

# 目次

第1章 総則 .....	1
1. 1 適用範囲 .....	1
1. 2 試験の概要と目的.....	2
1. 3 実施体制 .....	3
1. 4 用語の定義 .....	4
1. 5 記号の定義 .....	5
第2章 試験計画 .....	7
2. 1 試験計画策定のフロー.....	7
2. 2 所要 SN 比 $R_r$ の設定 .....	8
2. 3 打撃回数以外の測定条件.....	8
2. 4 杭頭ばねの想定.....	9
2. 5 予備測定および打撃回数の設定.....	10
2. 6 予備測定によらない打撃回数の設定.....	11
2. 6. 1 評価対象周波数帯域の想定.....	12
2. 6. 2 ノイズの現地調査.....	12
2. 6. 3 打撃回数の設定.....	14
2. 7 水平打撃時の打撃高さ .....	14
第3章 試験装置とその設置方法.....	16
3. 1 インパルスハンマーおよびセンサー系の要求性能.....	16
3. 2 センサーの設置方法.....	19
3. 3 測定系の全体構成.....	21
第4章 現地測定 .....	22
4. 1 事前準備 .....	22
4. 2 測定 .....	22
第5章 データ処理 .....	24
5. 1 杭頭応答の平均.....	24
5. 2 データの切り出し.....	25
5. 3 基線ずれフレームの除去.....	26
5. 3. 1 基線補正.....	26
5. 3. 2 基線ずれフレームの除去.....	26
5. 4 インパルスハンマー出力とセンサー系出力の相関解析.....	27
5. 4. 1 スペクトル平滑化のための窓関数の設定.....	27

5. 4. 2	杭頭インパルス応答および動的杭頭ばねの算出.....	28
5. 4. 3	コヒーレンス評価と SN 比推定.....	29
5. 5	静的杭頭ばねの推定.....	29
5. 6	地盤反力係数の推定.....	31
第 6 章	記録.....	35
付録	.....	37
付録 1.	実施例.....	37
付録 1. 1	地盤と杭の条件.....	37
付録 1. 2	所要 SN 比 $R_r$ の設定.....	37
付録 1. 3	杭頭ばねの想定.....	38
付録 1. 4	予備測定, 兼本測定.....	38
付録 1. 5	静的載荷試験結果との比較 (参考) .....	40
付録 2.	応用例: 杭頭荷重 - 変位関係の外挿.....	42
付録 2. 1	検討の条件.....	42
付録 2. 2	地盤反力係数および杭先端地盤ばねの推定.....	42
付録 2. 3	地盤ばねの非線形特性の仮定.....	43
付録 2. 4	簡易載荷試験から得られた杭頭ばねの外挿.....	43

## 第 1 章 総則

### 1. 1 適用範囲

本指針の適用範囲は、既往の試験法（静的載荷試験）との対応を実験で確認した、「杭頭ばね（微小ひずみ領域での値）： $1.4 \times 10^3$  kN/m から  $3.8 \times 10^6$  kN/m」の杭を対象とする。

最もばねの柔らかい実験（ばね値： $1.4 \times 10^3$  kN/m）は、杭径 165.2mm、鋼管厚 7mm、杭長 7m の鋼管杭の水平方向ばねを対象としており、最もばねの硬い実験（ばね値： $3.8 \times 10^6$  kN/m）は杭径 1.5m（実寸 1.5m、設計径 1.3m）、杭長 25m の場所打ちコンクリート杭の鉛直方向ばねを対象としている<sup>1.1)</sup>。

## 1. 2 試験の概要と目的

杭の簡易載荷試験は、杭頭をインパルスハンマーにより人力で打撃した際の衝撃力と杭頭の応答加速度または応答速度を測定し（図1. 1）、クロススペクトル法<sup>例えば1.1)</sup>により、衝撃力を入力、杭頭応答を出力とする杭頭のインパルス応答を求めて（図1. 2）、杭頭ばねの初期値を推定する杭の性能試験方法である。

鉛直に打撃すれば鉛直方向の杭頭ばねが推定でき、水平に打撃すれば水平方向の杭頭ばねが推定できる。

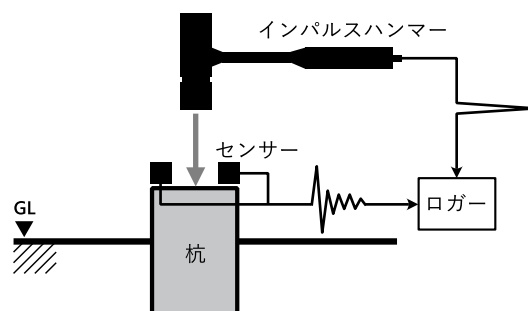


図1. 1 杭の簡易載荷試験における現地測定の様式図

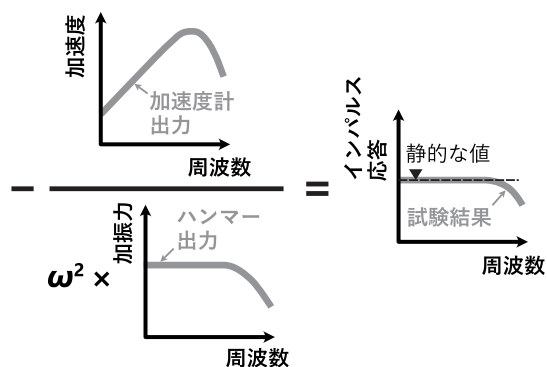


図1. 2 杭の簡易載荷試験におけるデータ処理の様式図

杭の簡易載荷試験は、人力で杭頭を打撃した際の衝撃荷重によって荷重 - 変位関係を求め、静的杭頭ばねを推定するものである。きわめて短い時間で瞬間的に載荷と除荷が生じるため、生データ（時間領域のデータ）では動的効果が顕著になるが、データをフーリエ変換して周波数成分ごとに分解すれば、低周波数領域の成分には動的効果が殆ど含まれないため、低周波数領域における荷重 - 変位関係から、静的杭頭ばねの推定ができる（図1. 2）。このデータ処理には、ハンマーによる加振力を入力、杭頭応答を出力とするクロススペクトル法<sup>例えば1.2)</sup>を用いるが、その詳細については「第5章 データ処理」で説明する。

人力で杭を打撃するので、生じる杭頭変位は $\mu\text{m}$ オーダー（ $10^{-6}\sim 10^{-4}\text{ m}$ 程度）であり、推定できる杭頭ばねは、微小ひずみ領域でのばねである。これは、図1. 2、図1. 3に示す

ように、従来の杭頭載荷試験（静的載荷試験、急速載荷試験など）から得られる杭頭の荷重 - 変位関係の初期勾配に対応する（図 1. 3 における各試験条件の詳細は、既発表論文<sup>1.3)</sup>参照）。従来の載荷試験のように直接的に杭の支持力・水平耐力等知ることはできないが、微小ひずみ領域の杭頭ばねだけでも知ることができれば、図 1. 5 のような応用が考えられる。杭の地盤ばねに関する既往の知見<sup>例えば 1.3)</sup>を使って大変形領域のばねを外挿して推定したり（図 1. 5 (a)、付録 2 の計算例も参照）、杭頭ばねが強いか弱いかで杭と杭周面・杭先端地盤の異常の有無を判定したり（同図(b)）ということが可能であろう。このような結果を（従来の杭頭載荷試験に比べて）容易に得られることが、杭の簡易載荷試験のメリットである。

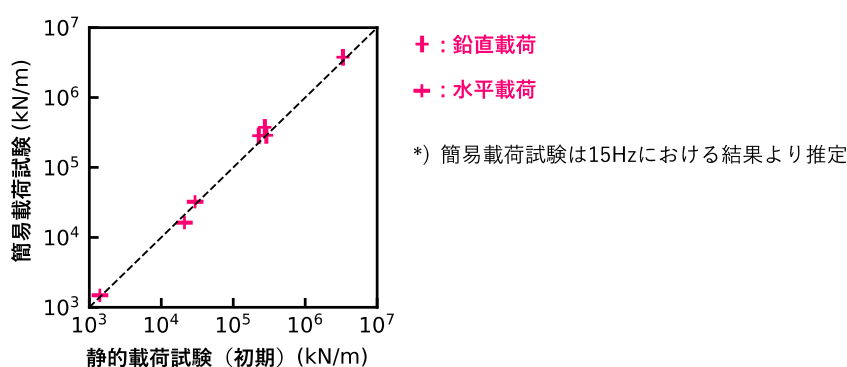


図 1. 3 簡易載荷試験と静的載荷試験との整合

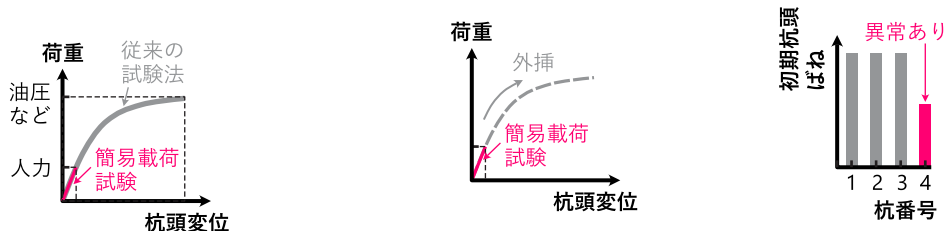


図 1. 4 杭の簡易載荷試験で分かる荷重 - 変位関係

(a) 荷重 - 変位関係の外挿 (b) 異常のある杭の検知

図 1. 5 想定される応用例

### 1. 3 実施体制

杭の簡易載荷試験は、性能証明の申請書類にある実施者もしくは実施者の実施許諾を受けた者により、本指針に則って実施される。

(商用・非商用の区別、実施許諾の条件など簡単に説明しておく)

## 1. 4 用語の定義

本指針で用いる用語を、以下の通り定義する。

本指針	: この文書全体。
本文	: 枠で囲った内部の文章を、本文と呼ぶ。
インパルスハンマー	: 衝撃力の出力機能を備えたハンマー。
打撃	: インパルスハンマーを用いた人力による打撃。発生する衝撃力の瞬間最大値は、20 kN 以下とする。
衝撃力	: 打撃によって杭頭に生じる動的荷重。
加振力	: 衝撃力のフーリエ振幅。
杭頭応答	: 打撃によって生じる杭頭の動き。この動きの測定に用いるセンサーが、加速度計である場合は加速度を指し、速度計である場合は速度を指す。
センサー	: 杭頭の動きの測定に用いるセンサー（加速度計もしくは速度計）。
センサー系	: センサー・ケーブル・（センサーの信号を増幅する）アンプから成る杭頭応答の測定システム一式。
ロガー	: インパルスハンマーおよびセンサー系の出力値を記録する装置。ここでは AD 変換器も含む。
測定系	: センサー系にインパルスハンマーとロガーおよび電源を加えた実験全体の測定・記録システム一式。
杭頭（応答）変位	: 杭頭応答（加速度または速度）を、フーリエ変換の積分規則（後述）により変位換算した値。杭の簡易載荷試験では、直接変位の測定を行うことは無い。
杭頭ばね	: 杭頭の荷重 - 変位関係を一つのばね要素と見なしたもの。
インパルス応答	: 周波数領域における、単位荷重あたりの杭頭応答変位。本指針においては、「衝撃力のフーリエスペクトル」に対する「杭頭応答変位のフーリエスペクトル」の比で定義される（ただし、クロススペクトル法により求めるので、実際の計算は定義通りではない）。
動的杭頭ばね	: インパルス応答の逆数。
評価対象周波数	: 杭の簡易載荷試験により静的杭頭ばねを推定する際に用いる動的杭頭ばねの周波数。
データ	: 測定系の出力値全般。
フレーム	: 打撃 1 回分のデータ（杭の簡易載荷試験では、通常 1 種類の杭頭ばねを推定するのに複数回の打撃を行う）。
サンプル	: （ロガーに記録される）離散データの 1 コマ分のデータ。時間領域での 1 コマも、周波数領域でも 1 コマも、1 コマ分のデータは全てサンプルと呼ぶ。

シグナル	: 一般には、データの内、杭頭の打撃に由来する応答成分。本指針では、特に杭頭応答変位を指す。
ノイズ	: データの内、シグナル以外の全てのセンサー系出力成分。本指針では、特にセンサー系出力の変位換算値に含まれる杭頭応答変位の真値からのずれ（誤差）を指す。杭の簡易載荷試験では、地盤の常時微動由来のノイズが卓越する。
自己ノイズ	: ノイズの内、地盤の常時微振動など物理的な信号に由来しないもの。主に、電源由来の信号（に見えるもの）や、測定系内部での信号の減衰、測定系内部の電気、電子回路上で発生する電磁気と信号の干渉、AD変換の誤りなどによって生じる。
パワー	: データの2乗振幅の平均。
パワースペクトル	: フーリエスペクトルの2乗振幅。「平均」の概念は特に含まないので注意。
SN比	: ノイズのパワーに対するシグナルのパワーの比。もしくはノイズのパワースペクトルに対するシグナルのパワースペクトルの比。本指針では後者を指す。データの精度を表す。
実効振幅	: パワーの平方根。
基線	: センサーの出力において、杭頭応答がゼロの状態に対応する値。理想的にはゼロであるが、実際にはセンサー系の個体差による出力信号のオフセットがあるためゼロにはならない。また杭の簡易載荷試験では、打撃の瞬間に基線がずれることもある。
FFT	: 高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform）の略。

## 1. 5 記号の定義

$g$	: 重力加速度（ $\cong 9.8 \text{ m/s}^2$ ）。単位のグラムは立体の「g」で表すので注意。
$f$	: 周波数（Hz）。
$\omega$	: 角周波数（rad/s）。
$i$	: 虚数単位（ $= \sqrt{-1}$ ）。
$T$	: サンプルのデータ長（秒）。
$u(\omega), \dot{u}(\omega), \ddot{u}(\omega)$	: 周波数領域における杭頭応答。点無しが変位（m）、点1つが速度（m/s）、点2つが加速度（ $\text{m/s}^2$ ）。
$B$	: 杭径（m）。
$L$	: 杭長（m）。
$E$	: 杭のヤング率（ $\text{kN/m}^2$ ）。
$A$	: 杭の断面積（ $\text{m}^2$ ）。

$I$	: 杭の断面2次モーメント ( $m^4$ )。
$P(\omega)$	: 周波数領域における杭頭荷重 (単位: kN, 加振力は $P(\omega)T$ となる)。
$G(\omega)$	: 杭の簡易載荷試験より推定される杭頭のインパルス応答 ( $m/kN$ )。
$K(\omega)$	: 杭の簡易載荷試験より推定される動的地盤ばね (単位: kN/m, $1/G(\omega)$ )。
$\hat{K}_0$	: 杭の簡易載荷試験より推定される静的地盤ばね (kN/m)。
$K_a$	: 計画上の静的杭頭ばね想定値 (kN/m)。
$s_v$	: 鉛直方向の地盤反力係数 ( $kN/m^3$ )。
$s_h$	: 水平方向の地盤反力係数 ( $kN/m^3$ )。
$V_s$	: 地盤のせん断波速度 (m/s)。
$V_p$	: 地盤の粗密波速度 (m/s)。
$n_s$	: 打撃回数。
$n_c$	: 全フレームの内, 杭頭ばねの推定に用いるフレーム数。
$n_w$	: 周波数領域での平滑化に用いる窓関数の幅 (周波数幅でなく, 何サンプル分かの数字)。
$\hat{R}$	: インパルスハンマーの出力とセンサー系の出力の間のコヒーレンスから推定される SN 比。
$R_r$	: 試験結果の利用目的に応じて設定される $\hat{R}$ が上回るべき基準となる SN 比。
$R_a$	: 試験の計画上, 実現が予測される SN 比。
$n'_s$	: $R_r$ を達成するために必要な最低限の打撃回数。
$\text{ceil}(x)$	: 実数 $x$ の小数点以下を切り上げた整数。
$N_a$	: 常時微動の変位パワースペクトル。
$z^*$	: 複素数 $z$ の共役複素数。
$S[z(\omega)]$	: 角周波数 $\omega$ 依存で変化する複素数 $z(\omega)$ を周波数平滑化した結果の値。
$\text{coh}^2(\omega)$	: $u(\omega)$ と $P(\omega)$ の間のコヒーレンス ( $:= (S[u(\omega)P^*(\omega)])^2 / (S[ u(\omega) ^2]S[ P(\omega) ^2])$ )。正確には振幅二乗コヒーレンスだが, 慣例的に $\text{coh}^2(\omega)$ も $\sqrt{\text{coh}^2(\omega)}$ も両方コヒーレンスと呼ばれる。本指針では, $\text{coh}^2(\omega)$ の方をコヒーレンスと呼ぶ。

#### 参考文献

1. 1) 成田修英, 福田健, 小阪宏之, 久世直哉, 飛田喜則, 岸本剛, 小川敦, 富田祐介, 内田崇彦, 大沼満, 川幡栄治, 阿部秋男, 新井寿昭, 沼本大輝, 佐藤武: 「人力加振による杭頭のインパルス応答を用いて弾性領域における杭頭の静的ばねを推定する方法」, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 779 号, 2021. 1 (印刷中)
1. 2) 金井浩: 「音・振動のスペクトル解析」, コロナ社, 1999
1. 3) 日本建築学会: 「建築基礎構造設計指針」, 日本建築学会, 2019



## 第2章 試験計画

### 2.1 試験計画策定のフロー

杭の簡易載荷試験は、以下のフローに従って計画し実施する。各計画項目、実施項目の詳細は2.2以降にて説明する。

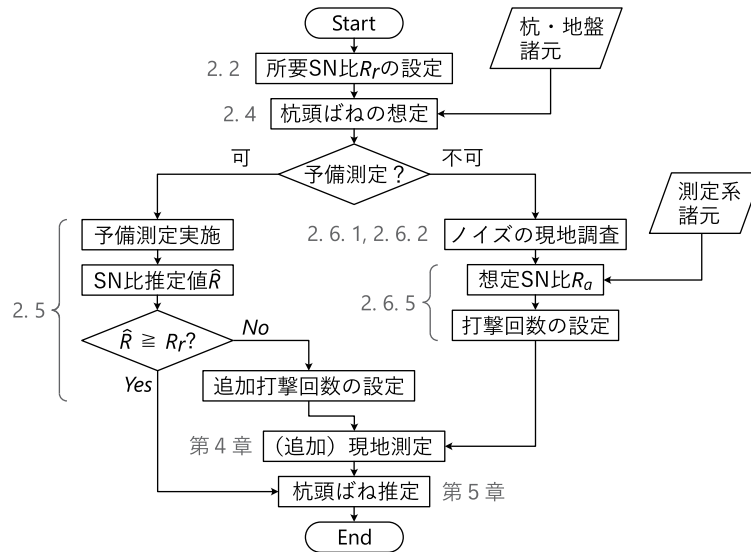


図2.1 試験計画策定および杭頭ばね推定の全体フロー

試験計画は、所要のSN比を確保しつつ、試験の実施に要する期間と費用を最小化することを目指す。ここで検討の中心となるのは、打撃回数である。中心極限定理<sup>例えば2.1)</sup>より、データに含まれるノイズのパワーは平均化の回数に反比例する。したがって、1回の打撃で得られるデータのSN比が低くなる条件の試験では、SN比確保のため打撃回数を多くし、SN比が高くなる条件の試験では、試験時間短縮のため打撃回数を少なくするのが、試験計画の基本方針となる。

杭の簡易載荷試験においては、ノイズのほとんどは地盤の常時微動に由来するものであり、そのパワーは、同一敷地内であれば杭の仕様によって多少周波数特性が変化するものの概ね一定である。したがって、同一敷地内での杭の簡易載荷試験データのSN比の大小は、杭頭応答の大小によって決まる（杭頭応答が大きいほどSN比が高い）。杭の簡易載荷試験で扱う低周波数領域の杭頭応答は杭頭ばねの値に反比例するので、杭頭ばねが硬いほどSN比は小さくなる。

ノイズとなる地盤の常時微動は、分析の対象とする周波数帯域である10Hz～数十Hz付近では、交通振動や（工場、工事現場等の）機械振動が振動源となる。交通振動は完全に排除することはできないので、予備測定（「2.5 予備測定および打撃回数設定」参照）

により影響を把握するか、「2. 6. 2 ノイズの現地調査」に記載の通りにその振幅を見積る。機械振動の影響が顕著となることが予想される場合には、以下のいずれかの対応により、その影響を排除する。

- ① 機械の稼働していない時間帯に測定を実施する。あるいは、機械を稼働させている現地（近隣）関係者と交渉し、測定時間帯での機械の稼働をストップさせる。
- ②（機械振動は通常ごく狭い周波数帯域にのみ影響が現れることが多いので）機械振動の影響が顕著な周波数帯域を、分析の対象から除外する。

どちらの対応も取れない場合は、必ず予備測定を行い、機械振動の影響含むノイズの大きさを把握して、SN比確保のための適切な対応をとる。

## 2. 2 所要 SN 比 $R_r$ の設定

試験結果の利用目的に応じて、試験の実施者が適宜定める。試験結果の用途の詳細が未確定である場合は、所要 SN 比  $R_r = 10$ （振幅比だと  $10^{0.5} \approx 3.16$ ）を目安とする。

付録 1. 2 に  $R_r$  の設定例（ $R_r = 10$  の場合）を示しているので、付録 1. 2 の記載を参考に適宜  $R_r$  を設定すること。

## 2. 3 打撃回数以外の測定条件

以下を標準とする。ただし、予備測定により、条件を変更しても所要の SN 比を確保できることを確認した場合には、SN 比を確保できる範囲内で条件を変更しても良い。

- 1) データ収録のサンプリングレートは、1kHz 以上とする。
- 2) 打撃の時間間隔は 4 秒以上あける。ただし、1 フレームあたりのデータ長を標準値 2.048 秒から変更する場合（「5. 4 データの切り出し」参照）には、1 フレームあたりのデータ長 + 2 秒以上の間隔とする。

インパルスハンマーによって発生する衝撃力のパルス幅が非常に狭い（打撃対象によるが概ね  $10^{-2}$  秒オーダー）ため、それを正確に捉えるには 1kHz 以上が必要である。データ処理時に利用する周波数帯域は精々数十 Hz 以下なので、そこから考えると 1kHz のサンプリングレートは一見過剰にも思えるが、衝撃力を捉えるためには 1kHz 以上必要なので注意。

打撃時間間隔は、1 フレームあたりの標準的なデータ長 2.048 秒（「5. 2 データの切り出し」も参照）に対し、人間が時間を測って打撃をすることによる時間間隔のぶれを吸収する余裕分をみて 4 秒以上としている。高周波数帯域での SN 比を向上させるためには 1 フレームあたりのデータ長は短い方が良いが、正確なフーリエスペクトルを得るためには、正弦波 10~20 サイクル分程度のデータ長は必要なため、評価対象として想定する周波数帯域の最低周波数（最長周期）20 サイクル分の長さが、1 フレームあたりのデータ長として妥

当だと考えられる。総則で定めた適用範囲内では、「評価対象として想定する周波数帯域の最低周波数」は 10Hz 前後であることが分かっている<sup>2.9)</sup>ので、10Hz の波 20 サイクル分で 2 秒、FFT を使い易いようにサンプル数が 2 の累乗になるよう端数を付け足して 2.048 秒を標準とする。

## 2. 4 杭頭ばねの想定

以下の手順により計画上の杭頭ばね想定値 $K_a$ を設定する。

- 1) PS 検層、常時微動アレイ探査<sup>2.2)</sup>、N 値を用いた経験式<sup>2.3)</sup>のいずれかの方法で地盤のせん断波速度 $V_s$ と粗密波速度 $V_p$ の深度分布を得る。PS 検層によらずに $V_s$ を決めた場合は、地盤の質量密度、ポアソン比については、近隣地の地盤調査結果を引用するか、一般的な値（例えば、日本建築学会 基礎構造設計指針<sup>2.4)</sup>の 2. 7 節参照）を設定する。
- 2) 鉛直打撃の場合は、Randolf の式<sup>2.5)</sup>による杭周面地盤ばねと弾性論による杭先端地盤ばね<sup>2.6)</sup>を弾性支承梁モデルの理論解に代入して静的ばねを求める。
- 3) 水平打撃の場合は、杭頭部の地層の $V_s$ を用いて Francis の式<sup>2.7)</sup>より水平地盤反力係数を求め、それを Chang の式<sup>2.8)</sup>に代入して静的ばねを求める。

人力の杭頭打撃による杭の応答が微小ひずみ領域の運動であることは明らかだが、それでも実験結果から逆算した地盤ばねは $V_s, V_p$ から算出した地盤ばねよりも弱めとなる傾向にある<sup>2.10)</sup>。これは恐らく杭打設時の杭周地盤の緩みや乱れによるものであり、現時点では予測する方法が無い。したがって、杭頭ばねの想定値に高い予測精度は期待できないので、ここでは試験計画のために安全側の値を大雑把に求めることを考えれば良い。計画段階における杭頭ばねの想定では、ばねを硬めに評価することが安全側の評価になるので、 $V_s, V_p$ から算出した地盤ばねをそのまま用いて杭頭ばねを計算する。

鉛直杭頭ばねの想定では、まず Randolf による鉛直地盤反力係数 $s_v$ を次式により求める。

$$s_v B = \frac{2\pi G_e}{\ln(2r_m/B)} \quad (2.1)$$

ここに、

$$r_m := 2.5L(1 - \nu_e) \quad (2.2)$$

$$G_e := \frac{1}{L} \sum_{i=1}^M G_i H_i \quad (2.3)$$

$$\nu_e := \frac{1}{L} \sum_{i=1}^M \nu_i H_i \quad (2.4)$$

$$G_i = \rho_{si} V_{si}^2 \quad (2.5)$$

$M$ ：支持層の層番号（表層から 1 層，2 層，…と数えていって $M$ 層目が支持層）， $G_i$ ：第 $i$ 層のせん断剛性， $\nu_i$ ：第 $i$ 層のポアソン比， $H_i$ ：第 $i$ 層の層厚， $\rho_{si}$ ：第 $i$ 層の質量密

度,  $V_{si}$  : 第*i*層の $V_s$

先端地盤ばね $K_b$ の式は幾つかのバリエーションがあるが、ここでは等分布荷重による平均変位によってばねを評価した次式を用いることにする。

$$K_b = \frac{3\pi^2}{16} \frac{G_M B}{1 - \nu_M} \quad (2.6)$$

$s_v$ と $K_b$ を弾性支承梁モデルの理論解である次式に代入すれば、鉛直杭頭ばねが求まる。

$$K_a = EA\beta_v \frac{EA\beta_v(1 - e^{-2\beta_v L}) + K_b(1 + e^{-2\beta_v L})}{EA\beta_v(1 + e^{-2\beta_v L}) + K_b(1 - e^{-2\beta_v L})} \quad (2.7)$$

ここに、

$$\beta_v := \sqrt{\frac{s_v B}{EA}} \quad (2.8)$$

水平杭頭ばねの予測では、Francisの式による水平地盤反力係数 $s_h$ をChangの式に代入する。Francisの式は、Randolfの方法と異なり多層地盤の平均的な地盤反力係数を求める方法が整備されていないが、この場合高い計算精度は必要ではないし、多層の弾性支承梁モデルを解いたとしても表層の寄与が卓越することには変わりはないので、ここでは杭頭部の地層の $V_s$ をFrancisの式に代入して水平地盤反力係数を定めることにする。

$$s_h B = 1.3 \frac{E_{s1}}{1 - \nu_1^2} \left( \frac{E_{s1} B^4}{EI} \right)^{1/12} \quad (2.9)$$

ここに、 $E_{s1}$  : 1層の変形係数 ( $= 2(1 + \nu_1)G_1$ )

これを杭頭自由条件のChangの式に代入して杭頭ばねを求める(次式)。

$$K_a = 2EI\beta_h^3 \quad (2.10)$$

ここに、

$$\beta_h := \sqrt[4]{\frac{s_h B}{4EI}} \quad (2.11)$$

なお、(2.10)式は突出部の影響を無視した杭頭ばねの式であり、杭と地盤の条件によっては杭頭ばねを過大評価する可能性がある(5.6参照)が、この場合、安全側の評価となるので問題ない。

## 2. 5 予備測定および打撃回数の設定

試験対象の杭の中から、予測した杭頭ばねが最も硬い仕様のを1本以上ピックアップして、以下の予備測定を実施することが望ましい。

- 1) 本測定時に用いる測定系で試験を行う。
- 2) 打撃回数20回として、「第3章 試験装置とその設置方法」および「第4章 現地測定」

の記載に従い、杭の簡易載荷試験を実施する。

- 3) 「第 5 章 データ処理」の記載に従い、センサー系出力の推定 SN 比 $\hat{R}$ を算出する。
- 4) 次式より、所要の SN 比を確保するための最低限の打撃回数 $n'_s$ を算出する（次式 $n_c$ は全 20 のフレームの内、 $\hat{R}$ の算出に用いたフレームの数である）。

$$n'_s = \text{ceil}\left(n_c \frac{R_r}{\hat{R}}\right) \quad (2.12)$$

- 5) 実施する打撃回数 $n_s$ は、余裕分を見込んで $n'_s$ の 2 倍以上とする。ここでの $n'_s$ は実施した全杭の平均とする。
- 6) 予備測定データを追加測定データに付け加えて用いても良い。その場合、追加で実施する打撃回数は $2 \times (n'_s - n_c)$ 以上とする。
- 7) 以上の手順は、予測される杭頭ばねの硬さに応じて幾つかにグループ分けして繰り返しても良い。例えば、試験対象の杭を 3 つにグループ分けしてグループごとに上記手順を実施し、一番ばねの硬いグループは $n_s = 20$ 、二番目のグループは $n_s = 15$ 、一番柔らかいグループは $n_s = 10$ とする、など。
- 8) 全数の予備測定を実施し、SN 比の足りていない杭のみ追加で打撃する計画としても良い。

試験対象の杭が打設されている敷地の常時微動の大きさ（ノイズの大きさ）にもよるが、総則に示した適用範囲内であれば、所要 SN 比の標準値（= 10）は、20 回の打撃で大体クリアできるはずである。試験対象の杭が少ない場合（例えば、実施対象の杭全数 20 回打撃しても 1～2 時間以内に測定終了するような場合）は、とりあえず全数打撃した後に SN 比をチェックする手順の方が（本文 7) の手順）、途中で SN 比をチェックして打撃回数を調整するよりも現地での作業が早く済むと思われる。一方、実施対象の杭本数が多い場合には、以下の手順の方が、合理的であろう。

- ① ピックアップした杭の打撃
- ② SN 比チェック
- ③ 最適な打撃回数の設定

なお、本試験時と同じ測定系を用いるのは、自己ノイズの影響を本測定時と揃えるためである（本測定時の方が自己ノイズが大きいようなことは、あってはならない）。

## 2. 6 予備測定によらない打撃回数の設定

以下（「2. 6. 2 ノイズの現地調査」～「2. 6. 5 打撃回数の設定」）に示す手順で打撃回数を設定しても良い。

ほとんどの試験条件において、何らかの形で予備測定を行った方がスムーズに試験が実施できると考えられるが、試験対象となる杭本数が多く（数十本以上）、かつノイズの現地

調査が事前に実施できる（もしくは何か別の調査・作業のついでに実施できる）場合には、こちらのルートの方が合理的なこともあるだろう。

## 2. 6. 1 評価対象周波数帯域の想定

計画段階では 10Hz～20 Hz とする。

評価対象周波数とは、静的杭頭ばねを推定する際に用いる動的杭頭ばねの周波数である。最終的には測定データを分析して決定する（「第5章 データ処理」参照）が、計画段階でも評価対象とする周波数の範囲は決めておく必要がある。10Hz～20Hz とする理由は以下の通りである。

3次元 FEM を用いた Gazetas and Dobry の研究<sup>2.9)</sup>によれば、20Hz 程度以下の杭頭ばねは、動的効果の影響が小さく静的ばねの近似値をとる。また、杭の簡易載荷試験を用いた成田らの研究<sup>2.10)</sup>により、本指針の適用範囲内における実際の杭 - 地盤系にも同様の傾向がみられることが確認されている。したがって、静的杭頭ばねの推定は 20Hz 程度以下の帯域を評価対象とするのが良い。

ただし、成田らの研究では<sup>2.10)</sup>、極端な低周波数帯域（概ね 10Hz 以下）のデータは SN 比が低く、評価の対象と出来ないことも示されている。また、Gazetas and Dobry の研究<sup>2.9)</sup>では、数 Hz 前後で地盤全体の周波数応答特性の影響が卓越し、静的杭頭ばねと動的杭頭ばねのずれが大きくなる帯域があることも指摘されている。つまり極端な低周波数帯域（概ね 10Hz 以下）のデータは、① SN 比の確保が難しいこと、② シグナルの性質自体が杭頭ばね推定に向かない帯域が存在すること、の 2 点により、杭頭ばねの推定に適さない。

以上より、計画段階における評価対象周波数帯域の想定は 10Hz～20Hz とする。

## 2. 6. 2 ノイズの現地調査

ノイズの現地調査は以下の通りに実施する。

- 1) 本測定時に用いる測定系で調査を行う。
- 2) 以下のいずれかの常時微動を 10 分以上測定する。測定する微動の向きは打撃方向に合わせる。なお、データの出力単位系は加速度の場合  $m/s^2$ 、速度の場合  $m/s$  とする（デフォルト設定だと長さの単位が  $cm$  で記録されるシステムも多いので注意）。
  - ① 試験対象の杭の中から、予測した杭頭ばねが最も柔らかい仕様のもを 1 本以上ピックアップして、常時微動を測定する。
  - ② 試験対象の杭が打設されている（もしくは打設される予定の）敷地において、地表面の常時微動を測定する。
- 3) 1 フレームあたりのデータ長を 2.048 秒とし、以下手順により、常時微動のパワースペクトルを算出、それをノイズのパワースペクトルとする。
  - ① 測定した微動データ全長をフレームごと（2.048 秒ごと）に区切り、フレームごとに基線

補正（「5. 2. 2 基線補正」参照）を行う。

- ② 各フレームを FFT によりフーリエ変換する。
  - ③ フーリエ変換した各フレームのデータを、フーリエ変換の積分法則に従い変位換算する。具体的には、元のデータが加速度の場合はフーリエ振幅を $\omega^2$ で割り、元のデータが速度の場合はフーリエ振幅を $\omega$ で割る。
  - ④ 各フレームにおいて、複素フーリエ振幅を幅 2.5Hz の窓関数で平滑化する（複素数をそのまま平滑化すること）。このときの窓関数には、矩形窓か Parzen 窓を用いる。
  - ⑤ 各フレームにおいて、平滑化された複素フーリエ振幅のパワースペクトル（2乗振幅のスペクトル）を計算する。
  - ⑥ 得られたパワースペクトルの全フレーム平均を計算する。
  - ⑦ 得られたパワースペクトルの評価対象周波数帯域（10Hz～20Hz）における最小値を、想定される評価対象周波数におけるノイズのパワースペクトル $N_a$ とする。
- 4) 以上の手順は、予測される杭頭ばねの硬さに応じて幾つかにグループ分けして繰り返しても良い（杭頭の常時微動を測定する場合）。

実用上安全を見込んだ上で「ノイズの標準値」的なものが設定できればノイズの現地調査は不要だと思われるが、地盤の常時微動は、その地盤の振動特性や周囲の環境、また試験対象となる杭の仕様によっても 100 倍以上パワーが変化するため、標準値のようなものを決定するのは困難である。安全側に評価して大き目の標準値を設定すると、SN 比を確保するための所要打撃回数が非常に過大となるケースが多く出てきてしまう。したがって、現実的で合理的な打撃回数を設定するためには、ノイズの現地調査が必要である。

ノイズの現地調査は、試験対象となる杭の杭頭か、その杭が打設されている（もしくは打設される予定の）敷地の地表面のノイズ（常時微動）を測定することにより行う。杭の測定ができる状況であれば、ほとんどの場合、予備測定を実施する方が合理的と考えられるので、ノイズの現地調査では、地表面の常時微動を測定することが多くなるであろう。杭頭と地表面の微動は概ね類似した特徴を示すが、地盤から杭への振動エネルギーの伝播には、入力損失効果<sup>2)11)</sup>が働くため、杭頭の微動の方が地表面の微動よりもやや小さくなる。正確なノイズの把握という意味では、杭頭で微動を測定するのが望ましいが、地表面で微動を測定してもノイズが大きめの評価となるだけで、この場合には安全側の評価になるので問題ない。

ノイズのパワースペクトル $N_a$ を得る手順において、平均化の操作と 2 乗振幅をとる順番を間違えると、計算結果の値もその物理的意味合いも全く変わってくるので注意が必要である。本文 3) ④～⑥の手順は、「平滑化によるノイズ低減効果のみを考慮し、フレーム平均によるノイズ低減は考慮しない」計算になっている。本文 3) ④での平滑化はノイズの期待値をゼロに近づけ、⑥の平均化はノイズの期待値は変化させず各フレームの持つ期待値からのばらつきのみを低減させる。順番を間違えると、「平滑化によるノイズ低減も考慮しない」計算や、「平滑化だけでなく、フレーム平均によるノイズ低減も考慮された」計算になってしまうので、本文記載の順番を守ること。

### 2. 6. 3 打撃回数の設定

- 1) 加振力の想定:  $1.50 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{s}$  を想定加振力とする。
- 2) 杭頭応答変位フーリエスペクトルの想定: 想定される杭頭ばね  $K_a$  と加振力  $1.50 \times 10^{-2} \text{ kN} \cdot \text{s}$  より,  $1.50 \times 10^{-2} / K_a \text{ m} \cdot \text{s}$  が杭頭応答変位フーリエスペクトルの想定値となる。
- 3) 打撃回数の設定: 打撃回数  $n_s$  は, 次式の  $n'_s$  の 2 倍以上とする。杭頭ばねの硬さごとにグループ分けしてノイズの想定を行っている場合には, グループごとに次式の計算をして  $n_s$  を定める。

$$n'_s = \text{ceil}(4.4 \times 10^3 \times R_r K_a^2 N_a) \quad (2.13)$$

衝撃力の瞬間最大値を安全側に想定して 9 kN とし, 簡単のため衝撃力を三角パルスで表せるものとする。インパルスハンマーのカタログによれば, 大型ハンマーで最も柔らかいハンマーヘッドを使用した場合, 加振力は概ね 0 Hz から 300 Hz 付近までに分布するので, 低周波数領域 (周波数 0 Hz 近傍) での加振力は,  $9 / (2 \times 300) = 0.015 \text{ kN} \cdot \text{s}$  となる。加振力の分布幅は打撃する対象の剛性によって変動するが, カタログ値を上回ることは無いので, カタログ値に基づいて計算すれば, 加振力は安全側 (小さめ) の値となる。

2. 6. 1, 2. 6. 2 および加振力と杭頭応答変位フーリエスペクトルの想定より, 想定される試験結果の SN 比  $R_a$  は, 次のようになる。

$$R_a = n_c \left( \frac{1.5 \times 10^{-2}}{K_a} \right)^2 \frac{1}{N_a} \quad (2.14)$$

この  $R_a$  が  $R_r$  を上回らなければならないので, 必要最低限の打撃回数  $n'_s$  は, (2.12) 式のようになる ( $1 / (1.5 \times 10^{-2})^2 \doteq 4.4 \times 10^3$ )。

### 2. 7 水平打撃時の打撃高さ

GL+100mm 以下の高さを打撃するものとする。

打撃点の高さを GL±0 と見なせる範囲として, GL+100mm 以下を設定する。打撃点の高さを無視できる条件の方が, 地盤ばねの推定 (5. 6 参照) が簡単になるためである。



## 参考文献

2. 1) 小林道正: 「サイコロから学ぶ確率論 -基礎から確率過程入門へ-」, 裳華房, 2018
2. 2) 物理探査学会: 「新版 物理探査適用の手引き -土木物理探査マニュアル 2008-」, 物理探査学会, 2008
2. 3) 太田裕, 後藤典俊: 「横波速度を推定するための実験式とその物理的背景」, 物理探査, 第 31 巻, 第 1 号, pp. 8-17, 1978
2. 4) 日本建築学会: 「建築基礎構造設計指針」, 日本建築学会, 2019
2. 5) Randolph, M. F. and Wroth, C. P.: “Analysis of deformation of vertically loaded piles”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 104, pp. 1465-1488, 1978
2. 6) Poulos, H. G. and Davis, E. H.: “Elastic solutions for soil and rock mechanics”, John Wiley & Sons, 1973
2. 7) Francis, A. J.: “Analysis of pile groups with flexural resistance”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.90, No. Sm3, pp. 1-32, 1964
2. 8) Chang, Y. L.: Discussion on “Lateral pile-loading test” by Feagin, Trans., ASCE, pp. 272-278
2. 9) Gazetas, G. and Dobry, R.: “Horizontal response of piles in layered soils”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, Issue 1, pp. 20-40, 1984
2. 10) 成田修英, 福田健, 小阪宏之, 久世直哉, 飛田喜則, 岸本剛, 小川敦, 富田祐介, 内田崇彦, 大沼満, 川幡栄治, 阿部秋男, 新井寿昭, 沼本大輝, 佐藤武: 「人力加振による杭頭のインパルス応答を用いて弾性領域における杭頭の静的ばねを推定する方法」, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 779 号, 2021. 1 (印刷中)
2. 11) 日本建築学会: 「建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計」, 日本建築学会, 2006

## 第3章 試験装置とその設置方法

### 3. 1 インパルスハンマーおよびセンサー系の要求性能

- 1) 使用するインパルスハンマーの性能は以下の条件を全て満たすものとする。
  - ① 出力可能な衝撃力の最大値が $\pm 20$  kN 以上であること。
  - ② ハンマーの質量が 5kg 以上であること。
  - ③ 評価対象周波数において、加振力振幅の静的出力に対する低下の割合が-3dB(約 29.3%) 以内であること。
- 2) インパルスハンマーのヘッド部分は、上記 1) ③の範囲内で最も柔らかい素材のものを用いる。
- 3) 使用するセンサー系は、自己ノイズの実効振幅が以下の値以下のものを用いる。
  - ① 加速度計の場合、 $5 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$  以下。
  - ② 速度計の場合、 $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$  以下。
- 4) 使用するセンサーの質量は 1kg 以下とする。
- 5) 使用するセンサーのアンプは、以下の条件をともに満たすローパスフィルタ機能を有するものを用い、測定時には必ずローパスフィルタ処理を実施する。ただし、ロガー側でアナログ信号に対するローパスフィルタ処理を行うことができ、その仕様が以下の条件をともに満たす場合、ロガー側でローパスフィルタ処理を行っても良い。
  - ① カットオフ周波数が 100Hz 以上。
  - ② サンプリングレートの 1/2 の周波数において、入力信号振幅に対するフィルタの出力信号信号の比が-100dB (1/100,000) 以下。

インパルスハンマーの要求性能は、なるべく大きな衝撃力を確実に発生させるために規定されたものである。枕頭に作用する衝撃力が大きければ大きいほど、枕頭応答も大きくなり、より SN 比の高いデータが得られる。上記の要求性能をすべて満たすインパルスハンマーとして、PCB 社の 086D50<sup>3.1)</sup> を推奨する。

なお本文 1) ②は、健康な成人男性が繰り返し打撃を行うにあたって過大な体力的負荷を生じない範囲で可能な限り重くという意味で「5kg」を基準としている。また本文 1) ③について、出力の周波数特定が(カタログ等で)確認できないハンマーを用いる場合には、剛体を打撃して出力の周波数特性を確認すれば良い。ここでの「剛体」はハンマーの発生する衝撃力に対して十分に硬ければ問題ないので、反力床や反力壁を用いて良い。

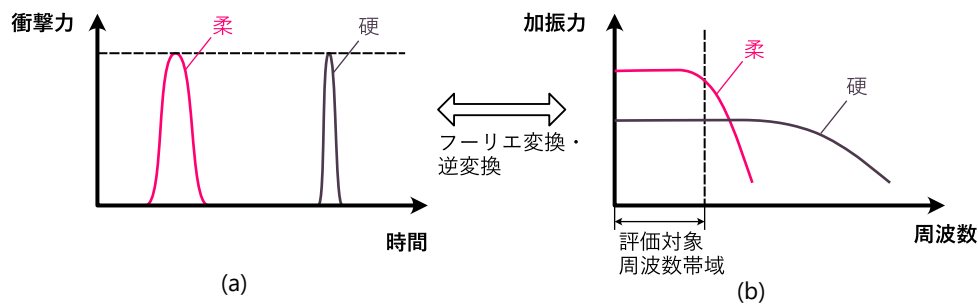


図3. 1 ハンマーヘッドの硬さと発生する衝撃力・加振力の関係の模式図

インパルスハンマーのヘッド部分は、通常付け替え可能で剛性の違うものが数種類用意されているが、杭の簡易載荷試験では、基本的に最も柔らかい素材のヘッドを使用すれば良い。図3. 1に、その理由を説明する模式図を示す。同じ力で叩いても、柔らかいヘッドを使った方が衝撃力パルスの時間幅が広くなり（同図(a)）、その分低周波数領域の加振力が大きくなる（同図(b)）。硬いヘッドを使った方がより高周波数領域まで加振できるが、静的な杭頭ばねを推定する目的においては、柔らかいヘッドで十分である。ただし、インパルスハンマーのメーカーによっては、最も柔らかいヘッドでの加振力の低下が、本文1) ③の定める範囲を超える可能性があるため、その場合には硬いヘッドの使用も検討する。なお、インパルスハンマーのカタログやマニュアルでは、この付け替え可能なハンマーヘッドは、「チップ」と呼ばれるので注意（柔らかいハンマーヘッドが「ソフトチップ」、硬いハンマーヘッドが「ハードチップ」などと呼ばれる）。

センサー系の自己ノイズについては、適用範囲内においてSN比の確保に対する条件の最も厳しい（杭頭ばねの硬い）杭頭ばね  $3.8 \times 10^6 \text{ kN/m}$  の条件において、自己ノイズが杭頭応答よりも十分に小さくなることを要件とする。杭頭ばね  $3.8 \times 10^6 \text{ kN/m}$  が確認された実験での杭頭応答の実効振幅は、加速度を元にした値で  $5.19 \times 10^{-2} \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、速度を元にした値で  $1.23 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$  である（図3. 2のフレーム平均の実効振幅）。自己ノイズのパワーがこの1/100以下ならば「十分に」小さいものと考えて、本文3)の値を要求性能とする。自己ノイズを直接確認することが難しい読者も居ると思われるが（このレベルだと、自己ノイズが大抵の場所の常時微動を下回るため、特別な除振設備が無い限りは自己ノイズの確認は難しい）、「加速度計：リオン社製 LS-10C、アンプ：IMV社製 VM5123/6、ロガー：キーエンス社製 NR-500」の組み合わせと、「速度計：東京測振社製 VSE-15D-6、アンプ・ロガー一体型システム：東京測振社製 SPC-52」の組み合わせが上記実験で使用した測定系なので、これらの組み合わせのいずれかを用いるか、これと同等以上のSN比を実現できることを確認した組み合わせであれば問題ない（ただしSPCの入力端子はやや特殊なので、インパルスハンマーをSPCに接続するためには、接続ケーブルを特注で製作する必要がある）。

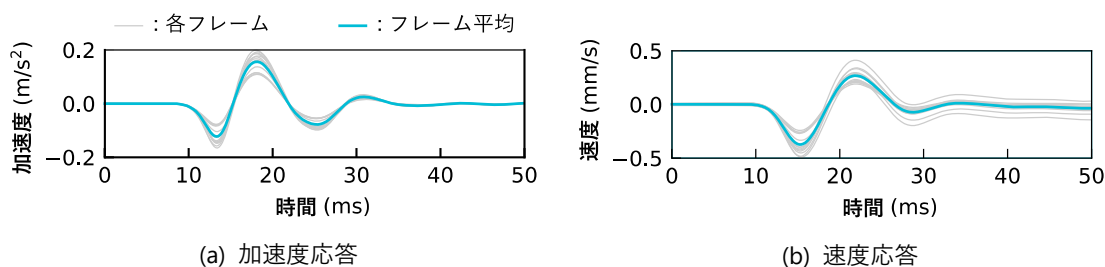


図 3. 2 適用範囲において確認されている最小の杭頭応答

センサー質量に対する要求性能は、よほど古いセンサーでなければ何を使っても満たすはずである（例えば、リオン社製の LS-10C は  $220g^{3.2)}$ 。センサーが重くなると打撃時にセンサーに働く慣性力も大きくなるため、打撃した瞬間にセンサーが初期の設置位置から動いてしまって正しい杭頭の動きが測定できない（センサーと杭頭の相対運動が測定誤差になる）可能性が出てくるが、質量 1kg 以下であればそのような懸念は無い。

ローパスフィルタは、大半のアンプで勝手にかかるはずであるが、デフォルト設定でフィルタがオフになっているものや、実装されているフィルタのカットオフ周波数が高すぎて、想定しているサンプリングレートの 1/2 倍を超えるようなものもあるので、注意が必要である。杭の簡易載荷試験では、杭体内部での弾性波の乱反射や杭先端および地層境界での弾性波の反射により、数百 Hz から数 kHz を超えるような高周波振動が発生する可能性があり、エイリアシングノイズ（サンプリングレートに対して 1/2 以上の周波数の信号に対して、FFT による周波数分解が不可能なことによって生じるノイズ）<sup>例えば 3.4)</sup> 抑制のため、ローパスフィルタ処理が必須である。ローパスフィルタの仕様に関する 2 つの条件については、第 1 の条件が評価対象周波数に対する影響の最小化を、第 2 の条件がエイリアシングノイズの影響最小化を、それぞれ意図している。なお、前述のアンプ IMV 社製 VM5123/6 と東京測振社製 SPC-52 は、いずれもこれらの条件を満たす。

### 3. 2 センサーの設置方法

以下のいずれかの位置に、正三角形に配置して（図3. 2参照）、瞬間接着剤で固定する。この際のセンサーの向きは、3点とも打撃方向に揃える。

1) 杭頭：標準としては杭頭に固定する。

2) 杭周面：

既存杭等への適用時など、杭頭部が破損しており杭頭部にセンサーを固定することが困難である場合には、杭周面にセンサーを固定しても良い。ただし、このとき3つのセンサーは全て同じ高さに設置しなければならない。

杭周面は曲面であり直接センサーを固定することが困難であるため、まず図3. 3のようにL字金具を杭周面に固定し、その上面にセンサーを固定する。このL字金具は、JIS G 3192規格のアンクル鋼、L3×40×40×40（厚さ3mm、Lの辺の長さがどちらも40mmで幅も40mm）を標準仕様とする。標準仕様によらない場合は、曲げ振動の1次固有周波数が500Hz以上となるように、L字金具を設計する。

杭周面へのL字金具の固定には、速乾モルタルかエポキシ系パテを用いる。非エポキシ系のパテは、剛性が足りない場合があるので用いない。固定前に杭周面を良く洗い泥等を落とした上で、接着に用いる材料（速乾モルタルかエポキシ系パテ）の仕様書・マニュアル等にある作業手順に従って接着を行い、十分な養生期間をおく。

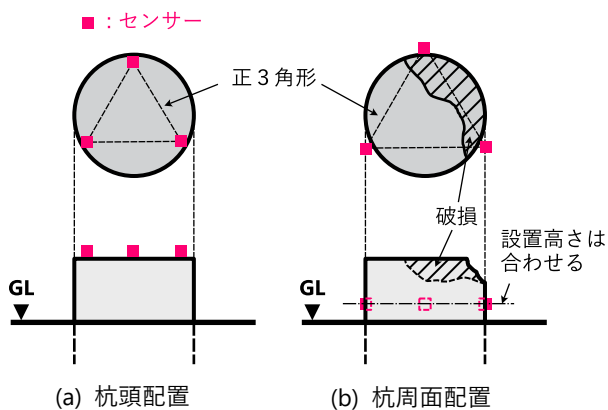


図3. 2 センサー配置

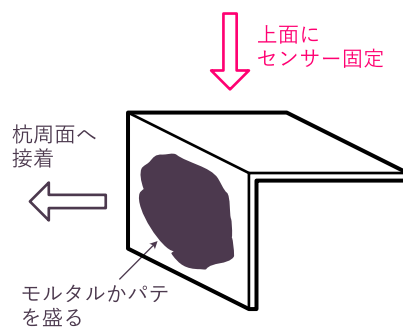


図3. 3 L字金具の使い方

正三角形にセンサーを配置するのは、その平均をとることにより、不正な回転（鉛直打撃時の杭頭回転や、水平打撃時のねじれ動）の影響を除去するためである。この際、センサーの設置高さは全て揃っている必要がある（センサーの高さが揃っていなければ、回転が上手く除去されない）。杭頭部にセンサーを設置する場合には必然的に高さが揃うが、杭周面にセンサーを設置する場合は、注意が必要である。

センサーと杭頭もしくはL字金具の固定には、瞬間接着剤を用いる。鉛直打撃でも水平打撃でも、杭頭の応答加速度は瞬間最大値で1gも出ないので、用いるセンサーの質量が最

大 1 kg であることを考慮すると、接着面の強度は  $1\text{kgf} \cong 10\text{N}$  で十分である。例えば東亜合成社製、アロンアルファ®では接着強度は  $0.4\sim 7\text{N}/\text{mm}^2$  程度<sup>3.3)</sup> であり、接着面の面積は少なくとも  $1\text{cm}^2$  は確保できるので、接着面の強度は  $40\sim 700\text{N}$  以上となり、必要な強度の 4 倍以上は確保できる。

センサーを周面に固定する場合、L 字金具の応答が測定に悪影響を与えないよう、L 字金具の固有周波数が、評価対象周波数に対して十分に高くなるよう注意する必要がある。評価対象周波数が L 字金具の固有周波数よりも十分に低ければ、評価対象周波数では、L 字金具とそれが固定された杭周面は一体で動くので、L 字金具の応答による悪影響は生じない。杭の簡易載荷試験で評価の対象とするのは、精々  $50\text{Hz}$  以下であるので、L 字金具とセンサーから成る振動系の固有周波数がその 2 倍 ( $= 100\text{Hz}$ ) 以上であれば、問題ない。標準仕様の L 字金具に  $1\text{kg}$  のセンサーを乗せた場合の 1 次固有周波数は、固有周波数  $148\text{Hz}$  である(以下の通り、片持ち梁のばねの式に 1 質点系の固有周波数の式を組み合わせると求まる)。

$$k = \frac{3EI}{l^3} \cong 865 \text{ (kN/m)} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \cong 148 \text{ (Hz)} \quad (3.2)$$

ここに、 $l$ : 梁の長さ ( $=0.04\text{m}$ )、 $E$ : 梁のヤング率 ( $=2.05 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ )、 $I$ : 梁の断面 2 次モーメント ( $=9 \times 10^{-11} \text{ m}^4$ )

また、杭頭が破損している状況に対する対応としては、杭頭の補修を実施して杭頭にセンサーを設置できる状態にする選択もある。試験を実施する杭本数や杭頭の状況など条件によっては、杭周面にセンサーを設置するよりも杭頭を補修した方が、時間的あるいは金銭的に有利になることも考えられるため、十分な事前調査・事前検討を行い、より合理的な方法を選択すべきである。

### 3. 3 測定系の全体構成

測定系の全体構成は図1. 1に概要を記載しているが、その詳細を書くと図3. 4のようになる。図3. 4各部の要求性能を以下に記す。

- 1) ロガーとしては、1kHz以上のサンプリングレートで4チャンネル以上の同期測定が可能なものを用いる。制御装置はロガーの制御プログラムが動けば何を利用しても良い。
- 2) センサーのアンプは、センサーと組み合わせたセンサー系として、3. 1のセンサー系の要求性能を満たせば良い。
- 3) インパルスハンマーのアンプは、ハンマーのメーカー指定の純正品を用いる。

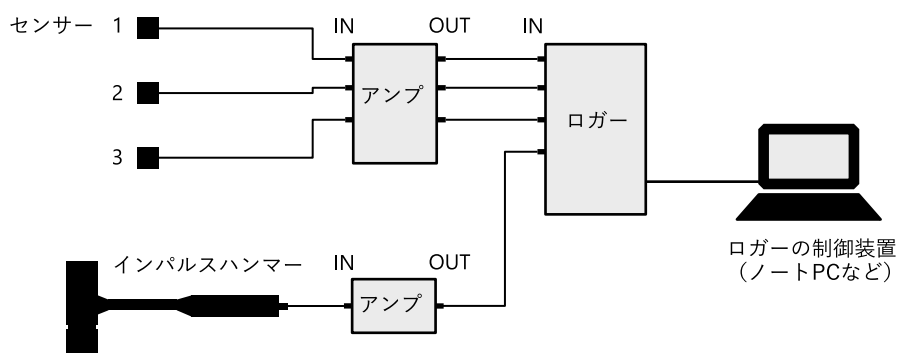


図3. 4 測定系の全体構成

静的杭頭ばねの推定を行う上で、衝撃力のデータと杭頭応答のデータの同期がとれていることは極めて重要である。杭頭ばねが静的に近いのか否かの判断は、加振力と杭頭応答の間のタイミングのずれ（位相遅れ）が少ないかどうかによる部分が大きいので、データの取得時刻自体にタイミングのずれが有っては推定が成り立たない。インパルスハンマーとセンサー3つは、必ず同じロガーに接続して、時間軸の揃ったデータを取得する必要がある。

#### 参考文献

3. 1) PCB: 「Model: 086D50」, <https://www.pcb.com/products?model=086D50> (2020年8月20日参照)
3. 2) リオン: 「LS-10C」, <https://svmeas.rion.co.jp/download/catalog/LS-10C#LS-10C> (2020年8月17日参照)
3. 3) 東亜合成: 「瞬間接着剤 アロンアルファ®」(カタログ), [http://www.toagosei.co.jp/products/functional/catalog/pdf/index\\_pdf\\_01.pdf](http://www.toagosei.co.jp/products/functional/catalog/pdf/index_pdf_01.pdf) (2020年8月17日参照)
3. 4) 渡部英二, 久保田彰, 神野健哉, 陶山健仁, 田口亮: 「基本からわかる 信号処理 講義ノート」, オーム社, 2014

## 第4章 現地測定

### 4. 1 事前準備

- 1) 杭頭が打撃可能かつセンサー設置可能な状態であるか確認し、必要であれば補修等を行う。
- 2) 水平方向に打撃を行う場合、杭周面を打撃することになるので、少なくともハンマーヘッドの径の分、杭を突出させる必要がある。打撃の施工性を考えれば、ヘッド径の1.5倍以上の突出が望ましい。
- 3) 杭周面にセンサーを設置する場合、事前に杭周面の洗浄を行う。その際先行してセンサーの設置用のL字金具を杭周に固定しても良い。

### 4. 2 測定

測定は、以下の手順を測定対象の杭本数分繰り返す。

- 1) センサーの設置
- 2) ケーブルの接続
- 3) データ収録の設定確認（この際、1回打撃を実施し、データに問題ないことを確認する）
- 4) 測定開始
- 5) 所定の回数の打撃
- 6) 測定終了

打撃に関しては、使用するインパルスハンマーにもよるが、成人男性が全力で打撃してしまうと、オーバーレンジになる場合があるので、あまり力を入れ過ぎない方が良い。本文3)の確認の打撃で、フルレンジの半分から2/3程度のレンジオーバーの懸念が無い範囲で最大レベルの衝撃力となっていることを確認する。杭頭ばねが柔らかい場合、ハンマーのフルレンジの半分の衝撃力で、センサー側がレンジオーバーすることもあるので、データを確認しながら、適宜打撃力の調整を行う。また、打撃時にケーブル類を踏んでしまうと、そこでノイズが発生するので、打撃する者の立つ位置とケーブルの経路を調整して、打撃時に踏まないように注意する。

測定は二人一組での実施を基本とし、一人がインパルスハンマーによる打撃、一人がデータの確認を行う。またデータ確認を行う側が、打撃時間間隔と打撃回数のカウントを行う。データ確認を行う者は、杭頭応答に関する以下基準について、打撃1回ごとに目視で確認を行い、確認したフレームが基準を満たさないことが疑われる場合には、その分、打撃回数を追加する。確認項目は以下2点である。① 突風や大型車の通行などの影響により、微動の実効振幅が平常時の3倍以上（目視で概ね）となっている部分が無いか（あればNG）。② 打



撃後の杭頭応答のデータにドリフト（図4. 1参照）が生じていないか（最大応答に対して目視で概ね 1/10 を超えたドリフトが生じていれば NG）。例えば図4. 1のデータが得られた場合、打撃 1, 3, 7, 8 を NG として、その分、4 回の追加打撃を行う。

以上測定作業は、一人でもできないことは無いが、一人の場合、打撃とデータの確認を同時にはできないので、確実に効率は下がるし、ミスの原因にもなる（ケーブルを踏んでしまう、打撃回数や打撃時間間隔を数え間違えるなど）。二人一組のペアを人員配置の基本単位とすることを推奨する。

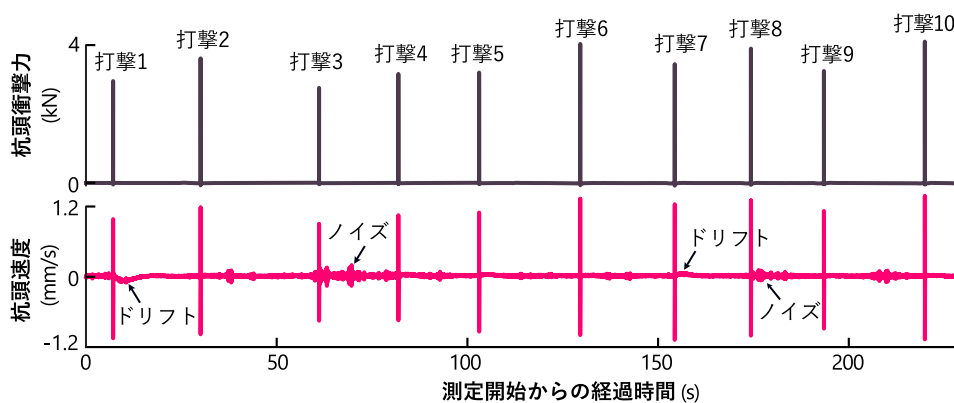


図4. 1 杭頭打撃応答データの例（測定時の周囲の環境が特に悪い例）

## 第5章 データ処理

### 5. 1 杭頭応答の平均

杭頭応答の測定に用いた3つのセンサーの平均をとり、以降、この平均データを杭頭応答として扱う。

3つのセンサーの内、一つだけ異常値を示す場合には、(残り2つで平均をとるのではなく)再測定を行う。再測定の際には、センサーの位置を入れ替える(例えばセンサーの番号を1, 2, 3とし、設置位置をA点, B点, C点として、1回目の測定で(1, A), (2, B), (3, C)の組み合わせとしていたならば、再測定では(3, A), (1, B), (2, C)などとする)。再測定で異常値が出なければ、それらの平均をとって5. 2節以降の手順に進めば良い。

再測定で再び異常値が出た場合、対応は以下の3パターンに分類できる。状況に応じて該当するパターンの対応をとった上で、再度測定を実施すること。① 同じセンサーで異常値が出る場合: 異常値の出るセンサーを別の新しいセンサーに入れ替える(別の位置に設置していたセンサーを入れ替えるのではなく、それまで使っていなかった新しいセンサーと入れ替える)。② 同じ位置で異常値が出る場合: 杭体に異常があることが疑われる。この場合には、異常値の出た杭は、簡易載荷試験の評価対象からは除外する。また目視点検・IT試験(ほか可能であればボアホールカメラ観察)などを利用して異常の特定を行う。③ センサーと位置どちらも1回目と異なる組み合わせで異常値が出ている場合: センサー系のケーブル・アンプもしくはロガーの異常が疑われる。ケーブルの断線・接触不良は無いか、機器に異常は無いか、そもそも機器のカタログスペックは3章記載の要求性能を満たすか、の3点を確認の上、必要に応じて機器の修理、入れ替えを行う。その後、再度測定を実施する。

## 5. 2 データの切り出し

標準 2.048 秒を 1 フレームのデータ長とし、打撃力のピークを基準に前 0.5 秒、後ろ 1.548 秒を 1 フレームとして、測定データ全体から打撃回数分のフレームを切り出す。以下、ピークより前の時間を  $t_b$ 、ピークより後の時間を  $t_a$  とする (図 5. 1 参照)。「5. 3. 3 コヒーレンス評価と SN 比推定」の手順により所要の SN 比が確保できることを確認できる場合には標準に従わなくても良いが、データ長および  $t_b, t_a$  は必ず全フレーム揃え、かつ  $t_a \geq t_b$  とすること。

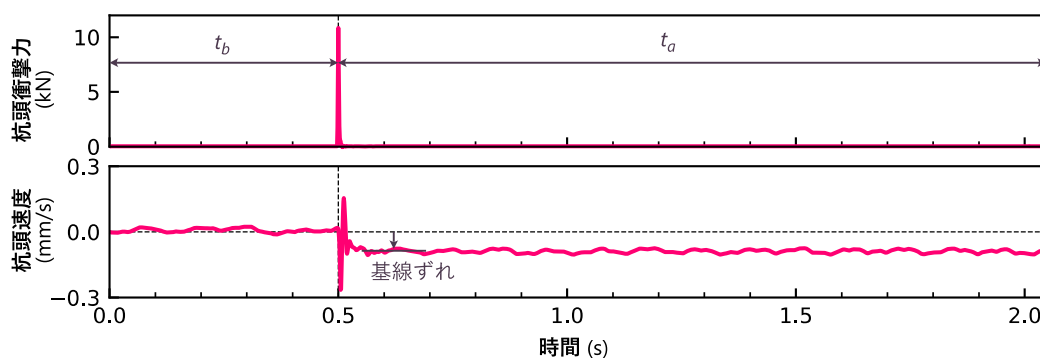


図 5. 1 切り出されたフレームの例 (径 1.5m の場所打ち杭の鉛直打撃の事例)

データの切り出しは、杭頭応答でなく打撃力の方のピークを基準に行うこと。杭頭応答のデータには杭頭の常時微動がノイズとして含まれているが、衝撃力のデータには微動が含まれていないので SN 比が良く、ピークの検出についても誤検知や取りこぼしが起こりにくい。ピークの検出アルゴリズムは、MATLAB<sup>5.1)</sup>、R<sup>5.2)</sup>、SciPy<sup>5.4)</sup> (Python 言語<sup>5.3)</sup> の数値計算ライブラリ) などデータ処理に強いモダンなプログラム言語に標準で実装されているピーク検出関数をそのまま利用すれば十分である。自作する場合は、衝撃力の時間勾配のゼロクロス点からピークを検出した後に、ノイズによるピークを以下 2 つの基準で排除すれば、大体上手く行く。① 最大衝撃力の数分の 1 以下 (検出結果を見て適宜調整、標準的には 1/4 程度が良い) のピークは排除。② あるピークの近くにそれより大きなピークが存在する場合、小さい方のピークは排除する。「近く」の基準は、標準で判定対象のピークの前後 500 サンプル分とする。

$t_a \geq t_b$  とするのは、以下 2 つの理由による。① 杭頭応答は、衝撃力に対して、常にやや遅れ気味に発生するので、衝撃力の後ろ側を長くとった方が良い。② 杭の応答は、衝撃力がゼロになった以降も自由振動の状態継続するので、自由振動が収まる時刻まではデータが必要。

## 5. 3 基線ずれフレームの除去

### 5. 3. 1 基線補正

フレームの先頭から $0.8t_b$ 秒間のサンプルの平均を基線の値とし、フレームのデータからマイナスする。

通常、基線の値はデータ全長の平均をとる場合が多いが、杭の簡易載荷試験では打撃の瞬間に基線がずれることがあるので、打撃の前のデータ区間で基線を計算する。

### 5. 3. 2 基線ずれフレームの除去

以下の手順をフレームごとに実施し、杭頭応答速度の基線のずれたフレームを判別、評価の対象から除く。

- 1) 用いたセンサーが加速度計の場合は、台形積分により速度応答を得る。
- 2) フレームの末尾から $0.8t_b$ 秒間のサンプルの平均を $v_s$ とし、杭頭応答速度振幅の最大値を $v_{max}$ として、 $v_{max}$ に対する $v_s$ の比率 $\varepsilon$ を次式で計算する。

$$\varepsilon := \frac{|v_s|}{v_{max}} \quad (5.1)$$

- 3) 各フレームについて $\varepsilon$ が 0.05 以下かどうか確認し、 $\varepsilon$ が 0.05 を上回るフレームは評価の対象から除外する。ただし、「5. 3. 3 コヒーレンス評価と SN 比推定」の手順により所要の SN 比が確保できることを確認できる場合には、 $\varepsilon$ が 0.05 を上回っても良い。

「加速度の時刻歴波形で全く問題ないように見えても、速度に直すと基線がずれている」ということは良くあるので、加速度計を用いた場合も、必ず速度に直して基線のチェックを行う。積分方法は、本文記載の通り台形積分である。フーリエ変換を利用した積分では、リンク効果により、速度の基線ずれが上手く評価できないので、フーリエ変換を利用した積分は使わないこと。また、この積分は、基線がずれていると基線のずれが累積して時間とともに誤差が拡大していくので、基線補正も忘れてはならない。

基線補正がきちんと成されていればフレーム先頭部分の基線はゼロになっているはずなので、フレーム末尾部分のサンプルの平均値 $v_s$ は、打撃による基線のずれを表す。 $\varepsilon$ は、最大応答に対する基線ずれの比率である。これが十分に小さければ、基線のずれは無視できる。「十分小さい」の基準は、本指針では 0.05 を標準とする。この基準を超えるフレームは、基線ずれの影響が無視できないものとして、評価の対象から除外する。

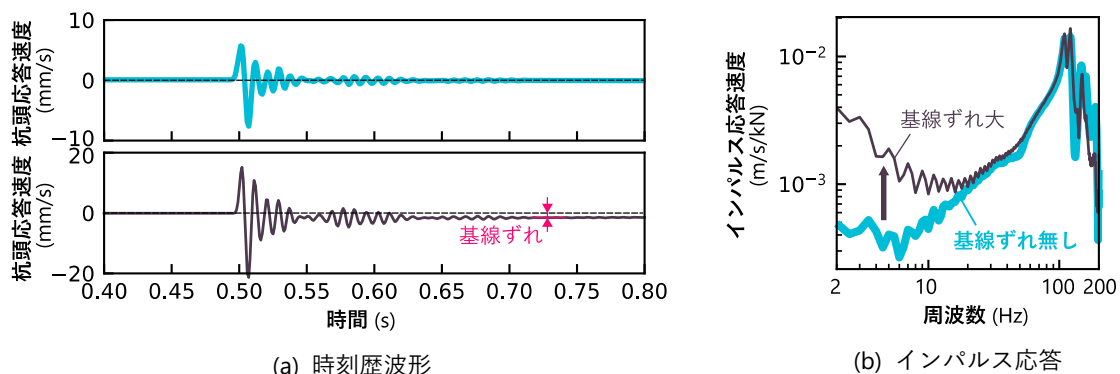


図5. 2 基線ずれの無い杭頭応答と有る杭頭応答速度（径 165mm の鋼管杭の水平打撃の事例）

基線ずれの影響は図5. 2のような形で結果に現れる。センサー系の異常で基線がずれるというのは、正規のセンサー系の出力にステップ関数状のノイズが載るのと同じなので、周波数領域においては $1/\omega$ に比例するノイズが載ることになり（単位ステップ関数のフーリエ変換は $1/i\omega$ である例えば5.5）、その結果、図5. 2 (b)のように低周波数側が持ち上がることになる。基線ずれによるノイズは振幅が $1/\omega$ に比例するので、十分な高周波数領域では必ず正規のセンサー系出力が卓越するが、ずれが大きすぎると評価対象周波数（標準 10Hz～20Hz）にまで影響が及ぶため、ずれの大きいフレームは除去しなければならない。

## 5. 4 インパルスハンマー出力とセンサー系出力の相関解析

### 5. 4. 1 スペクトル平滑化のための窓関数の設定

スペクトル平滑化に用いる窓関数は以下の通りとする。

- 1) 窓幅は、評価対象周波数の 1/4 以下とする。
- 2) 窓の種類は、窓の中心で最大値をとり、かつ窓の中心に対して対称な窓であれば、何でも良い。標準としては以下のいずれかとする。矩形窓、三角窓、Parzen 窓、Gauss 窓、Hann 窓、hamming 窓。

窓幅はあまり狭くしようとする必要は無い。杭の簡易載荷試験は、周波数領域においてインパルス応答振幅が概ね一定になっている帯域について評価を行う。構造物の固有周期や減衰を推定する場合のように、狭い帯域での急峻なピークを検出しようとしている訳では無いので、周波数分解能よりも平滑化された結果の精度（どれだけ真のスペクトルの平均に近づいているか）を重視しなければならない。とはいえ、あまり窓幅を広くし過ぎても、SN比が高い帯域の結果に SN 比の低い帯域の結果が混じることによるノイズ増大の懸念もあるため、窓幅は評価対象周波数の 1/4 以下とする。

用いる窓関数については、矩形窓で十分である。ここでの平滑化によって得ようとしているのは、単純に周波数領域におけるスペクトルの平均値に過ぎないので、窓関数にフーリエ

変換・逆変換を施した時の性質はどうでも良い。本文の条件を満たす中で試験の実施者が使い易い窓を用いれば良い。

#### 5. 4. 2 杭頭インパルス応答および動的杭頭ばねの算出

以下の手順により、杭頭のインパルス応答を求める。

- 1) 基線ずれフレームを除去した後に残った全フレームのフレーム平均をとる。
- 2) 得られた平均の時刻歴波形をフーリエ変換して、 $P(\omega)$ と $\ddot{u}(\omega)$ または $\dot{u}(\omega)$ を得る。
- 3) 以下の通り杭頭応答変位を算出する。

- ① センサーに加速度計を用いた場合：

$$u(\omega) = -\frac{\ddot{u}(\omega)}{\omega^2} \quad (5.2)$$

- ② センサーに速度計を用いた場合：

$$u(\omega) = -i\frac{\dot{u}(\omega)}{\omega} \quad (5.3)$$

- 4) 杭頭応答変位 $u(\omega)$ と杭頭加振力 $P(\omega)$ より、クロススペクトル法<sup>例えば 5.6)</sup> (次式)を用いて杭頭のインパルス応答を推定する。

$$G(\omega) = \frac{S[u(\omega)P^*(\omega)]}{S[|P(\omega)|^2]} \quad (5.4)$$

- 5) 動的杭頭ばね $K(\omega)$ は、 $G(\omega)$ の逆数 (=  $1/G(\omega)$ ) である。

ここでの加速度から変位もしくは速度から変位への積分には、フーリエ変換を利用する。時間領域で積分を行うと、積分結果に全周波数帯域の情報が混じるので、低 SN 比帯域のノイズが高 SN 比帯域にまで悪影響を及ぼす可能性がある。一方、フーリエ変換を利用した積分であれば、周波数成分ごとの積分が出来るので、そのような懸念は無い。したがって、ここでは、フーリエ変換を利用した(5.2), (5.3)式の積分を行うべきである。加速度計の出力を積分する場合にも、周波数領域で2回積分する ((5.2)式) べきで、基線ずれの確認の際に計算した時間領域での積分による速度を流用してはならない。

クロススペクトル法の計算 ((5.4)式) は、測定系の出力にノイズが全く含まれない状況であれば、 $u(\omega)/P(\omega)$ と変わらないが、ノイズが無視できない状況では結果が変わってくる。(5.4)式の計算の方がノイズの影響が低減されるので、(5.4)式の通りに計算すること。(5.4)式は $|P(\omega)|^2$ を平滑化した結果を分母、 $u(\omega)P^*(\omega)$ を平滑化した結果を分子として比をとる計算である。平滑化や比をとる順序を間違えると、所要のノイズ低減効果が得られないので注意。

動的杭頭ばねは、本指針の範囲内では静的杭頭ばねを推定するための中間データとしての利用しか想定していないが、もし動的杭頭ばねをそのまま動的なばねとして利用する場合 (例えば機械基礎の杭が試験対象で、機械が稼働する周波数での杭頭ばねが推定したい場合など)、SN 比の推定値 (「5. 4. 3 コヒーレンス評価と SN 比推定」参照) が十分に

高い周波数帯のばねのみを利用すること。

### 5. 4. 3 コヒーレンス評価と SN 比推定

以下の通りにコヒーレンスを評価し、それを元に SN 比を推定する。

1) コヒーレンスを次式により評価する。

$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{(S[u(\omega)P^*(\omega)])^2}{S[|u(\omega)|^2]S[|P(\omega)|^2]} \quad (5.5)$$

2) 次式を用いて、コヒーレンスより SN 比を推定する。

$$\hat{R} = \frac{n_w \text{coh}^2(\omega)}{1 - \text{coh}^2(\omega)} \quad (5.6)$$

コヒーレンスの計算 ((5.5)式) も、クロススペクトル法によるインパルス応答推定の計算 ((5.4)式) 同様、掛け算、平均化、割り算の順番が重要である。順番を間違えると、まともな SN 比推定ができないので注意。

コヒーレンスから直接推定される SN 比  $\hat{R}'$  は次式の通りになる<sup>5.6)</sup>が、これにはクロススペクトル法によるノイズ低減の効果が含まれていない。

$$\hat{R}' = \frac{\text{coh}^2(\omega)}{1 - \text{coh}^2(\omega)} \quad (5.7)$$

クロススペクトル法によるノイズ低減も、フレーム平均によるノイズ低減同様、平均化回数に反比例してノイズのパワーが低減する。つまり平均化回数に比例して SN 比が向上する。クロススペクトル法における「平均化回数」とは、スペクトル平滑化に用いる窓関数の窓幅  $n_w$  であるので、クロススペクトル法によるノイズ低減も考慮した SN 比の推定値は  $\hat{R}'$  の  $n_w$  倍になる。つまり次式が成り立つ。

$$\hat{R} = n_w \hat{R}' \quad (5.8)$$

以上より、(5.6)式の SN 比推定式が導かれる。

### 5. 5 静的杭頭ばねの推定

以下の方法により、静的杭頭ばねの推定値を決定する。

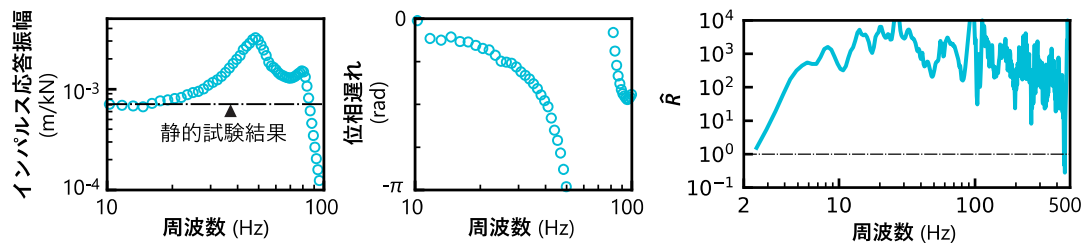
- 1) 周波数 20Hz 以下の範囲内で、かつ推定 SN 比  $\hat{R}$  が所要の SN 比  $R_r$  以上となる周波数の中で、最も低周波数における  $|K(\omega)|$  を静的杭頭ばねの推定値とする。
- 2) 周波数が 20Hz を超える領域でも以下の条件を同時に満たせば、その周波数における  $|K(\omega)|$  を静的杭頭ばねと見做してよい。
  - ① インパルス応答の位相遅れが  $\pi/4$  rad 以内である。
  - ② 20Hz 以下のどの周波数よりも推定 SN 比が高い。
- 3) いずれの方針をとる場合にも、インパルス応答変位の振幅と位相遅れの周波数特性が、

評価対象周波数近傍の帯域において、以下のような傾向（静的载荷の結果に近いことを示す傾向<sup>5.7), 5.8)</sup>を示すことを、目視で確認することが望ましい。

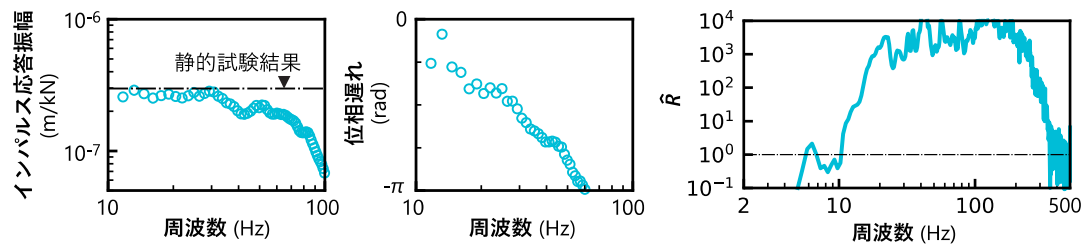
- ① インパルス応答変位振幅 $|G(\omega)|$ の変動が小さく、概ね一定値となっていること（この「一定値」が静的载荷の結果に近似する）。
- ② インパルス応答変位の位相遅れが、周波数に対して単調増加であること。また、評価対象周波数近傍の帯域における、周波数-位相遅れ関係のラインを低周波数側に延長していったときに、「0 Hz で位相遅れゼロ」となることが不自然でないようなラインが描かれていること。

本文 3)の記載が、静的杭頭ばね推定の判断基準として最も本質的で一般的な内容であるが、この内容を客観的・定量的に指針として整理することは困難なので、本文 1), 2)の判断基準を定めている。本指針の適用範囲内であれば、本文 1)もしくは 2)の判断基準で正しく推定を行うことが出来る。

図 5. 3 は杭頭インパルス応答の例である（図中「静的試験結果」は、別途実施した静的载荷試験の荷重-変位関係より求めたもの<sup>5.8)</sup>）。同図(a), (b)の結果は、応答変位に 3 桁以上の違いがある（したがって杭頭ばねにも 3 桁以上の差が生じる）が、10~20Hz 前後の帯域における周波数応答特性が本文 3)の記載の通りの傾向を示している点は共通している。また同図の周波数 -  $\hat{R}$ 関係より、10Hz 以下の低周波数領域では SN 比が低い傾向があるものの、10Hz~20Hz の帯域においては、SN 比 10 以上は確保できていることも確認できる。



(a) ばねが柔らかい例（杭径 165mm の鋼管杭の水平打撃）



(b) ばねが硬い例（杭径 1.5m の場所打ち杭の鉛直打撃）

図 5. 3 杭頭インパルス応答の例<sup>5.8)</sup>



## 5. 6 地盤反力係数の推定

推定した静的杭頭ばね $\hat{K}_0$ を用いて、以下の通りに地盤反力係数を推定できる。

- 1) 水平打撃の場合：杭頭自由条件の Chang の式を用いるが、杭の突出が大きい場合には、GL $\pm 0$ を打撃しても GL $\pm 0$ レベルの杭変位と杭頭の変位の差が無視できないため、以下の式を用いて、図5. 4のフローにより水平地盤反力係数 $s_h$ を定める。図中、誤差率の基準値 $\varepsilon_r$ について本指針では 0.05~0.001 程度を推奨値とし、要求される推定精度に応じて適宜定める。

$$\beta_{h,0} = \sqrt[3]{\frac{\hat{K}_0}{2EI}} \quad (5.9)$$

$$K_i = \frac{2EI\beta_{h,i}^3}{1 + \beta_{h,i}h} \quad (5.10)$$

$$K'_i = 2EI\beta_{h,i}^2 \frac{3 + 2\beta_{h,i}h}{(1 + \beta_{h,i}h)^2} \quad (5.11)$$

$$\beta_{h,i+1} = \beta_{h,i} + \frac{\hat{K}_0 - K_i}{K'_i} \quad (5.12)$$

ここに、 $h$ ：センサー設置位置の GL からの高さ、 $K'_i := dK_i/d\beta_{h,i}$

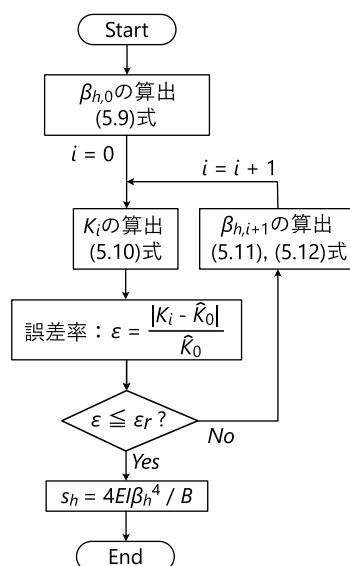


図5. 4 水平方向の地盤ばね逆算フロー

- 2) 鉛直打撃の場合：鉛直の場合は、杭頭ばねの式 ((2.6)式) が複雑なので、水平の場合のように、地盤反力係数を直接逆算することは難しい。以下、図5. 5のフローに基づくパラメータフィッティングより、杭周および杭先端地盤の平均的なせん断剛性 $\bar{G}$ を求め、 $\bar{G}$

より鉛直地盤反力係数 $s_v$ と杭先端の地盤ばね $K_b$ を定める。図中、誤差率の基準値 $\varepsilon_r$ について本指針では 0.05~0.001 程度を推奨値とし、要求される推定精度に応じて適宜定める。

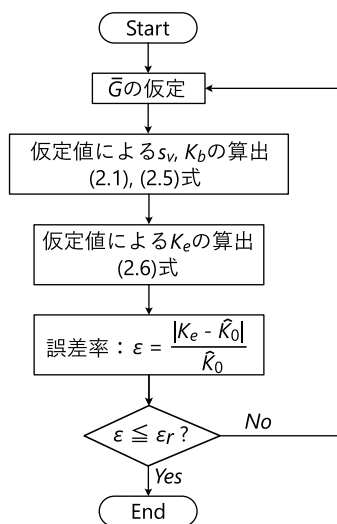


図 5. 5 鉛直方向の地盤ばね逆算フロー

3) 深度ごとに地盤ばねを変えた弾性支承梁モデルや多層地盤に杭が打設されている形でモデルを作成した FEM を用いてパラメータフィッティングを行っても良い。

杭頭ばねをそのまま利用することもできるが、杭頭ばねから地盤反力係数および杭先端の地盤ばねを逆算しておけば、それらの地盤ばねに、既往の研究に基づく一般的な非線形特性(例えば 5.9)を付加して杭頭ばねを再計算することで、大ひずみ領域における杭頭の荷重-変位関係を推定することができる(「付録 2. 応用例: 杭頭ばねの外挿」参照)。この結果より、例えば杭の支持力推定や大地震時の負担水平力推定などもできるであろう。

水平打撃については、GL±0 を打撃しても、GL±0 レベルにおける杭の傾斜角×センサーの設置高さの分だけ、突出長ゼロの杭よりも大きな変位が生じるので、その影響を考慮しなければならない場合がある(図 5. 6 参照)。杭頭自由の Chang 式の GL±0 位置の変位を $u_0$ 、そこから $h$ 上にずれたセンサー位置での変位を $u_s$ とすると、 $u_0, u_s$ はそれぞれ次のように書けるので、 $\beta_h h + 1 \approx 1$ と見なせない( $\beta_h h \ll 1$ でない)ような柔らかくて突出長の長い杭は突出の影響を無視できない。

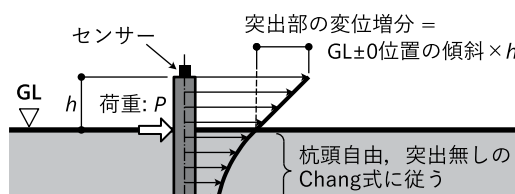


図 5. 6 センサー設置位置の高い杭の杭頭変位の模式図

$$u_0 = \frac{P}{2EI\beta_h^3} \quad (5.13)$$

$$u_s = u_0 + \frac{P}{2EI\beta_h^2} h = u_0 + u_0\beta_h h = (1 + \beta_h h)u_0 \quad (5.14)$$

(5.14)式より、突出を考慮した静的杭頭ばねは(5.10)式の通りになる。水平地盤反力係数を逆算するためには、(5.10)式の左辺に  $\hat{K}_0$  を代入し、それと右辺の値が等しくなるような  $\beta_h$  を求めれば良い。図5.4は、ニュートン法<sup>例えば5.11)</sup>を用いて  $\hat{K}_0$  に整合する  $\beta_h$  を求め、水平地盤反力係数を決定する手順を示している。 $\beta_h$  の初期値 (5.9)式) は、突出の影響を無視した場合の  $\beta_h$  であり、ループを重ねるほど、突出の影響がより正確に反映された  $\beta_h$  が求まるようになっていく。また突出の影響が小さい条件下では、初期の  $\beta_h$  に対して  $\varepsilon \approx 0$  となるので、繰り返し計算は必要なくなる。 $\hat{K}_0$  に整合する  $\beta_h$  は、(5.10)式を  $\beta_h$  に関する3次方程式と見なし、3次方程式の解の公式を用いることによっても求めることができるが、3次方程式の解の公式は非常に複雑で計算間違いをしやすいので、利用を推奨しない。

鉛直打撃については、本文2)にもある通り、杭頭ばねの理論式が複雑な形をしており、ニュートン法の適用でさえ困難である。そこで本指針では、図5.5の通り、試行錯誤で  $\bar{G}$  を調整することにより地盤反力係数を求めることを推奨する。最終的に十分に小さい誤差率の小さい  $\bar{G}$  が得られれば調整手順は問わないが、自動化したい場合は、想定される  $\bar{G}$  の上限と下限を定めた上で二分法<sup>例えば5.11)</sup>により解を求めるようにすれば良い。なお鉛直打撃における突出部の影響は、突出部の杭の軸縮みとしてしか表れないので、無視できる。

本文3)については、無制限に多層地盤のパラメータを変化させてフィッティングしようとしても、解が一意に定まらないことに注意が必要である。このアプローチをとる場合は、試験対象の杭が打設されている敷地地盤の情報や地盤剛性一般に関する既往の知見<sup>例えば5.10)</sup>を利用して地盤(ばね)のモデル化に関するルール・制限を設定し、何らかの単一の調整パラメータが決まると、後は設定したルールに従って多層地盤のパラメータが全て決まるようにすると良い。具体的なルールの例としては、「PS検層結果から求まる地盤ばねを基本として、そのばね値にかける全層一律のばね低減率を調整パラメータとする」などが挙げられる。

## 参考文献

5. 1) MathWorks: “MATLAB”, <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html> (2020年8月25日参照)
5. 2) R Foundation: “The R Project for Statistical Computing”, <https://www.r-project.org/> (2020年8月25日参照)
5. 3) Python Software Foundation: “python”, <https://www.python.org/> (2020年8月25日参照)
5. 4) SciPy developers: “SciPy.org”, <https://www.scipy.org/> (2020年8月25日参照)
5. 5) Hsu, P. H. (村崎憲雄, 間多均, 飽本一裕 共訳): 「マグローヒル大学演習 信号処理 (I)」, オーム社, 1998
5. 6) 金井浩: 「音・振動のスペクトル解析」, コロナ社, 1999
5. 7) Gazetas, G. and Dobry, R.: “Horizontal response of piles in layered soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, Issue 1, pp. 20–40, 1984
5. 8) 成田修英, 福田健, 小阪宏之, 久世直哉, 飛田喜則, 岸本剛, 小川敦, 富田祐介, 内田崇彦, 大沼満, 川幡栄治, 阿部秋男, 新井寿昭, 沼本大輝, 佐藤武: 「人力加振による杭頭のインパルス応答を用いて弾性領域における杭頭の静的ばねを推定する方法」, *日本建築学会構造系論文集*, 第 86 卷, 第 779 号, 2021. 1 (印刷中)
5. 9) 日本建築学会: 「建築基礎構造設計指針」, 日本建築学会, 2019
5. 10) 太田裕, 後藤典俊: 「横波速度を推定するための実験式とその物理的背景」, *物理探鉱*, 第 31 卷, 第 1 号, pp. 8–17, 1978
5. 11) 三井田淳郎, 須田宇宙: 「数値計算法」, 森北出版, 2014

## 第6章 記録

試験が本指針に則って適切に実施されたことを証明するため、少なくとも以下項目を記録に残し保管する。

- 1) 試験場所（現場住所、杭配置）
- 2) 試験対象杭および地盤（杭種、直径、長さ、質量、杭 No.、突出長さ、杭頭はつりの有無、地層構成など）
- 3) 試験日時
- 4) 試験実施者（計測担当者、試験結果の整理担当者）
- 5) 試験条件
  - ① 測定条件（サンプリングレート、打撃の時間間隔）
  - ② 打撃回数  $n_s$  の設定根拠
  - ③ ノイズに関する現地調査結果
- 6) 使用した試験装置
  - ① インパルスハンマー
  - ② センサー
  - ③ ロガー
- 7) 試験方法
  - ① 打撃方法
  - ② センサー設置位置及び方法
  - ③ 測定方法
- 8) 試験結果
  - ① 時刻歴波形
  - ② 杭頭インパルス応答波形
  - ③ 動的杭頭ばねの算定結果
  - ④ 静的杭頭ばねの推定値とその根拠
  - ⑤ 地盤反力係数の推定値とその根拠
- 9) その他
  - ① 試験装置の校正記録
  - ② 本基準と部分的に異なる方法を用いた場合には、その内容
  - ③ 計測生データ（電子媒体に保存）およびデータ処理の内容（基線ずれ補正など）
  - ④ その他特記すべき事項

試験位置の地盤に関する情報がある場合には、併せて記録を残す必要がある。使用する試験装置は過去2年以内に校正されたものであることが望ましい。（計量法校正事業者登録制度（JCSS）<sup>6.1)</sup>による）

本試験結果より大ひずみ領域における杭頭の荷重－変位関係を推定する場合には、用いた仮定条件を明示する。

#### 参考文献

6. 1) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構: 「計量法校正事業者登録制度 (JCSS)」,  
<https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/index.html> (2020 年 10 月 14 日参照)

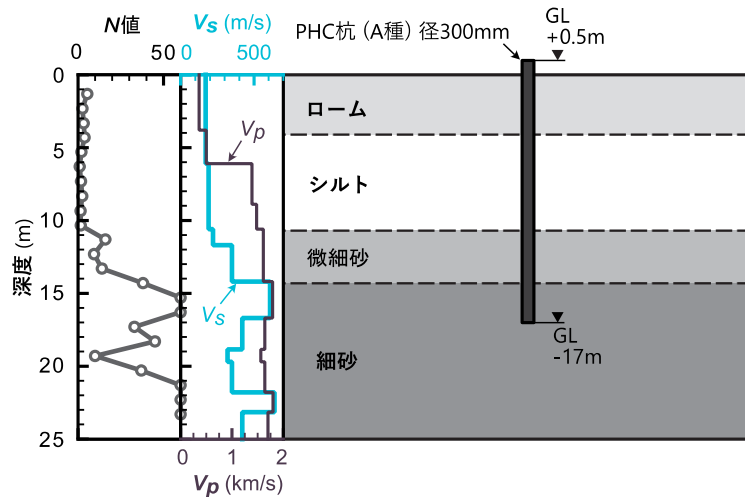
## 付録

### 付録 1. 実施例

ここでは、千葉県船橋市某所にて実施した事例について説明し、本文に記載した一連の試験手順を確認する。この事例では静的載荷試験も実施しているため、静的載荷試験と簡易載荷試験の比較も示す。

#### 付録 1. 1 地盤と杭の条件

付図 1. 1 に地盤と杭の条件を示す。評価対象となる杭は、GL-14.2m 以深の細砂層を支持層とする杭径 300mm の PHC 杭 (A 種) である。これを鉛直に打撃し、鉛直方向の杭頭ばねを推定する。



付図 1. 1 地盤と杭の条件

#### 付録 1. 2 所要 SN 比 $R_r$ の設定

試験結果から得られるばねに対して、安全率 3 を設定して使用するものとし、ノイズの標準偏差が、安全率によって担保される余裕度の 1/5 以下となるように所要 SN 比  $R_r$  を設定することを考える（「安全率 3」も「余裕度の 1/5 以下」も、この事例における値であり、標準値というわけではない。本文に記載の通り、ケースバイケースで適切に設定すること）。このとき、 $R_r$  は次式の条件を満たさなければならない。

$$\frac{1}{\sqrt{R_r}} \leq (3 - 1) \times \frac{1}{5} \quad (\text{付 1.1-a})$$

これを整理すると、次のようになる。

$$R_r \geq 6.25 \quad (\text{付 1.1-b})$$

(付 1.1-b) 式の条件に対しさらに余裕を見て、 $R_r = 10$  とする。

### 付録1. 3 杭頭ばねの想定

杭頭ばねの事前想定は、仕様の異なる複数の杭を試験の対象とする場合に試験計画上の杭の分類をすることが主な目的である（本文2章にも記載の通り）。この事例のように、評価対象となる杭の仕様が単一の場合には、ばねの想定は特に必須では無いが、仕様の異なる複数の杭を対象とする場合の参考として、手順を確認しておく。

まず PS 検層結果より、せん断剛性の深度分布を計算する（PS 検層を実施しない場合には、本文2章記載の通り、常時微動アレイ探査もしくはN値による経験式を用いる）。結果は、付表1. 1の通りである。

付表1. 1 地盤諸元

No.	層厚 $H_i$ (m)	せん断波速度 $V_{st}$ (m/s)	密度 $\rho_i$ (t/m <sup>3</sup> )	ポアソン比 $\nu_i$	せん断弾性係数 $G_i$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	3.8	170	1.4	0.357	$4.0 \times 10^4$
2	2.3	170	1.4	0.435	$4.0 \times 10^4$
3	2.8	190	1.4	0.490	$5.1 \times 10^4$
4	1.7	190	1.4	0.492	$5.1 \times 10^4$
5	1.1	220	1.7	0.490	$8.2 \times 10^4$
6	2.5	350	1.7	0.475	$2.1 \times 10^5$
7	2.3	610	1.9	0.434	$7.1 \times 10^5$

また杭の諸元は、ヤング率  $4.0 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>、断面積  $4.52 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup> である。以上諸元を本文(2.1)～(2.8)式に代入して計算すると、杭頭ばねの想定値は、 $K_a = 6.1 \times 10^5$  kN/m となる。

### 付録1. 4 予備測定，兼本測定

この事例は、予備測定を実施し、予備測定で所要のSN比 $R_r$ が確保できたため追加測定は無しルートで測定を実施している（本文図2. 1および2. 5節参照）。本指針作成前の事例であるため、予備測定における打撃回数は20回ではなく10回であるが、SN比は確保できているので問題ない。

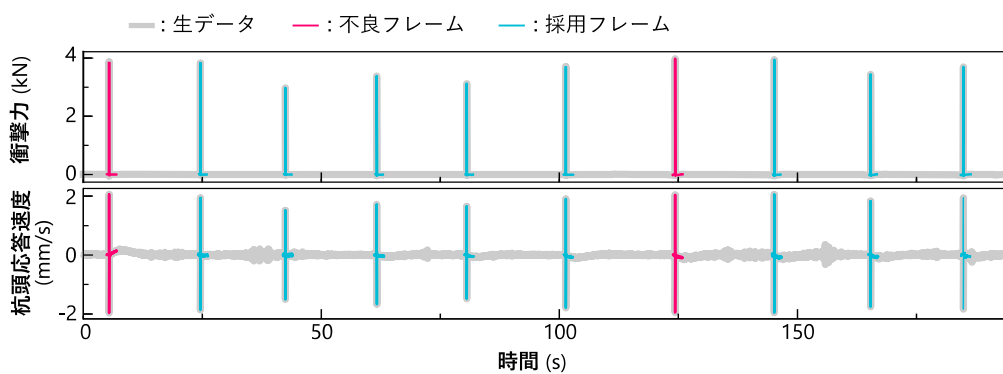
予備測定として、センサー系には速度計：東京測振社製 VSE-15D-6、アンプ・ロガー一体型システム：東京測振社製 SPC-52 の組み合わせを、インパルスハンマーには PCB 社の 086D50 を用い、杭頭部に正三角形に3つのセンサーを固定して測定を行った（付図1. 2参照）。打撃回数は10回である。この予備測定およびフレーム切り出しの結果を、付図1. 3に示す。同図の結果において、杭頭応答速度は杭頭に固定された3つのセンサー（付図1. 2参照）の平均値であり、またフレーム長は2.048秒（ $t_b = 0.5$ 秒， $t_a = 1.548$ 秒）、基線ずれの判定基準は5%（本文(5.1)式の $\varepsilon$ が0.05）を用いている。付図1. 4は、付図1. 3の「採用フレーム」とその平均を重ね書きした結果である。同図より、各フレームの波形の



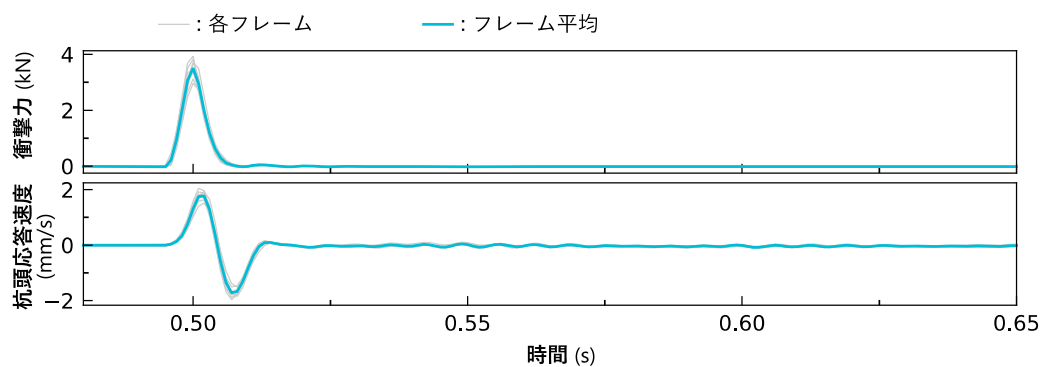
特徴は概ね一致しており、安定した結果が得られていることが分かる。



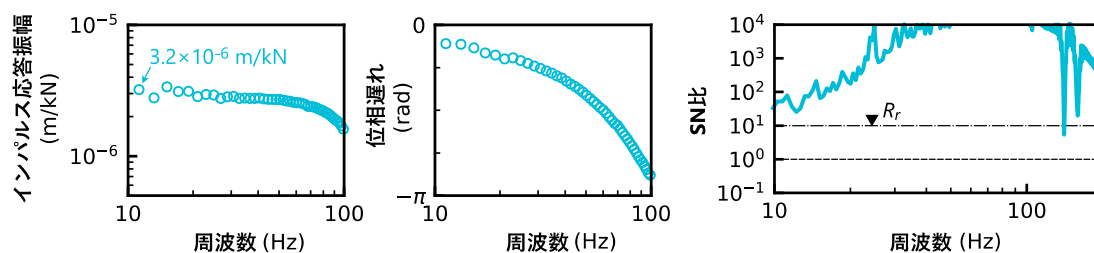
付図1. 2 センサー設置状況



付図1. 3 予備測定およびフレームの切り出しの結果



付図1. 4 フレームの切り出しの結果およびその平均（ピーク値前後の時間帯引き伸ばし）



付図1. 5 インパルス応答およびSN比

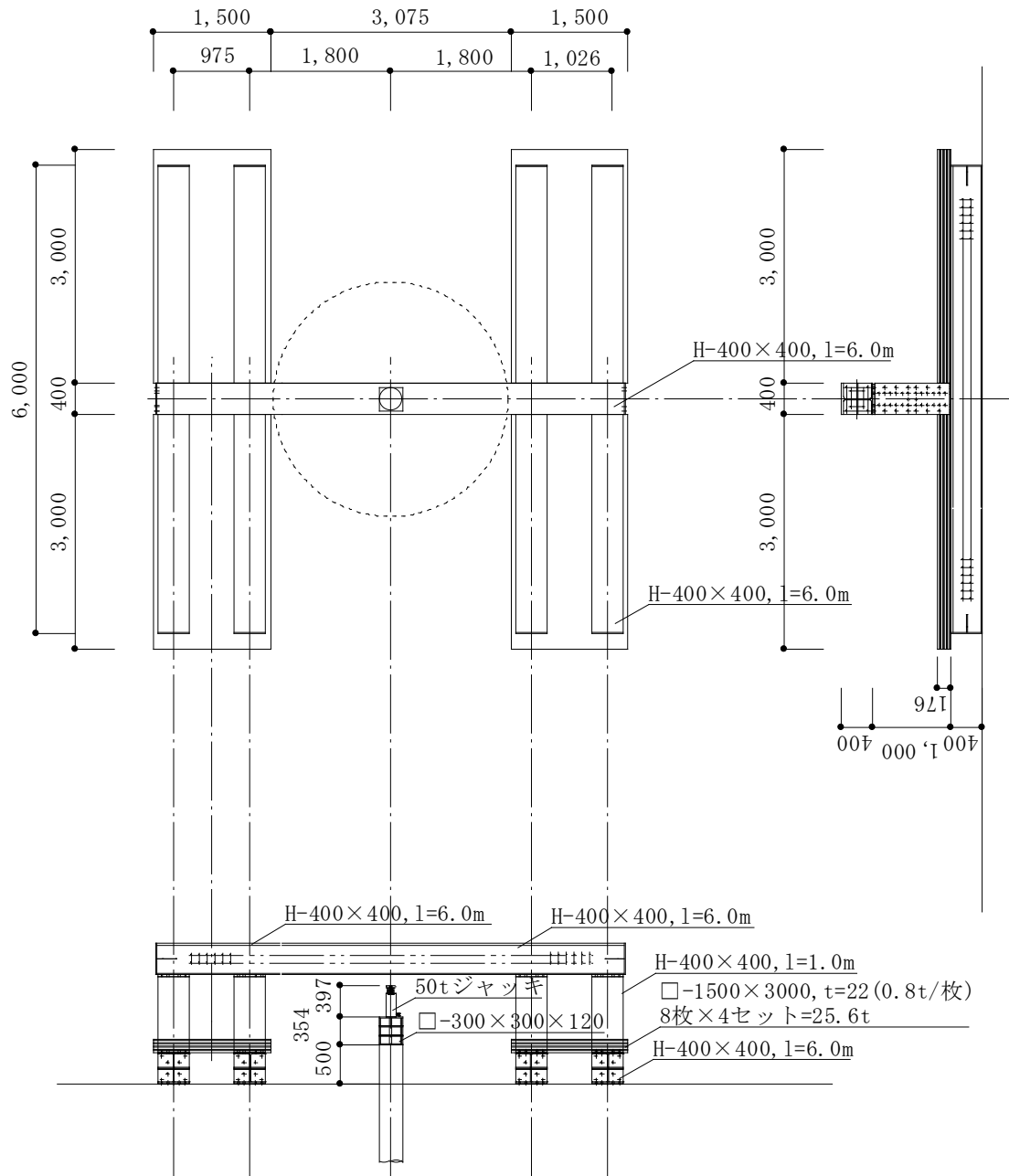
フレーム平均の時系列データをフーリエ変換して、本文5. 4節の手順により、幅2.5HzのParzen窓を用いてインパルス応答とSN比を求めた結果が、付図1. 5である。同図において、10HzでのSN比は所定の値( $R_r = 10$ )を満足しており、追加の測定は必要ないことが分かる。また、本文5. 5節記載の条件を満足することも確認できる。以上結果より、静的杭頭ばねの推定値 $\hat{R}_0$ は、10Hzにおけるインパルス応答 $3.2 \times 10^{-6} \text{ m/kN}$ の逆数、 $3.1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ となる。

なお、仮に10HzでSN比100を満足しようとした場合、10Hzにおける推定SN比 $\hat{R} = 52$ なので、本文(2.12)式より、 $n'_s = \text{ceil}(8 \times 100 / 52) = 16$ である。したがって、10HzでSN比100を満足しようとした場合には、最低でも $2 \times (16 - 8) = 16$ 回の追加の打撃が必要となる。

#### 付録1. 5 静的載荷試験結果との比較 (参考)

地盤工学会の指針<sup>付1)</sup>に従い、付図1. 6の装置にて静的載荷試験も実施した。載荷方式は、連続載荷であり、10kN/分の載荷速度で300kNまで載荷した。付図1. 7は、その載荷状況である。

以上、静的載荷試験から得られる杭頭の荷重-変位関係を、簡易載荷試験から推定される初期勾配と併記して付図1. 8に示す。同図より、静的載荷試験における荷重-変位関係の初期勾配と、簡易載荷試験から推定される初期勾配は、良く整合することが確認できる。



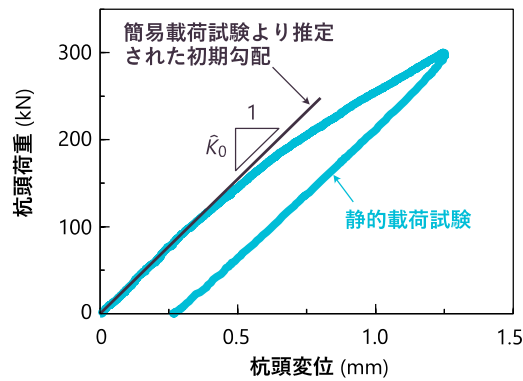
No	名称	規格・寸法	重量(t)	数量	総重量(t)
①	桁1	H-400×400×6000	1.03	5	5.15
②	桁2	H-400×400×1000	0.17	4	0.68
③	台座	□-360* 400* 118	0.11	3	0.33
④	ジャッキ	500kN	0.04	1	0.04
⑤	敷鉄板	5×10(3.0m×1.5m)	0.8	32	25.6

合計 31.8 t

付図 1. 6 静的載荷試験：載荷装置図



付図 1. 7 静的載荷試験：載荷状況



付図 1. 8 静的載荷試験結果と簡易載荷試験結果の比較

## 付録 2. 応用例：杭頭荷重－変位関係の外挿

杭の地盤ばねに関する既往の知見<sup>例えば付 2), 付 3)</sup>を用いれば、簡易載荷試験から得られる杭頭ばねの初期値を外挿して、大ひずみ領域の杭頭ばねを推定することが可能である。そのばねを用いることで、支持力や沈下量の推定も可能になる。推定値のばらつきを考慮した適切な安全率を設定すれば、既存杭の再利用のための性能評価に用いることも可能であろう。

### 付録 2. 1 検討の条件

引き続き付録 1 の条件で検討を行う。

### 付録 2. 2 地盤反力係数および杭先端地盤ばねの推定

付表 1. 1 のせん断弾性係数を全層一律 0.26 倍に低減させて計算すると、杭頭ばね推定値  $K_e = 3.1 \times 10^5$  kN/m となり、簡易載荷試験の結果と一致した結果が得られる。このとき

杭周面の鉛直地盤反力係数 $s_v = 1.8 \times 10^5$  kN/m<sup>3</sup>、杭先端の地盤ばね $K_b = 1.8 \times 10^5$  kN/m となる ( $s_v$ と $K_b$ は同じ数値になっているが、偶然である。書き間違いでない)。以下、これらの値 ( $s_v = 1.8 \times 10^5$  kN/m<sup>3</sup>、 $K_b = 1.8 \times 10^5$  kN/m) を地盤ばねの初期値として用いる。

## 付録 2. 3 地盤ばねの非線形特性の仮定

日本建築学会の基礎構造設計指針<sup>(付2)</sup>より、地盤ばねの非線形特性を以下の通りに仮定する。

### 1) 杭周面地盤ばね

杭周面地盤ばねの非線形特性は、完全弾塑性型バイリニア・モデルに従うものとし、杭径の1%の変位、つまり3mmの変位で折れ点に達するものとする。したがって、単位長さあたりの杭周面の最大抵抗力は、 $1.8 \times 10^5 \times 0.3 \times 0.003 \doteq 1.6 \times 10^2$  kN/mとなる。

### 2) 杭先端地盤ばね

基礎構造設計指針<sup>(付2)</sup>に従い、高野ら<sup>(付3)</sup>の提案する次式により、杭先端地盤ばねの非線形特性を表すものとする。

$$\frac{\delta}{0.1B} = \alpha \frac{R}{R_u} + (1 - \alpha) \left( \frac{R}{R_u} \right)^n \quad (\text{付 2.1-a})$$

ここに、 $\delta$ : 杭先端の変位、 $R$ : 杭先端の地盤反力、 $R_u$ : 杭先端の極限地盤反力(変位 $\delta = 0.1B$ 時を極限として)、 $\alpha$ 、 $n$ : 地盤ばねの非線形特性を調整するパラメータ(ただし $n > 1$ )

非線形性を考慮した杭先端の地盤ばねを $K_b(\delta)$ と置くと、 $R = K_b(\delta)\delta$ なので、 $K_b(\delta)$ を用いて、(付 2.1-a)式は次のようにも整理できる。

$$\frac{1}{0.1B} = \alpha \frac{K_b(\delta)}{R_u} + (1 - \alpha) \left( \frac{K_b(\delta)}{R_u} \right)^n \delta^{n-1} \quad (\text{付 2.1-b})$$

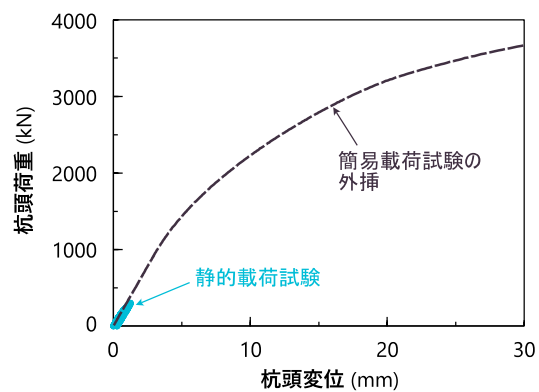
ここで、検討の対象としている杭は既製杭であり、支持層は砂層なので、基礎構造設計指針より、 $\alpha = 0.28$ 、 $n = 3.9$ を用いることができる。また、簡易載荷試験結果より $K_b(0) = 1.8 \times 10^5$  kN/mが既知であるので、 $\delta = 0$ を(付 2.1-b)式に代入して整理すると、 $R_u$ も次式の通りに定まる。

$$R_u = 0.1\alpha BK_b(0) = 0.1 \times 0.28 \times 0.3 \times 1.8 \times 10^5 \doteq 1.5 \times 10^3 \text{ (kN)} \quad (\text{付 2.2})$$

以上より、(付 2.1-a)、(付 2.1-b)式に含まれる未知定数 $\alpha$ 、 $n$ 、 $R_u$ が全て定まる。したがって、 $\delta$ と $R$ の関係および $\delta$ と $K_b(\delta)$ の関係も一意に定まる。

## 付録 2. 4 簡易載荷試験から得られた杭頭ばねの外挿

付録 2. 3 で設定した非線形地盤ばねを用いて、荷重伝達法<sup>(付2)</sup>により杭頭の荷重-変位関係を計算すると、付図 1. 9 の通り、大ひずみ領域における杭頭ばねが推定できる。



付図1. 9 簡易載荷試験から得られた杭頭ばねの外挿

#### 参考文献

- 付1) 地盤工学会: 「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 (第一回改訂版)」, 地盤工学会, 2002
- 付2) 日本建築学会: 「建築基礎構造設計指針」, 日本建築学会, 2019
- 付3) 高野昭信, 青木一二三, 小粥庸夫, 小笠原政文: 「第1限界荷重, 第2限界荷重の意義と特徴について」, 杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 47-54, 1991