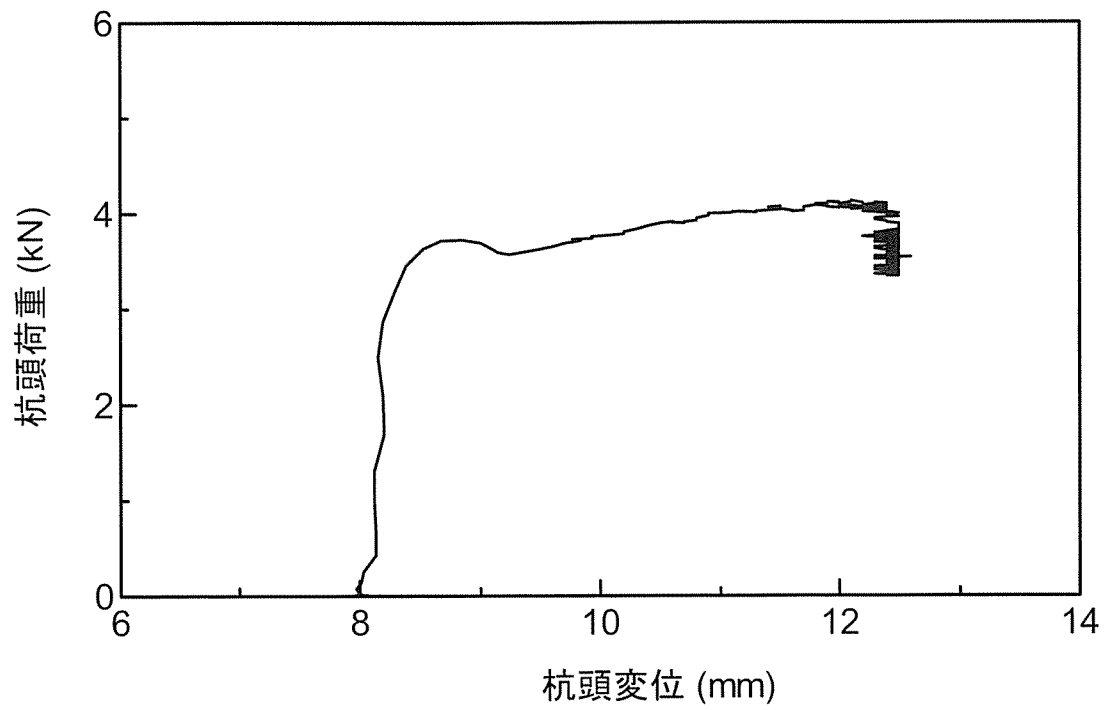


図-付 1.4.3.e ケース 1-7 (3 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

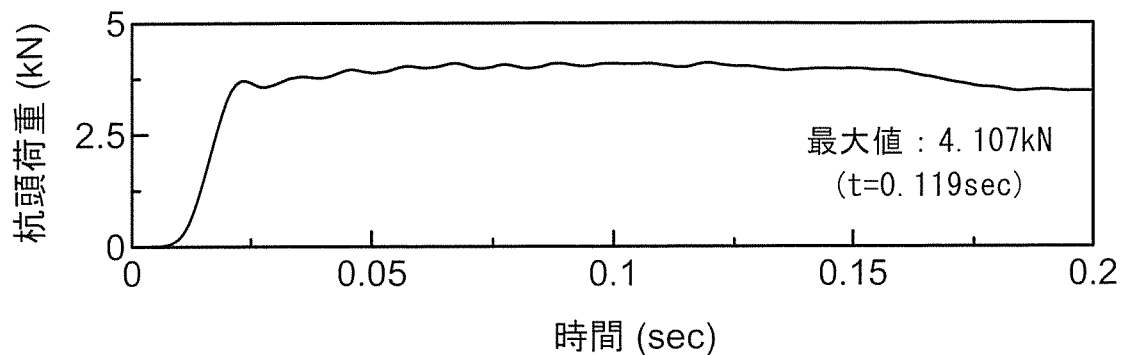


図-付 1.4.4. a ケース 1-7 (4 ステップ) : 杭頭荷重～時間

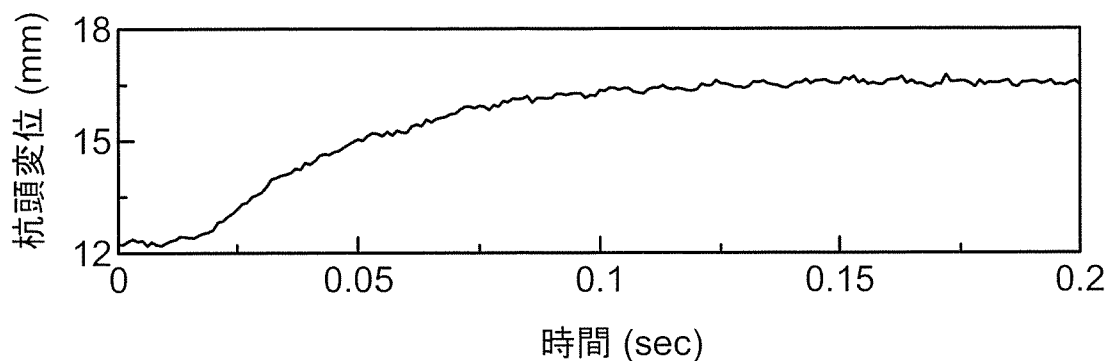


図-付 1.4.4. b ケース 1-7 (4 ステップ) : 杭頭変位～時間

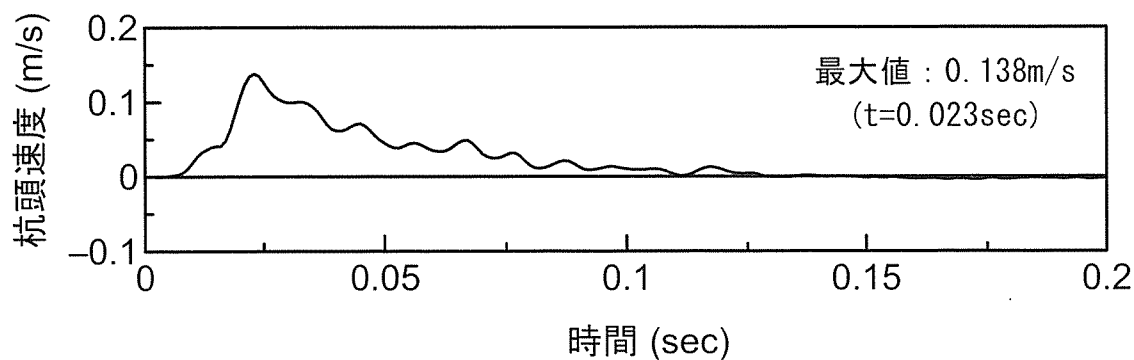


図-付 1.4.4. c ケース 1-7 (4 ステップ) : 杭頭速度～時間

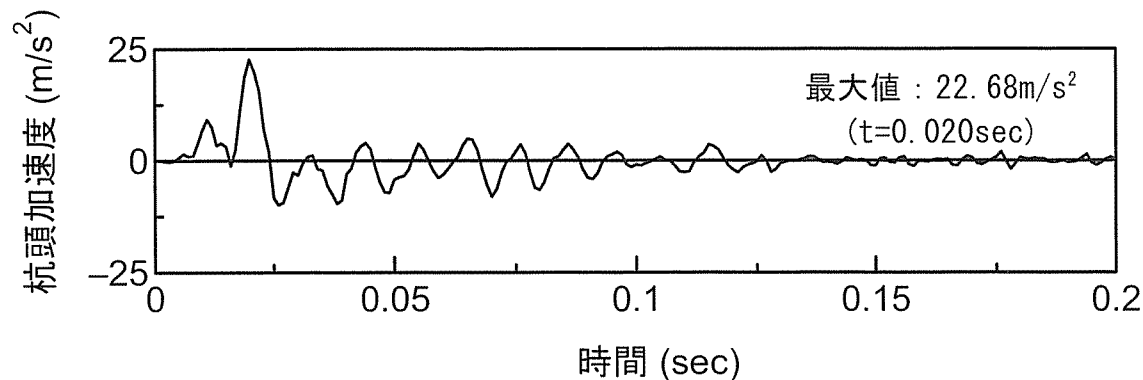
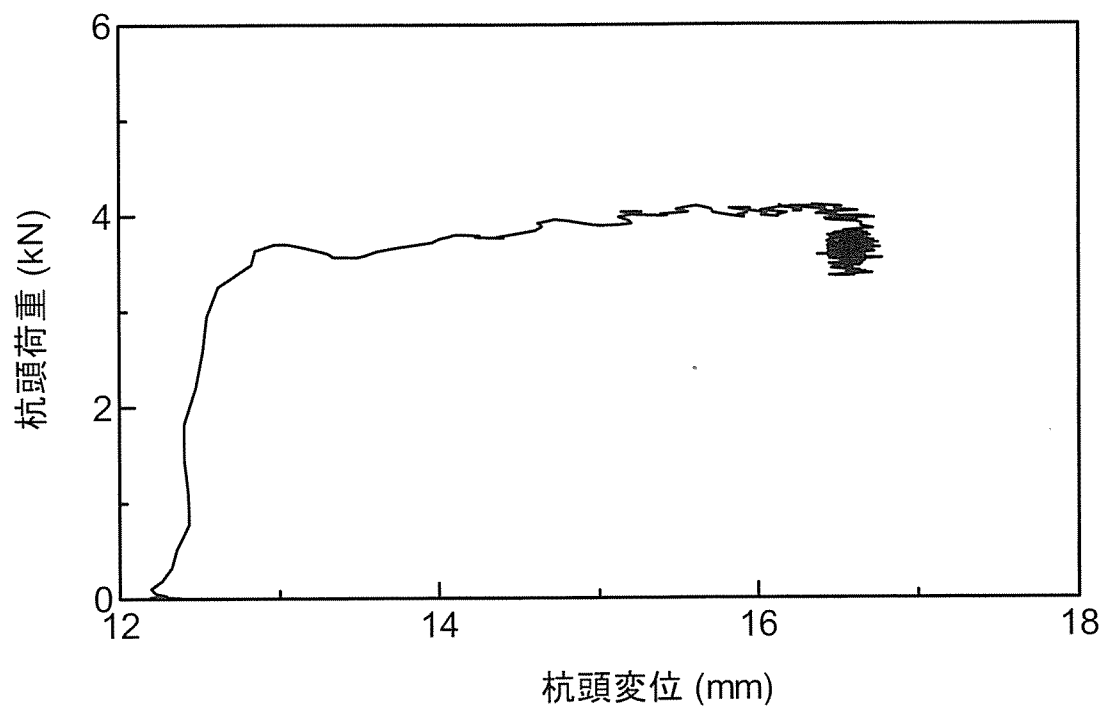


図-付 1.4.4. d ケース 1-7 (4 ステップ) : 杭頭加速度～時間



図一付 1.4.4.e ケース 1-7(4 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

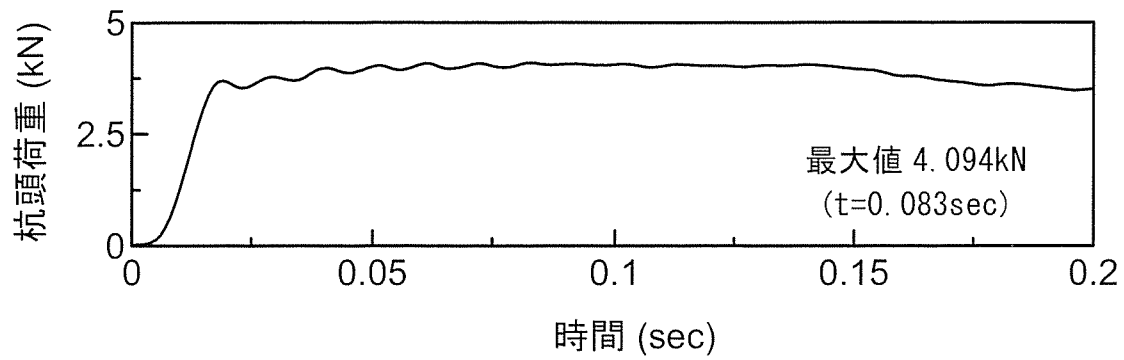


図-付 1.4.5.a ケース 1-7 (5 ステップ) : 杭頭荷重～時間

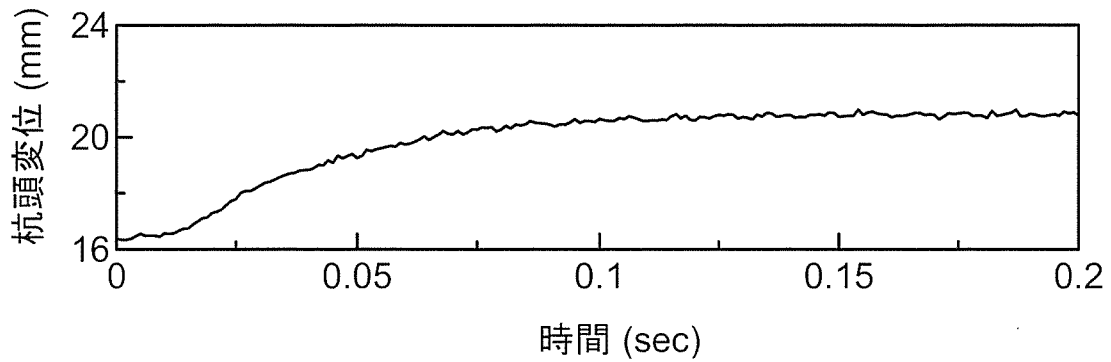


図-付 1.4.5.b ケース 1-7 (5 ステップ) : 杭頭変位～時間

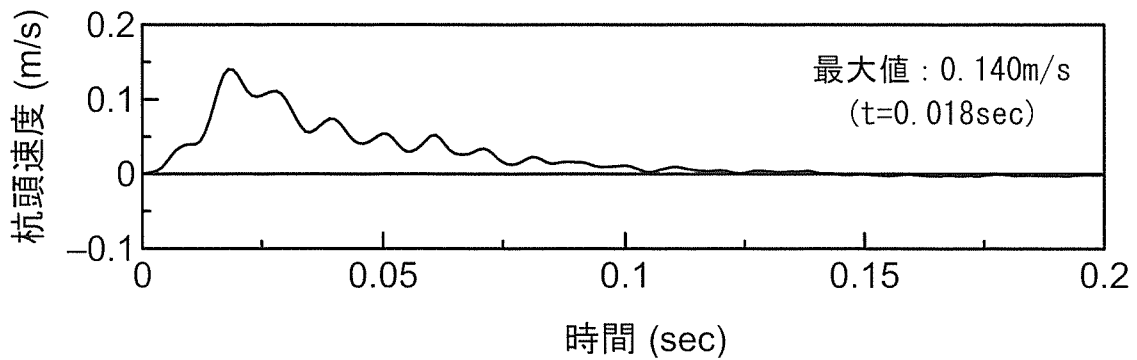


図-付 1.4.5.c ケース 1-7 (5 ステップ) : 杭頭速度～時間

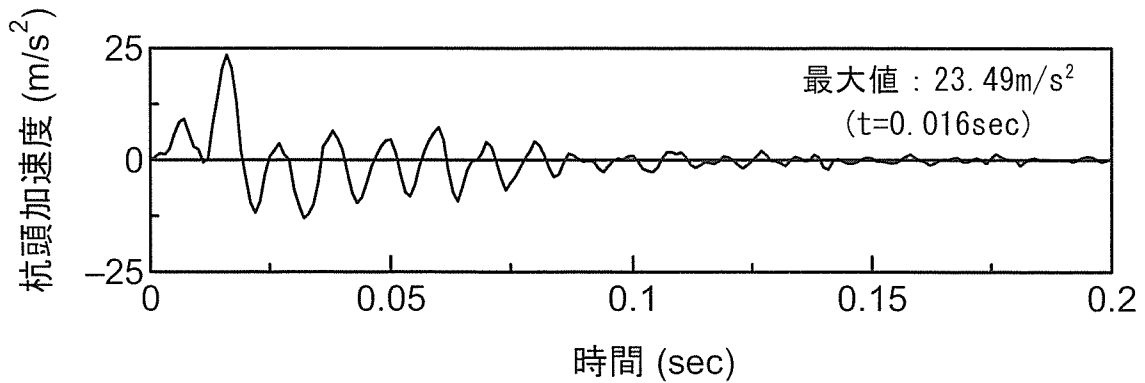
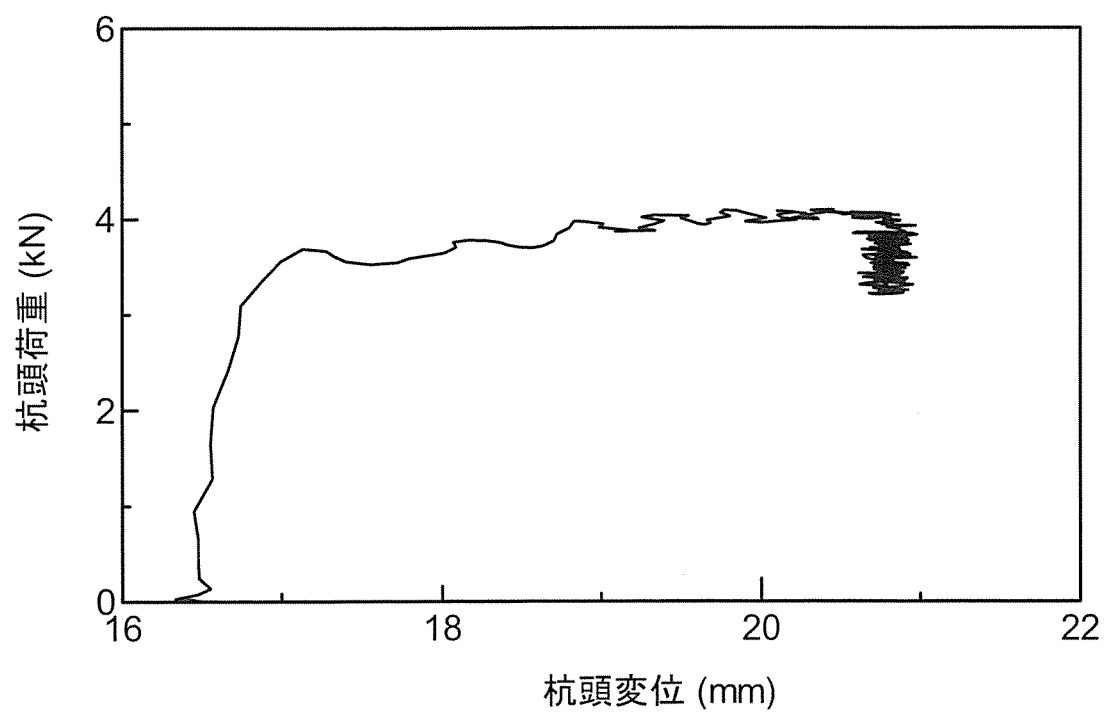


図-付 1.4.5.d ケース 1-7 (5 ステップ) : 杭頭加速度～時間



図一付 1.4.5.e ケース 1-7 (5 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

2. 大型模型実験結果

2.1 押込み (ケース 2-1)

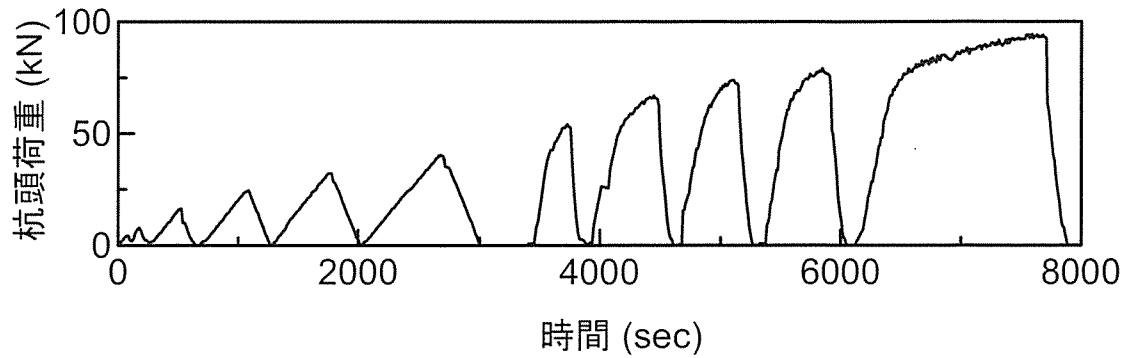


図-付 2.1. a ケース 2-1 : 杭頭荷重～時間

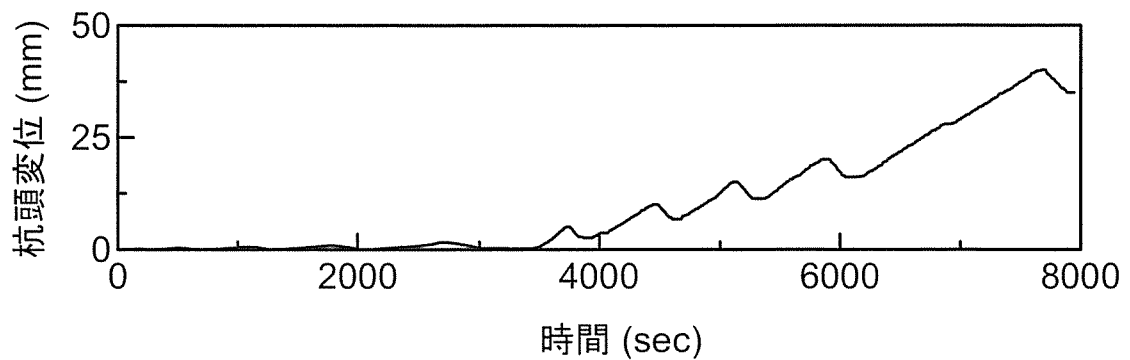


図-付 2.1. b ケース 2-1 : 杭頭変位～時間

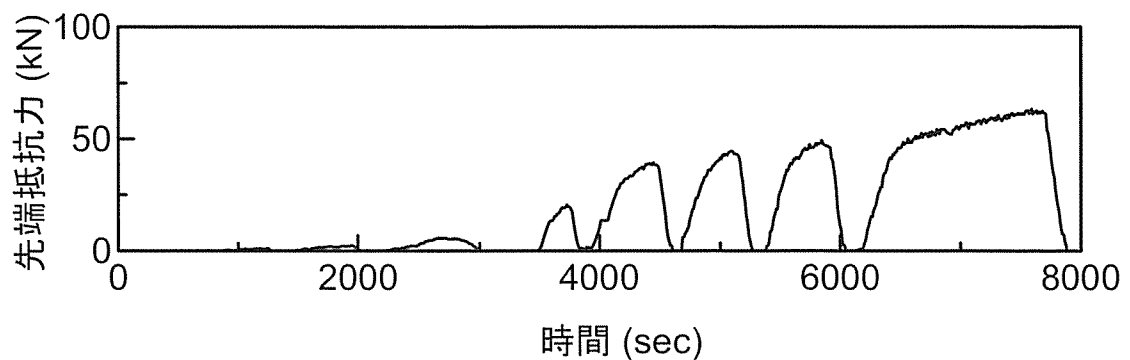


図-付 2.1. c ケース 2-1 : 先端抵抗力～時間

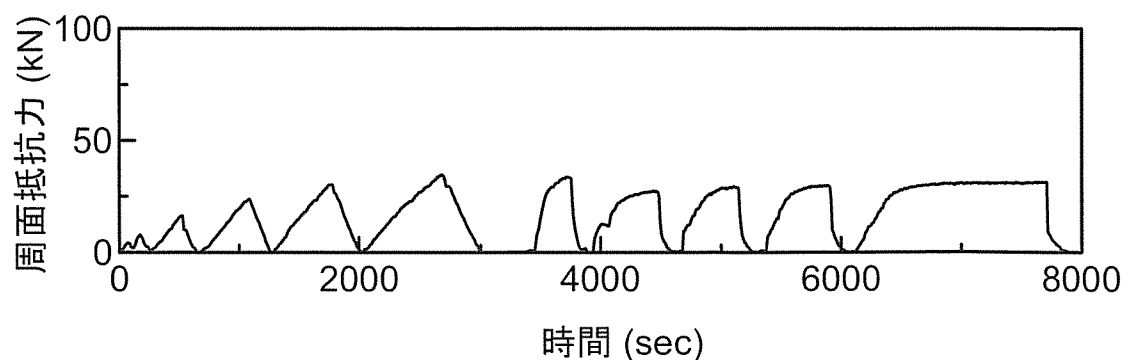
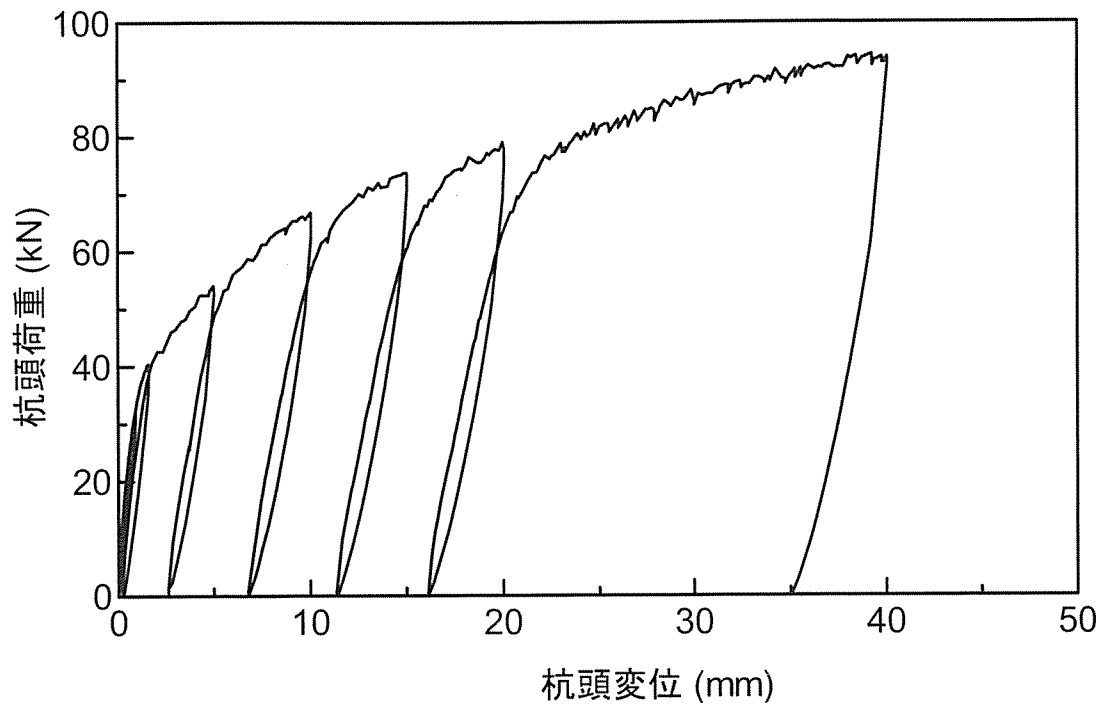
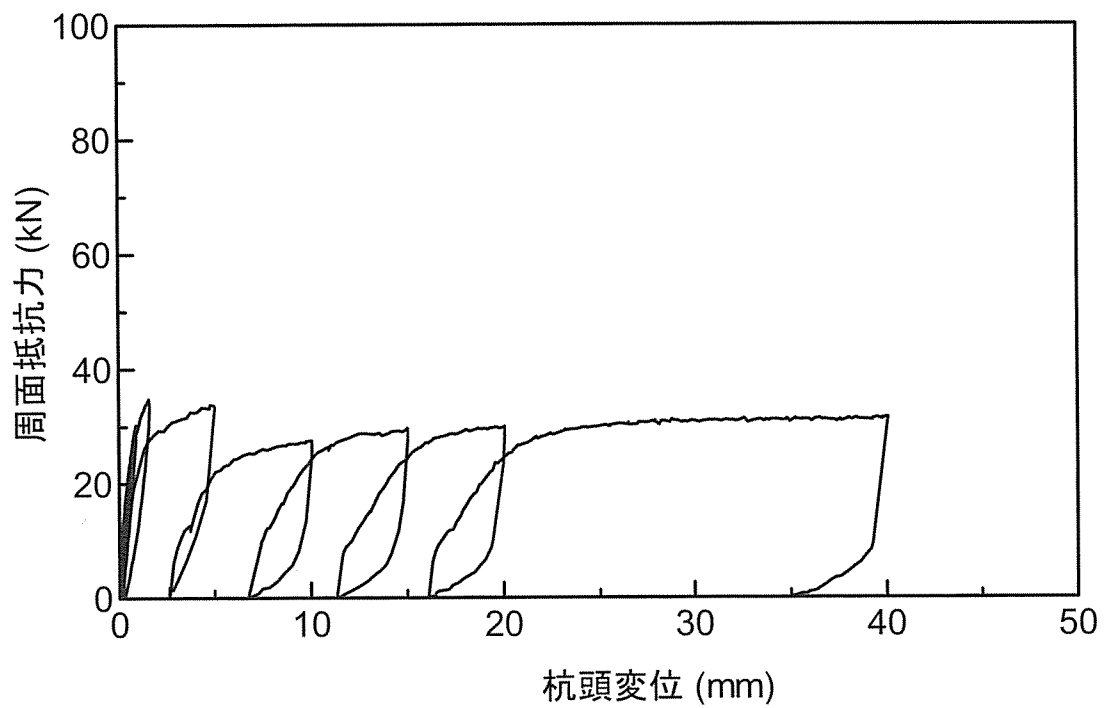


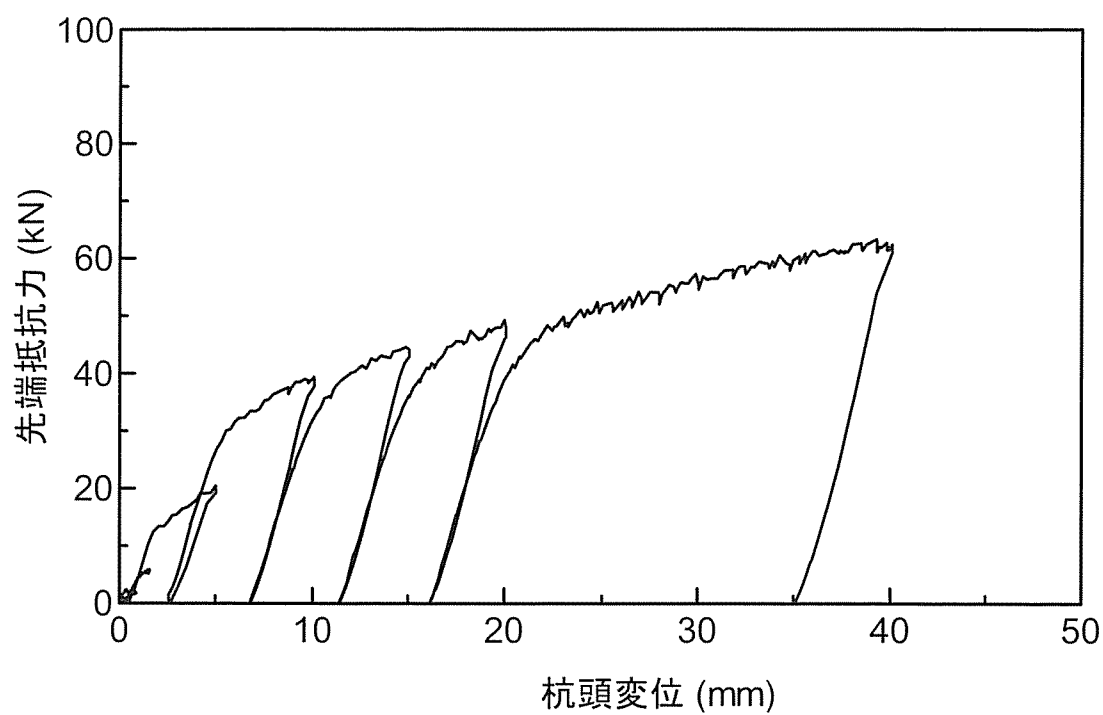
図-付 2.1. d ケース 2-1 : 周面抵抗力～時間



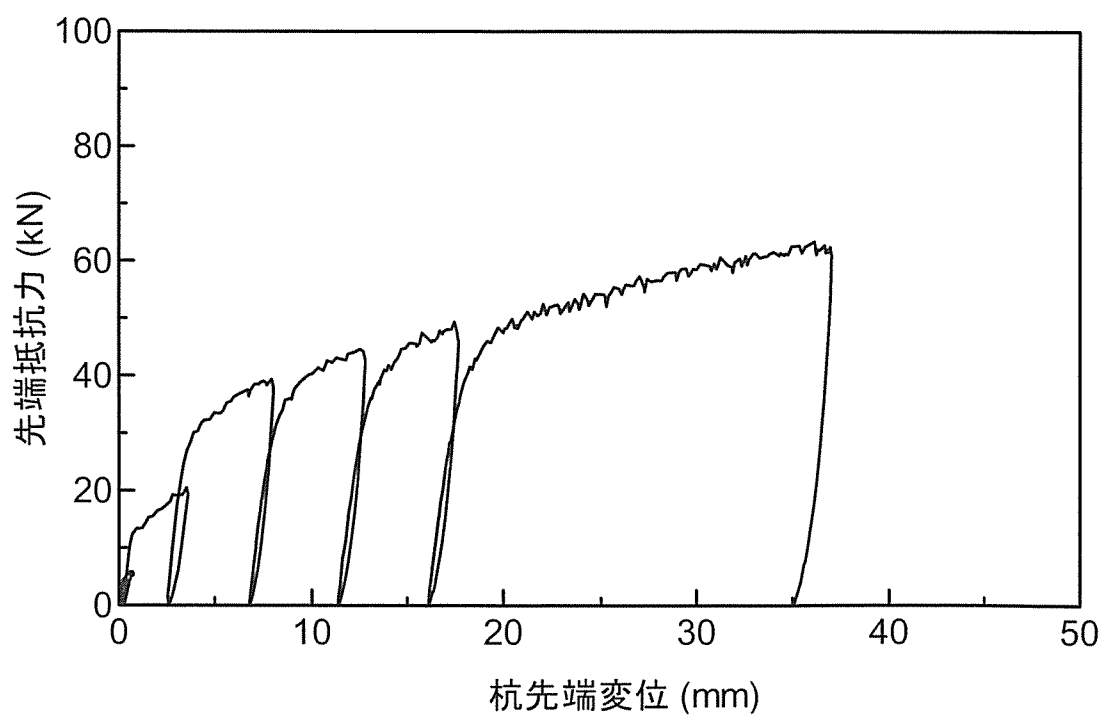
図一付 2.1.e ケース 2-1 : 杭頭荷重～杭頭変位



図一付 2.1.f ケース 2-1 : 周面抵抗～杭頭変位



図一付 2.1. g ケース 2-1 : 先端抵抗力～杭頭変位



図一付 2.1. h ケース 2-1 : 先端抵抗力～先端変位

2.2 交番载荷 (ケース 2-2)

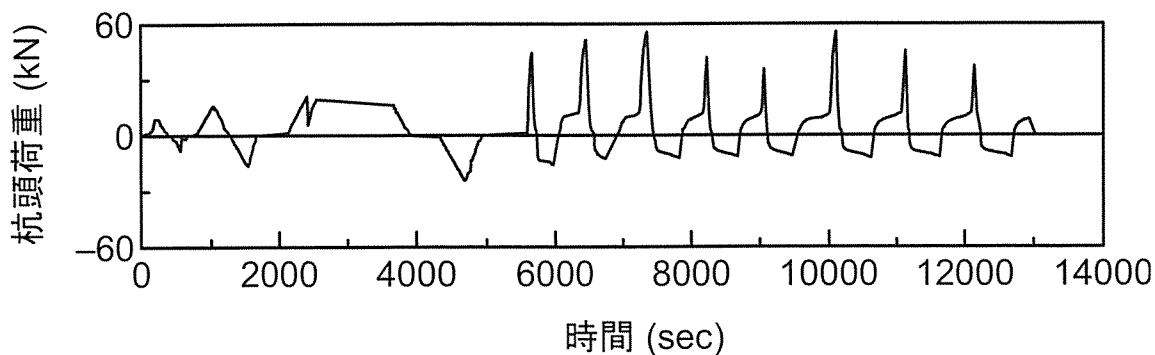


図-付 2.2. a ケース 2-2 : 杭頭荷重～時間

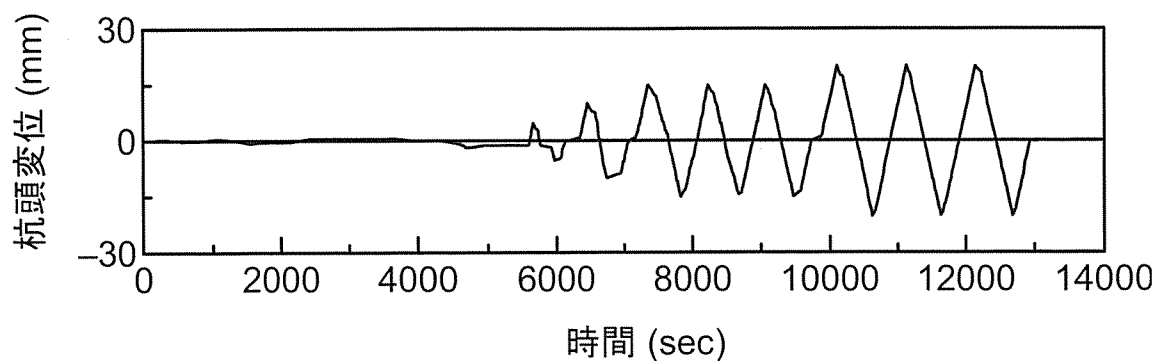


図-付 2.2. b ケース 2-2 : 杭頭変位～時間

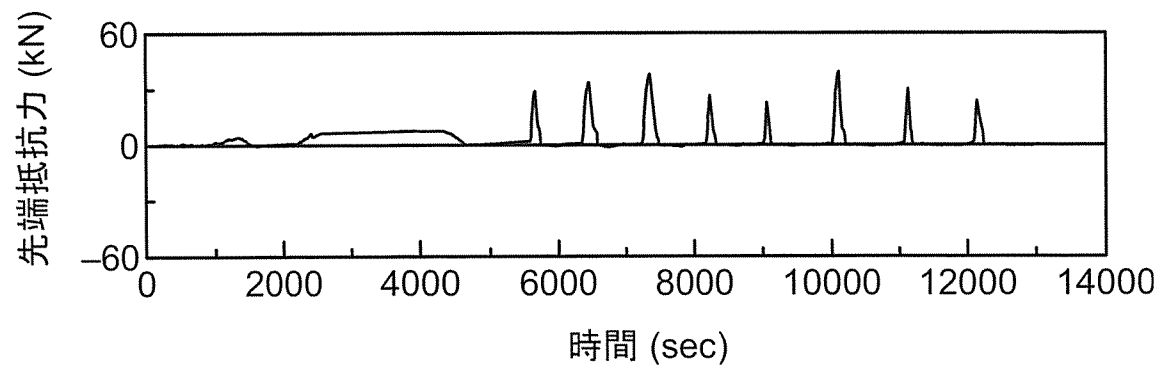


図-付 2.2. c ケース 2-2 : 先端抵抗力～時間

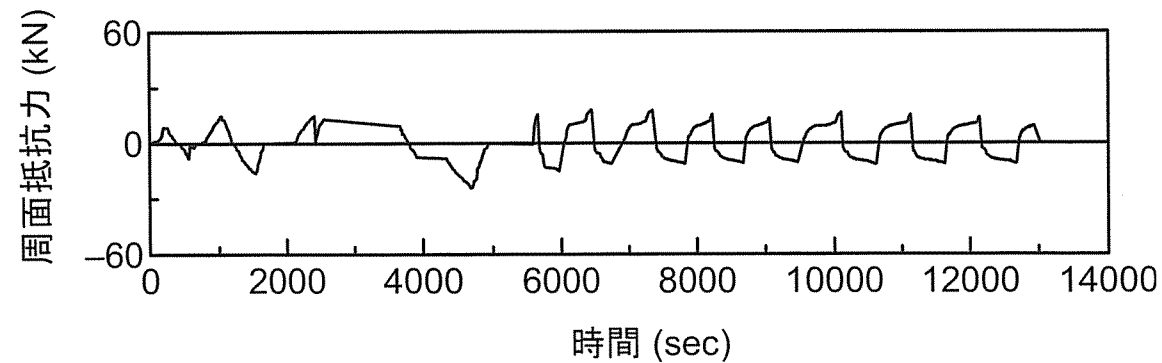
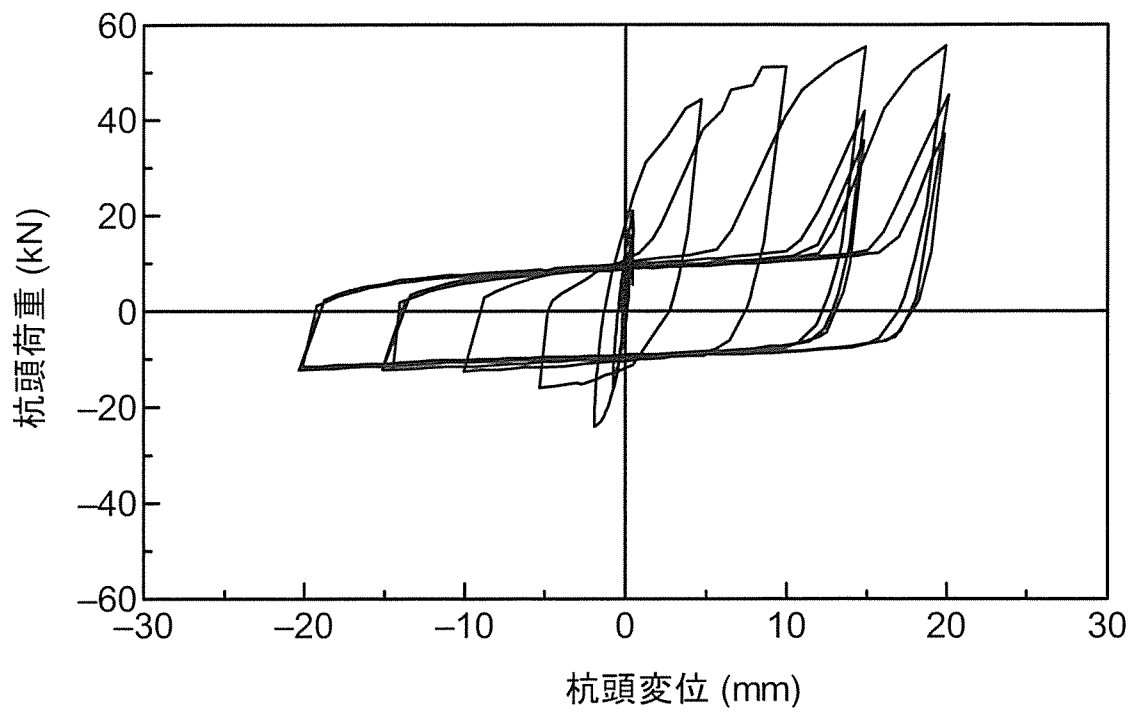
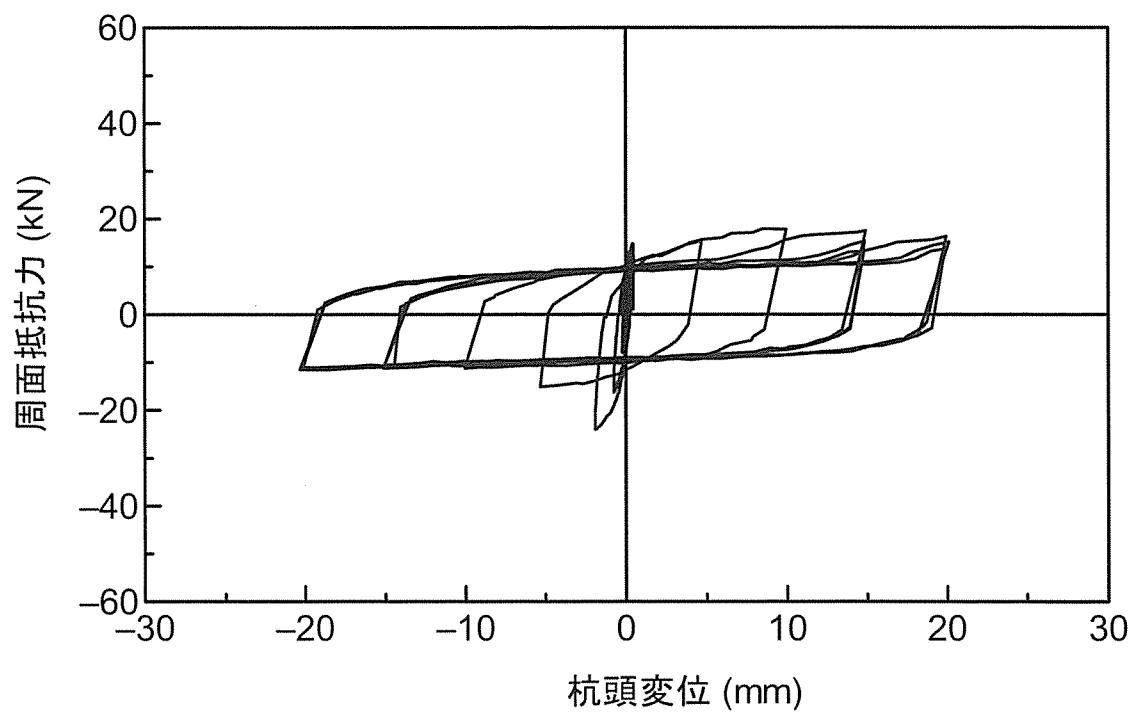


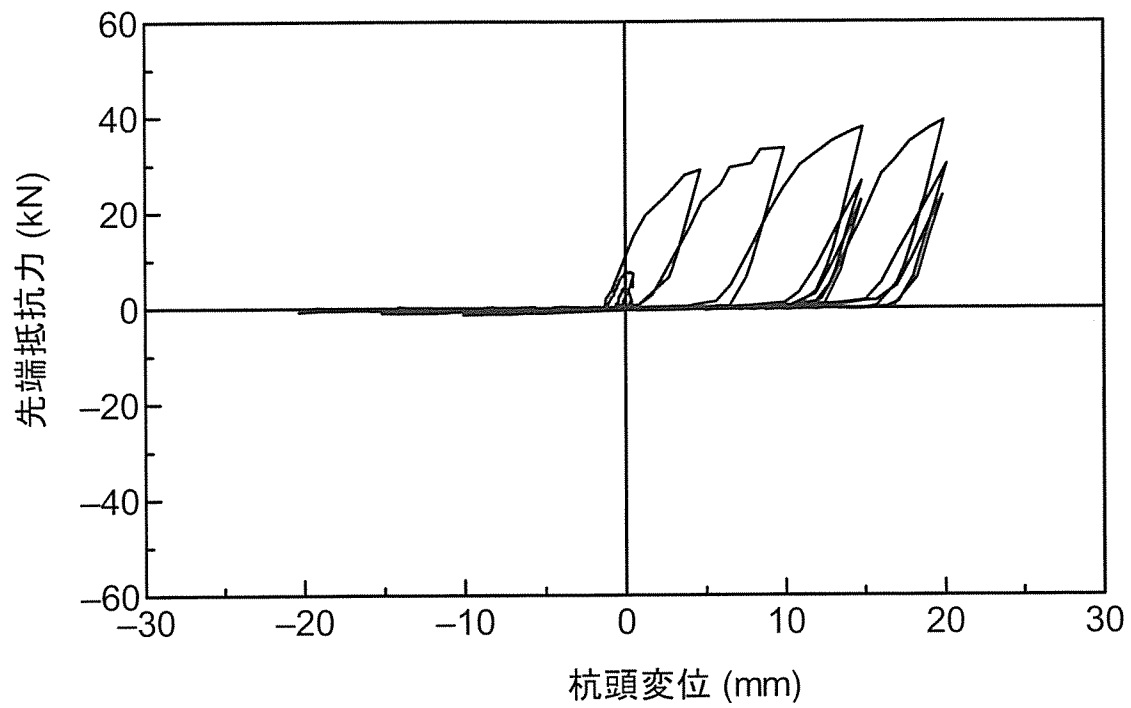
図-付 2.2. d ケース 2-2 : 周面抵抗力～時間



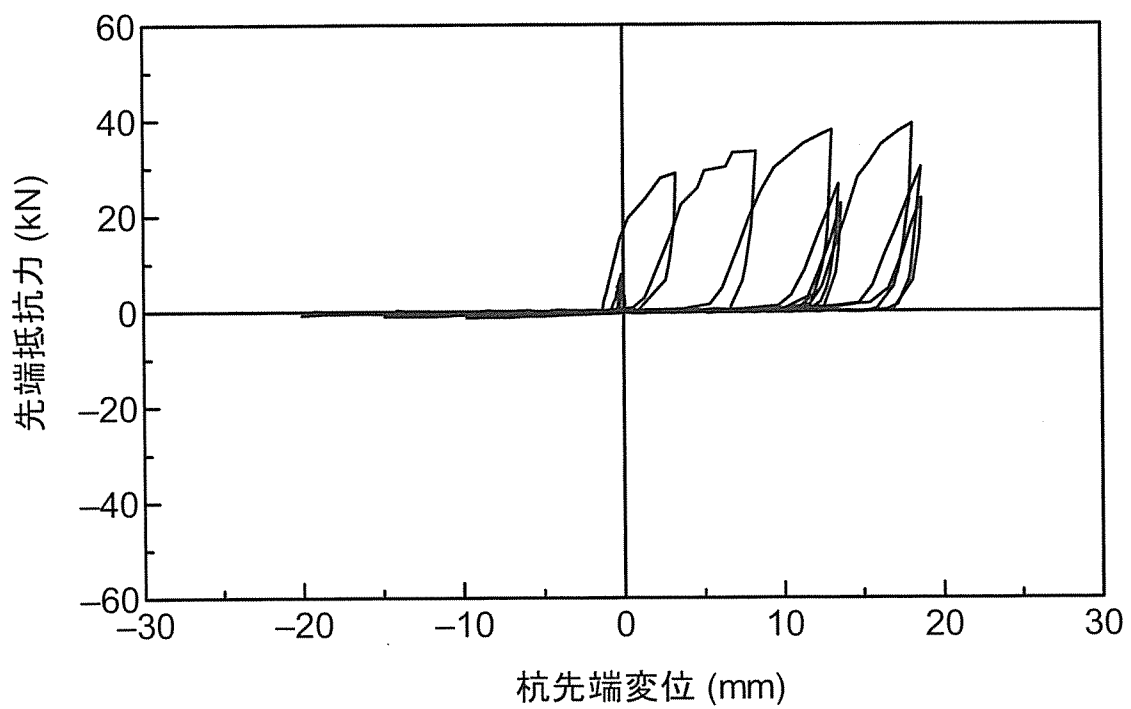
図一付 2.2. e ケース 2-2 : 杭頭荷重～杭頭変位



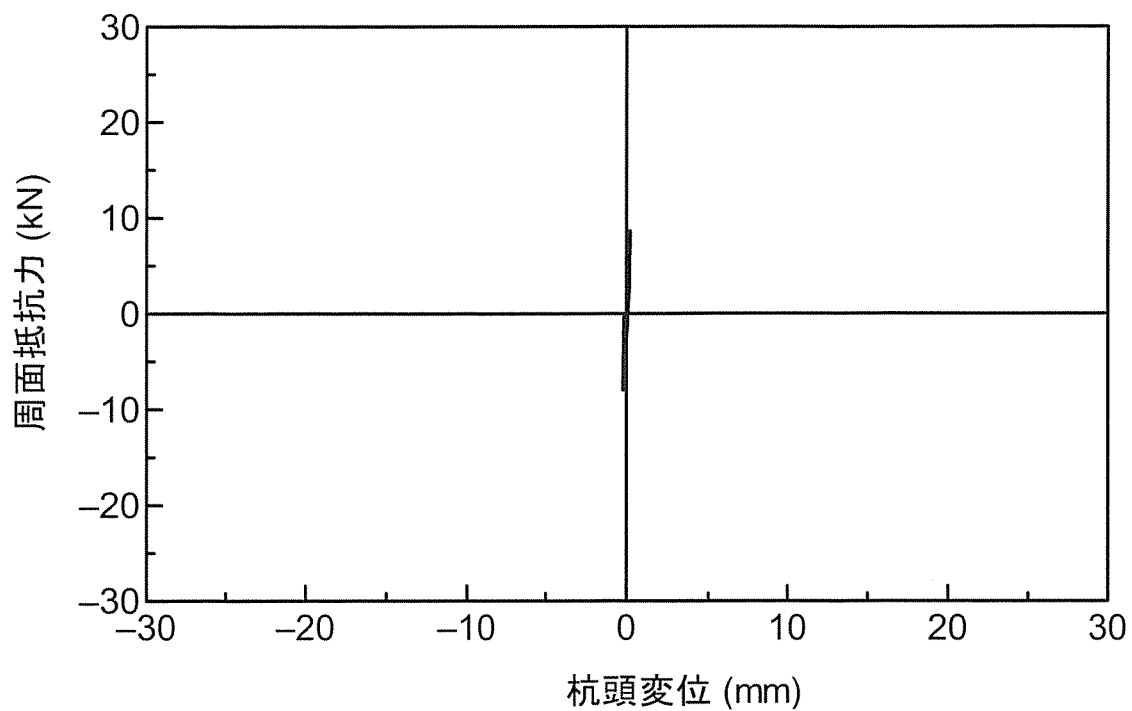
図一付 2.2. f ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位



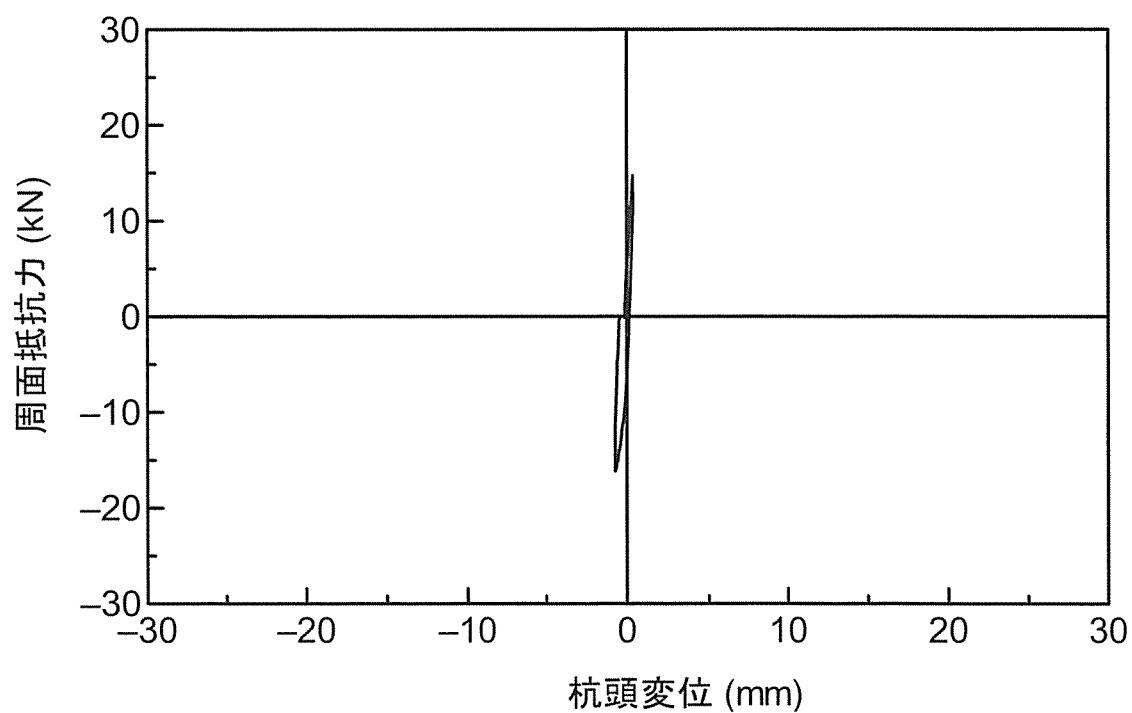
図一付 2.2. g ケース 2-2 : 先端抵抗力～杭頭変位



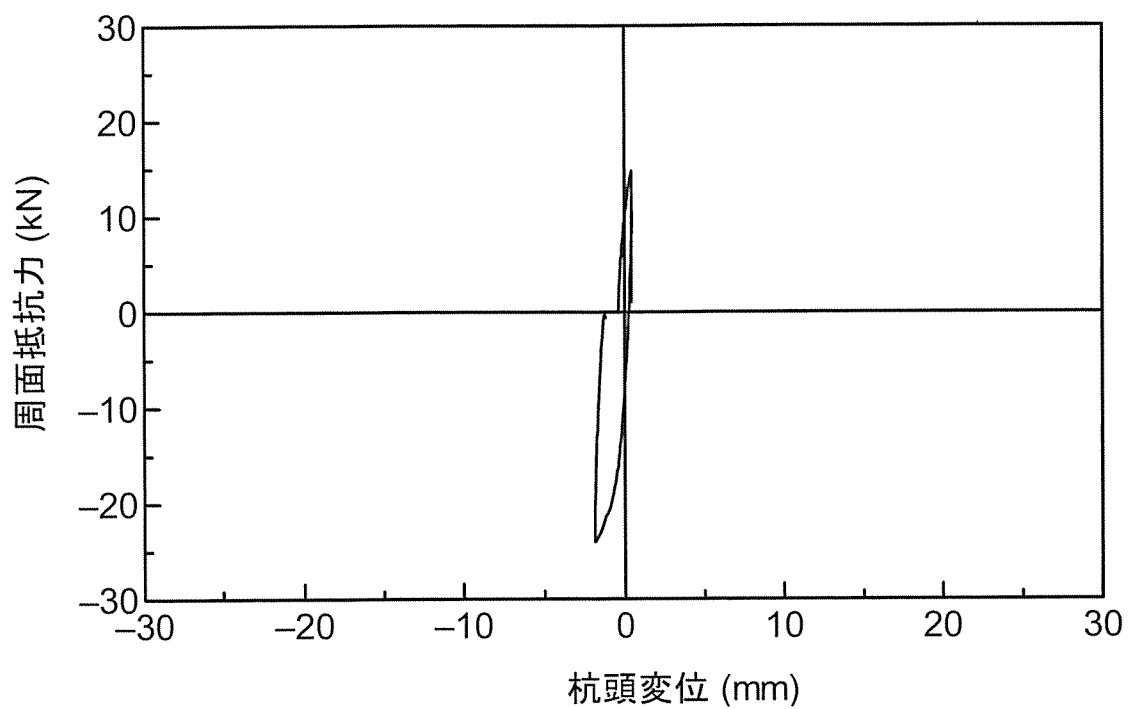
図一付 2.2. h ケース 2-2 : 先端抵抗力～先端変位



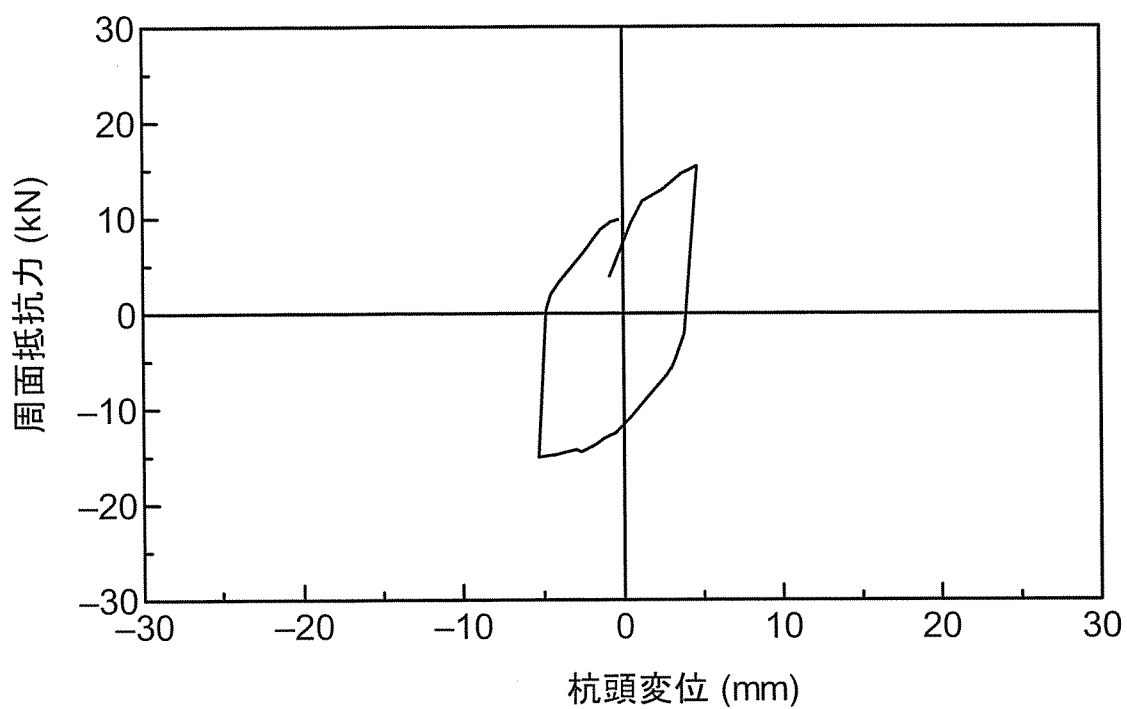
図一付 2.2. i ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (1 サイクル)



図一付 2.2. j ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (2 サイクル)



図一付 2.2.k ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (3 サイクル)



図一付 2.2.l ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (4 サイクル)

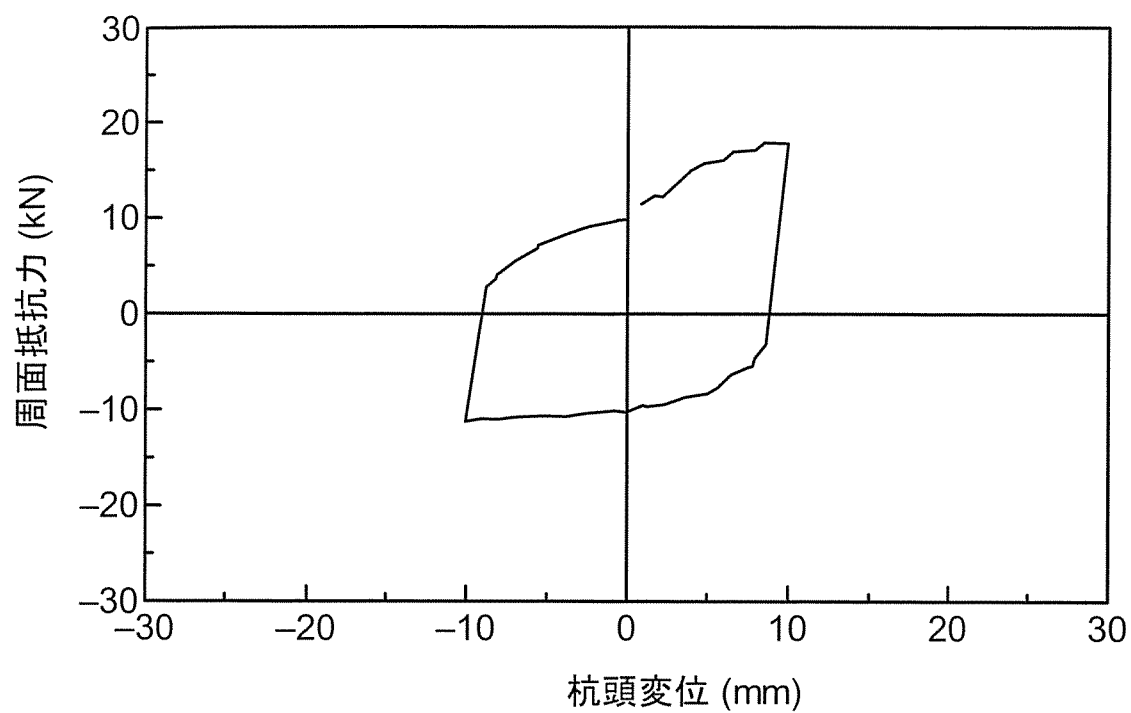


図-付 2.2.m ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (5 サイクル)

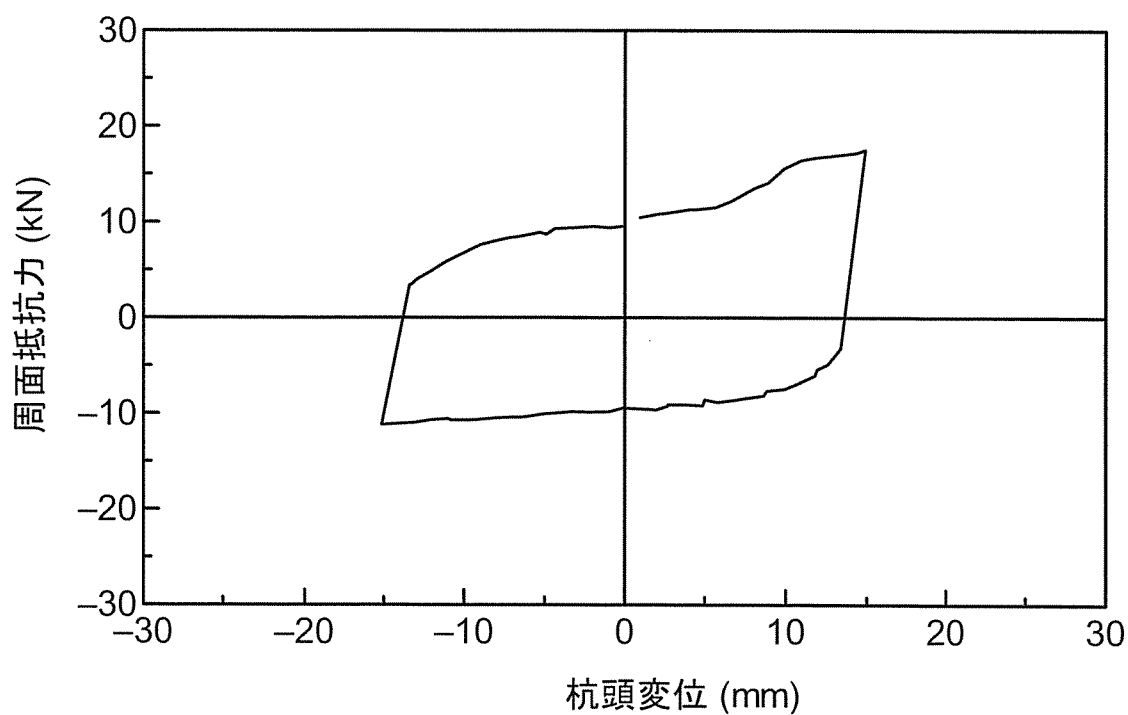


図-付 2.2.n ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (6 サイクル)

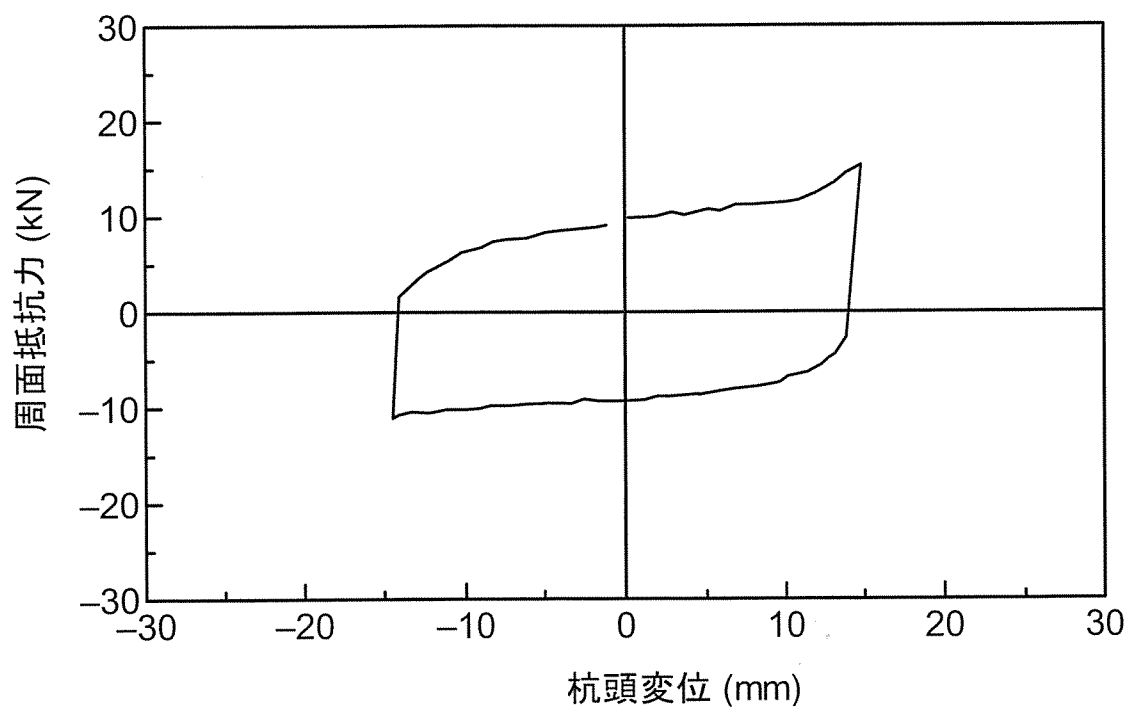


図-付 2.2.o ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (7 サイクル)

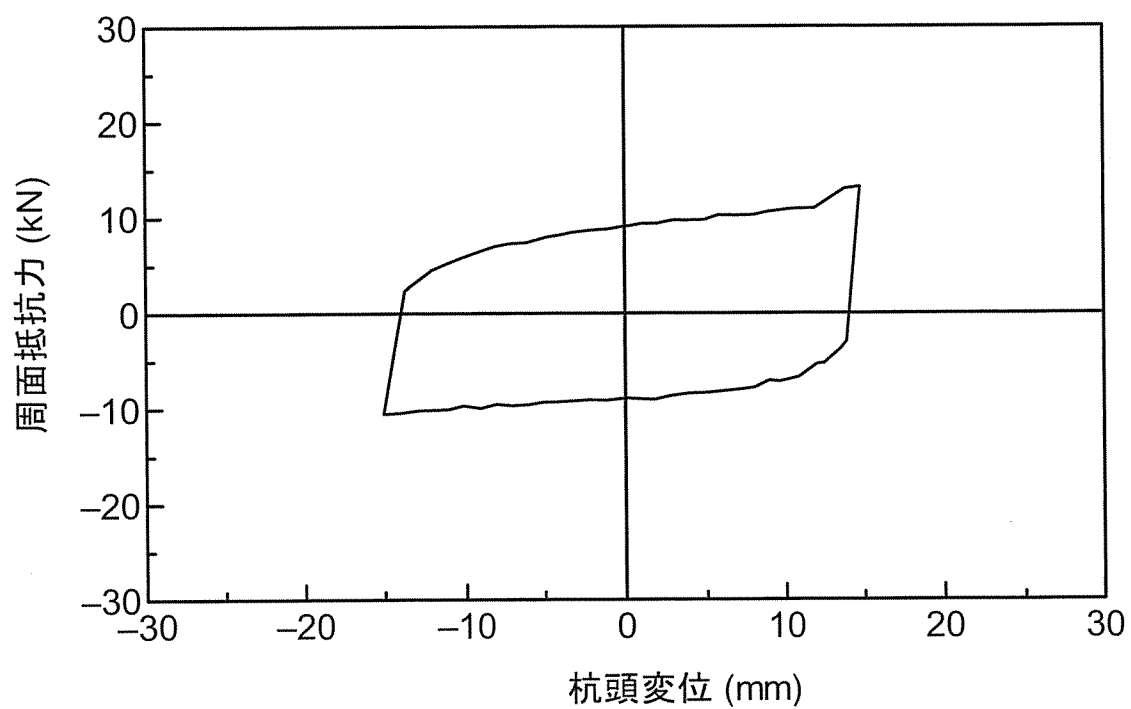
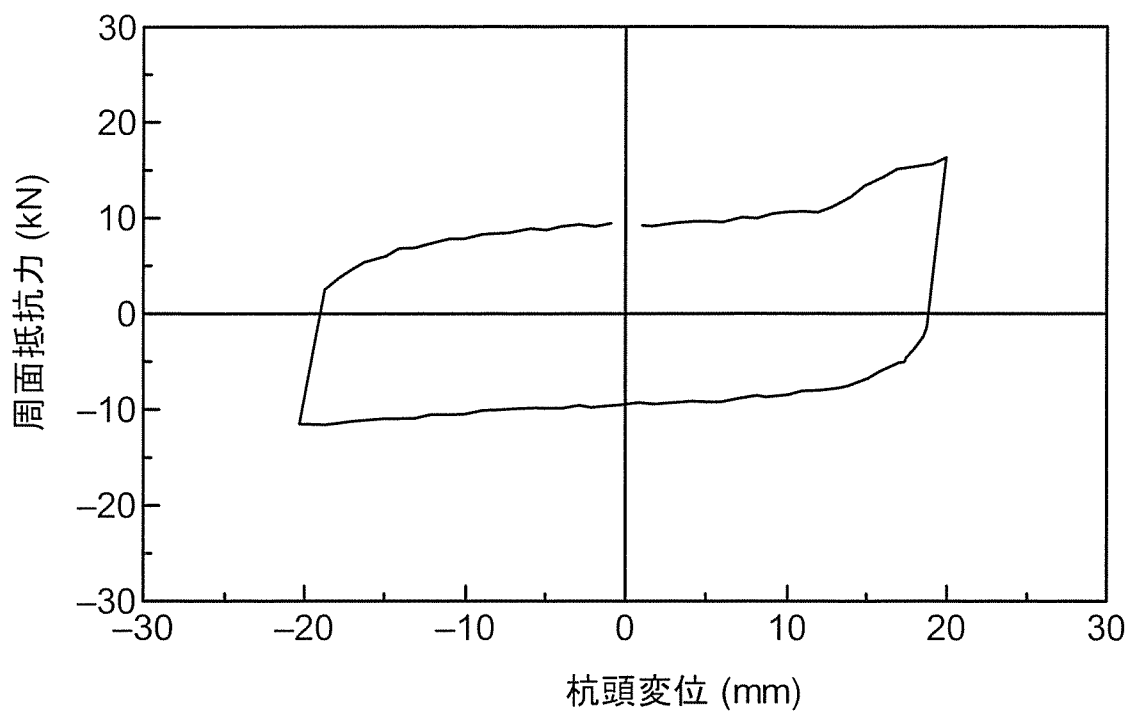
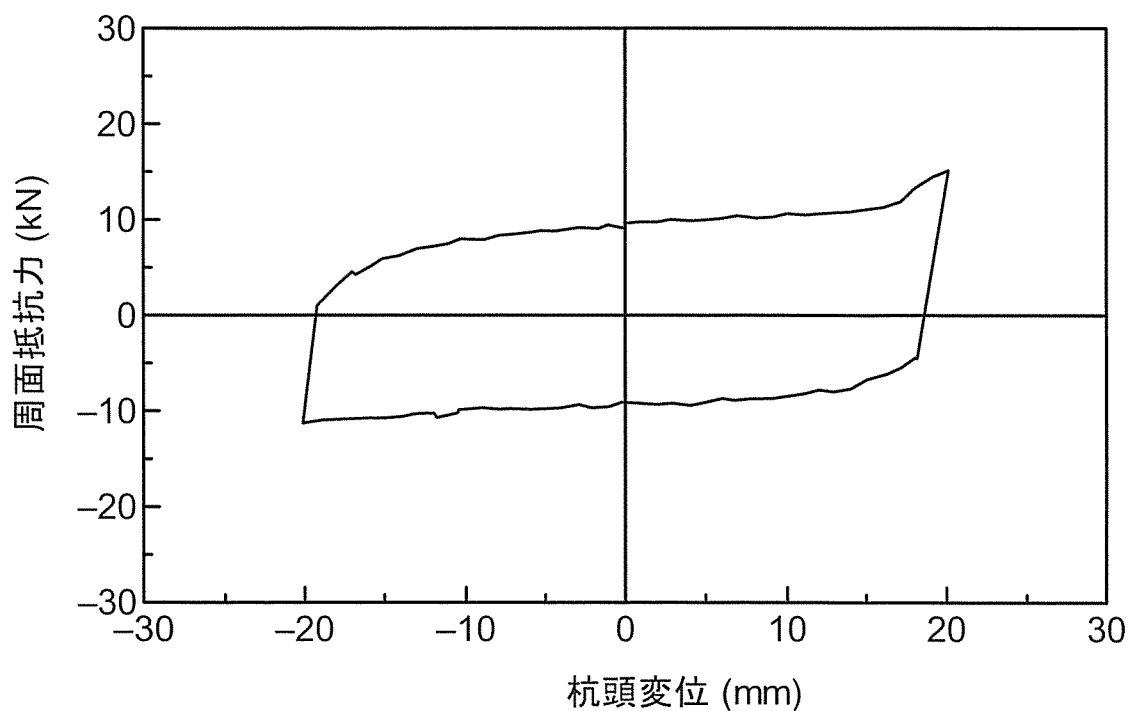


図-付 2.2.p ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (8 サイクル)



図一付 2.2.q ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (9 サイクル)



図一付 2.2.r ケース 2-2 : 周面抵抗力～杭頭変位 (10 サイクル)

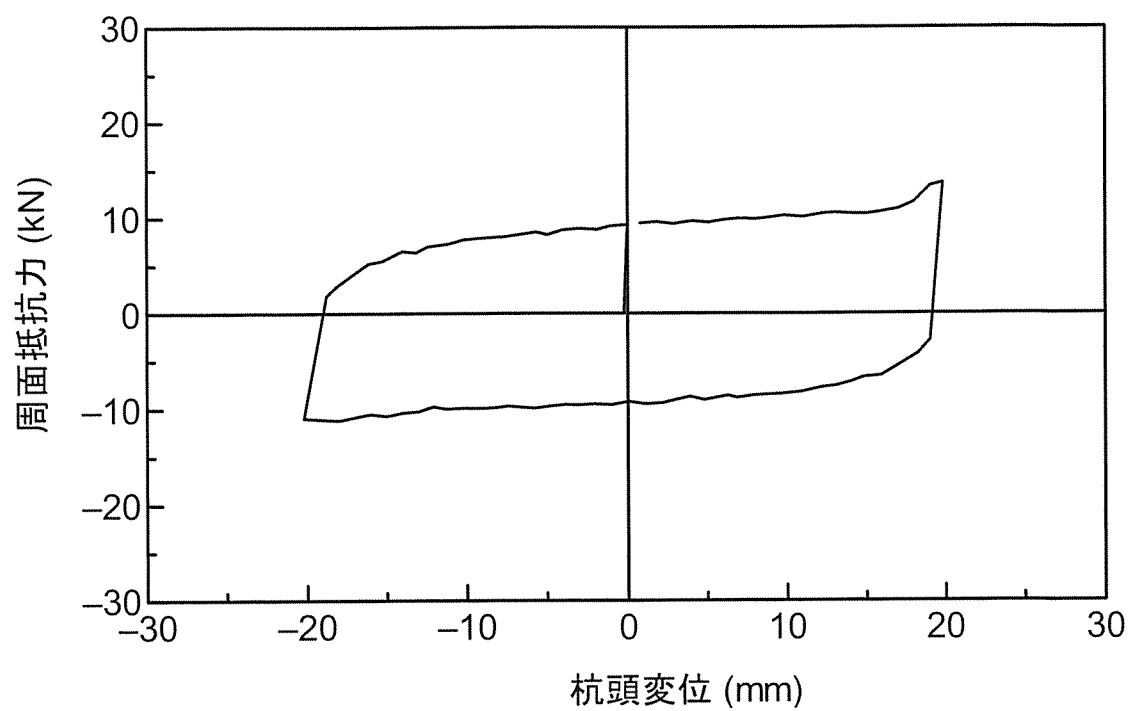


図-付 2.2.s ケース 2-2 : 周面抵抗～杭頭変位 (11 サイクル)

2.3 急速载荷 (ケース 2-3)

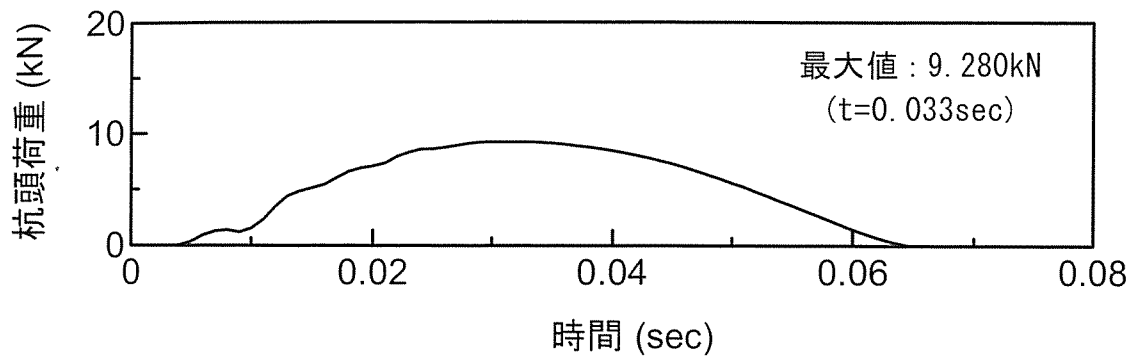


図-付 2.3.1. a 急速载荷 No. 3 (1 ステップ) : 杭頭荷重～時間

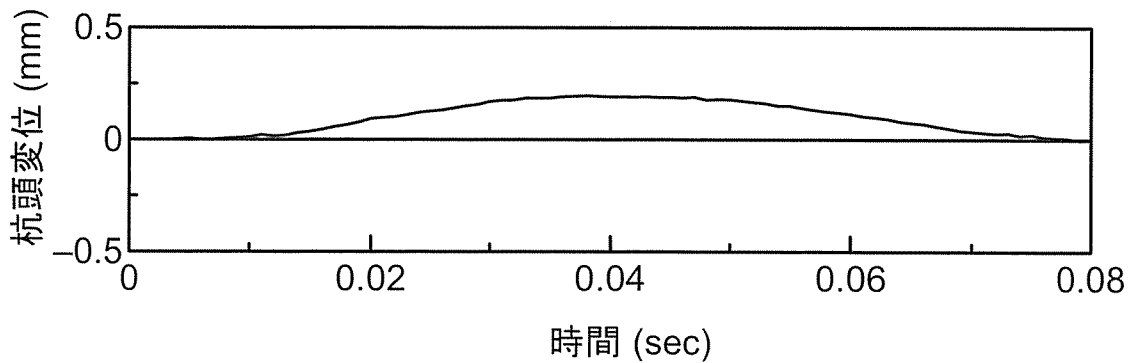


図-付 2.3.1. b 急速载荷 No. 3 (1 ステップ) : 杭頭変位～時間

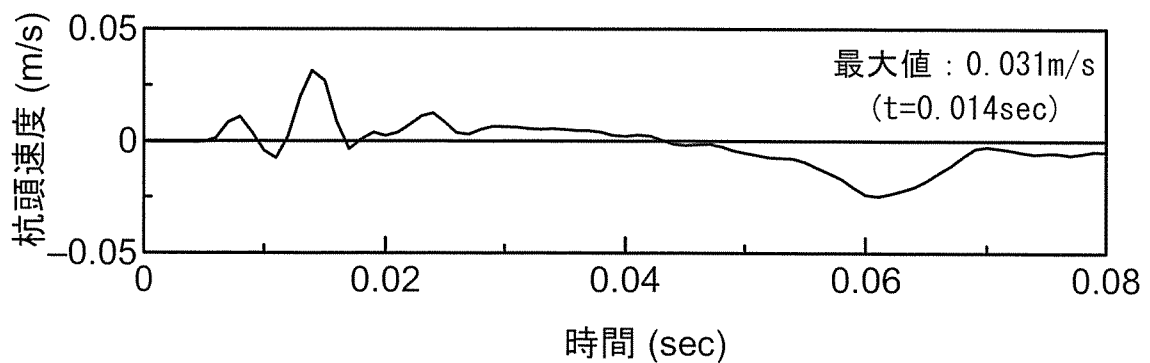


図-付 2.3.1. c 急速载荷 No. 3 (1 ステップ) : 杭頭速度～時間

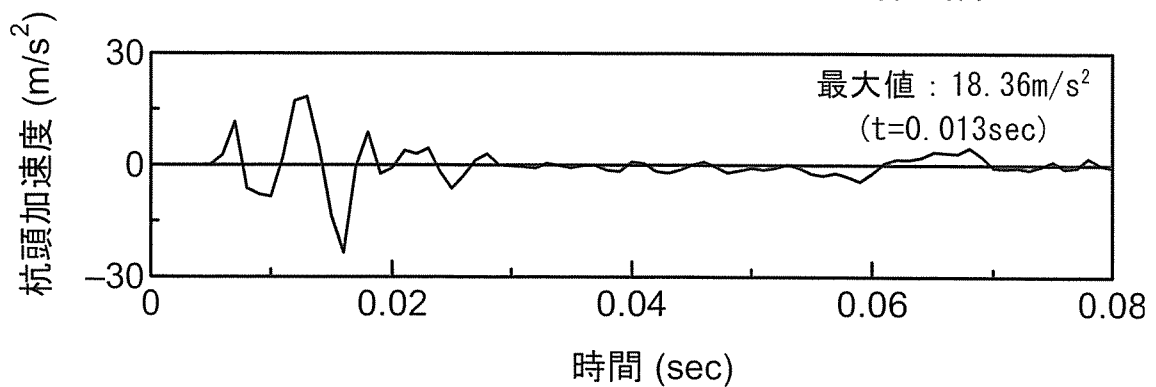
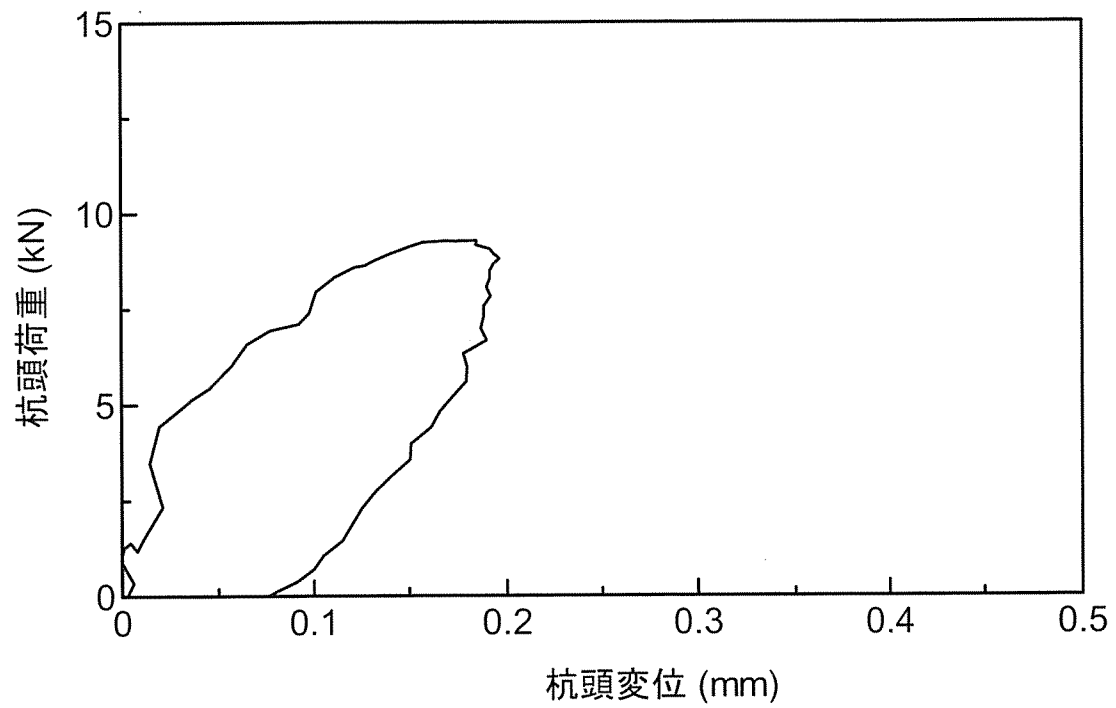
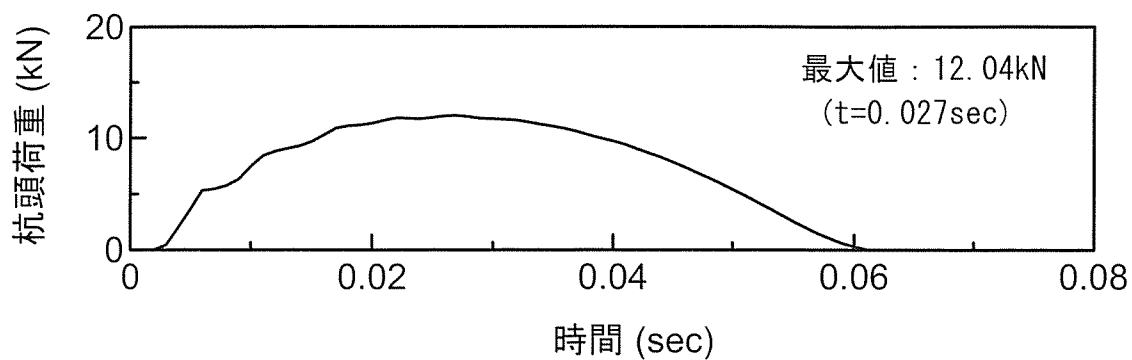


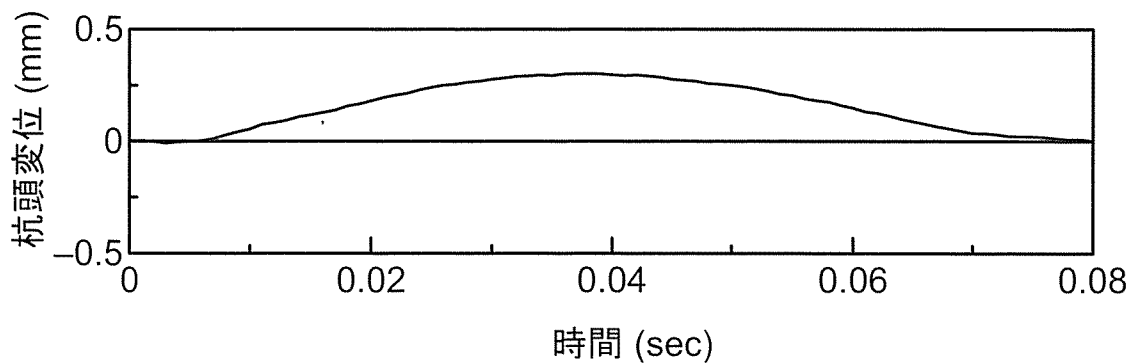
図-付 2.3.1. d 急速载荷 No. 3 (1 ステップ) : 杭頭加速度～時間



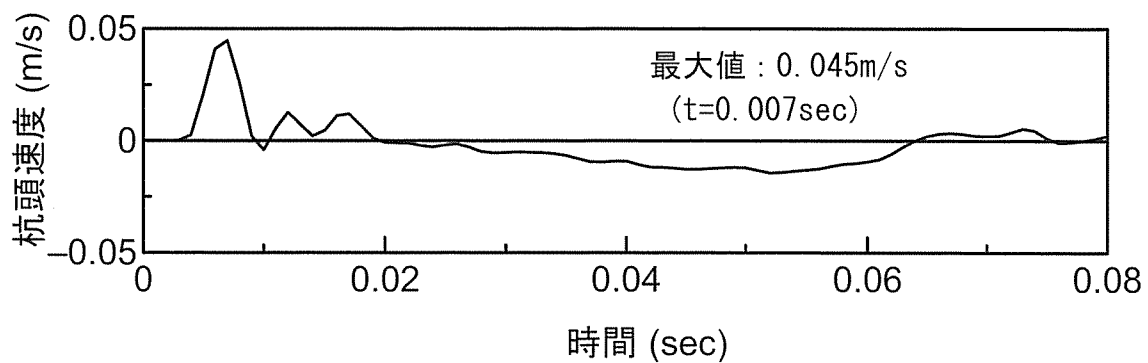
図一付 2.3.1.e 急速載荷 No.3 (1 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



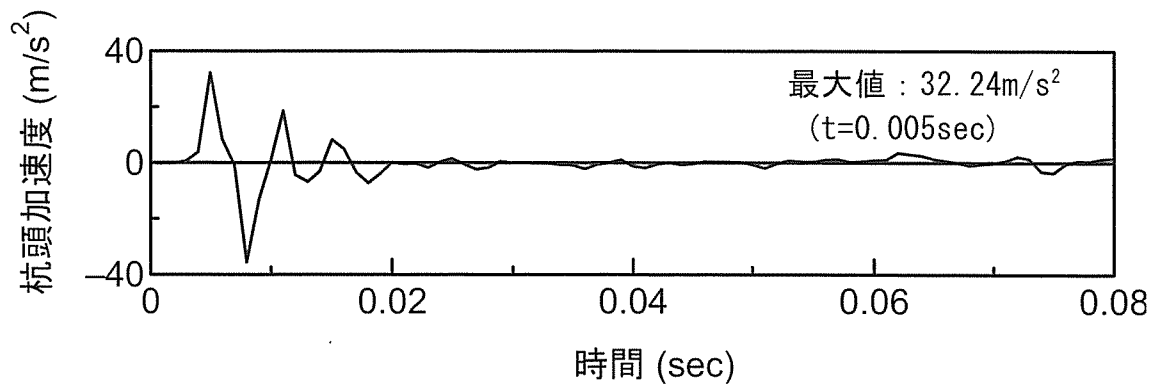
図一付 2.3.2. a 急速載荷 No.3 (2 ステップ) : 杭頭荷重～時間



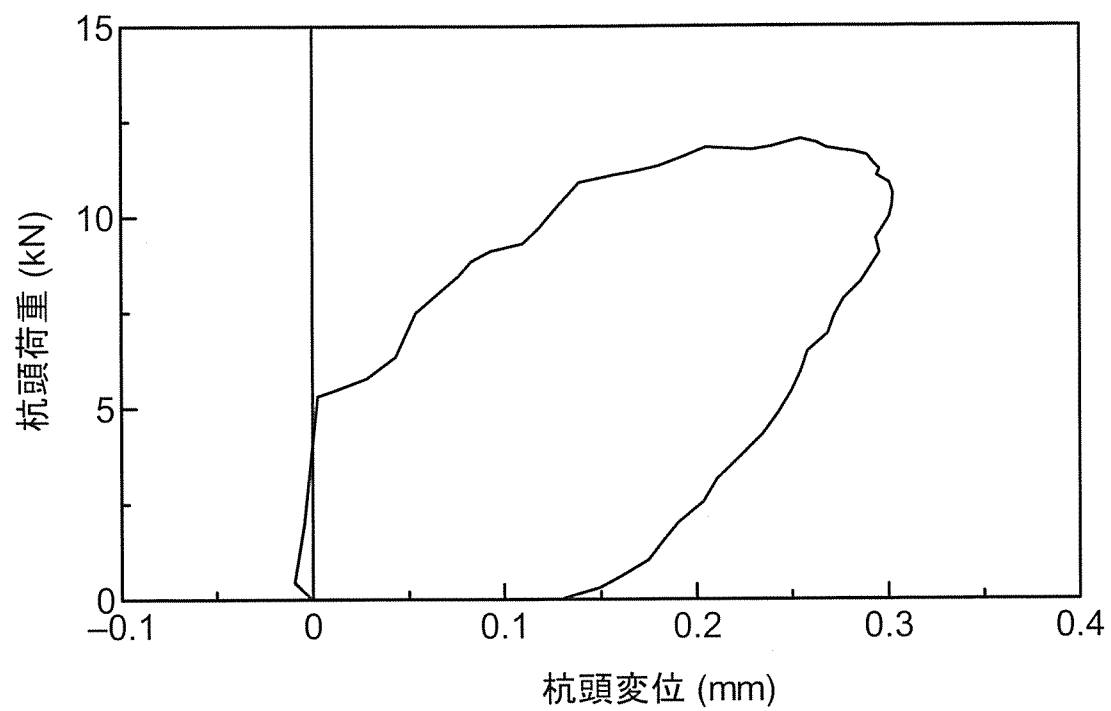
図一付 2.3.2. b 急速載荷 No.3 (2 ステップ) : 杭頭変位～時間



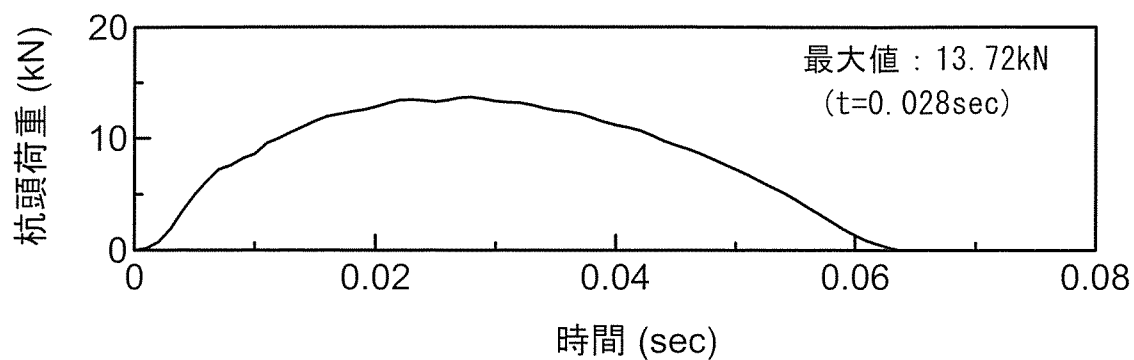
図一付 2.3.2. c 急速載荷 No.3 (2 ステップ) : 杭頭速度～時間



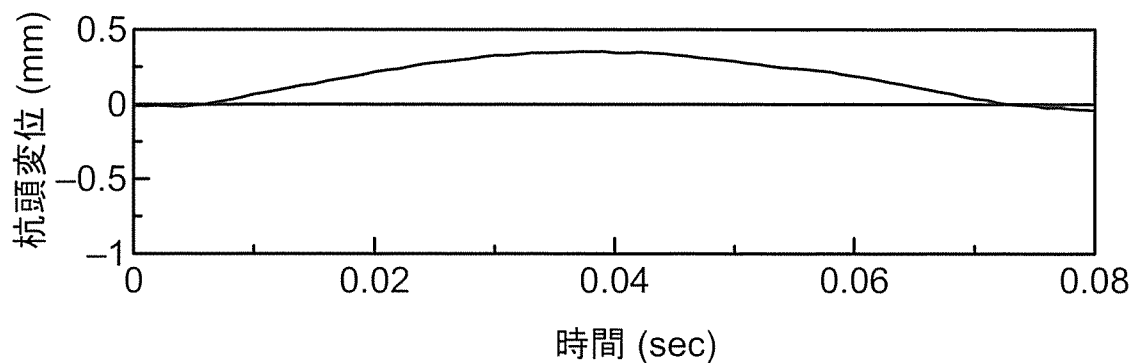
図一付 2.3.2. d 急速載荷 No.3 (2 ステップ) : 杭頭加速度～時間



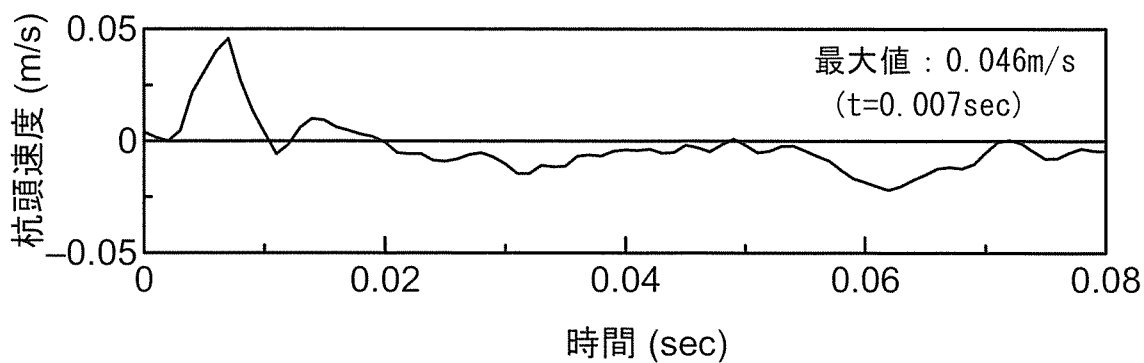
図一付 2.3.2.e 急速載荷 No.3 (2 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



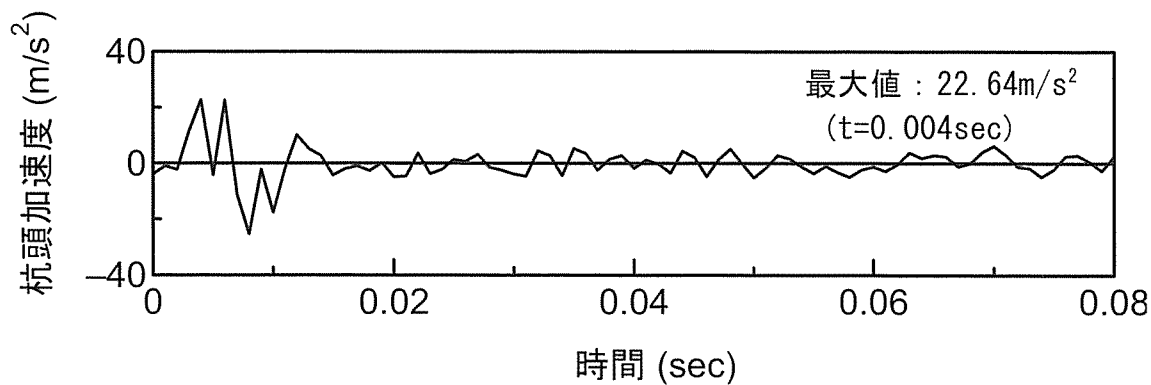
図一付 2.3.3. a 急速載荷 No.3 (3 ステップ) : 杭頭荷重～時間



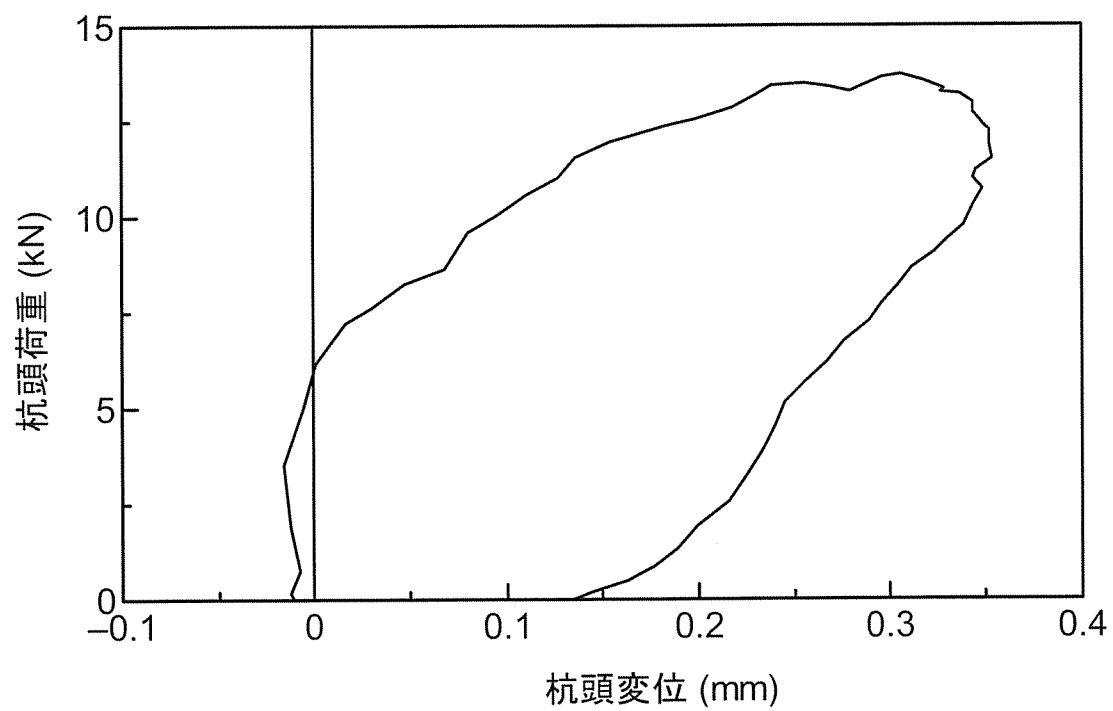
図一付 2.3.3. b 急速載荷 No.3 (3 ステップ) : 杭頭変位～時間



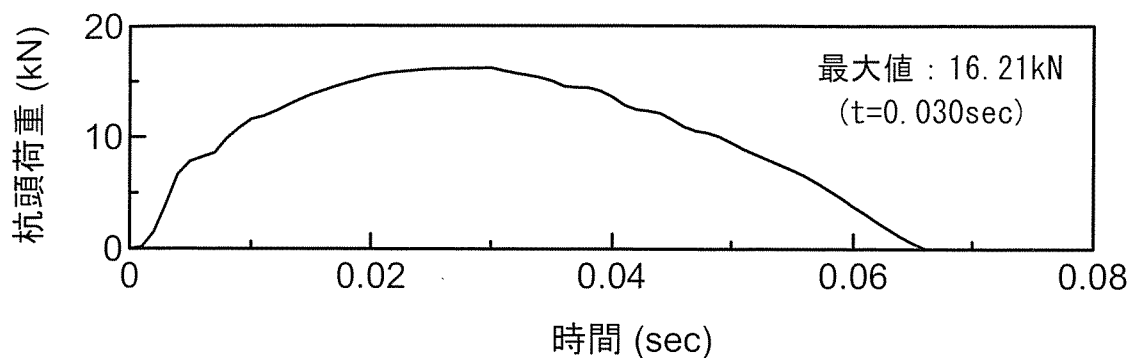
図一付 2.3.3. c 急速載荷 No.3 (3 ステップ) : 杭頭速度～時間



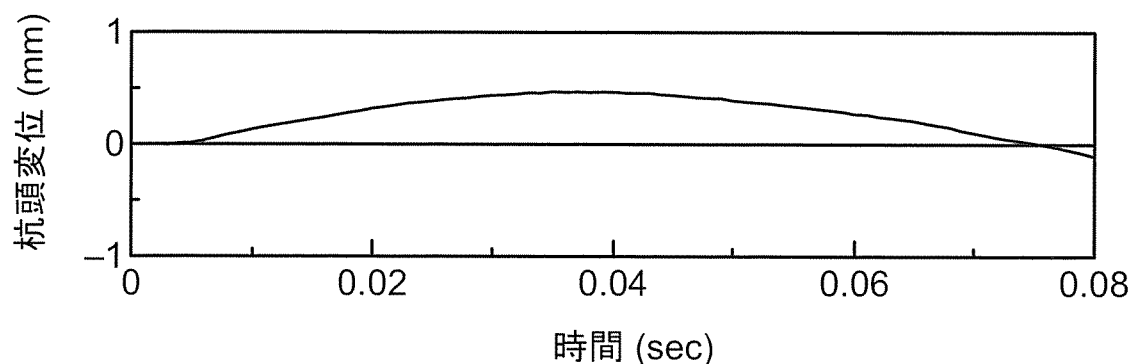
図一付 2.3.3. d 急速載荷 No.3 (3 ステップ) : 杭頭加速度～時間



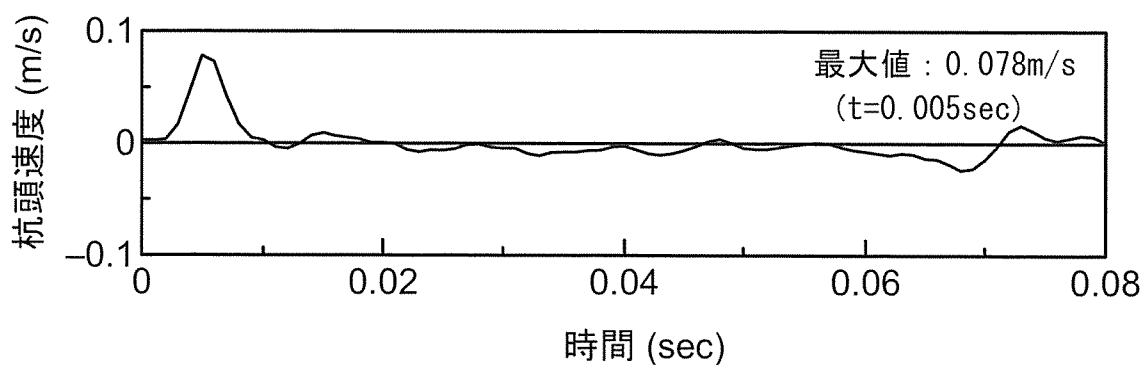
図一付 2.3.3.e 急速載荷 No.3 (3 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



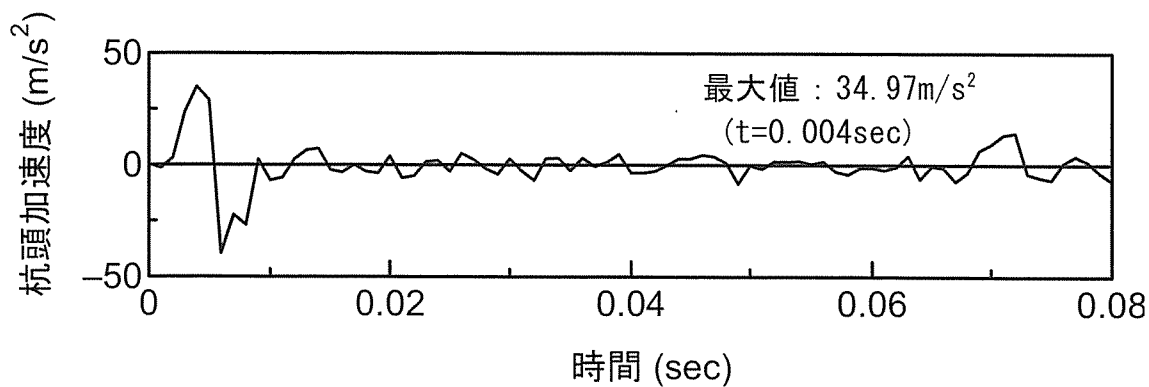
図一付 2.3.4. a 急速載荷 No.3 (4 ステップ) : 杭頭荷重～時間



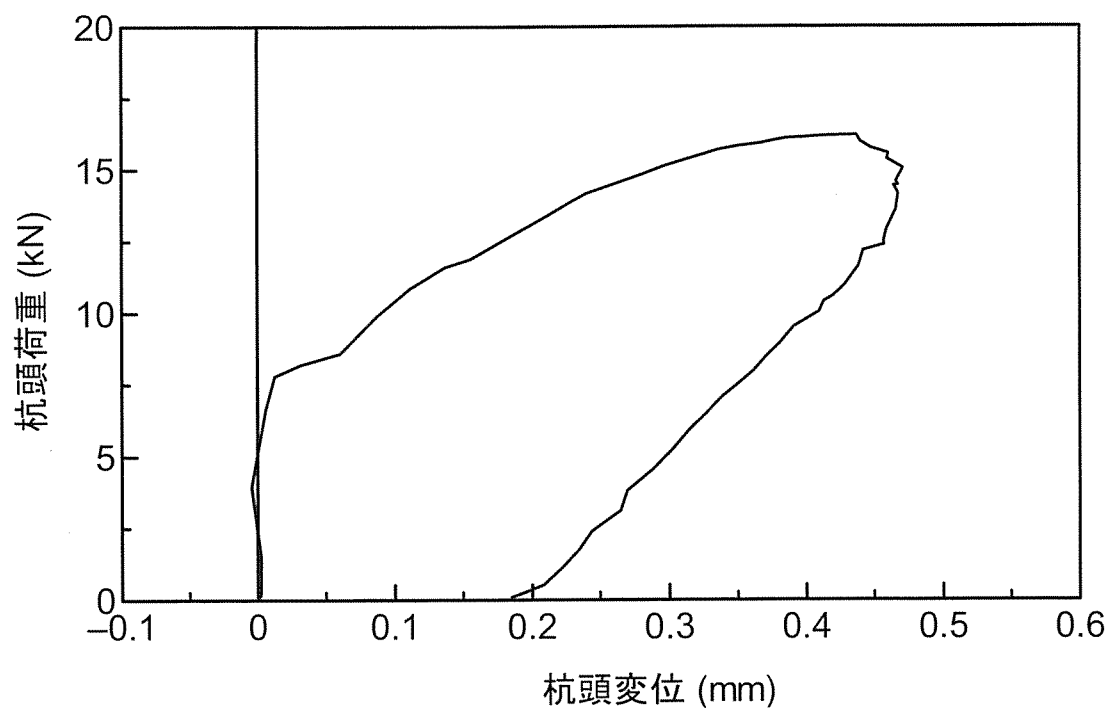
図一付 2.3.4. b 急速載荷 No.3 (4 ステップ) : 杭頭変位～時間



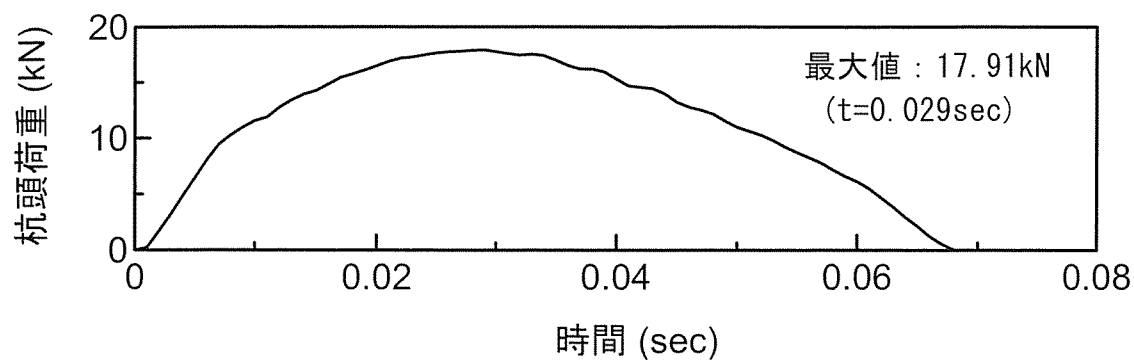
図一付 2.3.4. c 急速載荷 No.3 (4 ステップ) : 杭頭速度～時間



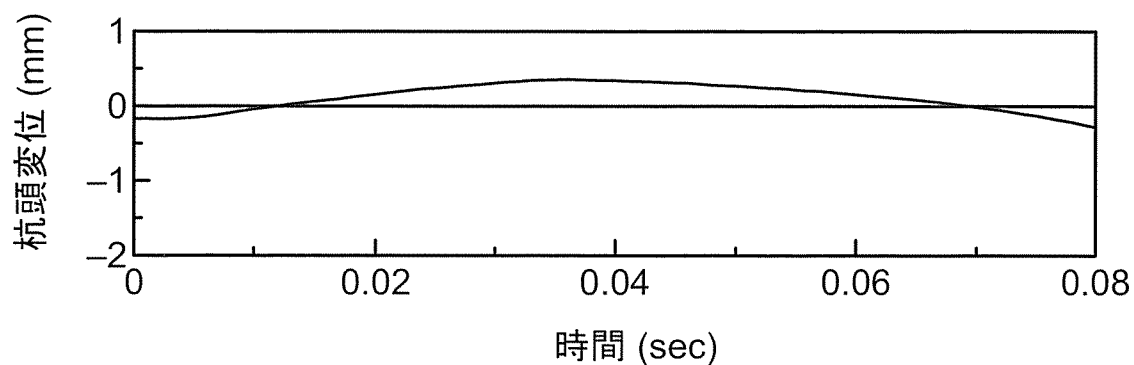
図一付 2.3.4. d 急速載荷 No.3 (4 ステップ) : 杭頭加速度～時間



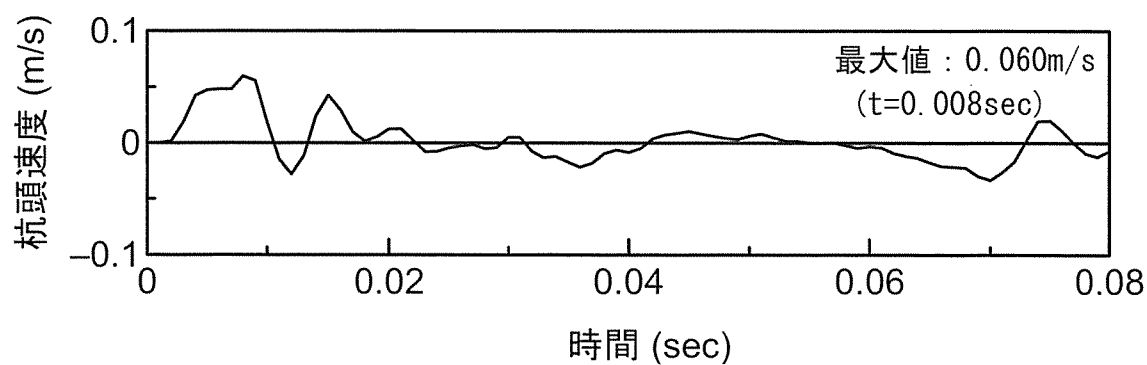
図一付 2.3.4.e 急速載荷 No.3 (4ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



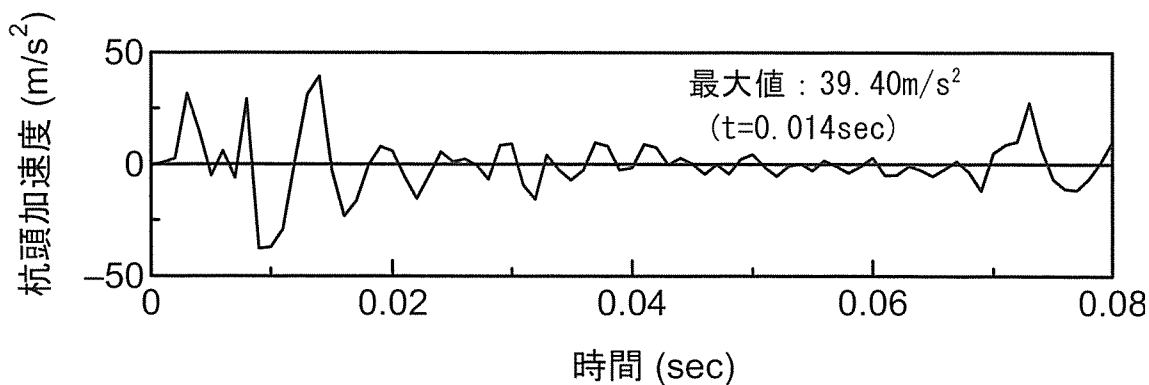
図一付 2.3.5. a 急速載荷 No.3 (5 ステップ) : 杭頭荷重～時間



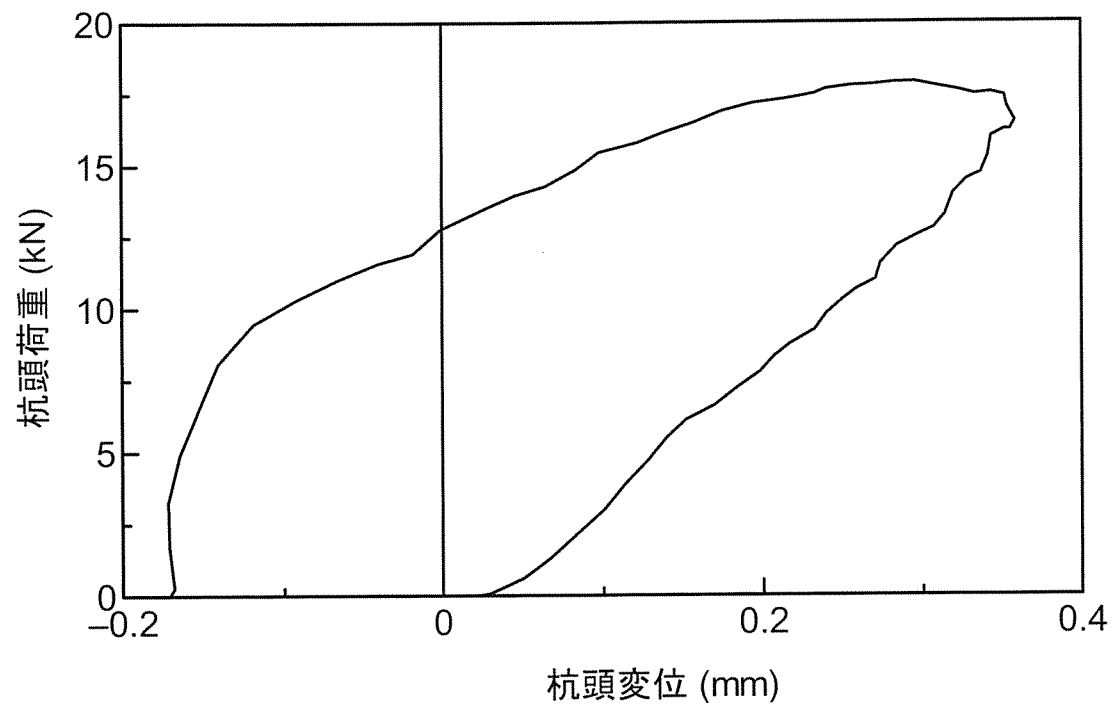
図一付 2.3.5. b 急速載荷 No.3 (5 ステップ) : 杭頭変位～時間



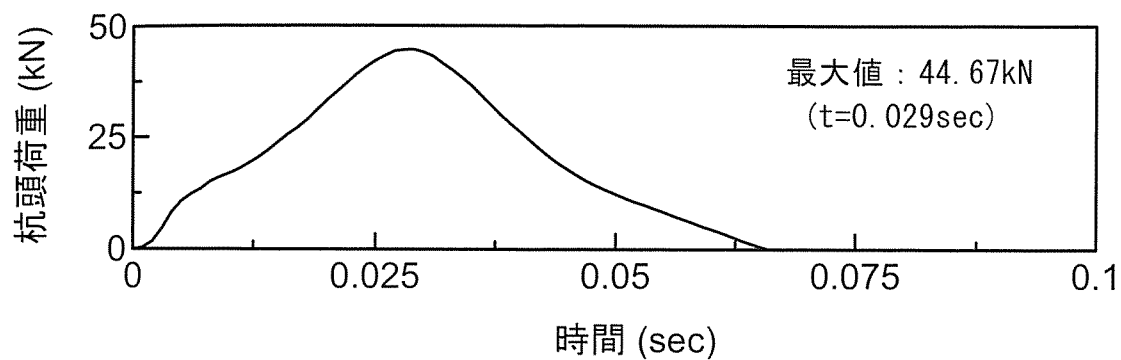
図一付 2.3.5. c 急速載荷 No.3 (5 ステップ) : 杭頭速度～時間



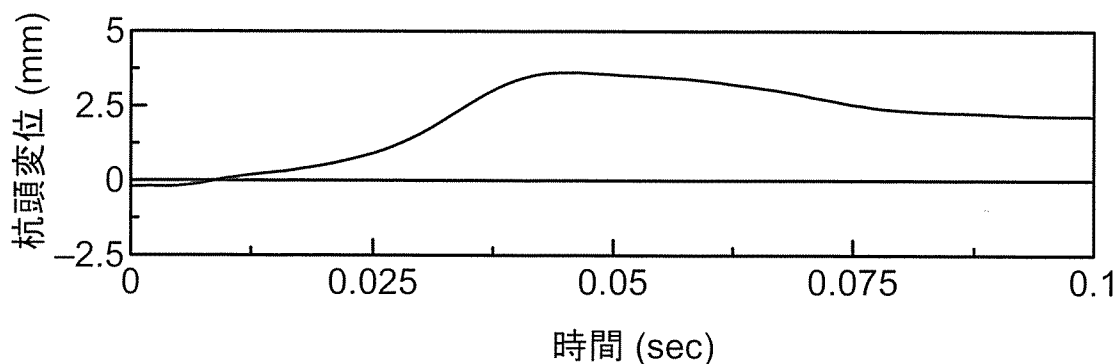
図一付 2.3.5. d 急速載荷 No.3 (5 ステップ) : 杭頭加速度～時間



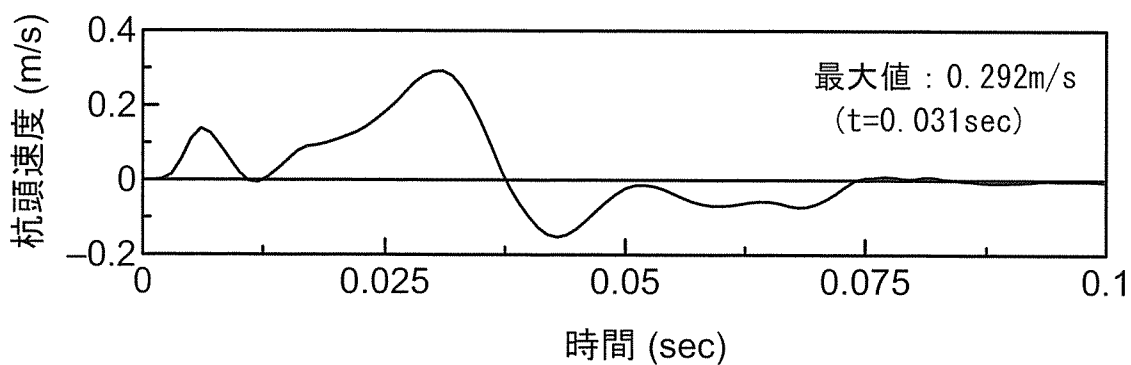
図一付 2.3.5.e 急速載荷 No.3 (5 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



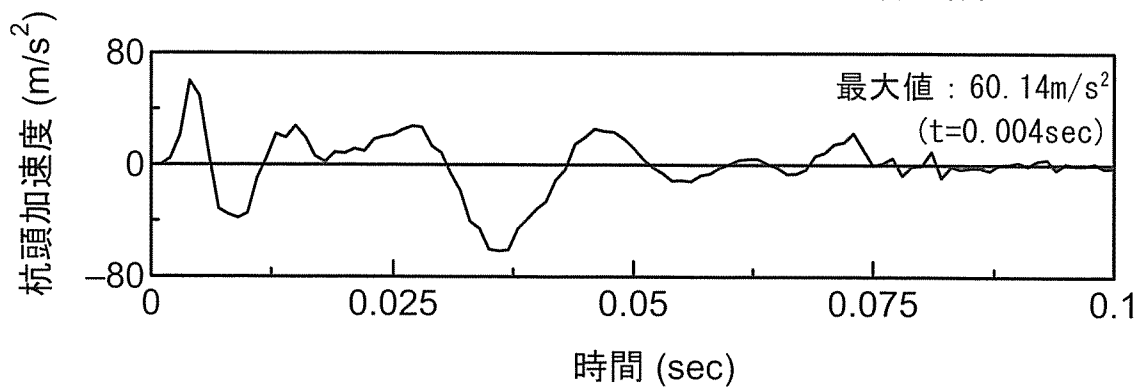
図一付 2.3.6. a 急速載荷 No.3 (6 ステップ) : 杭頭荷重～時間



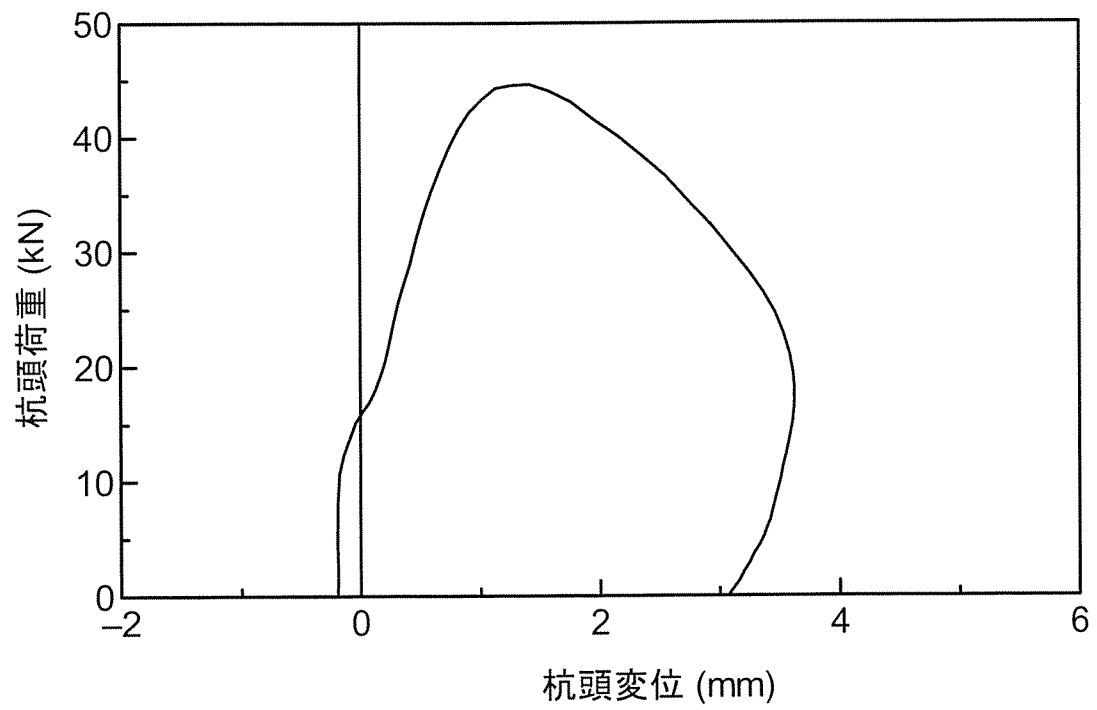
図一付 2.3.6. b 急速載荷 No.3 (6 ステップ) : 杭頭変位～時間



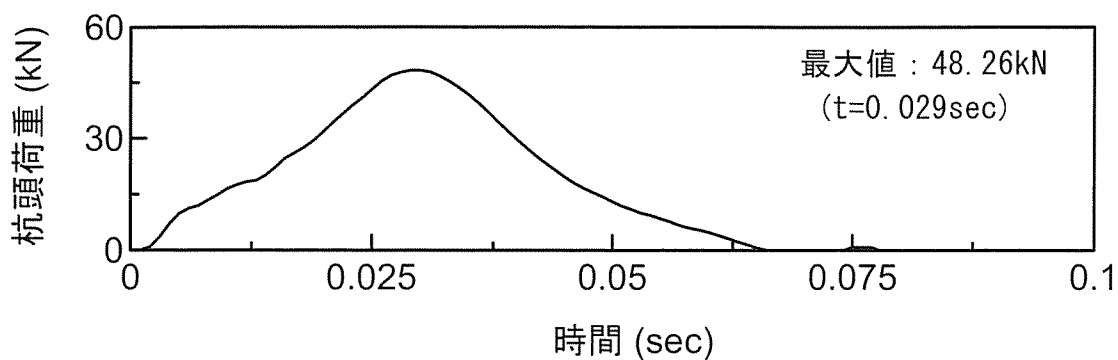
図一付 2.3.6. c 急速載荷 No.3 (6 ステップ) : 杭頭速度～時間



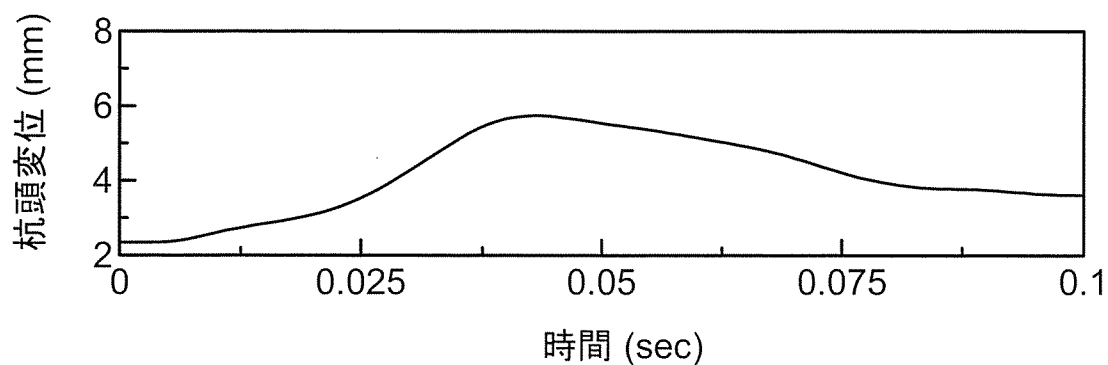
図一付 2.3.6. d 急速載荷 No.3 (6 ステップ) : 杭頭加速度～時間



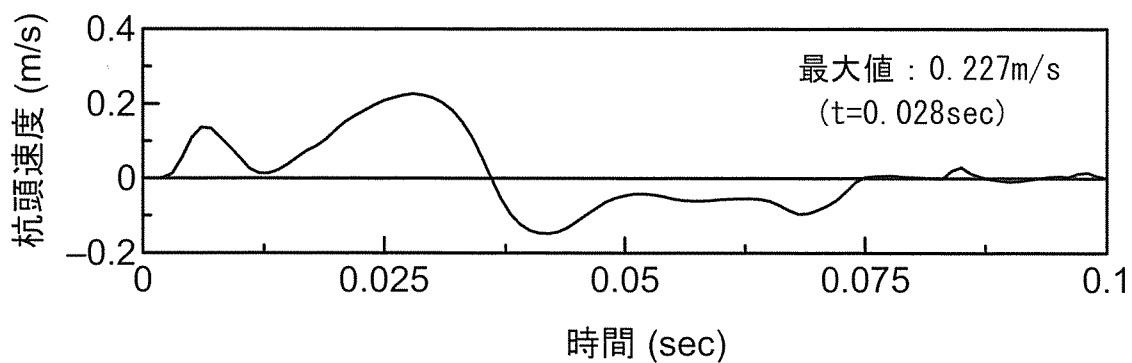
図一付 2.3.6.e 急速載荷 No.3 (6 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



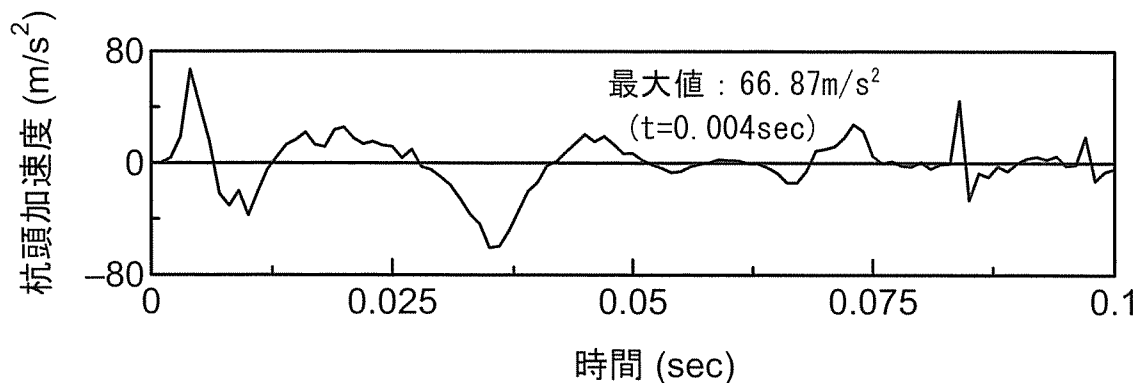
図一付 2.3.7. a 急速載荷 No.3 (7 ステップ) : 杭頭荷重～時間



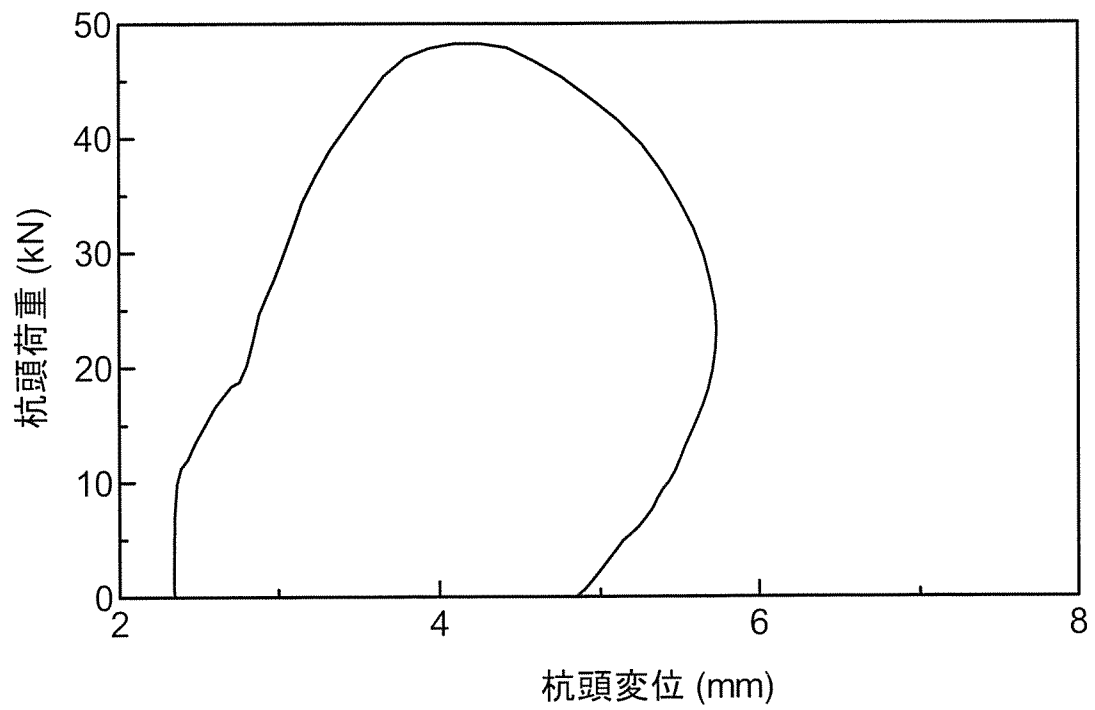
図一付 2.3.7. b 急速載荷 No.3 (7 ステップ) : 杭頭変位～時間



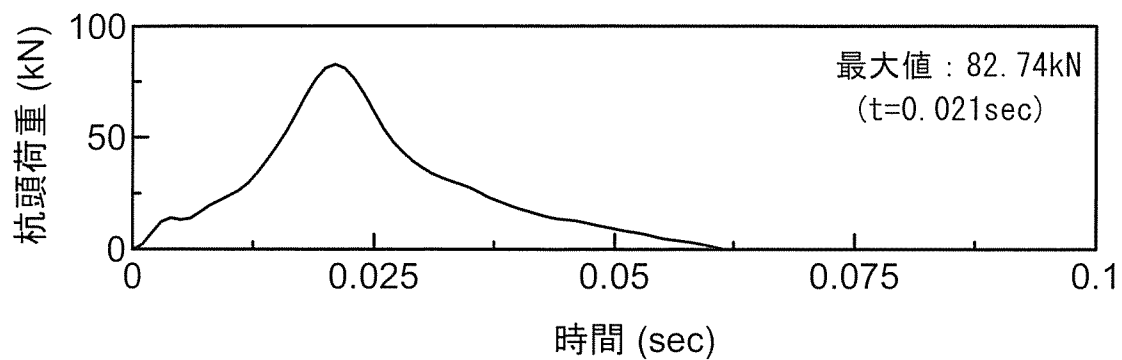
図一付 2.3.7. c 急速載荷 No.3 (7 ステップ) : 杭頭速度～時間



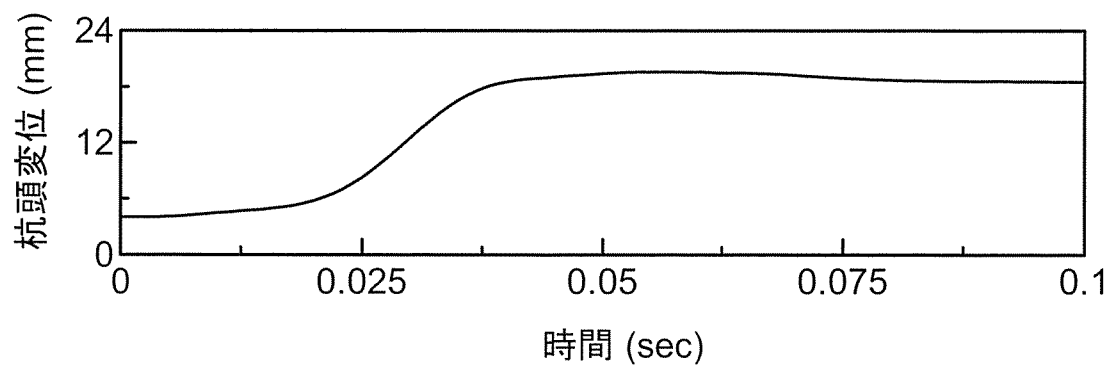
図一付 2.3.7. d 急速載荷 No.3 (7 ステップ) : 杭頭加速度～時間



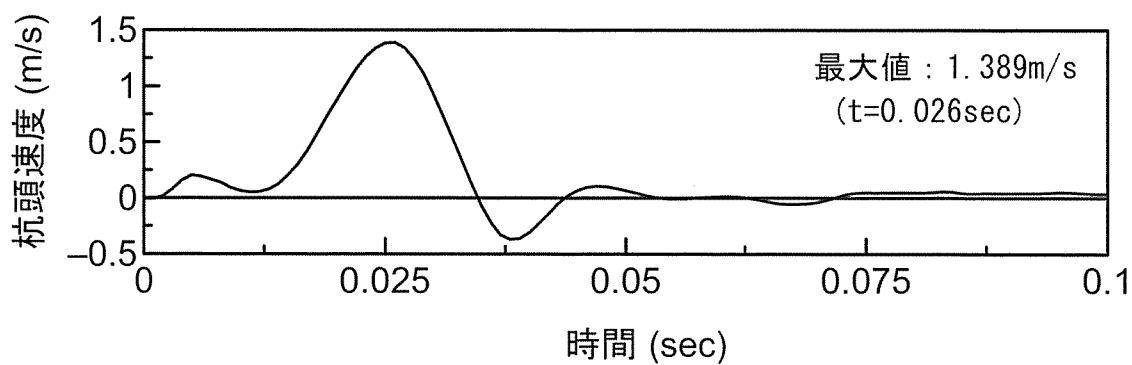
図一付 2. 3. 7. e 急速載荷 No. 3 (7 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



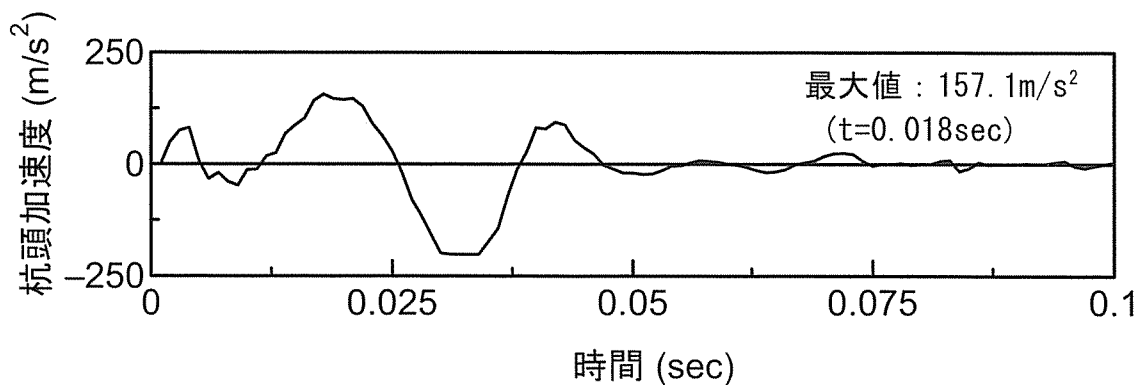
図一付 2.3.8. a 急速載荷 No. 3 (8 ステップ) : 杭頭荷重～時間



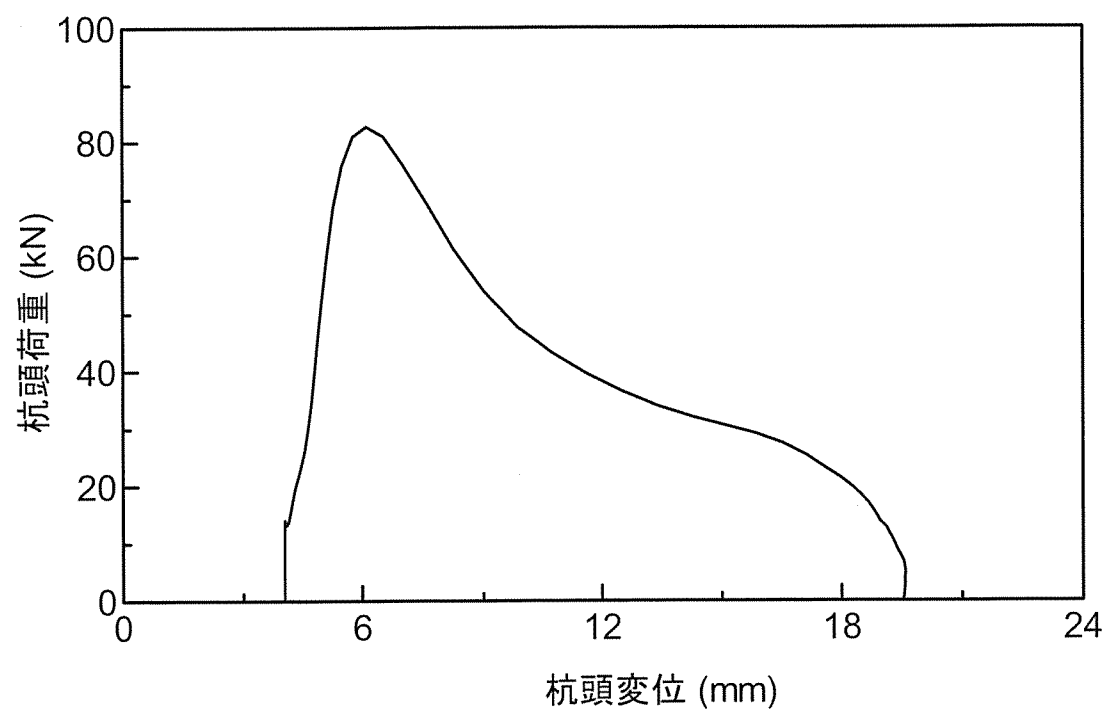
図一付 2.3.8. b 急速載荷 No. 3 (8 ステップ) : 杭頭変位～時間



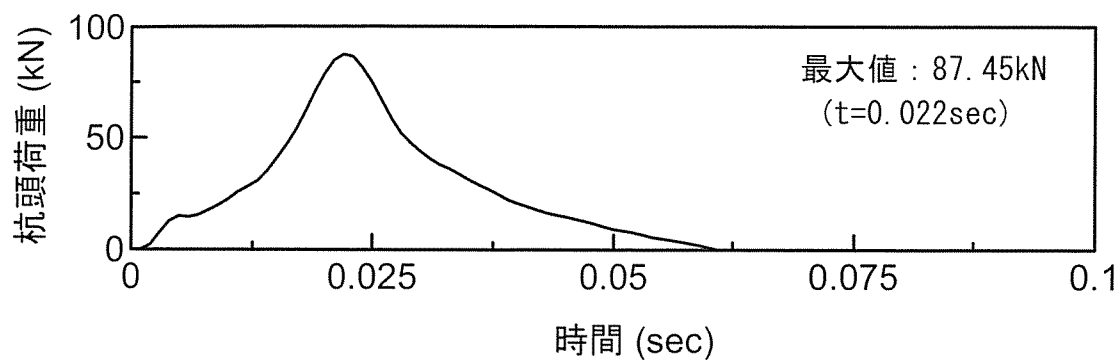
図一付 2.3.8. c 急速載荷 No. 3 (8 ステップ) : 杭頭速度～時間



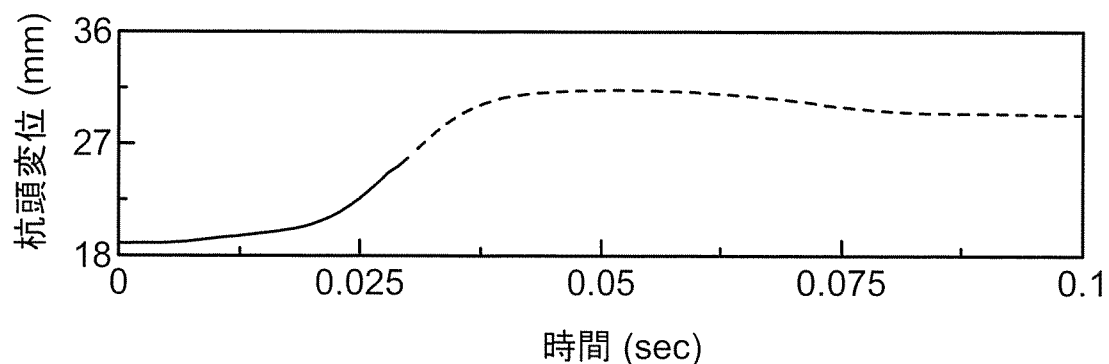
図一付 2.3.8. d 急速載荷 No. 3 (8 ステップ) : 杭頭加速度～時間



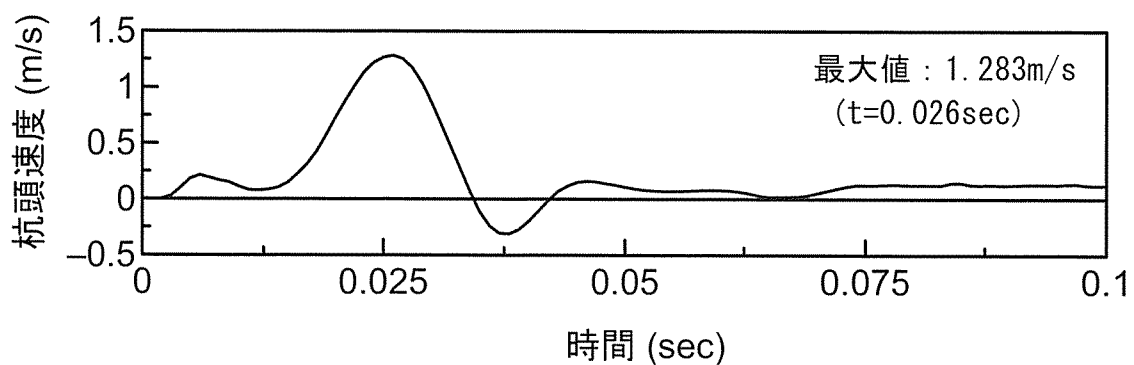
図一付 2.3.8.e 急速載荷 No.3 (8ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



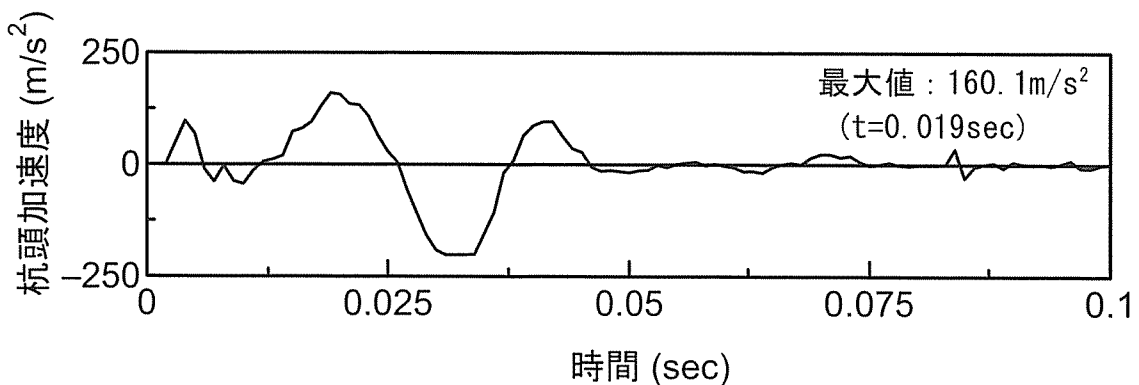
図一付 2.3.9. a 急速載荷 No.3 (9 ステップ) : 杭頭荷重～時間



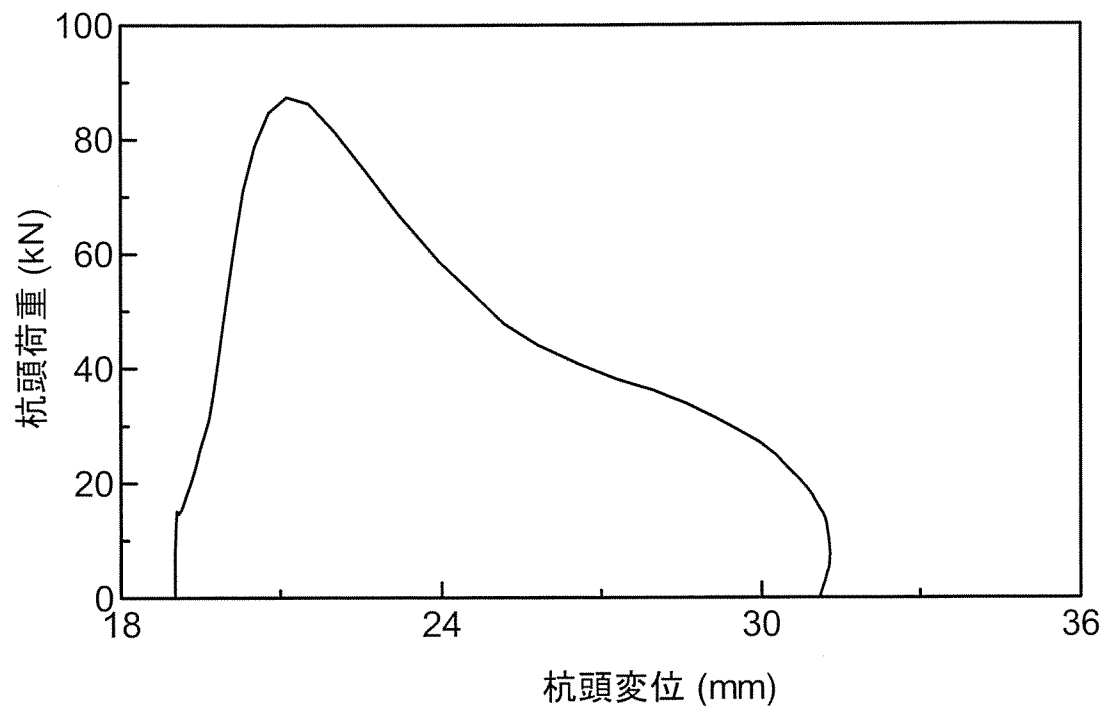
図一付 2.3.9. b 急速載荷 No.3 (9 ステップ) : 杭頭変位～時間



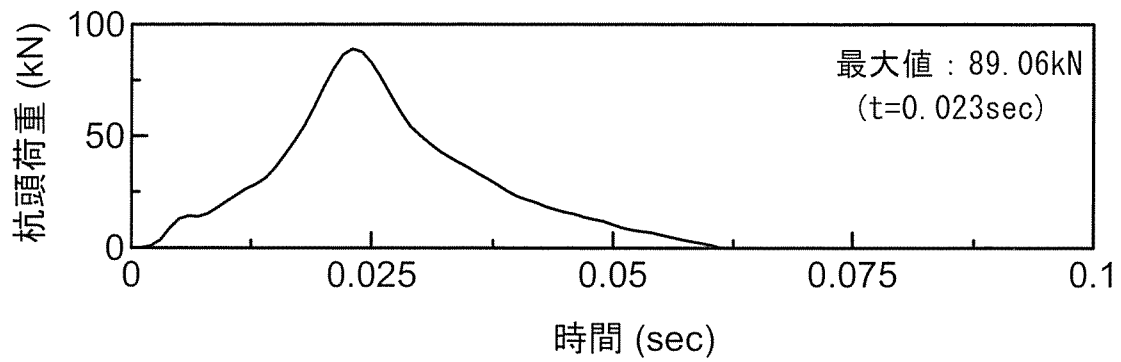
図一付 2.3.9. c 急速載荷 No.3 (9 ステップ) : 杭頭速度～時間



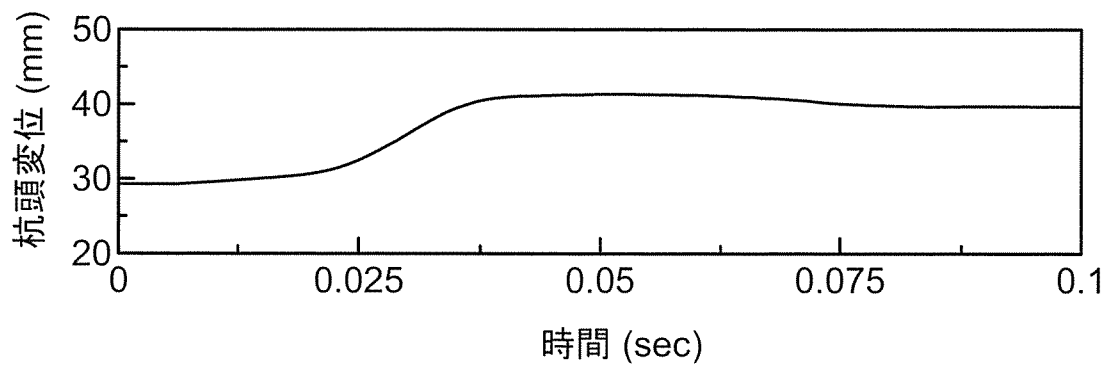
図一付 2.3.9. d 急速載荷 No.3 (9 ステップ) : 杭頭加速度～時間



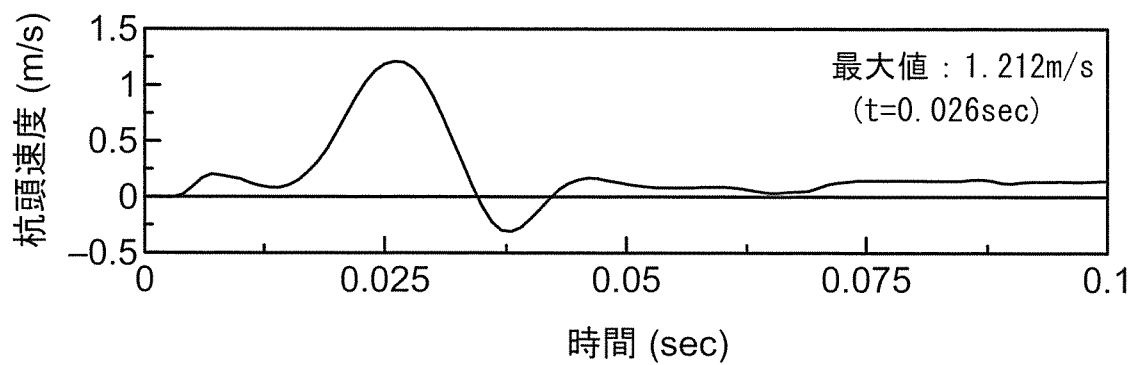
図一付 2.3.9.e 急速載荷 No.3 (9 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位



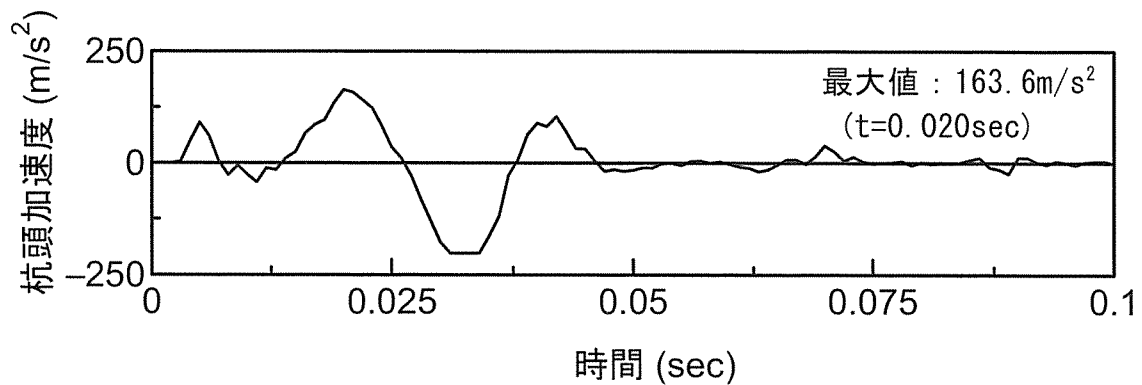
図ー付 2.3.10. a 急速載荷 No.3 (10 ステップ) : 杭頭荷重～時間



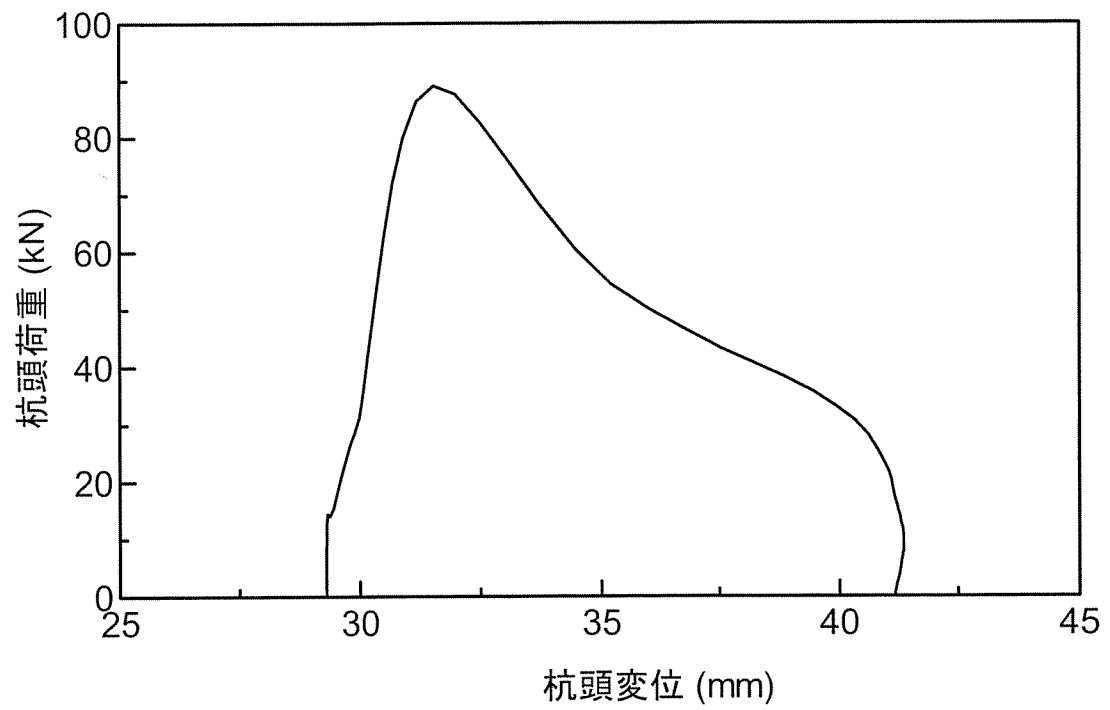
図ー付 2.3.10. b 急速載荷 No.3 (10 ステップ) : 杭頭変位～時間



図ー付 2.3.10. c 急速載荷 No.3 (10 ステップ) : 杭頭速度～時間



図ー付 2.3.10. d 急速載荷 No.3 (10 ステップ) : 杭頭加速度～時間



図一付 2.3.10.e 急速載荷 No.3 (10 ステップ) : 杭頭荷重～杭頭変位

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4106 March 2008

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754