

工事

## 杭の急速載荷試験

# 報告書

令和3年11月

株式会社地盤試験所

<<目次>>

1. 概要.....	1
1. 1 工事概要.....	1
1. 2 目的.....	1
1. 3 試験杭の仕様 .....	1
1. 4 試験位置および地盤条件 .....	1
1. 5 試験内容.....	2
1. 6 試験工程.....	2
2. 計画最大荷重および載荷装置の検討.....	7
2. 1 計画最大荷重 .....	7
2. 2 重錘の質量とクッションの設計.....	7
2. 3 載荷装置.....	9
2. 4 重錘落下サイクル .....	11
3. 動的計測方法.....	12
3. 1 計測システム .....	12
3. 2 急速載荷試験の作業手順 .....	14
4. 解析方法.....	16
4. 1 急速載荷試験結果の解析 .....	16
4. 1. 1 除荷点法解析.....	16
5. 試験結果.....	19
5. 1 計測結果.....	19
5. 2 解析結果.....	27
6. まとめ .....	28

## 1. 概要

### 1.1 工事概要

工 事 件 名 : ██████████ 工事

工 事 場 所 : ██████████ (図・1.1 参照)

試 験 杭 : P1 φ139.8 t4.5 L=10,000

試 験 内 容 : 杭の急速載荷試験 (JGS1815-2002)

試 験 数 : 1 試験

試 験 日 : 令和3年11月5日

総 合 施 工 : ██████████

### 1.2 目的

「██████████ 工事」の擁壁工事において KD 工法を検討している。そこで、杭の常時荷重である 27.60kN 載荷時に杭頭変位量が弾性範囲内であること、杭の支持力算定式から算出した極限鉛直支持力 141.24kN を確認することを目的として急速載荷試験を実施した。

### 1.3 試験杭の仕様

今回の試験で使用する杭の仕様を表・1.1 に示す。

表-1.1 試験杭の仕様

鋼管径 (mm)	鋼管板厚 (mm)	根固め径 (mm)	杭長 (m)
139.8	4.5	300	10.0

### 1.4 試験位置および地盤条件

試験位置を記した当現場の平面図を図・1.2 に、近隣土質柱状図を図・1.3～図・1.4 に示す。

## 1.5 試験内容

試験の内容および測定項目を表-1.2に示す。

表-1.2 試験の内容および測定項目

項目	試験内容
試験基準	試験の方法は、地盤工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 杭の急速載荷試験方法（JGS1815-2002）」に基づいて実施した。
計画最大確認荷重	P=141.24kN
載荷装置	重錘質量 400kg 重錘落下装置、ハイブリッドナミッククッション
荷重計測	杭頭に設置した杭体ひずみ量より、荷重に換算した。
変位計測	杭の変位量は加速度を2階積分して求めた。
	OIMS システムを用いて変位を計測した。(カメラは試験杭から 10m 以上はなれた位置に設置した。)
載荷方法	重錘を段階的に上げて落下させる軟クッション重錘落下方式で実施した。

## 1.6 試験工程

試験工程を表-1.3に示す。

表-1.3 試験工程

	10/22	10/23	・・・	11/4	11/5
杭打設	○				
養生期間		○	○	○	○
急速載荷試験					○

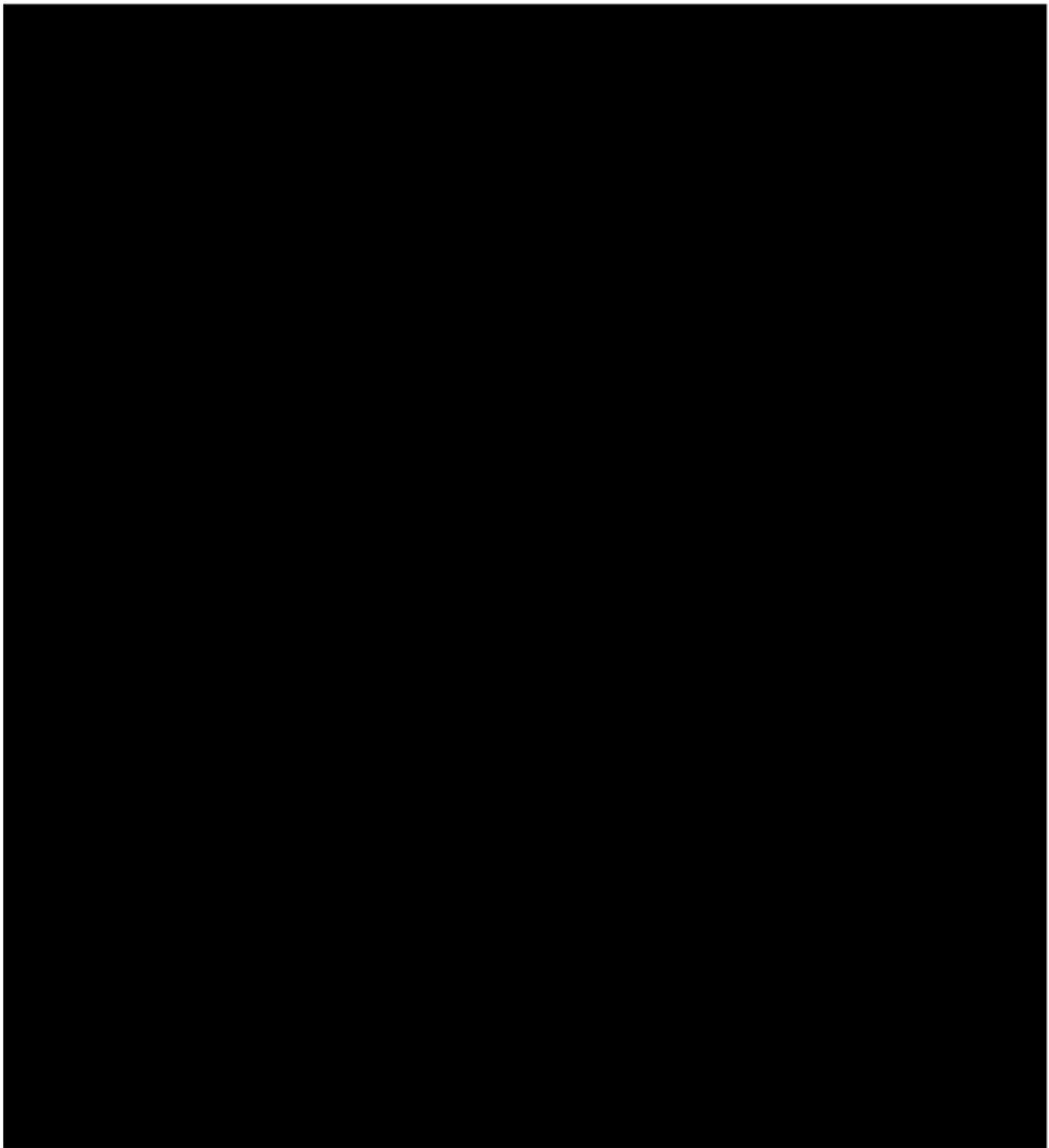


図-1.1 試験場所案内図

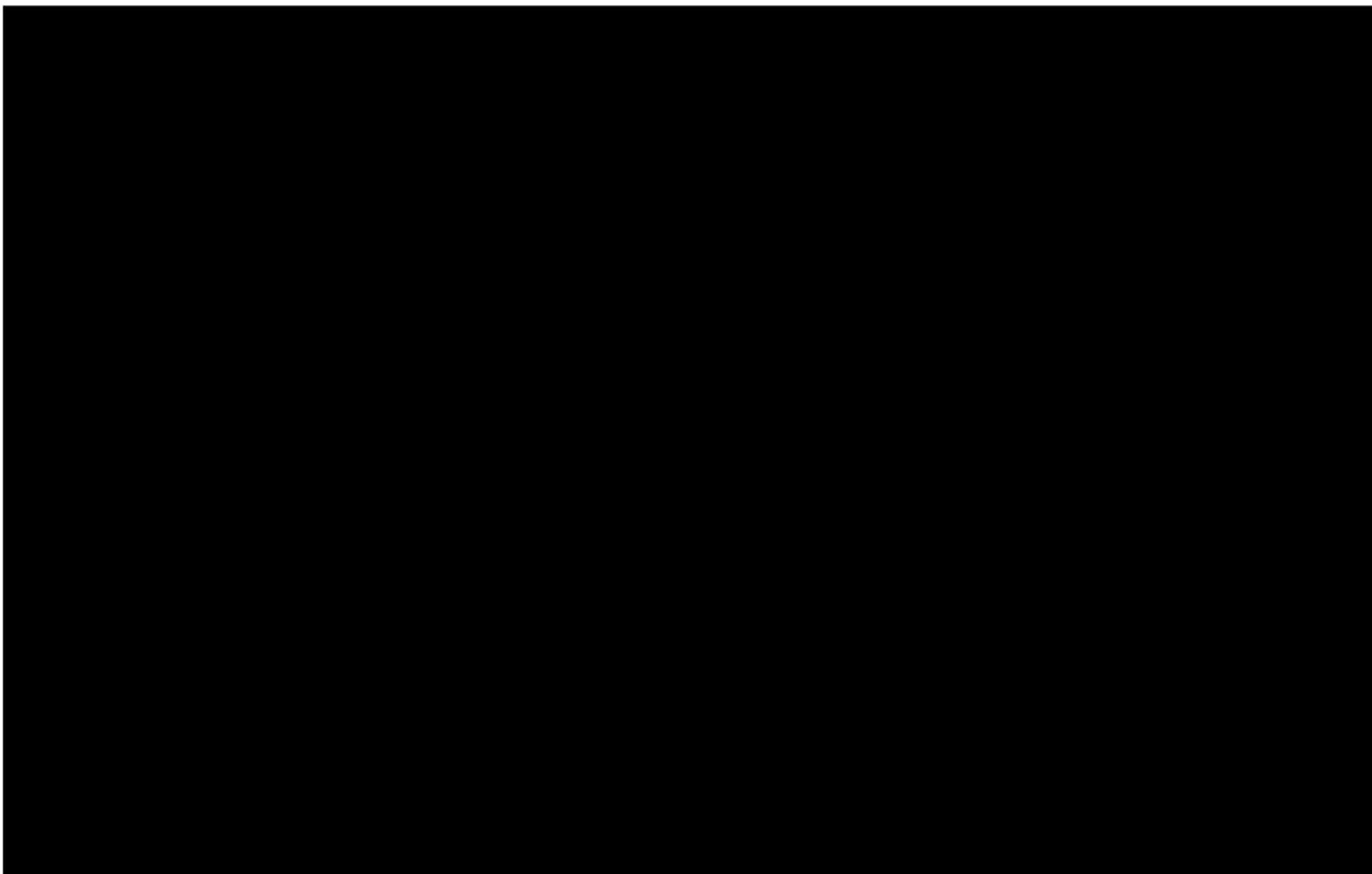


图-1.2 平面图

# ボーリング柱状図

調査名 [ ] 地質調査

ボーリングNo 001

事業・工事名

シートNo 20020601

ボーリング名	No.1		調査位置	[ ]	北緯	[ ]	
発注機関	[ ]		調査期間	令和2年2月12日～2年2月13日	東経	[ ]	
調査業者名	有限会社 シン技研地産調査 電話 (042-748-4155)	主任技師	曾我 正廣	現場代理人	曾我 正廣	ボーリング責任者	小池 敏彦
孔口標高	H= 18.58m	角	180° 上 90° 下 0°	方	北 0° 東 90° 南 180° 西 270°	地盤勾配	水平 0°
総掘進長	17.45m	度	90°	使用機種	試験機 TOHO D0-D エンジン YANMAR TF90M	ハンマー	半自動落下装置
						ポンプ	TOHO BG-3CL

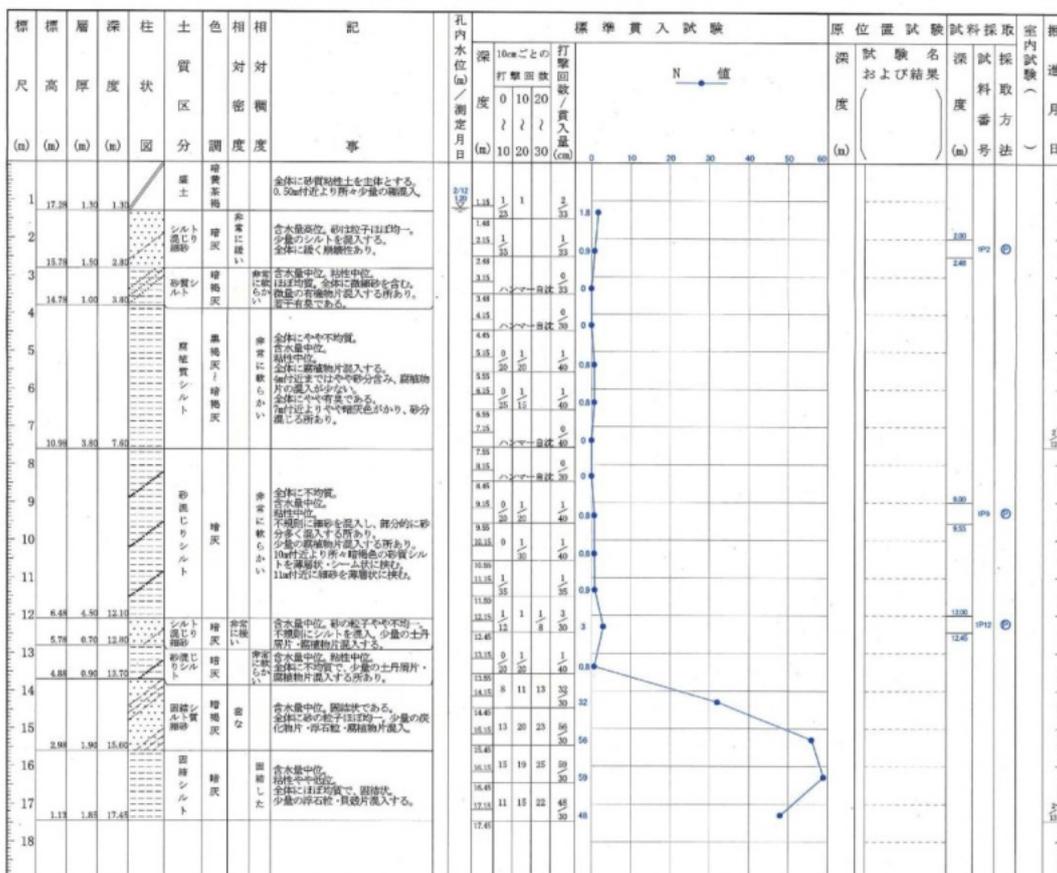


図-1.3 土質柱状図(No.1)



## 2. 計画最大荷重および載荷装置の検討

### 2.1 計画最大荷重

本試験杭の試験計画荷重を表-2.1に示す。確認支持力は、極限鉛直支持力とした。

表-2.1 試験最大荷重

項目	荷重
極限鉛直支持力	141.24kN
計画最大荷重	150kN

### 2.2 重錘の質量とクッションの設計

計画荷重まで載荷するために必要な重錘の質量とハイブリッドクッションのサイズを決定した。試験条件を表-2.2に示す。この条件から使用する重錘とクッション材のばね定数を調整し、試験計画荷重を満足できる組み合わせを求めた。

表-2.3にハイブリッドナミッククッションの設計計算書を示す。本試験で、計画荷重を満足する重錘とハイブリッドクッションの組み合わせを表-2.4に示す。

表-2.2 試験条件

試験条件	杭長（最大値）	$L$	10.0 m
	伝播速度 $V$	$V_s$	4500 m/sec
	相対載荷時間 ( $\geq 5$ )	$Tr$	7 往復
	計画荷重	$F_0$	150 kN

表-2.3 ハイブリッドナミッククッションの設計計算書  
クッション材設計

現場名: XXXXXXXXXX Ver. 210604

試験杭の振動条件設定	重錘の自由落下設定	試験杭への設計荷重
杭長 $L=$ 10 m	重錘質量 $W=$ 0.4 t	固有振動数 $\omega_0=$ 107.1 Hz
伝播速度 $V_s=$ 4,500 m/sec	落下高さ $H=$ 0.70 m	減衰 $c=$ 0 kg/sec
Round= $7$ 往復	重力 $g=$ 9.81 m/sec <sup>2</sup>	減衰比 $\zeta=$ 0.0000 < 0.1
必要載荷時間 $t=$ 0.03 sec	衝突時速度 $v_0=$ 3.71 m/sec	減衰固有振動数 $\omega=$ 107.1 Hz
必要ばね定数 $k_0=$ 4,588 kN/m	重錘質量×効率 $m=$ 0.4 t	最大変位量 $x=$ 35 mm
グラフ時間最大 $t_{max}=$ 0.06 sec	打撃効率 $=$ 100 %	載荷荷重 $F=$ 159 kN

**クッション材の選定**

クッション材	使用限界	クッション材 最低辺	採用 クッション幅	実載荷応力度 $\sigma$	実載荷ひずみ $\epsilon$	実載荷 弾性係数 $E$	クッション材 最低高	採用 クッション高	クッション材 圧縮量	クッション材 ばね定数	判定結果 実荷重	判定結果 実載荷時間
	$\sigma_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	(cm)	(cm)	(kN/m <sup>2</sup> )	(%)	(kN/m <sup>2</sup> )	(cm)	(cm)	(mm)	(kN/m)	(kN)	(sec)
TypeJ-70	10,000	13	25	2,539	11.8	21,517	29.3	30.6	36	4,395	152	0.030
								17枚				
								総枚数				

使用限界	許容レベル	判定	クッション材 温度補正
$\sigma_{max 2}$	25%	OK	100%
	100% 時	0.625kN	

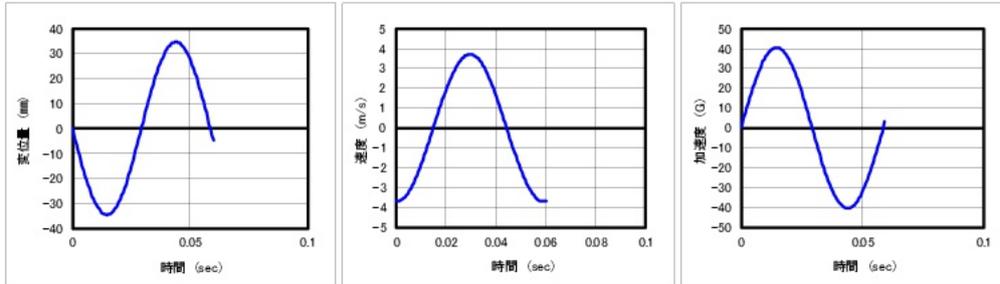


表-2.4 重錘とクッション材の設計結果

クッション材 の 設計結果	重錘質量	$W$	0.4 t
	落下高さ	$H$	0.7 m
	必要ばね定数	$k_0$	4,588 kN/m
	クッション材サイズ		250mm×250mm×306mm
	クッション材ばね定数	$k$	4,395 kN/m
	実荷重	$F$	152 kN

## 2.3 载荷装置

本試験で使用する重錘質量 0.4t の急速载荷試験装置図を図-2.1、写真-1 に示す。

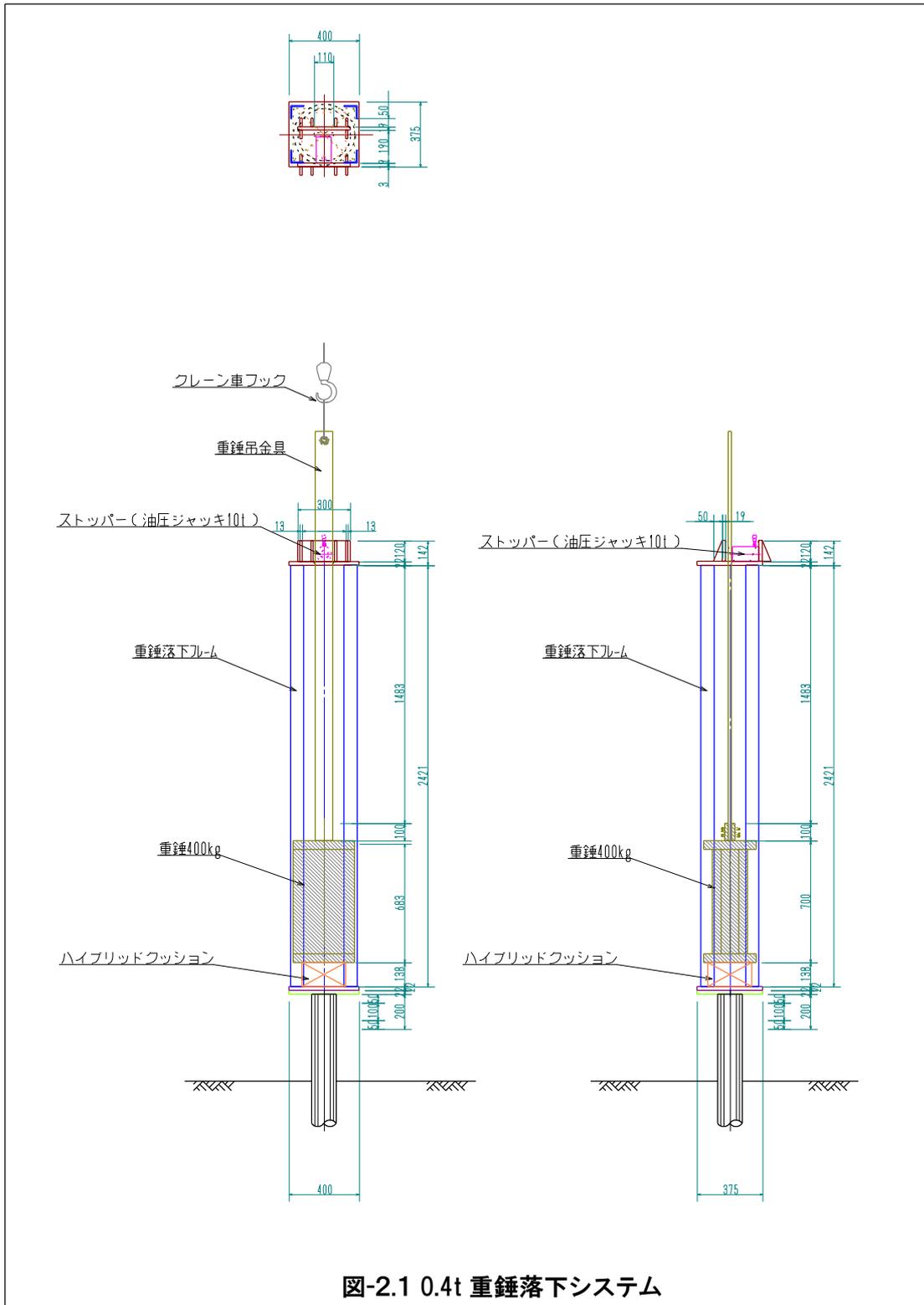




写真-1 0.4t 急速載荷試験装置設置例

## 2.4 重錘落下サイクル

本試験の重錘落下サイクルを図-2.2に示す。

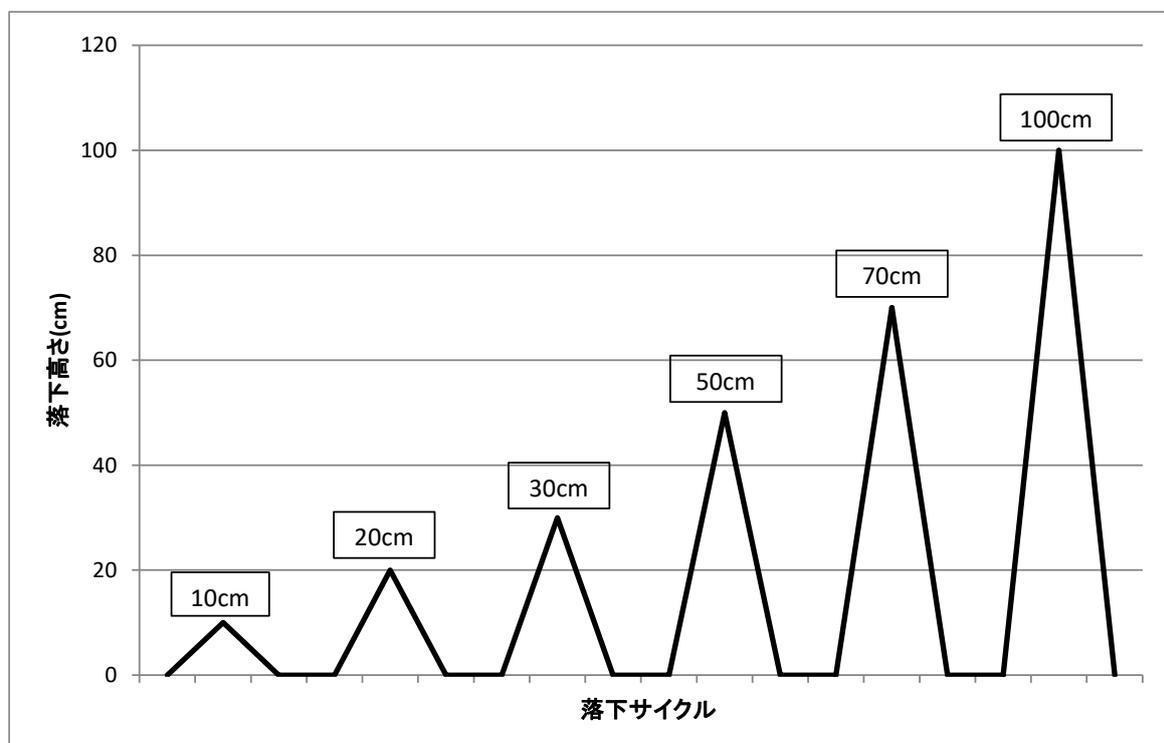


図-2.2 落下サイクル図

### 3. 動的計測方法

#### 3.1 計測システム

計測装置は、急速载荷試験用データロガー（PDA）とセンサー（加速度計、ひずみ計）および杭の鉛直変位計測用OIMSとLEDターゲットで構成される。加速度とひずみ計は杭頭から1.0D（D：杭径）付近に取り付ける。またLEDターゲットも同一付近に設置する。

急速载荷試験では 10kHz のサンプリング周波数でデータを記録する。計測システムを図-3.1に示す。計測機器の仕様を表-3.1～表-3.2に示す。

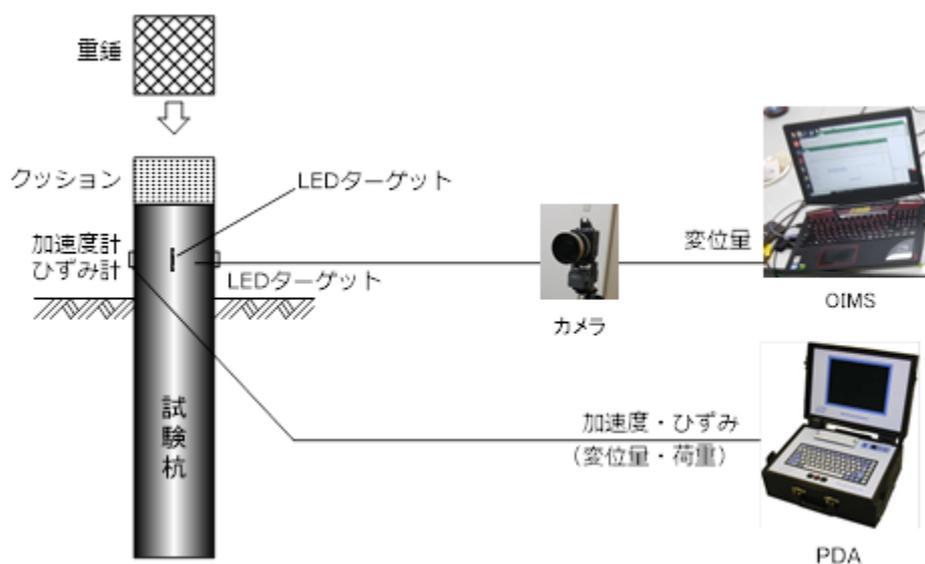


図-3.1 計測システム図

**表-3.1 計測機器の仕様(PDA)**

	システム名称	Pile Driving Analyzer
	メーカー	Pile Dynamics, Inc.
計測仕様	計測物理値	ひずみ量 加速度
	測定位置	杭頭直下軸対象
	サンプリング周波数	10kHz
	データ数	2000 以下
	ひずみ容量	8000 $\mu$ 以下
	加速度容量	10000G 以下
解析システム	モニタリング	PDA-W

**表-3.2 計測機器の仕様(OIMS)**

	システム名称	OIMS
	メーカー	(有) エム・システム
測定器仕様	アナログチャンネル	1CH
	ターゲット	LED ターゲット
	サンプリング周波数	1kHz
	データ数	3000 以下
	基準距離	10m
	分解能	0.1mm
	使用電源	AC100V $\pm$ 10% 50/60Hz

### 3.2 急速载荷試験の作業手順

急速载荷試験における作業手順をフロー図として図-3.2に示す。

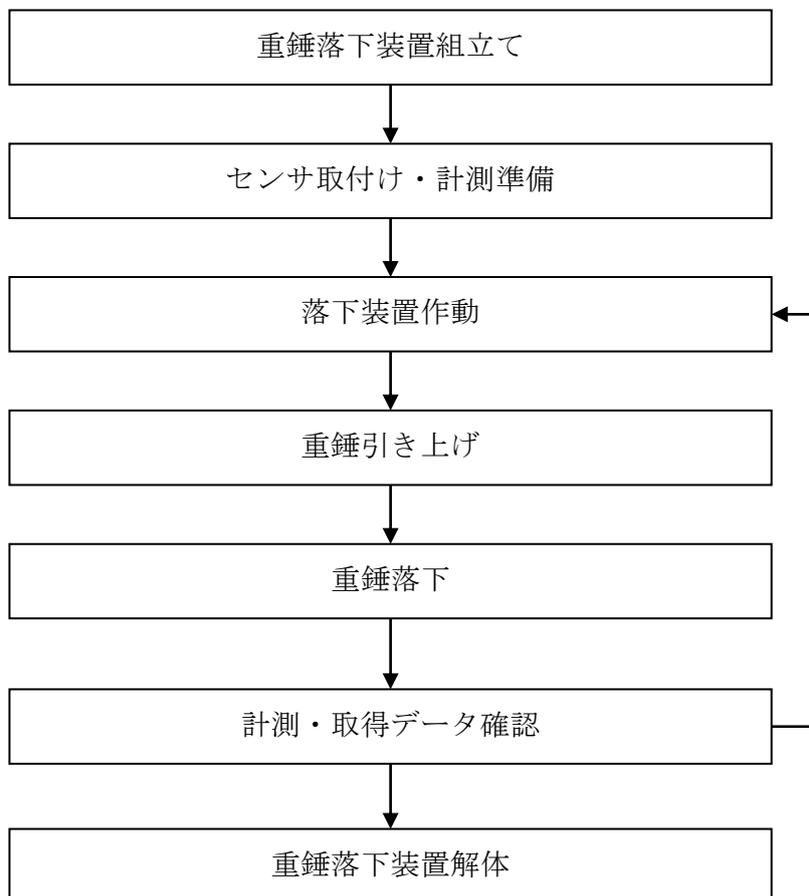


図-3.2 急速载荷試験の作業手順

(1) 重錘落下装置組立て

重錘落下装置は下部フレーム、重錘、上部フレームの順に組み立てた。

(2) センサ取り付け・計測準備

センサ（加速度計、ひずみ計）を杭頭付近の軸対象の位置に取り付け、計測ケーブルを計測器（PDA）に接続し、計測準備をした。また LED ターゲットを 1 点杭頭に設置し計測用カメラは杭から 10m 以上離れた位置に設置した。

(3) 落下装置作動

落下装置の油圧ジャッキを作動させ、重錘を固定した。

(4) 重錘引き上げ

重錘引き上げ用油圧ジャッキで重錘を所定の高さまで引き上げた。

(5) 重錘落下

重錘の落下は落下装置のジャッキを開放して行った。

(6) 計測・取得データ確認

重錘落下後、測定波形の品質、荷重、変位量などを確認すした。試験を継続する場合は (3) へ戻り、次のサイクルを実施した。

(7) 重錘落下装置解体

試験終了後、センサを取り外し、計測ケーブルとともに回収し、装置を解体した。

## 4. 解析方法

### 4.1 急速載荷試験結果の解析

急速載荷試験結果の解析については、一質点系モデルを用いた除荷点法で実施する。試験時には、落下毎に除荷点法を用いて地盤抵抗力と変位量の関係を把握し試験を進行する。

#### 4.1.1 除荷点法解析

試験結果を整理するに際して、杭頭における荷重、変位量、速度、加速度を図化する。図-4.1に測定波形の例を示す。

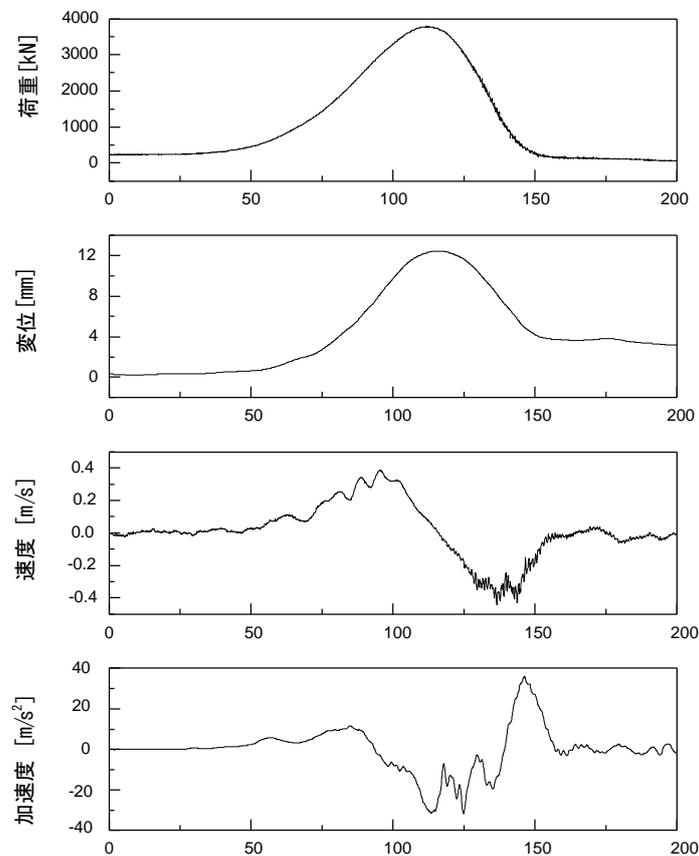


図-4.1 測定波形(例)

急速载荷試験中に杭に作用する抵抗力成分、および除荷点法で仮定している一質点系モデルを図-4.4に示す。

杭に作用する力の釣り合いにより、

$$F_{rapid} = R_a + R_{soil} = M \cdot \alpha + R_{soil} \dots\dots\dots (4.1.1)$$

$$R_{soil} = R_w + R_v = R_w + C \cdot v = F_{rapid} - M \cdot \alpha \dots\dots\dots (4.1.2)$$

$$R_w = F_{rapid} - R_a - R_v = F_{rapid} - M \cdot \alpha - C \cdot v \dots\dots\dots (4.1.3)$$

ここに、

- $F_{rapid}$  : 杭頭における荷重
- $R_a$  : 杭体の慣性力
- $R_{soil}$  : 地盤抵抗力
- $R_w$  : 静的抵抗成分
- $R_v$  : 地盤の動的抵抗成分
- $M$  : 杭体の質量
- $\alpha$  : 杭体の加速度
- $C$  : 減衰定数
- $v$  : 杭体の速度

荷重～変位量の関係を図-4.2に示す。除荷点法では、最初に式(4.1.2)より  $R_{soil}$  を算定する。地盤抵抗力  $R_{soil}$  - 杭頭変位量  $S$  曲線上の最大変位点を除荷点と呼ぶが、除荷点では速度  $v=0$  であることから、地盤の動的抵抗成分  $R_v$  は作用しない事になり、式(4.1.2)から  $R_w = R_{soil}$  となる。除荷点に対応する  $R_{soil}$  は、急速载荷試験における静的抵抗成分の最大値  $R_{w(max)}$  と判断する事ができ、これが除荷点抵抗力  $R_{ulp}$  となる。

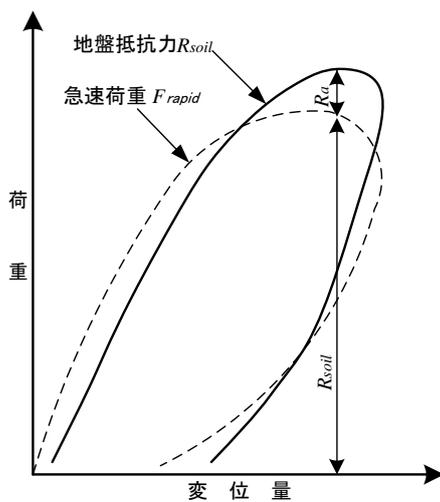


図-4.2 荷重～変位量曲線

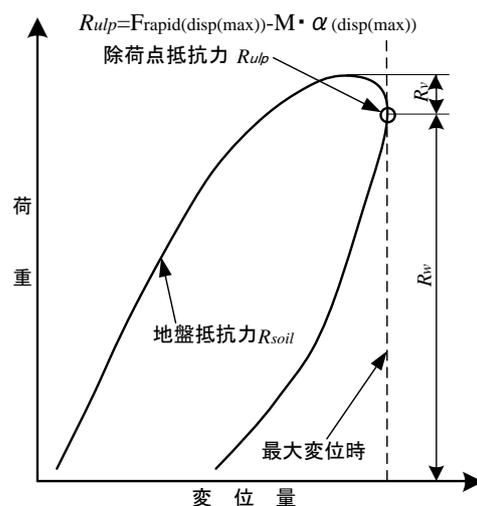
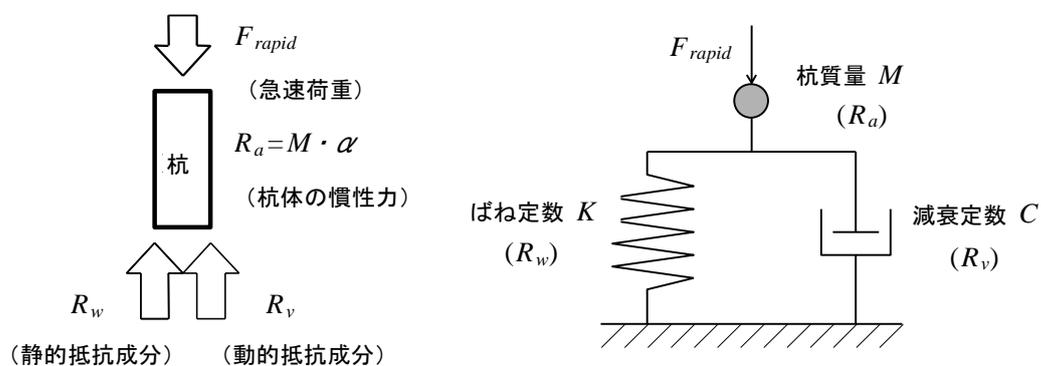


図-4.3 除荷点抵抗力



- $M$  : 杭体の質量
- $\alpha$  : 杭体の加速度
- $C$  : 減衰定数
- $v$  : 杭体の速度

図-4.4 急速载荷試験における抵抗成分と一質点系モデル

## 5. 試験結果

### 5.1 計測結果

#### (1) 試験の経緯

急速載荷試験は令和3年11月5日に図-2.2に示す落下高で6サイクルの試験を実施した。試験は重錘落下高0.1mから1.00mまで実施し、落下高1.00mの試験終了後、所定の荷重が載荷されたことを確認し、監督員と協議の上、試験を終了した。

#### (2) 計測結果

計測結果として、各落下サイクルでのデータを表-5.1、落下サイクル毎の計測波形を図-5.1～図-5.6、荷重-変位量関係を図-5.7に示す。

試験による最大荷重は223kN、最大変位量7.1mm、累計残留変位量2mmであった。

表-5.1 計測結果一覧

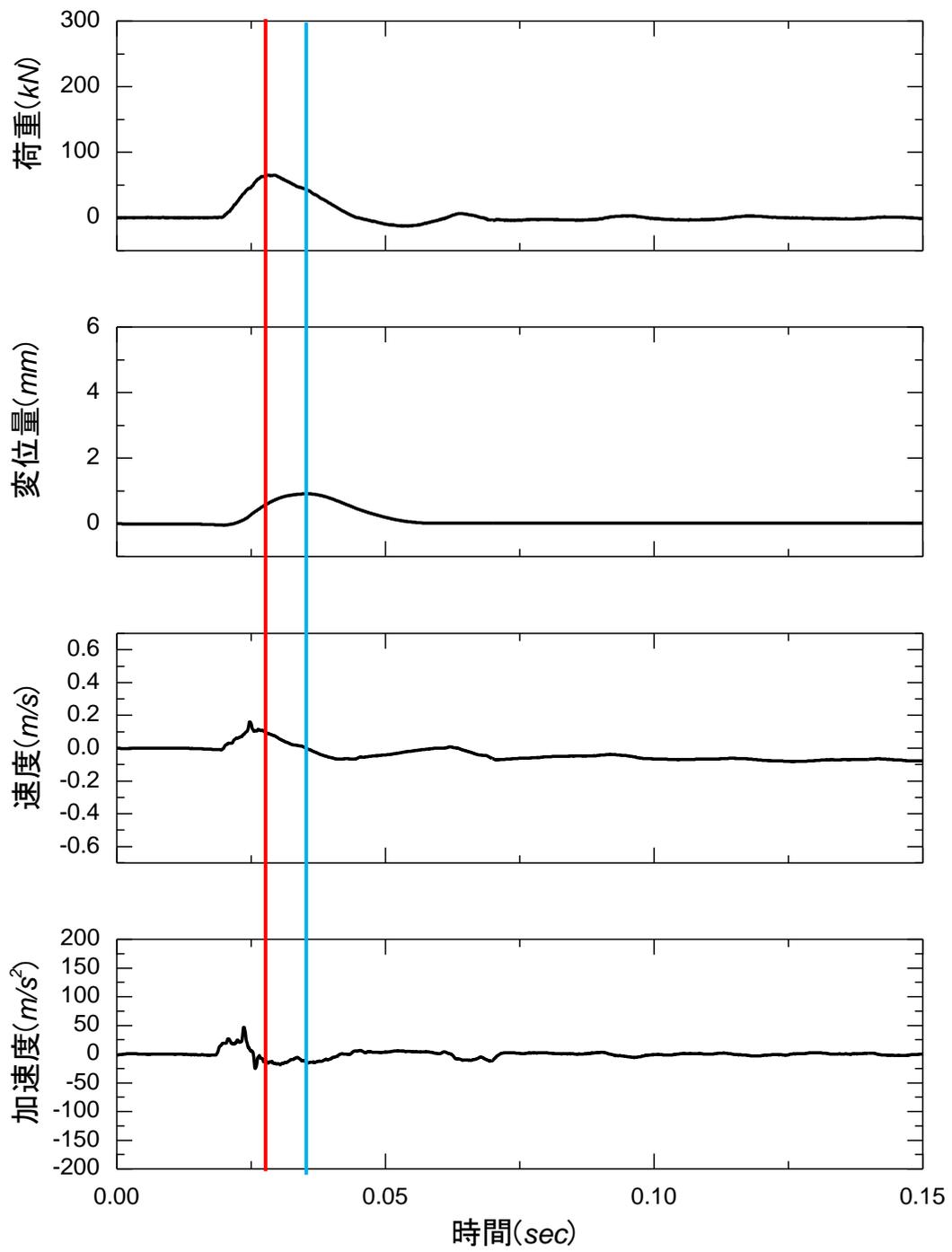
落下高 (m)	最大荷重 <i>F<sub>rapid</sub></i> (kN)	最大変位量 (mm)	残留 変位量 (mm)	累計残留 変位量 (mm)	最大+残留 変位量 (mm)	載荷時間 (sec)
0.1	65	0.9	0	0	0.9	0.0256 ( <i>Tr</i> =6.01)
0.2	87	1.9	1	1	1.9	0.0244 ( <i>Tr</i> =5.73)
0.3	111	2.0	0	1	3.0	0.0257 ( <i>Tr</i> =6.03)
0.5	149	2.6	1	2	3.6	0.0268 ( <i>Tr</i> =6.29)
0.7	194	3.5	0	2	5.5	0.0307 ( <i>Tr</i> =7.21)
1.0	223	5.1	0	2	7.1	0.0306 ( <i>Tr</i> =7.19)

\*最大変位+残留変位は最大変位に1サイクル前の累計残留変位を加算した値。

\*相対載荷時間  $T_r$  は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」によると「載荷時間  $t_L$  の、縦波（応力波）が杭体を一往復するのに要する時間  $2L/c$  に対する比率」として、式(5.1)で定義される。急速載荷試験は  $T_r \geq 5$  と規定されている。

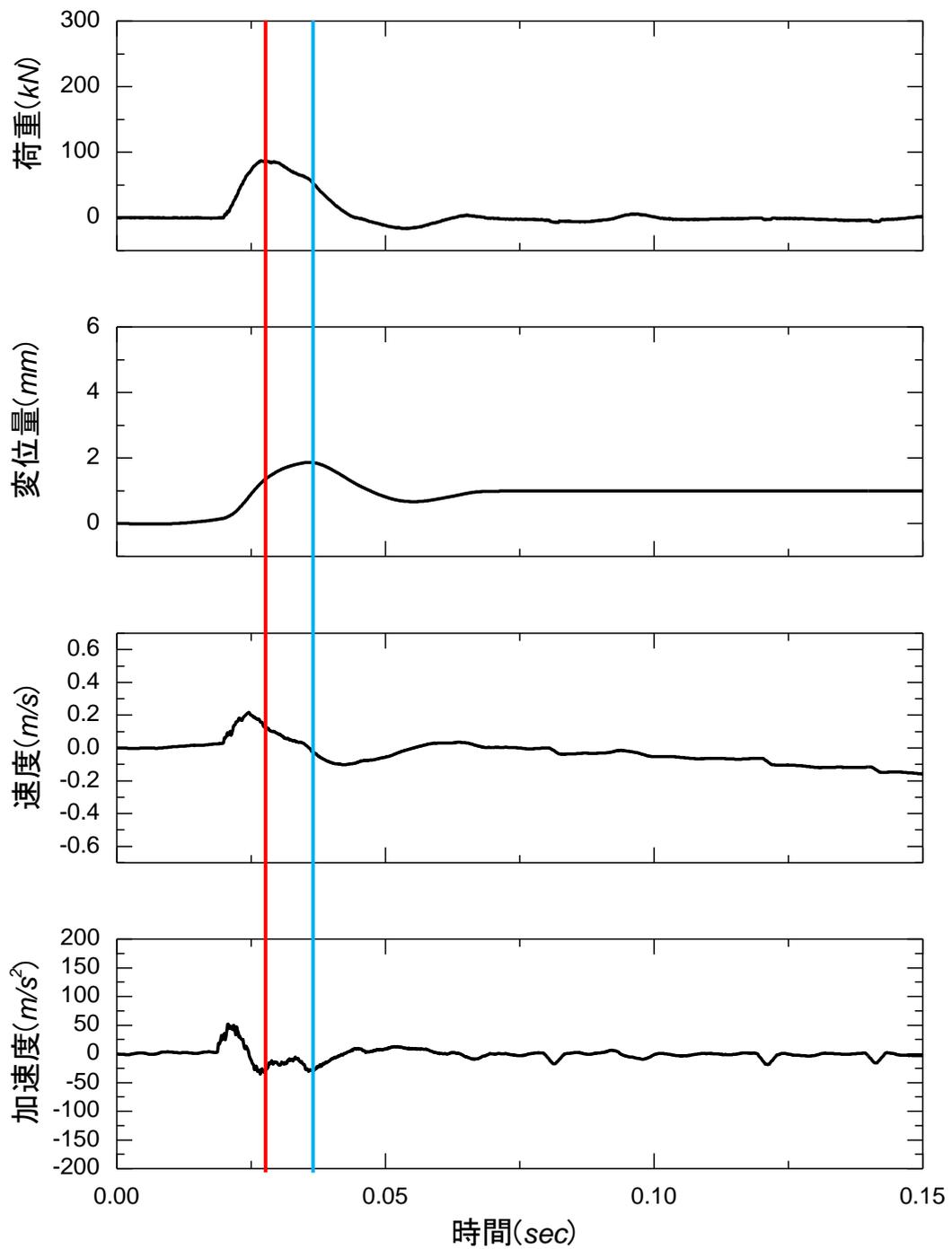
$$T_r = \frac{t_L}{2L/c} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに、 $T_r$  : 相対載荷時間、 $t_L$  : 載荷時間、 $L$  : 杭長 (10.0m)、 $c$  : 伝播速度 (4,700m/s)



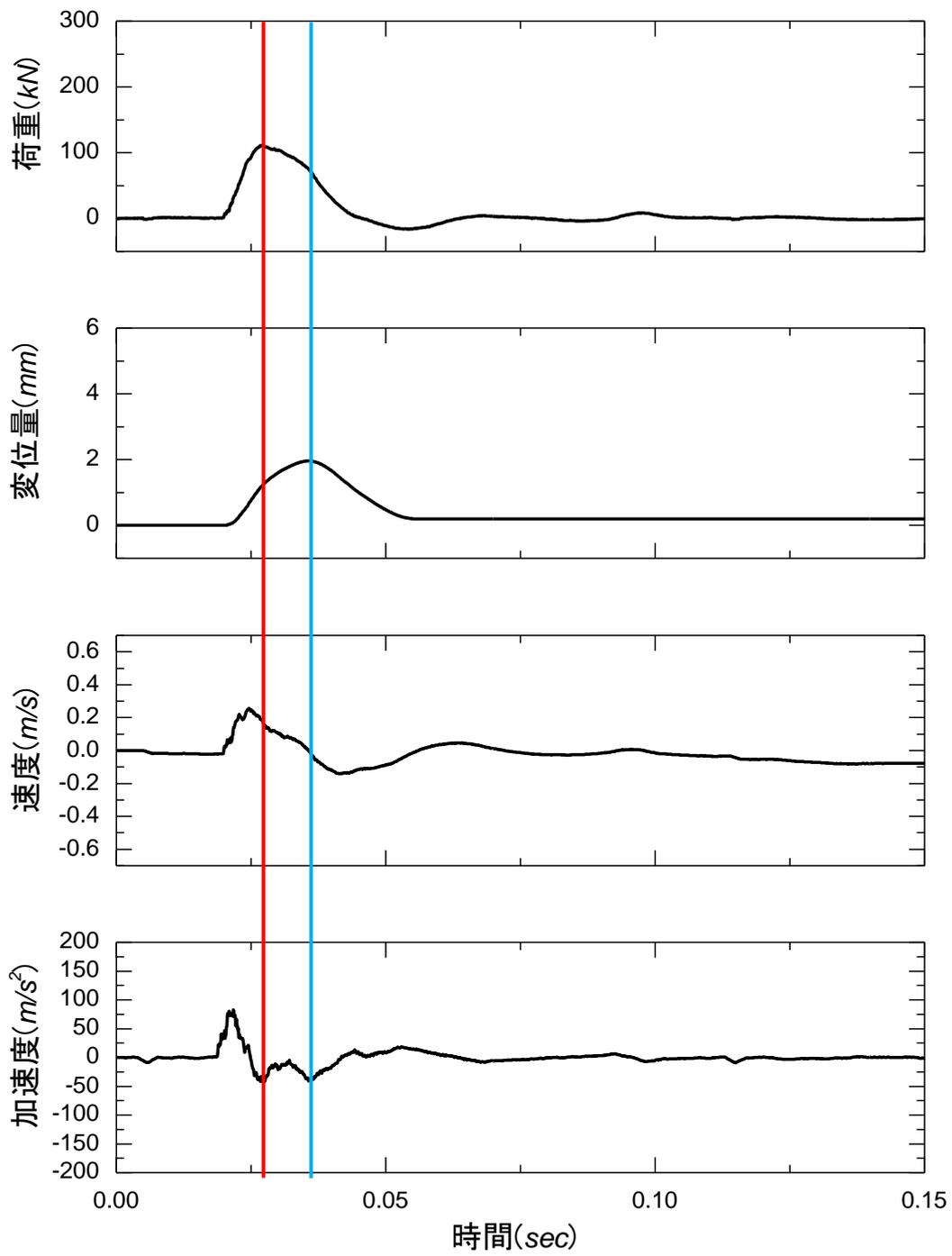
— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.1 計測波形(落下高 0.1m)



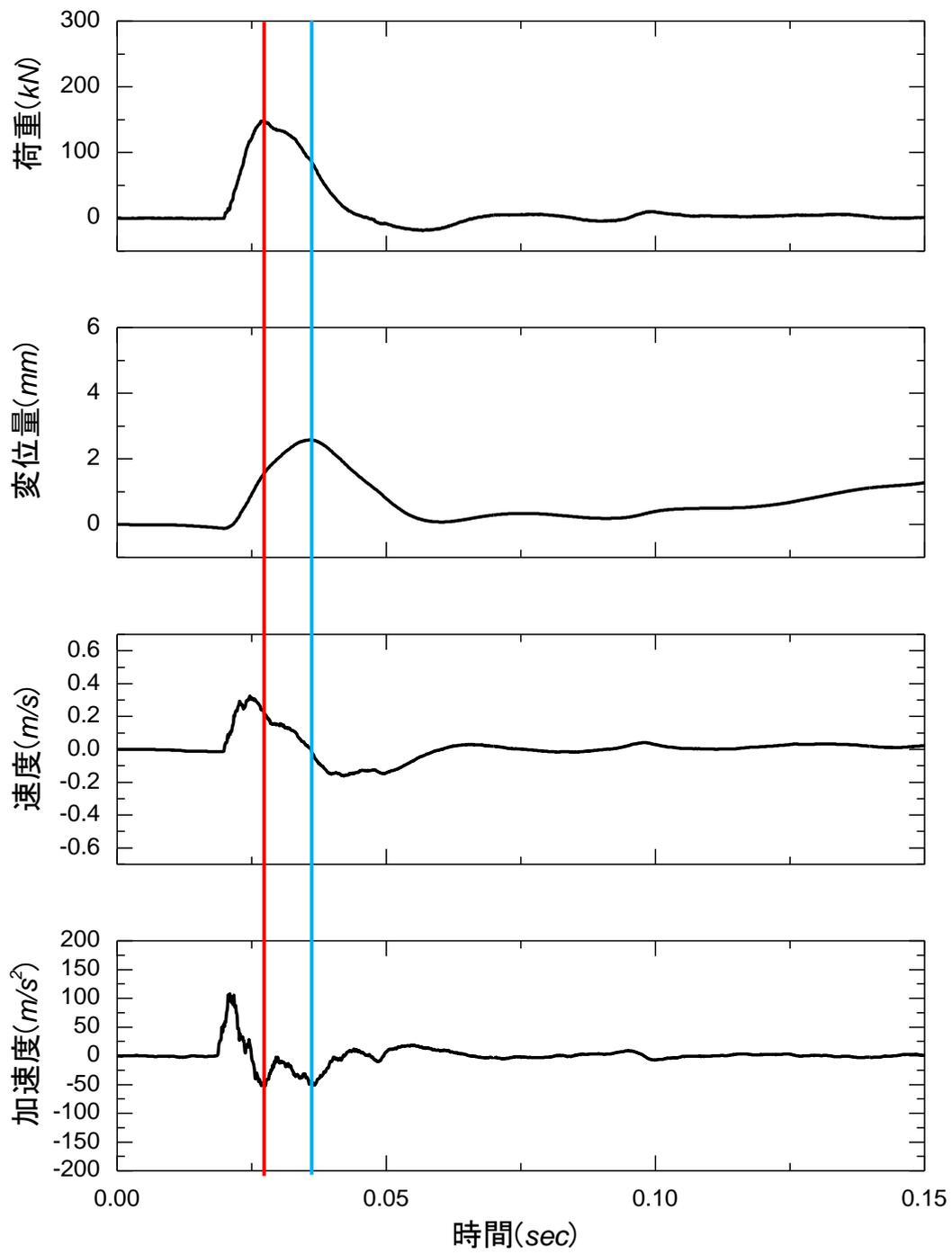
— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.2 計測波形(落下高 0.2m)



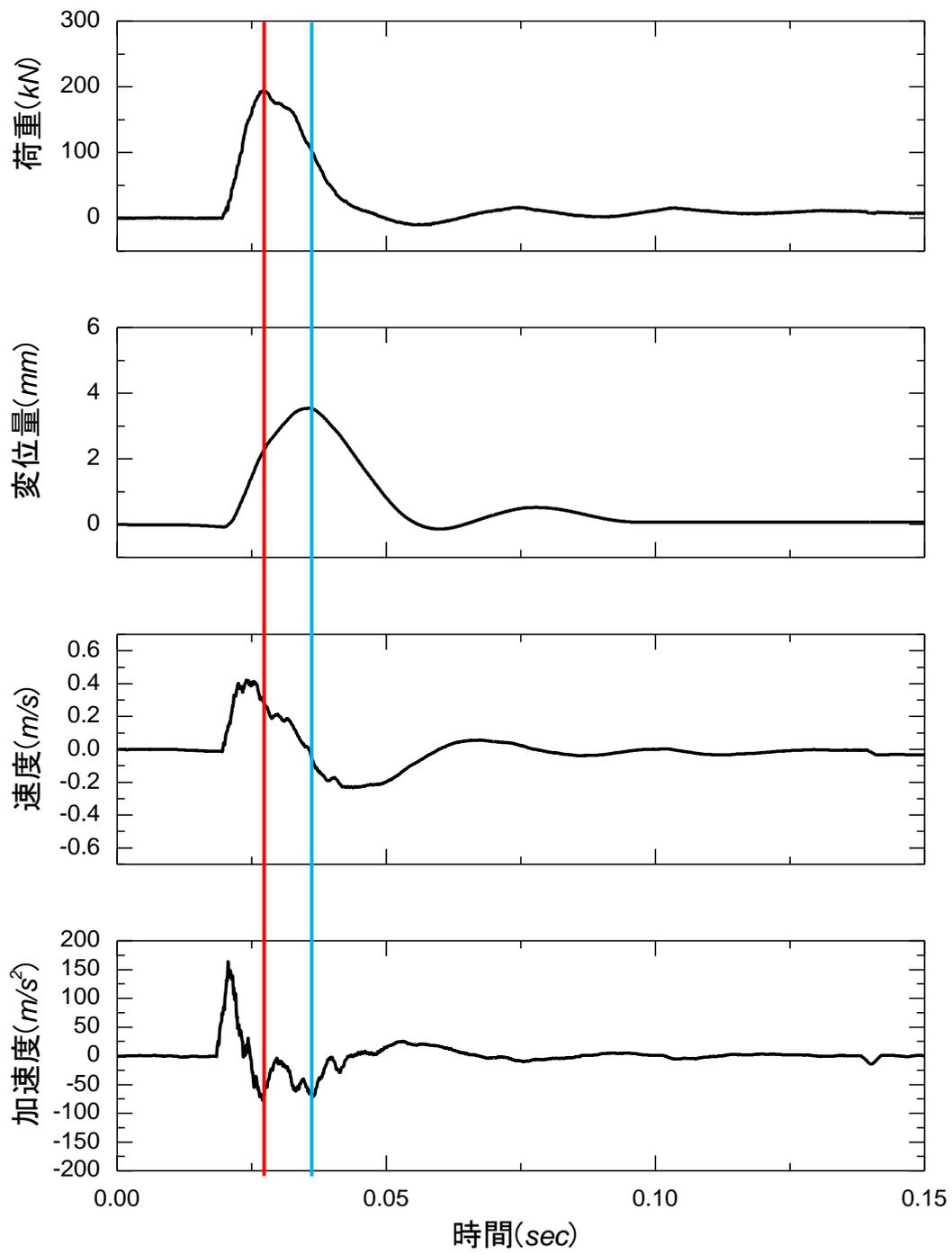
— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.3 計測波形(落下高 0.3m)



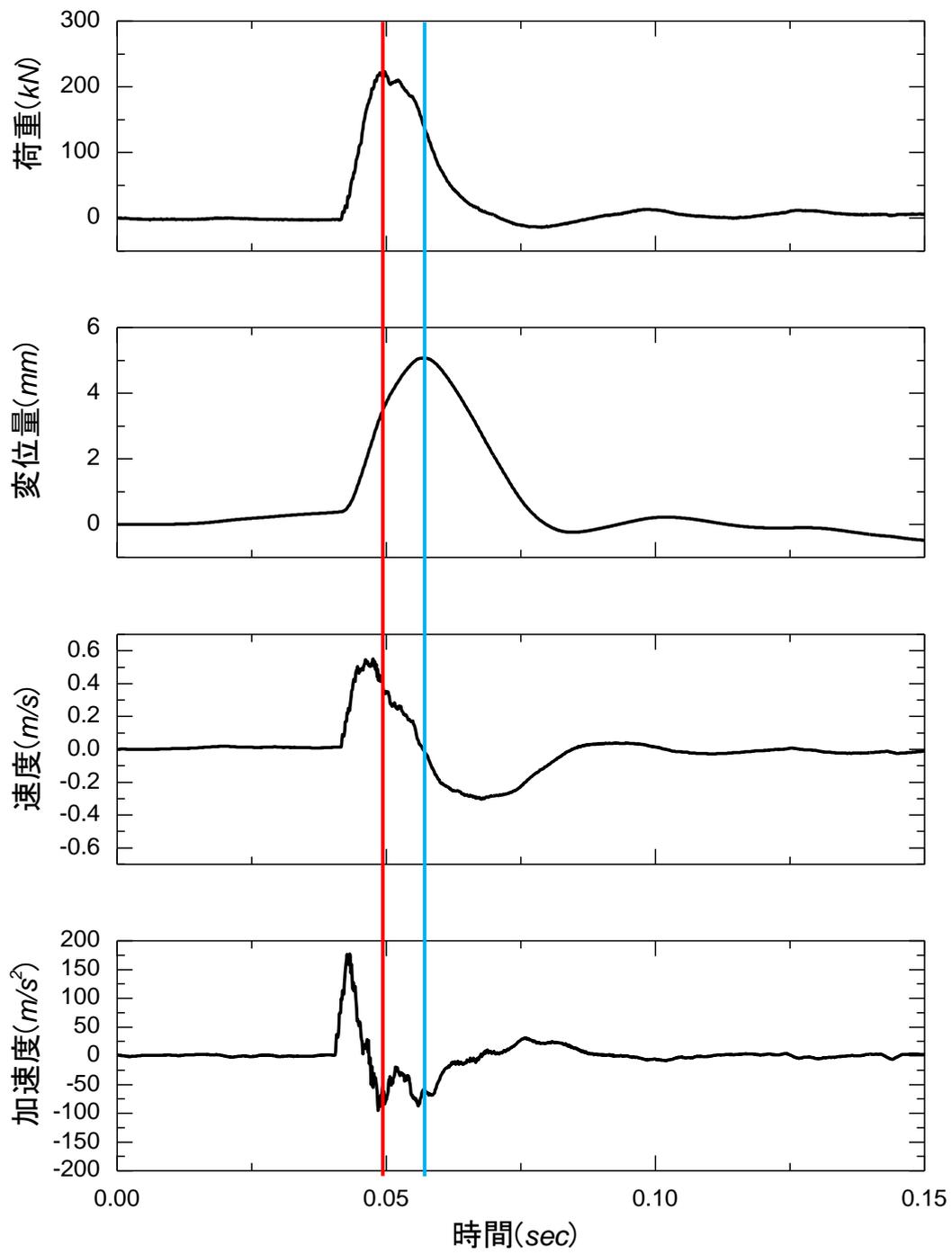
— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.4 計測波形(落下高 0.5m)



— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.5 計測波形(落下高 0.7m)



— : 荷重最大時刻  
 — : 変位量最大時刻

図-5.6 計測波形(落下高 1.0m)

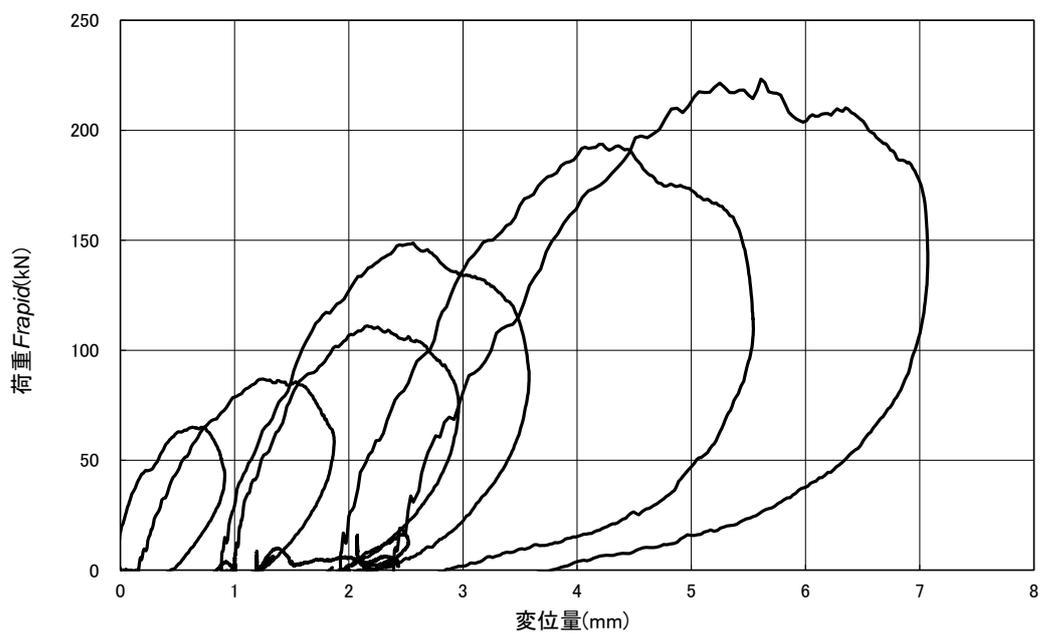


図-5.7 荷重 *Frapid*-変位量関係図

## 5.2 解析結果

計測結果から除荷点法解析により除荷点抵抗力を求めた。試験で得られた最大除荷点抵抗力は 151kN であった。除荷点法解析結果を表-5.2、除荷点法による地盤抵抗力と変位量の関係図を図-5.8 に示す。

表-5.2 急速載荷試験解析結果

落下高 (m)	最大荷重 <i>Frapid</i> (kN)	最大 変位量 (mm)	累計残留 変位量 (mm)	最大+残 留変位量 (mm)	除荷点 抵抗力 <i>Rulp</i> (kN)
0.1	65	0.9	0	0.9	45
0.2	87	1.9	1	1.9	63
0.3	111	2.0	1	3.0	82
0.5	149	2.6	2	3.6	95
0.7	194	3.5	2	5.5	120
1.0	223	5.1	2	7.1	151

\*最大+残留変位量は最大変位量に 1 サイクル前の累計残留変位量を足した変位量。

\*除荷点抵抗力 *Rulp* は最大変位時の地盤抵抗力 *Rsoil*

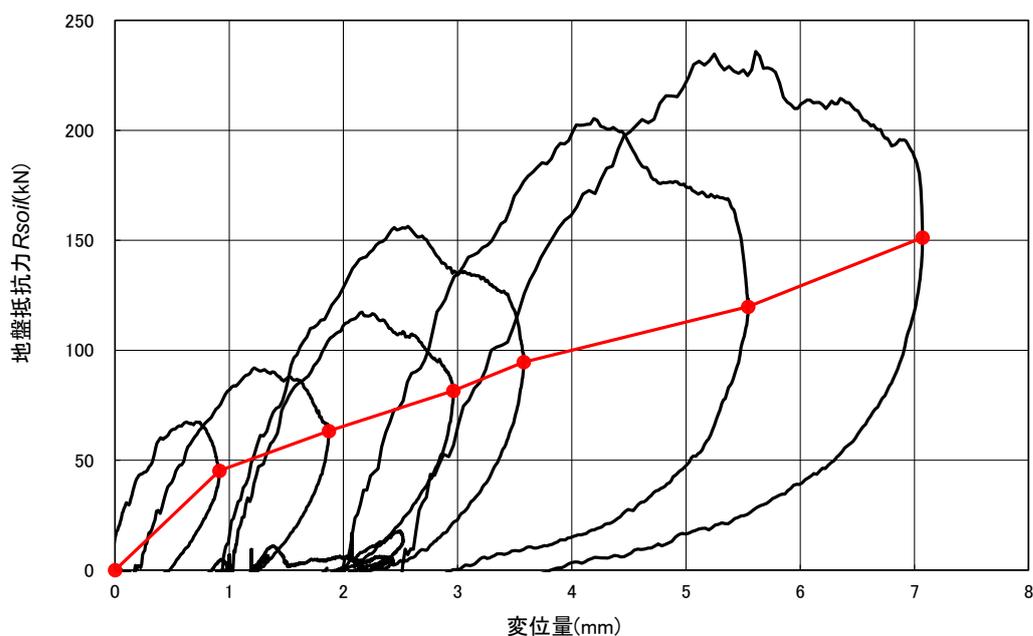


図-5.8 除荷点法による地盤抵抗力(*Rsoil*)-変位量図

## 6. まとめ

解析によって得られた結果を表-6.1、図-6.1に示す。

本試験により得られた除荷点抵抗力（支持力）は 151kN であり、設計極限鉛直支持力 141.24kN を満足する結果となった。また、落下高 0.1m 時に確認された除荷点抵抗力は 45kN、残留変位量は 0mm であり、杭の常時荷重である 27.60kN 時において杭頭変位量が弾性範囲内であることが確認された。

表-6.1 解析結果まとめ

支持力判定方法	判定結果
除荷点抵抗力	151(kN)
設計極限鉛直支持力	141.24(kN)
判定	○

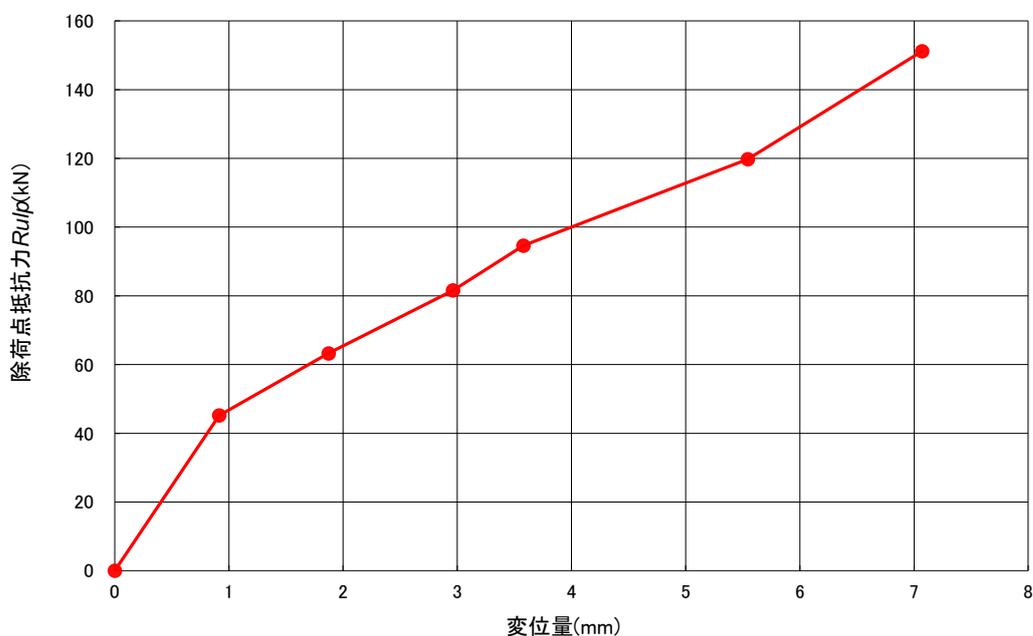


図-6.1 除荷点抵抗力( $R_{ulp}$ )～変位量関係図