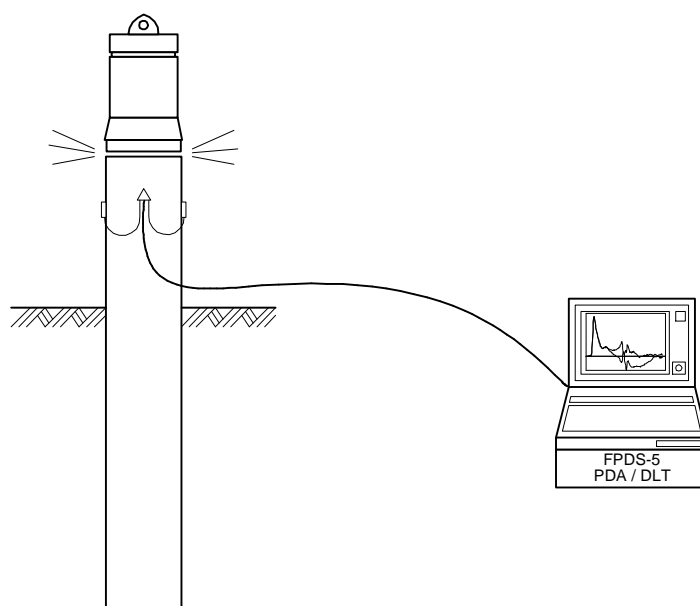


PDA・DLT

動的計測による
杭打ちモニタリング (PDA)
衝撃載荷試験 (DLT)



2007年

多摩火薬機工株式会社

はじめに

動的計測とは、杭にハンマーによる打撃力を与え、その時の杭頭での発生応力、速度を計測し、一次元波動理論に基づいて解析することにより、地盤の貫入抵抗力、透過ハンマーエネルギー、杭体の発生応力等の情報を得る計測手法である。

動的計測は、杭の施工時に、ハンマー効率、発生応力、打ち止め管理のための貫入抵抗力をモニタリングする目的で実施される**杭打ちモニタリング(PDA : Pile Driving Analysis)**と、杭施工後に養生期間を経て再び杭に打撃力を与え(リドライブ)地盤の貫入抵抗力を測定し、解析を経て静的貫入抵抗力を求める**衝撃載荷試験(DLT : Dynamic Loading Test)**に分けられる(表1参照)。

現在、杭の打ち止め管理は、Hileyの式、道路橋示方書式等の動的支持力式により行われている。これらの式は理論的には正しいものであるが、一般性を高めるために係数として平均値的なものが採用されており、個々の現場でそのまま用いる場合は誤差が大きくなる危険がある。そこで動的計測を行い、実際の打ち込み中の杭の貫入抵抗力を測定することにより、より精度の高い打ち止め管理を実現することが出来る。

また衝撃載荷試験は、打ち込み杭の現場であれば、容易に低コストで行える簡易載荷試験法であり、静的載荷試験と比較して、解析により間接的に支持力を求めるため、精度は落ちるが、容易に複数の杭に実施することができる。

表1 動的計測の目的

区 分	実施時期	実 施 目 的
杭打ちモニタリング PDA	施工時	地盤抵抗、ハンマー効率、杭体応力のモニタリング
衝撃載荷試験 DLT	養生後 再打撃時	地盤の静的抵抗(支持力)の解析

表 2 打ち止め管理手法の比較

	道路橋示方書	Hiley 系の式			衝撃载荷試験	
式	$Ra = \frac{1}{3} \left(\frac{AEK}{e_0 L_1} + \frac{NUL_2}{ef} \right)$ <p>Ra : 杭の許容支持力(tf) A : 杭の断面積(m²) E : 杭のヤング係数(tf/m²) L₁ : 杭の先端からの測定位置(m) L₂ : 地中に打ち込まれた杭長(m) U : 杭の周長(m) N : 杭周面の平均N値 K : リバウンド量(m) e₀, ef : 補正係数</p>	<p>(簡略式)</p> $Ru = \frac{ef \cdot WH \cdot H}{S + \frac{1}{2}K}$ <p>Ru : 杭の極限支持力(tf) ef : ハンマー効率(0.5) WH : ラム重量(tf) H : ハンマーの落下高(ディーゼル 2H) S : 貫入量(cm) K : リバウンド量(cm)</p>	<p>(建設省告示式)</p> $Ru = \frac{F}{5S + 0.1}$ <p>Ru : 杭の極限支持力(tf) F : ハンマーの打撃エネルギー(tfm) ドロップハンマー : WH ディーゼルハンマー : 2WH S : 貫入量(m)</p>	<p>(IHC 提案式)</p> $Ru = \frac{f \cdot En}{S + \frac{1}{2}K}$ <p>Ru : 杭の極限支持力(MN) f : ハンマー効率(2.5) En : ハンマーエネルギー(kJ) S : 貫入量(mm) K : リバウンド量(mm)</p>	<p>(CASE 法)</p> $Rr = F \downarrow(t) + F \uparrow(t + 2L/c)$ $Rs = R - Rd$ <p>R_T : 全貫入抵抗力 R_S : 静的貫入抵抗力 R_d : 動的貫入抵抗力 F_T(t) : 杭頭での打撃入力波 F_T(t+2L/c) : 打撃波が杭体を 1 往復した後の杭頭での反射波</p>	<p>(シグナルマッチング解析)</p> 
採用基準	道路橋示方書 (日本道路協会)	建築鋼杭基礎設計施工基準(日本建築学会), 港湾の施設の技術上の基準動解説(日本港湾協会)	建設省告示第 111 号 (S46.1.29)	IHC		
基本理論	一次元波動理論	エネルギー平衡式			一次元波動理論	
測定物理量	杭頭の変位 (リバウンド, 貫入量)	杭頭の変位 (リバウンド, 貫入量)			杭頭のひずみ, 加速度	
測定方法	おもに手書き	おもに手書き			ひずみ計, 加速度計	
概要	宇都らが一次元波動理論に基づいて, 実験から地盤のリバウンドと貫入量が等しい, 打ち込み中の周面摩擦力は無視する等の仮定を設けて, 算出したもの。式の第 1 項は, 打ち込み中の先端抵抗で, 第 2 項は, N 値から求められる静的な周面抵抗である。	杭を剛体として, 極限支持力が打撃時の貫入抵抗に等しいと仮定し, 損失を除いた有効エネルギーが, 杭が抵抗に抗して貫入するときになす仕事, および杭, 地盤, キャップなどの弾性変形するときになす仕事に費やされることとして, エネルギーの平衡式を立て導かれたもの。			一次元波動理論の一般解を用いて, 杭頭に与えた打撃による入力波と, それが杭体を 1 往復して戻ってきた反射波との和が, 地盤の抵抗と釣り合うとして, 地盤の全貫入抵抗力を計算する。	杭を弾性体 地盤の抵抗をバネとダッシュポットでモデル化し, 一次元波動理論の一般解を用いて 杭体を伝播する応力波を特性曲線により解析し 打撃時の地盤の抵抗を動的成分と静的成分に分離し推定する。地盤回復後の再打撃データの解析により 静的支持力を高い精度で推定できる。
問題点	<ul style="list-style-type: none"> 打ち込み中の周面の抵抗を無視していること。 地盤のリバウンド量と杭の貫入量を等しいとしているため, 貫入量が多い場合は合わない。 抵抗の動的成分を無視していること。 地盤の回復(セットアップ)を考慮していない。 	<ul style="list-style-type: none"> 杭を剛体とみなしていること。 打撃エネルギーをハンマーの落下高さで与えており, 実際の透過エネルギーと誤差を生じること。 式の形から, 貫入量が小さい場合は, 支持力がハンマーエネルギーにより決まること。 地盤の回復(セットアップ)を考慮していない。 IHC の提案式は, IHC 系のハンマーがダブルアクション式で, ハンマーエネルギーが従来の油圧式ハンマーより大きく, ハンマー効率も高いため, 経験的に簡略式のエネルギー効率を 2.5 としたもので, 理論的根拠は薄い。 			<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムで地盤の全貫入抵抗力を計算できるが, 静的貫入抵抗力を求めるためには, 適切な補正係数を与えなければならない。 	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムでの解析ができない。 理論的には静的载荷試験に近い結果が得られる。
実験杭ハンマー	コンクリート杭(PHC-A) : 300~600, L15~16m 鋼管杭: 500~800, L16m ハンマー: 油 圧 7.2tf 以下 ディーゼル 4.5tf 以下	杭を剛体とみなせる長さの杭 ハンマーの打撃効率がわかっていることが必要。			現状のすべての杭種, ハンマーについて, 適用可能。	

1. 衝撃載荷試験の概要

1.1 衝撃載荷試験法の特徴

衝撃載荷試験とは、載荷荷重として杭頭にハンマーによる打撃力を与え、その時の杭頭での発生応力、速度を計測し、一次元波動理論に基づいて解析することにより、地盤の静的な貫入抵抗力を推定する簡易載荷試験手法である。

ハンマーで杭に打撃力を与えた場合、杭体の挙動は静的に載荷した場合と異なり(図 1-1)、衝撃載荷試験時の杭頭の載荷荷重と変位から、静的な荷重に対する杭の荷重～沈下挙動を直接導くことはできない。衝撃載荷試験では、一次元波動理論に基づいた解析により、間接的に地盤の静的貫入抵抗力を推定し、それにより静的な荷重に対する杭の挙動(荷重～沈下曲線)を求める。したがって、静的載荷試験と比較して、間接的な手法を用いるため、精度は落ちるが、簡易に経済的に複数の杭に実施することができるメリットがある。

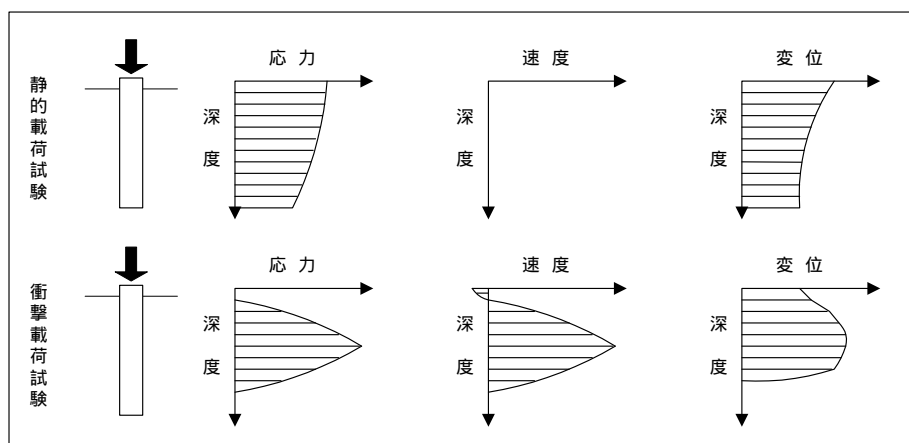


図 1-1 載荷試験時の杭の挙動

1.2 計測システム

計測には、ひずみ計と加速度計からなる衝撃载荷試験システムを使用する。システムはトランスデューサ(加速度計・ひずみ計)とシグナル・コンディショナおよびコンピュータから構成される。図 1-2 に計測イメージを、また表 1-2 にシステムの仕様、使用機材を示す。

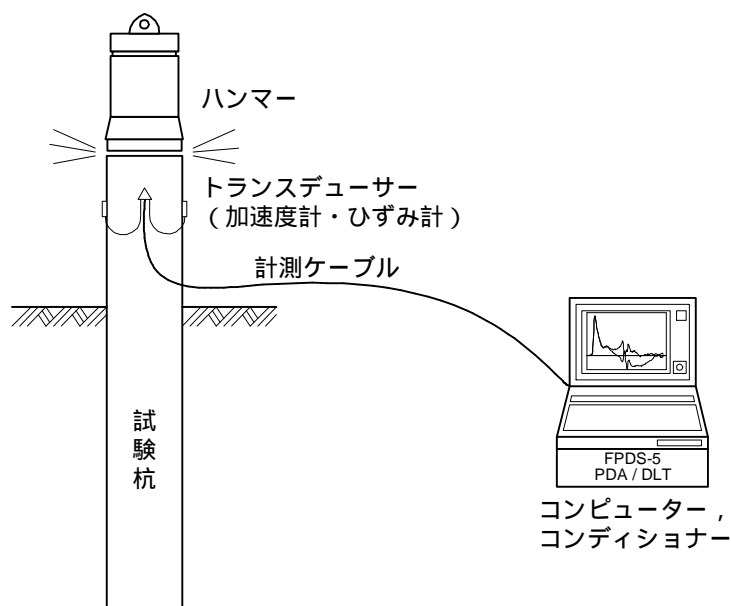


図 1-2 計測システム概要

表 1-2 システム仕様・使用機材

	名 称	仕 様	数量	メーカー
1	データロガー	サンプリング周波数：10KHz	1	東京測器
2	一体型トランスデューサ ：ひずみ計 ：加速度計	1000～3000 μ m/m 1000～5000 G	2	応用計測工業
3	計測ケーブル	40/80m シールドケーブル	1	
4	プログラム	データ処理(CASE 法)	1	
5	プログラム	シグナルマッチング解析	1	
6	データ処理用コンピュータ	IBM 互換機	1	Compaq
7	計測小屋, 又は計測車	窓付き	1	
8	電源	AC100V, 50/60Hz	1	

1.3 衝撃载荷試験の計測

1.3.1 トランスデューサの取り付け

トランスデューサは、杭頭から $2D \sim 3D$ 離れた位置に、2 個 1 組で軸対称に取り付ける。取り付けにあたり、あらかじめ所定の位置に 2 箇所ずつ穿孔し、タップを切っておく。図 1-3 にトランスデューサの取り付け状況を示す。

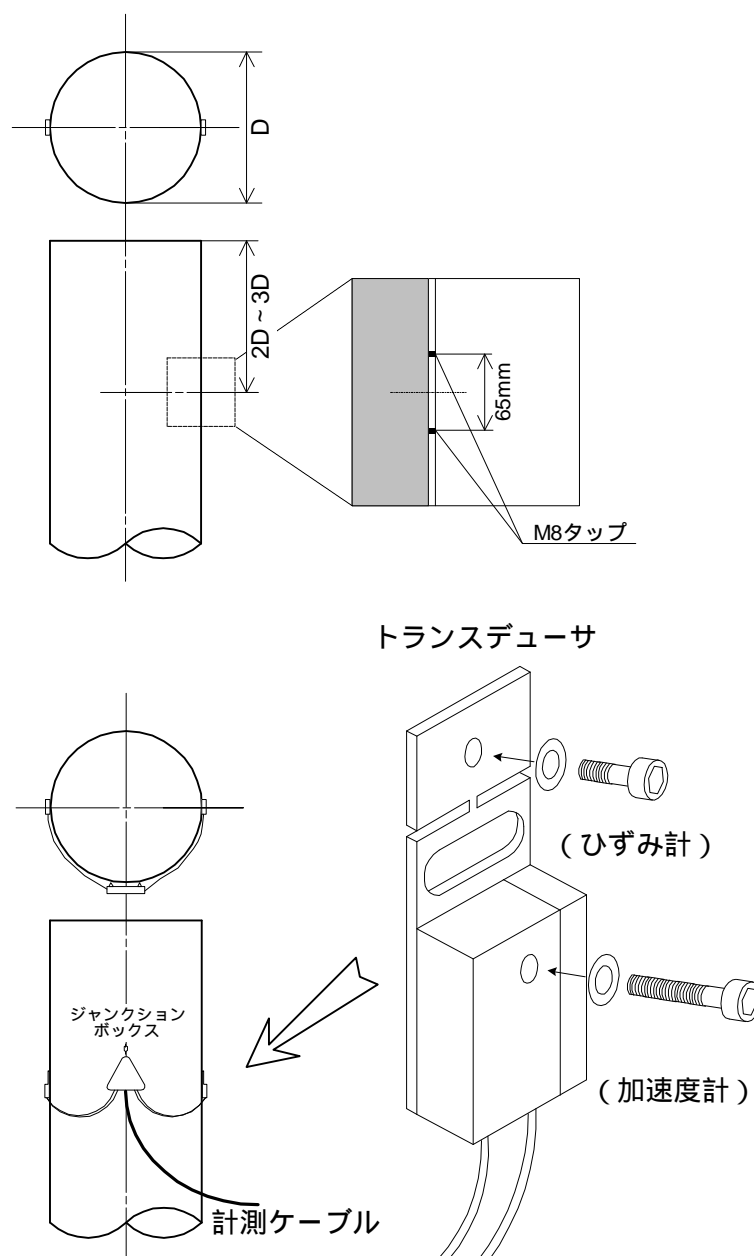


図 1-3 トランスデューサの取り付け状況

1.3.2 計測

計測は、杭施工時に実施するの PDA と、施工後養生期間において地盤の回復後に実施する再打撃時の DLT に分けられる。表 1-3 に標準的な計測要領を示す。

表 1-3 計測要領

計測区分	計測深度	計測打撃数	ハンマーエネルギー
施工時 (PDA)	トランスデューサ 取り付け深度から	打ち止めまで	適宜
再打撃時 (DLT)	施工時の打ち止め深度	杭が沈下するまで (通常 10～30 打撃)	打ち止め時の 落下高以上

1.3.3 トランスデューサの取り外し

計測終了後、トランスデューサとジャンクションボックス(計測ケーブル)を取り外し回収する。

1.4 計測データ

1.4.1 計測波形

衝撃载荷試験においては、杭頭に取り付けたトランスデューサ(ひずみ計, 加速度計)により、杭体に発生する時間軸上のひずみ, 粒子加速度を計測する。

計測値 杭体軸方向ひずみ : $\varepsilon(t)$

杭体軸方向粒子加速度 : $\alpha(t)$

計測値からひずみにヤング係数 E , 断面積 A_p を乗じた力と, 加速度を時間積分した速度が計算される(図1-4)。

杭体軸力 : $F(t) = A_p \cdot E \cdot \varepsilon(t)$

粒子速度 : $v(t) = \int \alpha(t) dt$

さらに, 力 F と速度 v から, 入力波 F と反射波 F を求める。入力波はハンマーの载荷荷重を, 反射波は地盤の抵抗状態を, それぞれ表現している(図1-5)。

入力波 : $F \downarrow (t) = \frac{(F(t) + Z \cdot v(t))}{2}$

反射波 : $F \uparrow (t) = \frac{(F(t) - Z \cdot v(t))}{2}$

Z : インピーダンス($= \frac{E \cdot A_p}{c}$, E : ヤング係数, A_p : 断面積, c : 応力波速度)

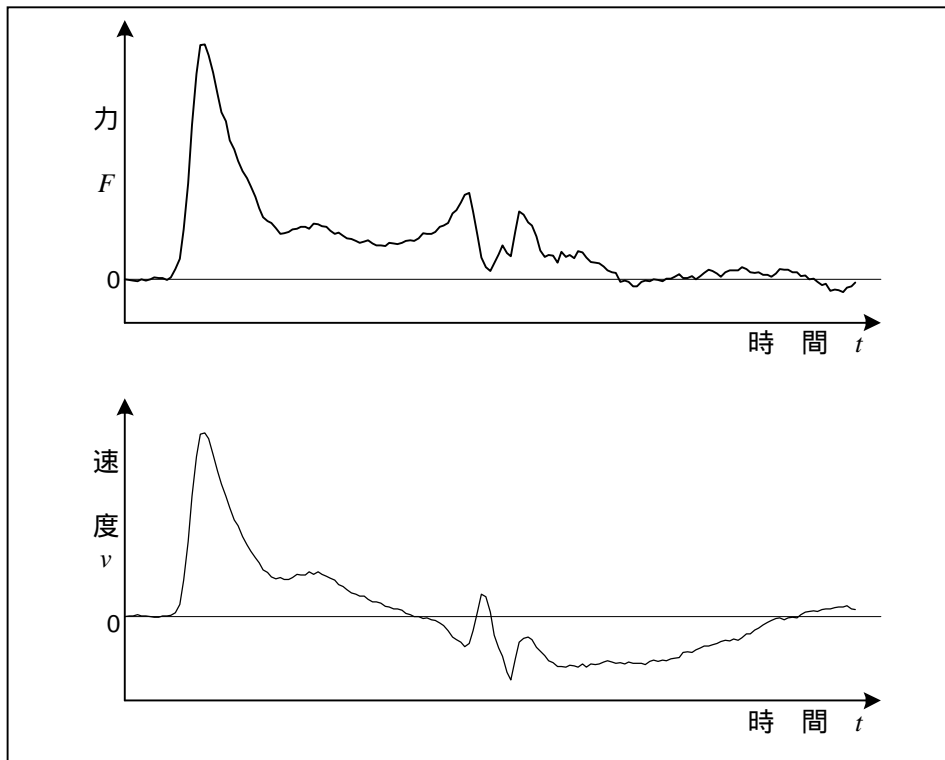


図 1-4 計測データ(力, 速度)

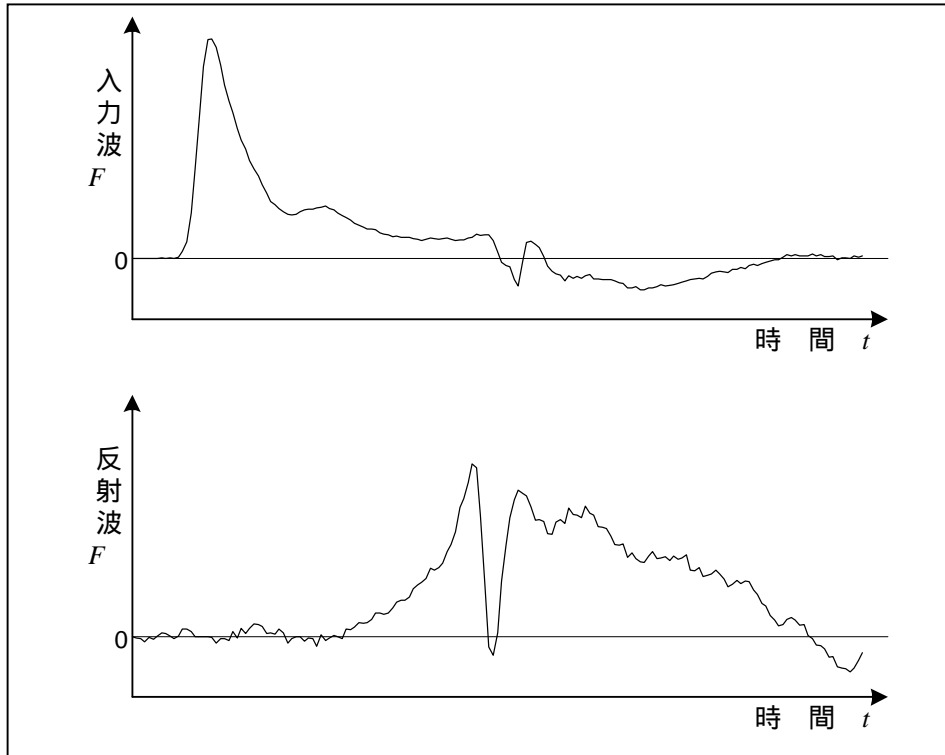


図 1-5 計測データ(入力波, 反射波)

1.4.2 リアルタイム解析(CASE法)

一次元波動理論の一般解を用いて、杭頭に与えた打撃による入力波と、それが杭体を1往復して戻ってきた反射波との和が、地盤の抵抗と釣り合うとして、地盤の全貫入抵抗(静的貫入抵抗+動的貫入抵抗)を計算する(図1-6)。さらに、伝達エネルギー、杭体応力、偏打率等も計算できる。杭の静的貫入抵抗力は、全貫入抵抗力のうちの動的成分を補正して求める。ただし、適切なCASEダンピングを決める必要があり、有効な地盤の情報を得られない場合は、静的貫入抵抗力の計算は行わない。これらの計算は計測時にリアルタイムででき、結果(Monitoring Results)は1打撃ごとの計測波形と同時に計測用コンピュータ画面に表示される。

$$R_T = F(t) + F(t+2L/c)$$

$$R_s = R_T - R_d$$

$$R_d = J_c * Z * V_b$$

$$V_b = \frac{2F(t_{max}) - R}{Z}$$

- R_T : 地盤の全(貫入)抵抗
 R_s : 地盤の静的貫入抵抗(=静的支持力)
 R_d : 地盤の動的貫入抵抗
 $F(t)$: 杭頭での打撃入力波
 $F(t+2L/c)$: 打撃波が杭体を1往復した後の杭頭での反射波
 J_c : CASEダンピング
 Z : 杭の機械的インピーダンス
 V_b : 杭先端の速度
 $F(t_{max})$: ハンマーの打撃力の最大値

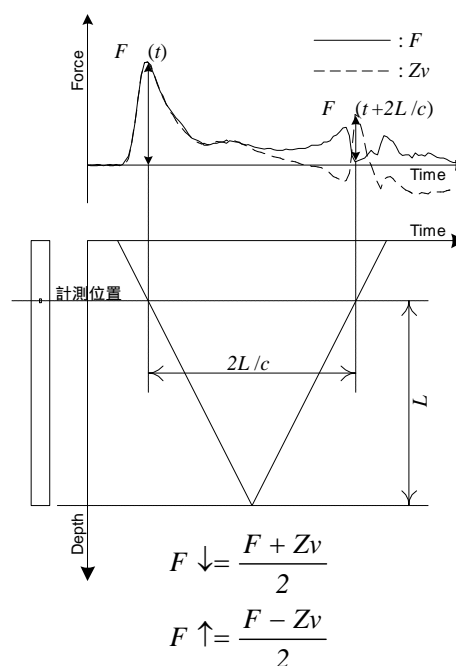


図 1-6 リアルタイム解析(CASE法)の概要

1.5 シグナルマッチング解析(詳細解析)

杭を弾性体, 地盤の抵抗をバネ, スライダー(弾塑性)とダッシュポットでモデル化(図1-7)し, 一次元波動理論に基づいて, 杭体を伝播する応力波を特性曲線(図1-8)により解析する。

まず, 測定された力 F と速度 v から, 入力波 F と反射波 F を求める。入力波はハンマーの载荷荷重を, 反射波は地盤の抵抗状態を, それぞれ表現している。

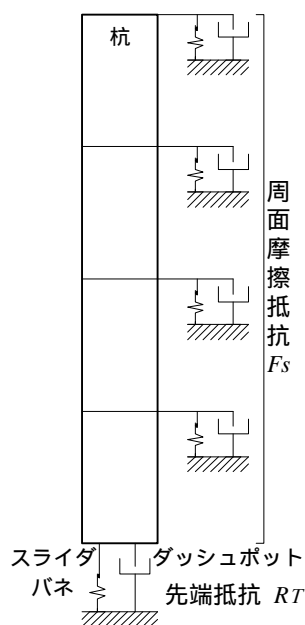


図 1-7 杭地盤系のモデル

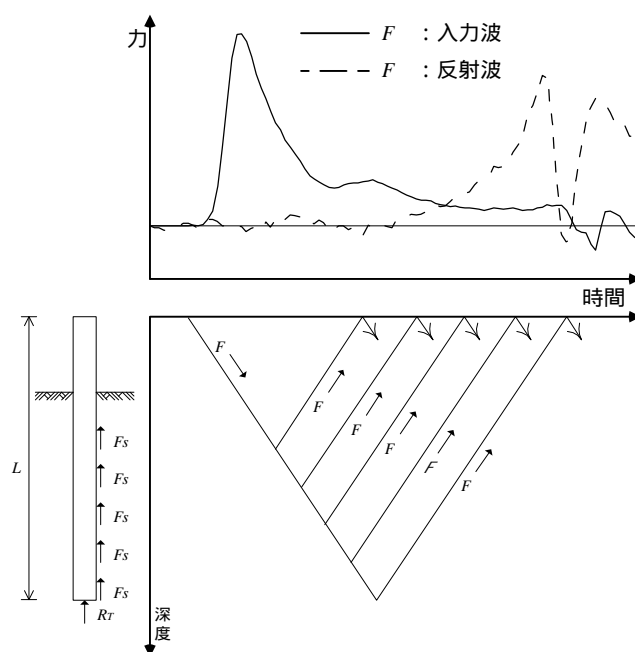


図 1-8 特性曲線による波動伝播

測定から得られた入力波 F (力)を境界条件として, 杭体中の応力の伝播を特性曲線により計算し, 計算上の反射波を得る。計算反射波形と測定反射波形を比較し, 両者が一致するまで地盤パラメタを変化させる。計算と測定が一致したときのパラメタが, 実地盤が発揮した抵抗挙動を表現していることになる。このようにして, 衝撃载荷試験時の地盤の抵抗を解析することができる。この手法をシグナルマッチング解析と呼ぶ。図1-9にマッチング解析のフローを示す。

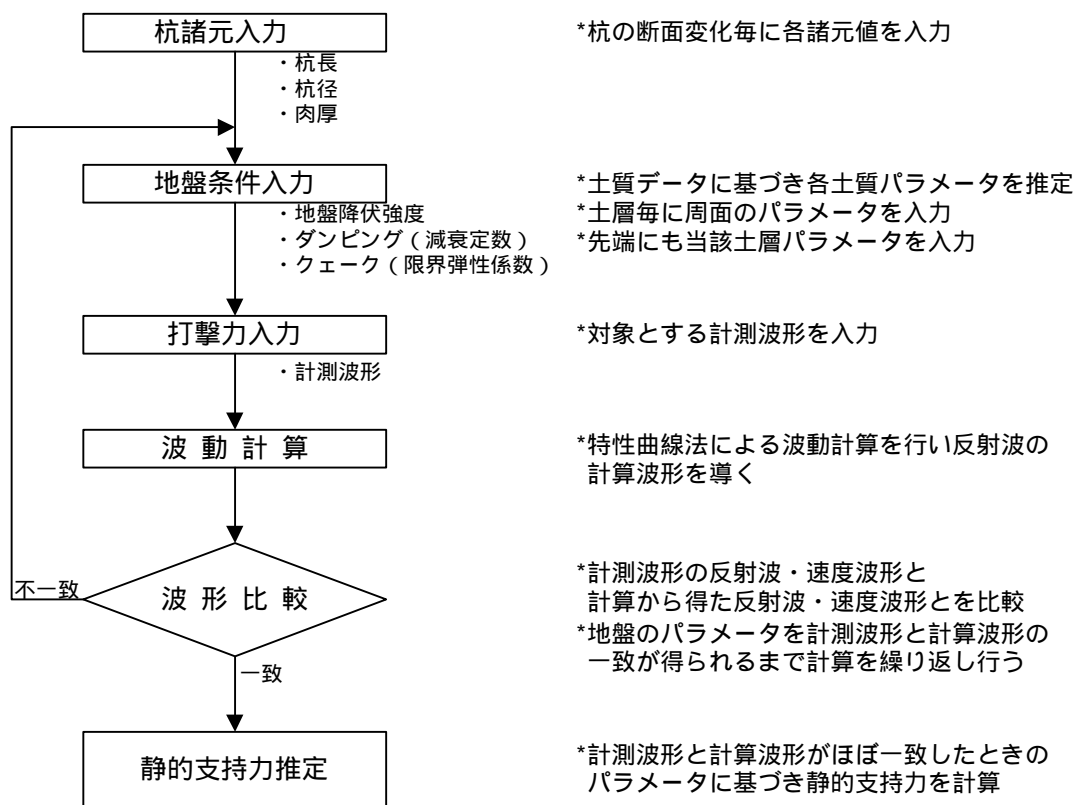


図 1-9 シグナルマッチング解析のフロー

1.6 静的な荷重～沈下曲線の推定

シグナルマッチング解析で得られた地盤パラメタのうち、バネ、スライダ－を静的な成分として、図1-10に示す杭～地盤モデルを仮定し、荷重伝達法により杭頭での静的な荷重～沈下曲線を求める(図1-11)。

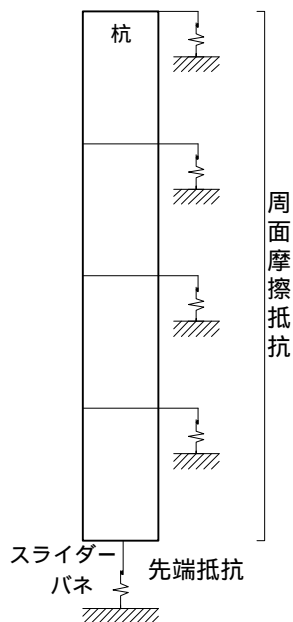


図 1-10 荷重伝達法の杭～地盤モデル

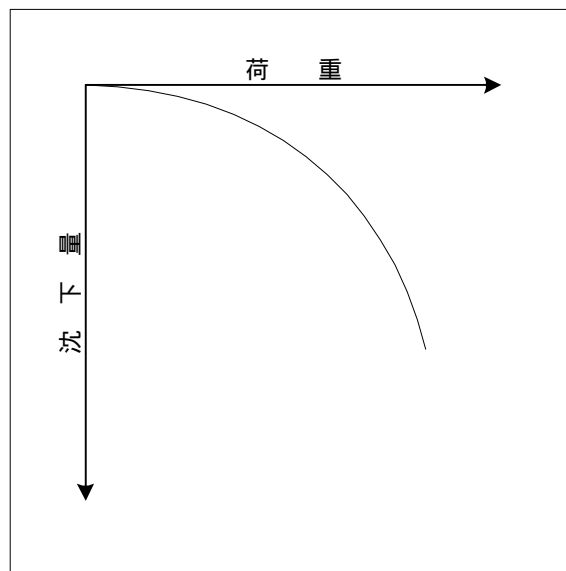


図 1-11 荷重伝達法による静的荷重～沈下曲線

1.7 一次元波動理論の概要

1.7.1 一次元波動方程式

杭の打撃応力波伝播理論とは、杭に発生する応力 σ 、変位 u についてSt.Venantによって明らかにされている。

弾性一次元棒(杭)中の応力とひずみの関係(フックの法則)により、

$$\sigma(x,t) = E \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \quad (1)$$

また、微小要素 dx の運動方程式は

$$\rho \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = A \{ \sigma(x+dx,t) - \sigma(x,t) \} \quad (2)$$

(1)式より

$$\begin{aligned} \rho \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} &= E \left\{ \frac{\partial u(x+dx,t)}{\partial x} - \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right\} \\ &= E \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \end{aligned}$$

以上から

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

式(3)が一般に波動方程式と呼ばれているもので、双曲型の2階の偏微分方程式が得られる。

ここで E は杭材の縦弾性係数、 x は距離、 A は杭の断面積、 ρ は杭材の密度である。また、 $c^2 = \frac{E}{\rho}$ で c は波速とよばれる。

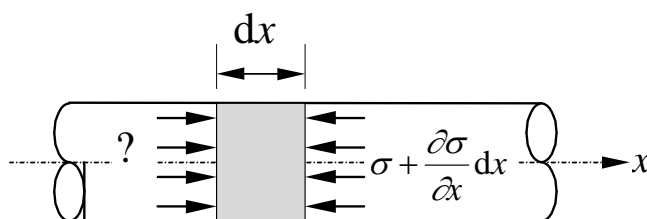


図 1-12 一次元棒中の力の釣り合い

1.7.2 波動方程式の一般解と特性曲線による波動伝播

(1) 上昇波(反射波), 下降波(入力波)

式(3)の一般解は, D'Alembert によって, 次式で与えられている。

$$u = f(x - c \cdot t) + g(x + c \cdot t) \quad (4)$$

ここで関数 f と g は任意の関数で, それぞれ杭体を下降する波形と上昇する波形を表している。

一方, ひずみ速度はそれぞれ変位 u を用いて, 式(5), (6)で示される。圧縮ひずみを正として,

$$\varepsilon = -\frac{\partial u}{\partial x} = -f' - g' \quad (5)$$

$$V = \frac{\partial u}{\partial t} = -cf' + cg' \quad (6)$$

断面力とひずみの関係式 $F = EA\varepsilon$ を適用すると, 式(5), (6)は

$$F = -EAf' - EA g' = F \downarrow + F \uparrow \quad (7)$$

$$V = -cf' + cg' = V \downarrow + V \uparrow \quad (8)$$

ここで,

- $F \downarrow$: 下降する断面力波形
- $F \uparrow$: 上昇する断面力波形
- $V \downarrow$: 下降する速度波形
- $V \uparrow$: 上昇する速度波形
- E : 杭の弾性係数
- A : 杭の断面積

式(7), (8)から断面力波形と速度波形の関係として次式が導かれる。

$$F \downarrow = ZV \downarrow \quad (9)$$

$$F \uparrow = -ZV \uparrow \quad (10)$$

ここで, Z は杭断面の機械的インピーダンスで, $Z = \frac{EA}{C}$ である。

したがって $F \downarrow$ と $F \uparrow$ を測定される断面力 F と速度 V で表現すると, 以下のようになる。

$$F \downarrow = \frac{(F + ZV)}{2} \quad (11)$$

$$F \uparrow = \frac{(F - ZV)}{2} \quad (12)$$

式(11), (12)を用いて, 打撃時に測定される断面力波形と速度波形より, 下降波と上昇波を分離することが可能となる。下図に示すように特性曲線上で下降波(入力波)と上昇波(反射波)に分離できることとなる。

(2) 境界面における反射と透過

図 1-13 に示すように, 断面の異なる杭 1 と杭 2 が連続している境界面に応力波が到達すると, 応力波の反射と透過が生じる。杭 1 の波速度を c_1 , 密度を ρ_1 , ヤング率を E_1 , 断面積を A_1 , インピーダンスを Z_1 で表す。杭 2 のそれらを c_2 , ρ_2 , E_2 , A_2 , Z_2 で表す。力と速度の連続性($F_1 = F_2$, $v_1 = v_2$)から, 力に関して次の式が成立する。

$$F \uparrow_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot F \downarrow_1 \quad (13)$$

$$F \downarrow_2 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot F \downarrow_1 \quad (14)$$

ここで, 応力に関する反射係数および透過係数は次のように定義される。

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad \beta = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

以上のような応力波の反射と透過は, ハンマーと杭頭との接触面, ハンマー上端面および杭先端においても生ずる。ハンマー上端面のような自由端に応力波が到達した場合, $Z_2 = 0$ であるため, $\alpha = -1$, $\beta = 0$ の値を持つ。

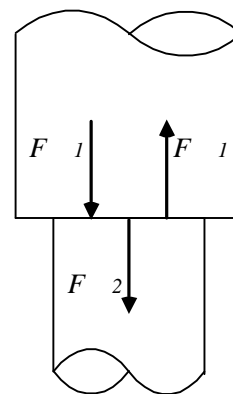


図 1-13 境界面での応力波の伝播

(3) 周面に外力が作用する場合

外力 F_s が作用する断面での波動の伝播は, 境界面における反射と透過現象と同様に力と速度の連続性($F_1 = F_2$, $v_1 = v_2$)から力に関して次の関係が成立する。

$$F \uparrow_1 = F \uparrow_2 + \frac{FS}{2} \quad (15)$$

$$F \downarrow_2 = F \downarrow_1 - \frac{FS}{2} \quad (16)$$

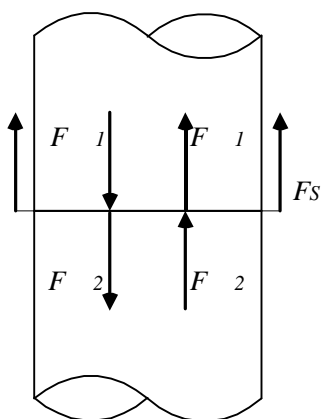


図 1-14 外力が作用する場合の応力波の伝播

(4) 先端に抵抗力が作用する場合

図 1-15 のように杭の先端に、抵抗 R_P が作用する場合は、力の釣り合いから次の関係が成立する。

$$F \downarrow_P + F \uparrow_P = R_P \quad (17)$$

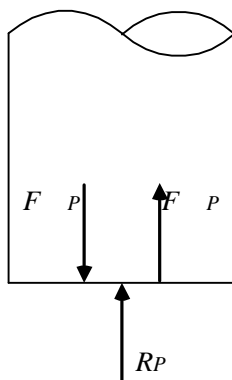


図 1-15 杭先端での応力波の伝播

2. 動的計測・衝撃載荷試験による施工管理

2.1 施工管理の考え方

従来、杭の打ち止め管理は Hiley の式、道路橋示方書式等の動的支持力式により行われている。これらの式は理論的には根拠のあるものであるが、一般性を高めるために係数として平均値的なものが採用されており、個々に地盤、施工の条件の違う工事に対し、そのまま用いる場合は誤差が大きくなる危険がある。そこで衝撃載荷試験を実施し、静的載荷試験またはスタナミック試験の結果と併せて、工事の地盤、施工条件における打ち止め挙動（貫入量、リバウンド）と支持力の相関を把握する。そして施工管理のために Hiley の式を基にして本工事施工条件に適合した貫入量、リバウンドによる打ち止め管理式を導き、その式により本杭の支持力管理を行う。

施工管理式の基本的考え方は、杭の打ち止め状態と載荷試験結果（スタナミック、動的）の相関を求め、その結果からエネルギー平衡式に基づいた施工管理式を作成し、その管理式により、杭全数の施工管理を行うものである。

杭の施工管理式は、杭の打ち止め時の抵抗から、杭の使用時の静的支持力を求めようとするもので、そのためには、杭の打ち止め時の全貫入抵抗値から静的抵抗を抽出し、さらに施工時の地盤の乱れを考慮して、地盤回復率（セットアップ率）を乗じなければならない。これを式で表すと以下の通りとなる。

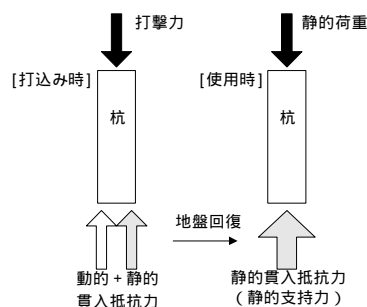
$$R_s = R_T \times S_r \times S_t$$

R_s : 静的貫入抵抗

R_T : 全貫入抵抗

S_r : 静的抵抗比

S_t : セットアップ率



全貫入抵抗の計算は、エネルギー平衡式からなる Hiley の簡略式を基本とし、施工時の貫入量・リバウンド、ハンマーエネルギーを用いてセットアップ後の静的貫入抵抗を計算する。管理式は以下の通りとなる。

$$R_s = R_T \times S_r \times S_t$$

R_s : 静的貫入抵抗

$$R_T : \text{全貫入抵抗} = e \frac{E_h}{S + \frac{K}{2}} \times C_f$$

（ e : ハンマー効率, S : 貫入量, K : リバウンド量, E_h : ハンマーエネルギー）

C_f : 換算係数

S_r : 静的抵抗比（全貫入抵抗に対する静的貫入抵抗の比）

S_t : セットアップ率

換算係数 C_f は、Hiley の式の仮定である剛体モデルによる誤差、エネルギーの杭体内でのロス、その他の誤差を調整するための係数である。

式の作成にあたっては、急速載荷試験、衝撃載荷試験の解析の結果から静的抵抗比、セットアップ率、ハンマー効率、換算係数を求め、管理式を導く。一般杭(非試験杭)の支持力管理は貫入量・リバウンド、ハンマーエネルギー($W \cdot h$ または、ハンマーの表示エネルギー)を計測値として、使用時の静的貫入抵抗を求める。

管理を実施するうえで中核となる管理項目は、施工中の貫入量 S 、リバウンド量 K 、ハンマーエネルギー Eh 等である。これらの計測値から施工管理式によって得られる静的貫入抵抗力が、設計上で要求される静的支持力を満足するか否かで品質の合否がなされる。

R_s C_d

R_s : 静的貫入抵抗

C_d : 設計上の静的支持力

2.2 品質設計

図 2-1 に、動的計測、衝撃载荷試験による杭の品質設計のフローを示す。衝撃载荷試験結果の解析において、载荷試験結果(静的、準静的(スタナミック))を参照することにより、解析の精度を向上させる。衝撃载荷試験は、精度向上のため複数実施することが望ましい。

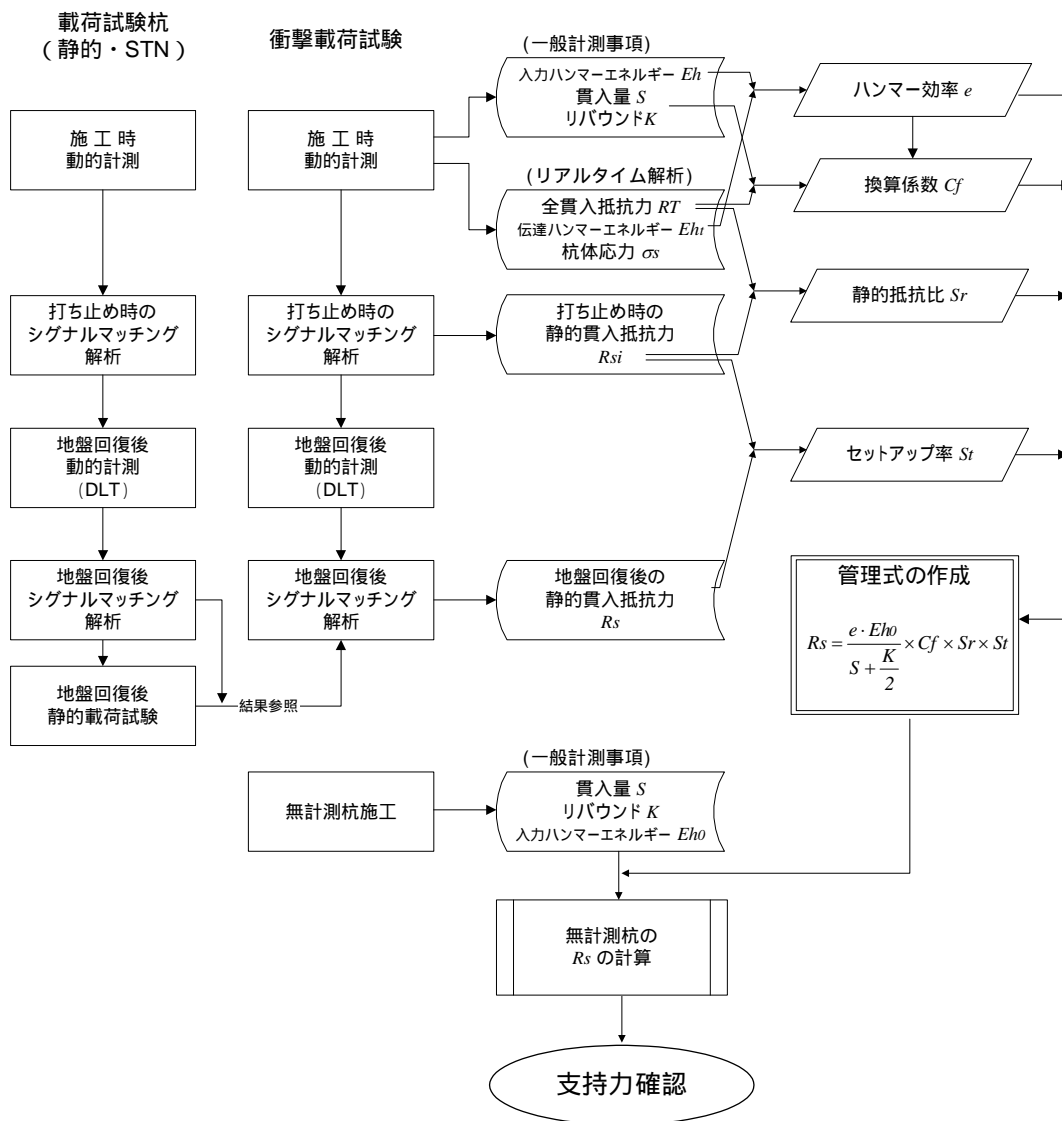


図2-1 杭の品質設計のフロー-A
《衝撃载荷試験 + 載荷試験(静的, スタナミック)》

2.3 施工管理の水平展開

参照可能な載荷試験結果を有する近隣、同類の工事においては、衝撃載荷試験のみを実施することにより、品質設計(図2-2)を行うことで、施工管理の水平展開が可能となる。

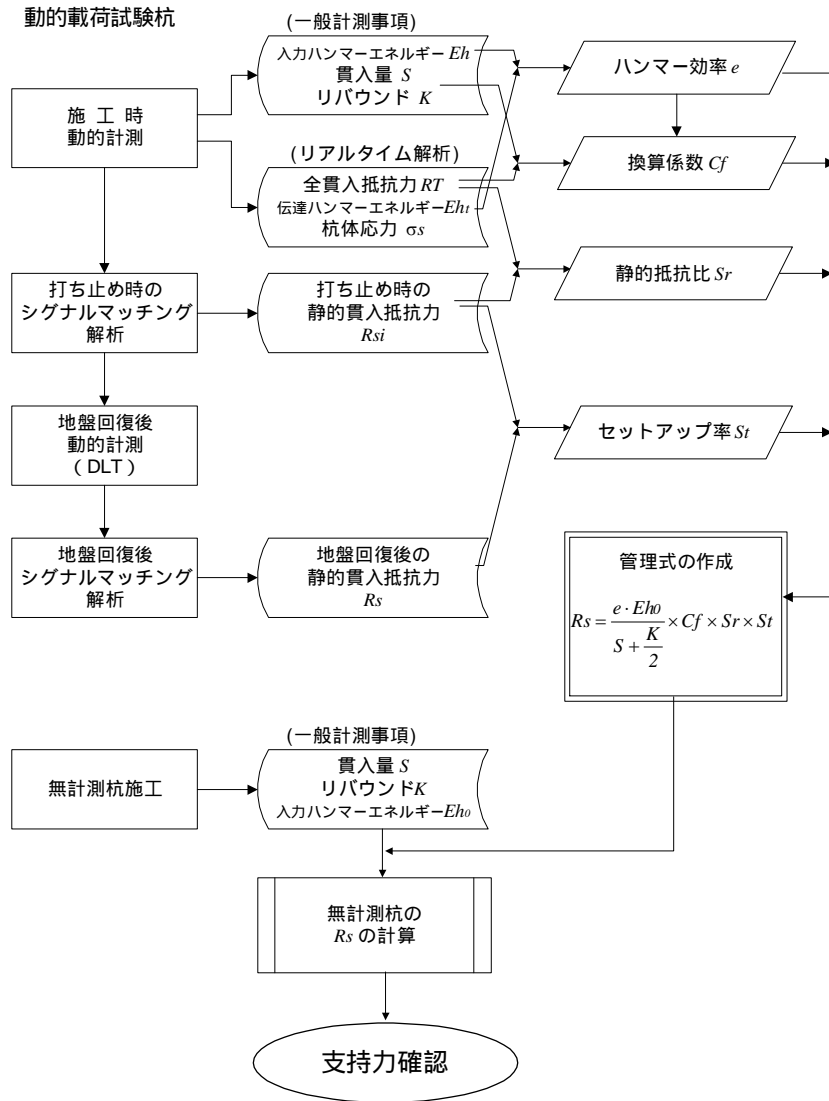


図2-2 杭の品質設計B
《衝撃載荷試験のみ》

おわりに

1) 動的計測・衝撃載荷試験の適用性

動的計測, 衝撃載荷試験の適用目的・機能は, 施工管理における杭の施工モニタリング, 支持力照査および静的載荷試験の代替である。

・施工管理における杭の施工モニタリング, 支持力照査

動的計測による杭の施工モニタリングの主な目的は, 杭体の応力チェック, ハンマーの性能確認(打撃力, ハンマー効率)であり, これらは従来, 確認不可能であったものであるが, 施工上重要な管理項目である。また, 施工時の杭, ハンマーの実挙動の計測は, 現場において有効な情報を与えるだけでなく, 後の施工計画, 杭体の設計に反映できる。

打ち止め管理(支持力照査)は, 打ち止め時の杭, ハンマーの挙動から, 構造物完成時の静的貫入抵抗力を求め, 設計上要求される静的支持力と照査することである。打ち止め時に杭が受ける地盤の全抵抗力から, 静的貫入抵抗を推定するためには, 地盤の動的挙動と静的挙動の相関, 施工時の地盤の乱れの回復(セットアップ)を考慮しなければならない。理論的には, 非常に複雑な問題を取り扱う必要がある。従来の動的支持力式は, 理論的根拠を持ちながらも, 計測値として, 入力ハンマーエネルギー(多くは, ラム重量×落下高), リバウンドおよび貫入量を前提として, 打ち止め時の杭の挙動と静的載荷試験の単純な比較から経験的に作成されており, 計算される値は, 理論的根拠の薄いものとなる。

動的計測, 衝撃載荷試験は, 一次元波動理論に基づいた計測, 解析により, 出来るだけ現象に忠実に, 地盤の全貫入抵抗力から地盤回復後の静的貫入抵抗力を導き, さらにその結果をエネルギー平衡式に基づいた管理式に反映させることにより, 精度の高い支持力照査となっている。

・静的載荷試験の代替

衝撃載荷試験の特徴として, ハンマーの打撃力を載荷荷重とすることから, 杭に与える変位量は, 静的載荷試験と比較して小さい。したがって, 一般的に衝撃載荷試験により, 地盤の貫入抵抗力の極限值まで確認することはできない。したがって, 衝撃載荷試験を静的載荷試験の代替として適用する場合は, 設計上の静的支持力の照査を目的として実施する。

また, 衝撃載荷試験の簡易性を生かして, 同一サイトにおいて複数の杭に実施することにより, 支持力照査の精度を高めることができる。

2) 動的計測, 動的載荷の今後の課題

杭基礎の地盤抵抗(支持力)問題は, 理論的に非常に複雑で, 特に杭と地盤の境界条件は, 杭種, 施工法に依存し, 一般的な土質調査, 試験では, 明確にできない。したがって, 現段階では, 杭の性能(支持力)品質に対する検査のためには, 実杭に対する計測, 試験を実施することが望ましい。しかし, コストの高い静的載荷試験のみが, 支持力照査の唯一の手段である現状では, 性能確認のための検査が, 行われていないに等しい。

衝撃載荷試験は、静的貫入抵抗力を確定値として計測するのではなく、一次元波動理論に基づいた解析により、計測値から静的貫入抵抗力を推定する。したがって、その精度は、静的載荷試験と比較して落ちる。しかし、その簡易性、経済性により、複数の杭に対して、容易に実施することができるので同一サイト全体の品質保証に貢献する場合が多い。

ここで提案している品質設計 A は、衝撃載荷試験と静的・準静的載荷試験、さらに従来の管理式を組み合わせた例である。衝撃載荷試験の解析精度を高めるためには、静的載荷試験との比較データを蓄積することが今後とも重要である。

動的計測、衝撃載荷試験による品質設計手法の確立のためには、静的貫入抵抗力の精度の高い解析手法が必要であり、静的載荷試験との比較を通じて、適切な地盤モデルの採用等、解析法の理論的根拠を、土質力学的な立場で明確にして行く必要がある。