

## 2.3 衝撃載荷試験(DLT)

### (1) 衝撃載荷試験の概要

元々打ち込み杭の施工管理手法から発達したもので、ハンマーの打撃力などの短い時間の動的荷重（相対荷重時間  $Tr < 5$ ）を載荷する試験方法です。急速荷重より荷重時間が短いことから、試験中の杭体の応力状態は静的や急速とは異なり、杭体中に波動現象と呼ばれる力の伝搬現象が生じています。また一般に急速載荷より杭の貫入速度が大きいため発揮される動的抵抗成分の割合も大きくなります。衝撃載荷試験ではハンマーの打撃による衝撃力が杭体を伝搬する波動現象を伴う現象を測定し解析を行います。この解析には一般に一次元波動理論に基づいた波形マッチング解析と呼ばれるシミュレーション解析を経て静的抵抗力を得ます。打ち込み杭の施工時に試験が行える唯一の載荷試験方法です。

### (2) 衝撃載荷試験の載荷装置

載荷は重錘落下装置により行います。打ち込み杭については施工に使用するハンマーを利用できれば非常に安いコストで実施することができます。ただし施工ハンマーを養生後試験に適用する場合はハンマーエネルギーの不足に注意する必要があります。施工可能なハンマーであっても養生後には地盤が回復しており必要な抵抗力を確認できない場合があります。通常 10ton クラスの油圧ハンマーにより衝撃載荷試験で確認できる静的抵抗力は 6000~7000kN です。また養生後の試験においては施工時より大きな衝撃力を加えることになるので、杭材の耐力についてもチェックしておく必要があります。

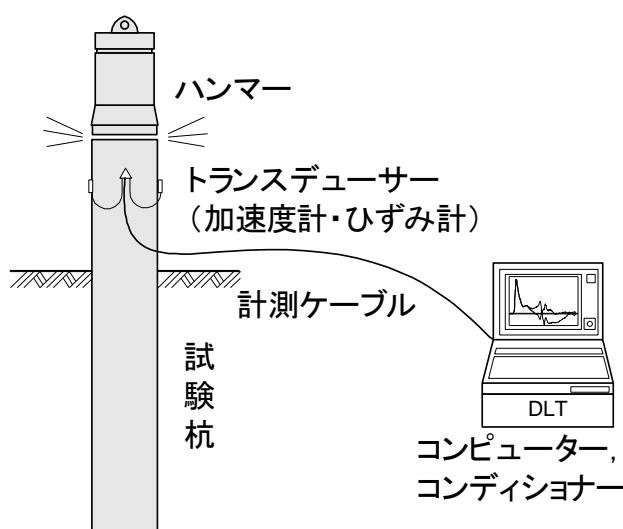
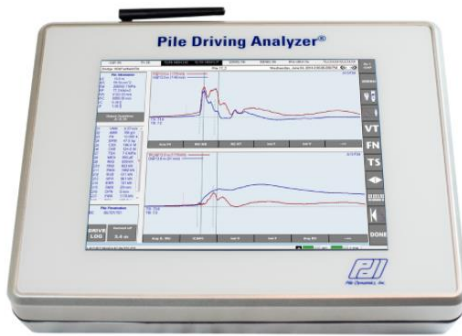


図 2-9 衝撃載荷試験の実施イメージ

### (3) 衝撃載荷試験の測定機器

計測は杭頭から 1.5D 以上離れた位置にひずみ計と加速度計を 180° 軸対称に 2 組取り付けて、杭軸方向の杭頭荷重と杭頭加速度を測定します。杭径が大きい場合や場所打ち杭の場合は 90° 方向に 4 か所取り付ける場合もあります。1.5D 以上離すのは偏打の影響を避けるためです。測定データに異常がなければ短くしてもかまいません。測定は通常 10~20kHz のサンプリング周波数で 1 打あたり 0.05~0.2 秒間程度のデータを取得します。測定データは専用のロガーに取り込まれて保存されます。衝撃載荷試験の測定システムとしてはアメリカのパイルダイナミックス (PDI) 社のパイルドライビングアナライザー (PDA) が世界的に普及しています。オランダのプロファウンド社の FPDS システムも同様の装置です。



<測定システム：PDA>



<センサー：加速度計、ひずみ計>

図 2-10 衝撃載荷試験の測定システム

#### (4) 衝撃載荷試験の載荷方法

衝撃載荷試験においては1打撃のデータを解析することにより静的支持力を得ますから、目標支持力が得られる打撃を1回実施すれば良いことになります。しかし、実際には現場ごとに杭の仕様、地盤条件、ハンマー効率等が異なりますので、目標を満足する打撃条件を事前に決めることは困難であり、1打撃のみで試験が完了することは通常ありません。標準的には最初に小さなエネルギーの予備打撃を行い、測定システムの作動や載荷装置の安全性のチェックを行い、落下高さを上げてCASE法の結果と発生応力をチェックしながら、杭体の健全性を保てる範囲で出来るだけ高いCASE法の結果が得られるように打撃を続けます。あまり打撃回数が多くなると周面摩擦が切れてしまうことがあるので注意をする必要があります。

#### (5) 衝撃載荷試験の試験期間

試験に要する時間は、施工で使用しているハンマーを載荷装置として利用する場合、センサー取り付けのためのタップ孔加工を含め1~2時間程度です。しかし別途、重錘落下装置を使用する場合は急速載荷試験と同様の期間を要します。

#### (6) 試験結果の整理

##### a) 測定データ

衝撃載荷試験においては、ハンマーなどで加力された下向きを入力波とそれが杭先端まで届いて地盤の抵抗に応じて戻ってきた反射波を測定する必要があります。1次元の波動理論によると入力波  $F_d$  と反射波  $F_u$  は式 2.1 で表されます。

$$F_d(z,t) = (F(z,t) + Z \cdot v(z,t)) / 2 \quad (\text{式 2.1})$$

$$F_u(z,t) = (F(z,t) - Z \cdot v(z,t)) / 2$$

ここに、 $F_d(z,t)$  : 位置  $z$  時間  $t$  における入力波 (kN)

$F_u(z,t)$  : 位置  $z$  時間  $t$  における反射波 (kN)

$F(z,t)$  : 位置  $z$  時間  $t$  における力 (kN)

$v(z,t)$  : 位置  $z$  時間  $t$  における部分速度 (m/s)

$Z_p$  : 杭体のインピーダンス =  $E_p \cdot A_p / c$

$E_p$  : 杭材料のヤング係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_p$  : 杭の断面積 (m<sup>2</sup>)

$c$  : 応力波の伝搬速度 (m/s)

インピーダンス  $Z_p$  は分かり易く言うと動的なバネ定数です。伝搬速度  $c$  は単位時間当たりでの杭長となり、静的の  $E_p A_p / L$  と同じです。速度  $v$  は同様に時間当たりでの変位置量ですから、 $Z_p \cdot v$  は動的なフックの法則による力ということになります。

式を見ますと、力  $F$  と速度  $v$  が測定できれば入力波  $F_d$  と反射波  $F_u$  が得られることが分かります。現在の衝撃載荷試験システムでは、直接計測値としてはひずみと加速度を測定して下式で力  $F$  と速度  $v$  を算出するのが一般的です。

$$\text{軸方向力} : F(z,t) = \varepsilon_p \cdot E_p \cdot A_p \quad (\text{式 2.2})$$

$$\text{速度} : v(z,t) = \int \alpha(z,t) dt$$

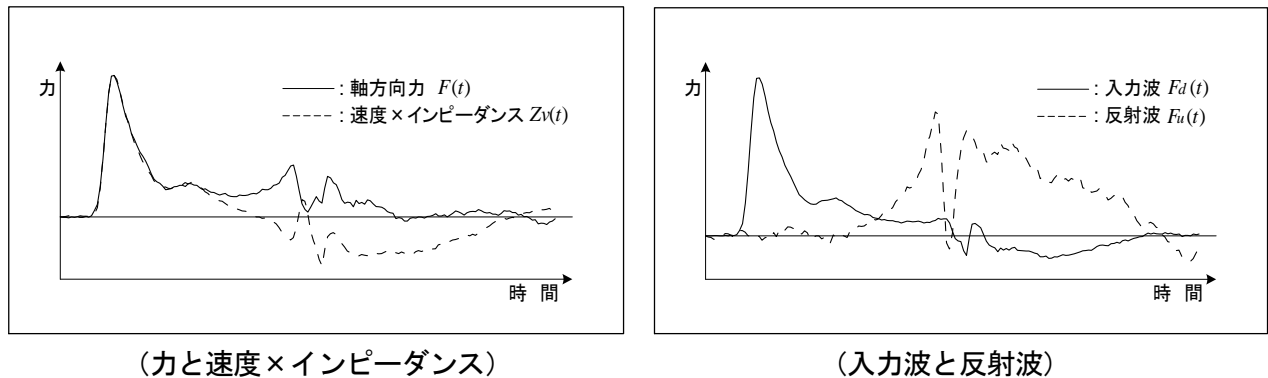


図 2-11 衝撃載荷試験の測定データ

#### b) 衝撃載荷試験の基本原則 (CASE 法)

衝撃載荷試験においては載荷時間が非常に短いため杭体に波動現象が生じます。そのため押し込み試験や急速載荷試験のような荷重～変位置量曲線を直接得ることはできません。ここでは衝撃載荷試験の解析の説明をする前に衝撃載荷試験のイメージを掴んでもらうために基本原則について述べます。

衝撃載荷試験の原理を分かり易く説明するために図 2-12 に示す列車のイメージを用います。図の列車が杭です。左図は抵抗力が無い杭のイメージで先端フリー、右図は強固な先端抵抗力を持つ杭のイメージで先端に剛な壁が存在するという条件です。

まず左図の先端フリーの場合から説明します。右端の車両に 1000kN の衝撃力を加えたとしても入力された衝撃力は圧縮力として次々と左隣の車両へ伝わって行きます。この力の伝搬現象を波動現象と呼びます。衝撃力が左端の車両に伝わった時に左端の車両はフリーであるため飛び出そうとします。その際に右隣の車両を 1000kN の力で引っ張ることになります。今度は引っ張り力が次々と右隣の車両へ伝搬することになります。そして最後に右端の車両に戻ってきます。力の伝搬の過程でエネルギーのロスがないものとする 1000kN の圧縮力を入れて 1000kN の引っ張り力 (-1000kN) が戻ってくるようになります。

一方、右図の先端に剛な壁がある場合を考えます。右端の車両に 1000kN の衝撃力を加えた場合に左端の車両まで衝撃力が圧縮力として伝わるまでは左図と同様です。しかし今度は先端に剛な壁があるために飛び出そうとした左端の車両は壁にぶつかり跳ね返されます。すると跳ね返された車両は右隣の車両を 1000kN の圧縮力として押すことになります。そして次々と右隣の車両へ圧縮力が伝搬し最後に右端の車両に 1000kN の圧縮力が戻って来ます。1000kN の圧縮力を入れて 1000kN の圧縮力 (+1000kN) が戻ってくるようになります。

衝撃載荷試験の基本原則は「入れた力と戻ってきた力の和が抵抗と釣り合う。」ということです。式で表すと以下の通りです。

$$\text{抵抗} = \text{入力 } F_d + \text{反射力 } F_u$$

すなわち左図の先端フリーの場合は入力圧縮力の+1000kNで、戻ってきた反射力が引っ張りの-1000kNですから抵抗は次式の通りとなり抵抗力は0kNとなります。

$$\text{抵抗} = +1000\text{kN} + (-1000\text{kN}) = 0\text{kN}$$

一方、右図の先端が剛の場合は入力圧縮力の+1000kNで、戻ってきた反射力が圧縮の+1000kNですから全抗は次式の通りとなり抵抗力は2000kNとなります。

$$\text{抵抗} = +1000\text{kN} + (+1000\text{kN}) = 2000\text{kN}$$

このように右端の車両（杭頭）で入る力（入力波）と戻ってくる力（反射波）を測定すれば、地盤の抵抗（支持力）が計算できます。これが衝撃載荷試験の基本原理です。

図 2-12 の下図は三角形の入力波の杭中の伝搬を模式的に表したものです。杭頭に入力された圧縮力が、先端フリーの場合は先端で位相が反転して杭頭へ戻り、先端が剛の場合は位相が反転せず圧縮力のまま杭頭へ戻ります。抵抗は入力波の三角形の頂点とそれが杭体を1往復して戻ってきた反射の頂点の和として求められます。この地盤抵抗を求める方法はケース法（CASE法）と呼ばれる方法です。

$$R = Fd(t_0) + Fu(t_0 + 2L/c) \quad (\text{式 2.3})$$

ここに R : 抵抗

$Fd(t_0)$  : 時間  $t_0$  における入力波

$Fu(t_0 + 2L/c)$  : 1 往復後の反射波

L : 杭長、c : 応力波の伝搬速度

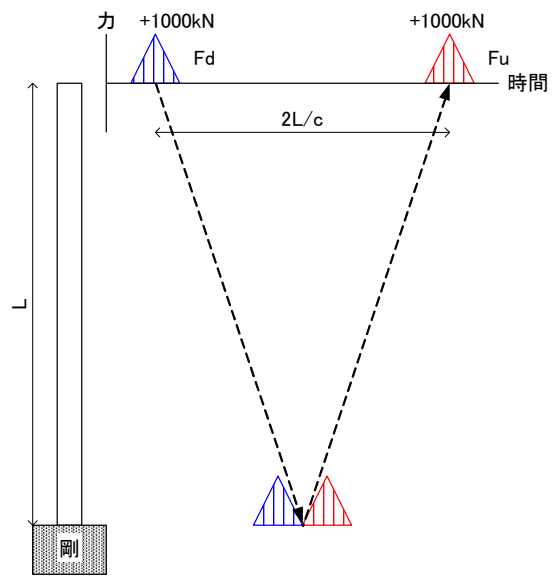
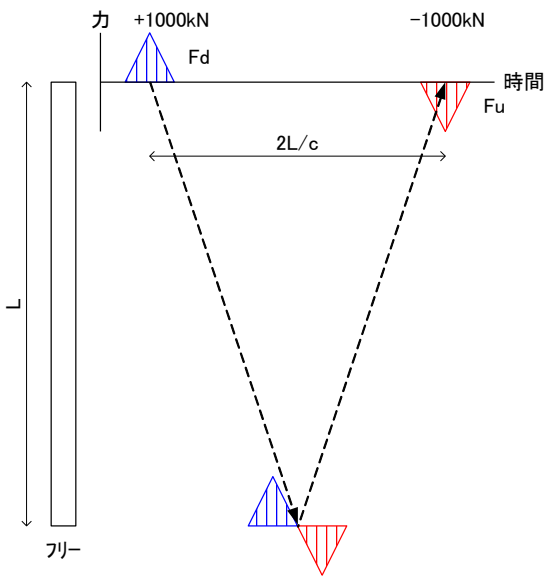
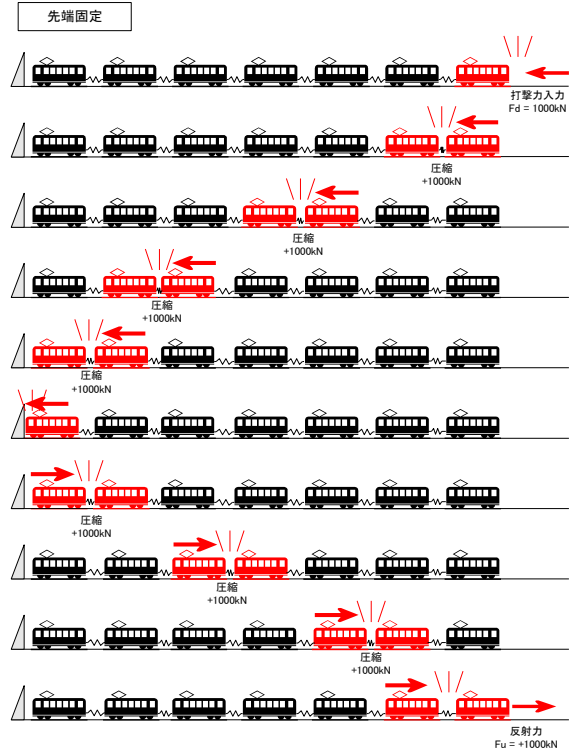
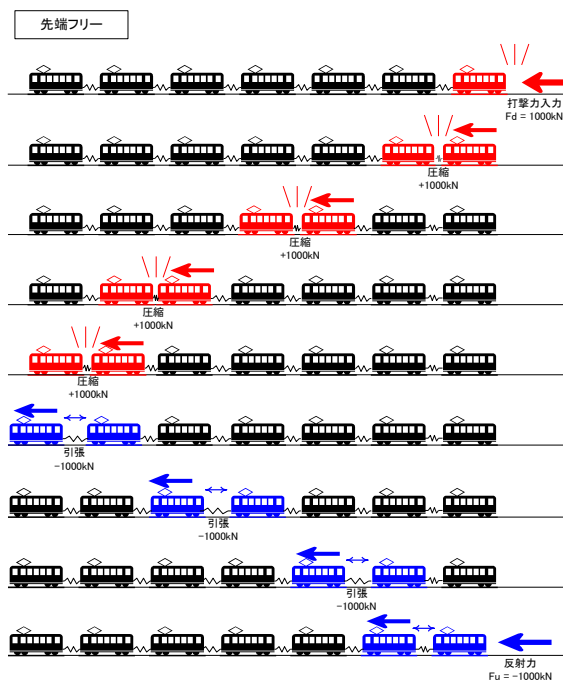


図 2-112 衝撃载荷試験の基本原理

b) 特性曲線法（波動伝搬）

ここでは特性曲線法と呼ばれる考え方によって波動伝搬を説明します。杭体を1次元の梁としてモデル化します。0.5~2.0mのセグメントが連結した形です。特性曲線法ではセグメント間の接点において下降波と上昇波の力のつり合いと速度の連続性が成り立ちます。また周面や先端の地盤抵抗は接点に集中的に作用する形となります。図-2.13に示す接点nにおける力のつり合いと速度の連続性は式2.4、2.5の通りとなります。

接点nにおける力のつり合い： $F(n)=F(n+1)$

$$F_d(n,t_{n-1})+F_u(n,t_n)=F_u(n+1,t-1)+F_d(n+1,t)+R_s(n) \quad (式 2.4)$$

接点nにおける速度の連続性： $V(n)=V(n+1)$

$$F_d(n,t-1)/Z(n)-F_u(n,t)/Z(n)=-F_u(n+1,t-1)/Z(n+1)+F_d(n+1,t)/Z(n+1) \quad (式 2.5)$$

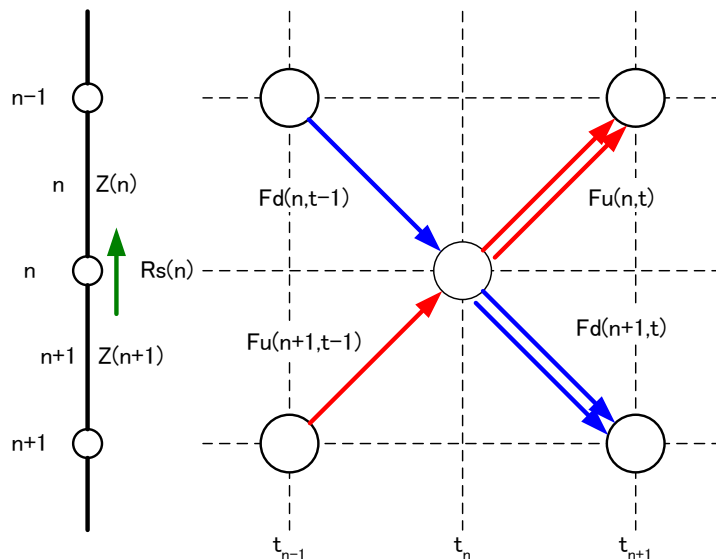


図 2-123 特性曲線法における接点の波動伝搬

分かりやすくするために杭を同じインピーダンスの3セグメントとして、途中2深度に周面抵抗  $R_s(1)$  と  $R_s(2)$ 、先端抵抗  $R_t(3)$  が作用すると仮定します。杭頭に三角形の入力波が作用した場合の波動伝搬を式2.4、2.5に従って逐次に計算します。

まず、入力波  $F_d(0,t_0)$  は時刻  $t_1$  に接点1で  $R_s(1)$  により反射する上昇波  $F_u(1,t_1)$  と透過する下降波  $F_d(2,t_1)$  に分かれます。式2.4、2.5から接点1の時刻  $t_1$  における反射波（上昇波）と透過波（下降波）は式2.6となります。

$$\text{接点1、時刻 } t_1 \text{ における上昇波： } F_u(1,t_1)=R_s(1)/2 \quad (式 2.6)$$

$$\text{下降波： } F_d(2,t_1)=F_d(0,t_0)-R_s(1)/2$$

同様に接点2の時刻  $t_2$  においては式2.7となります。

$$\text{接点2、時刻 } t_2 \text{ における上昇波： } F_u(2,t_2)=R_s(2)/2 \quad (式 2.7)$$

$$\text{下降波： } F_d(3,t_2)=F_d(2,t_1)-R_s(2)/2$$

下降波  $F_d(3,t_2)$  が杭先端に達した時には、先端抵抗  $R_t(3)$  との力のつり合いから、先端から反射する上昇波  $F_u(3,t_3)$  は式2.8となります。

$$\text{杭先端3、時刻 } t_3 \text{ における上昇波： } F_u(3,t_3)=R_t(3)-F_d(3,t_2) \quad (式 2.8)$$

先端からの上昇波  $F_u(3,t_3)$  は接点2、時刻  $t_4$  において、下降波  $F_d(2,t_3)$  の反射波と重なり式2.9となります。

$$\text{接点2、時刻 } t_4 \text{ における上昇波： } F_u(2,t_4)=F_u(3,t_3)+R_s(2)/2 \quad (式 2.9)$$

接点1、時刻  $t_5$  においても同様に反射波と重なり式2.10となります。

$$\text{接点1、時刻 } t_5 \text{ における上昇波： } F_u(1,t_5)=F_u(2,t_4)+R_s(1)/2 \quad (式 2.10)$$

$F_u(1,t_5)$  は杭頭にそのまま戻り、 $F_u(0,t_6)=F_u(1,t_5)$  となります。

式 2.6~2.10 を整理すると杭頭に返る上昇波は式 2.11 となります。

$$Fu(0,t_6) = Rs(1) + Rs(2) + Rt(3) - Fd(0,t_0) \quad (式 2.11)$$

ここで前述の杭頭での「入力+反射力=抵抗」を当てはめると式 2.12 の通りとなり、周面抵抗が有る場合でも CASE 法の「入力+反射力=抵抗」が成り立つことが分かります。

$$Fd(0,t_0) + Fu(0,t_6) = Rs(1) + Rs(2) + Rt(3) \quad (式 2.12)$$

さらに軸  $t_6$  までの杭頭の上昇波について注目すると、接点 1、時刻  $t_1$  の反射波  $Fu(1,t_1)$  は杭頭に返り  $Fu(0,t_2)$  となります。

$$Fu(0,t_2) = Rs(1) / 2 \quad (式 2.13)$$

接点 2、時刻  $t_2$  の上昇波  $Fu(2,t_2)$  は接点 1、時刻  $t_3$  において、杭頭からの下降波  $Fd(0,t_2)$  の反射と重なり杭頭へ返ります。

$$Fu(0,t_4) = Rs(1) / 2 + Rs(1) / 2 \quad (式 2.14)$$

時刻  $t_2$  は接点 1 の深度までの 1 往復時間であり、この時刻に接点 1 の周面抵抗の  $1 / 2$  が杭頭での上昇波として現れます。さらに時刻  $t_4$  は接点 2 の深度までの 1 往復時間であり、この時刻に接点 1 と 2 の周面抵抗の合計の  $1 / 2$  が杭頭での上昇波として現れます。

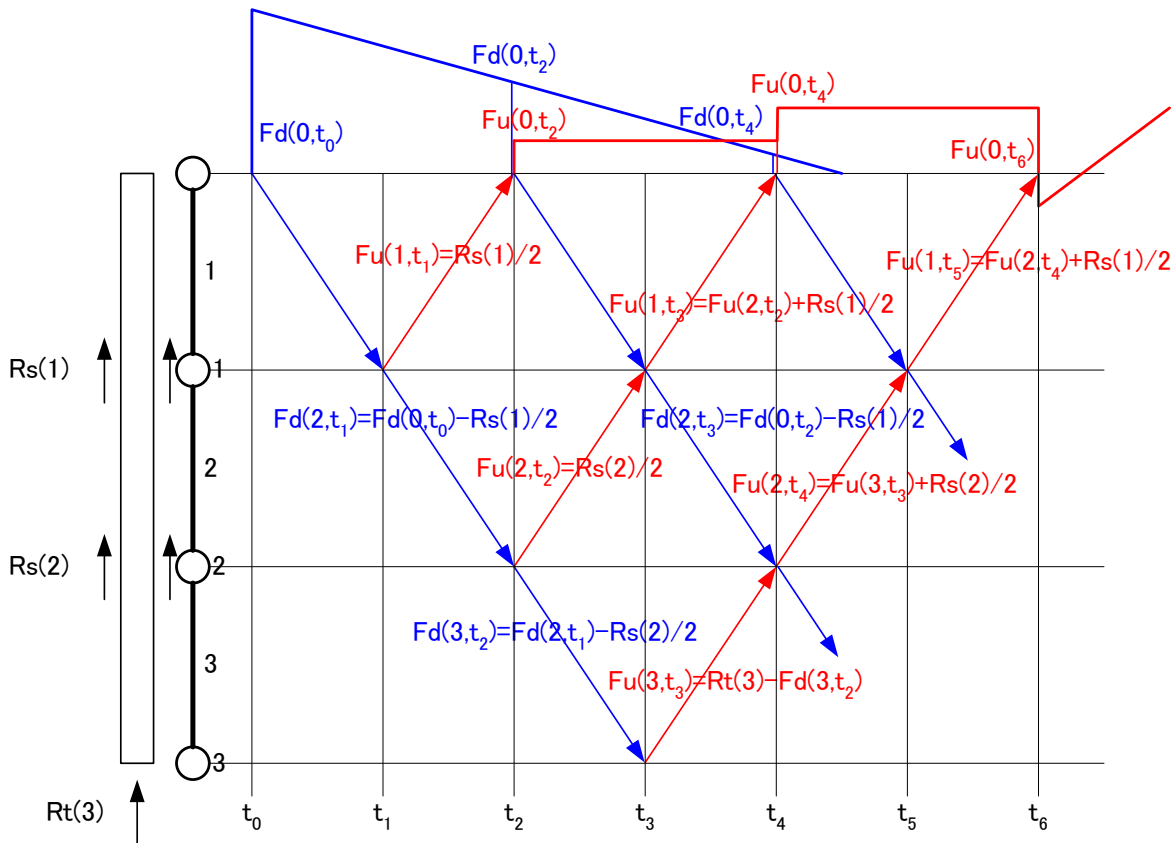


図 2-134 特性曲線法における 3 セグメントモデルの波動伝搬

これでこのモデルの 1 往復分のすべての接点、時刻における波動伝搬を説明しました。

以上のことから、下降波  $Fd(0,t_0)$  が 1 往復して戻る時刻までの杭頭の上昇波  $Fu(0,t_n)$  は  $t_n \cdot c / 2$  で計算される深度までの周面抵抗の  $1 / 2$  を累積したものとなります。(式 2.13) そして先端からの上昇波が返ってくる時刻

で、周面と先端の合計の抵抗から入力  $F_d(0, t_0)$  を引いた大きさの波が戻ります (式 2.11)。これが杭頭における上昇波の中身です。

周面抵抗の累積の  $1/2$  が返っている区間の上昇波の波形は、例えば周面抵抗の大きさが深度方向に一定の場合には上昇波は線形に増加します (図 2-15)。ある区間の周面抵抗がゼロだとするとその区間に相当する上昇波は一定の形状となります (図 2-16)。さらに深度方向に三角形分布で周面抵抗が増加している場合には上昇波は2次曲線となります (図 2-17)。

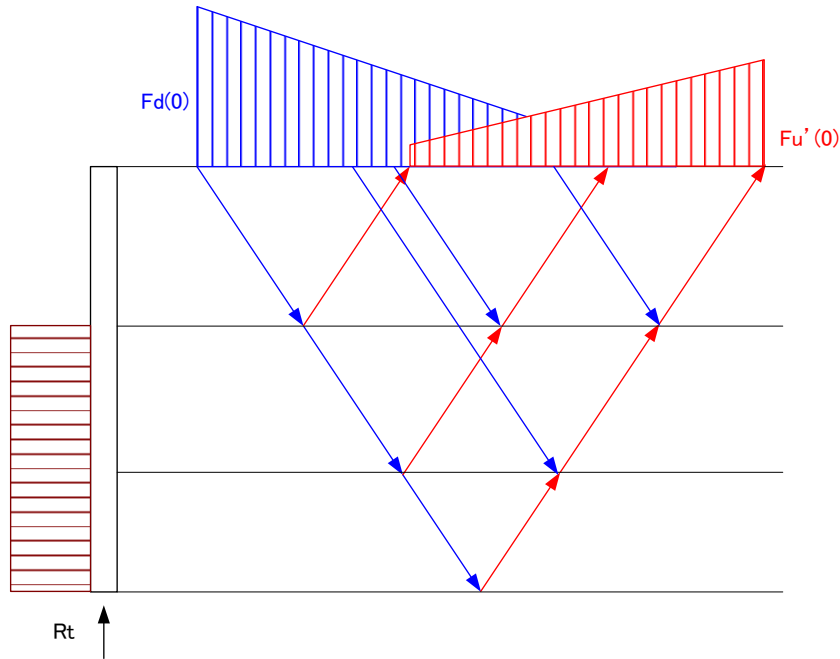


図 2-15 周面抵抗が一定の場合の杭頭の上昇波形状

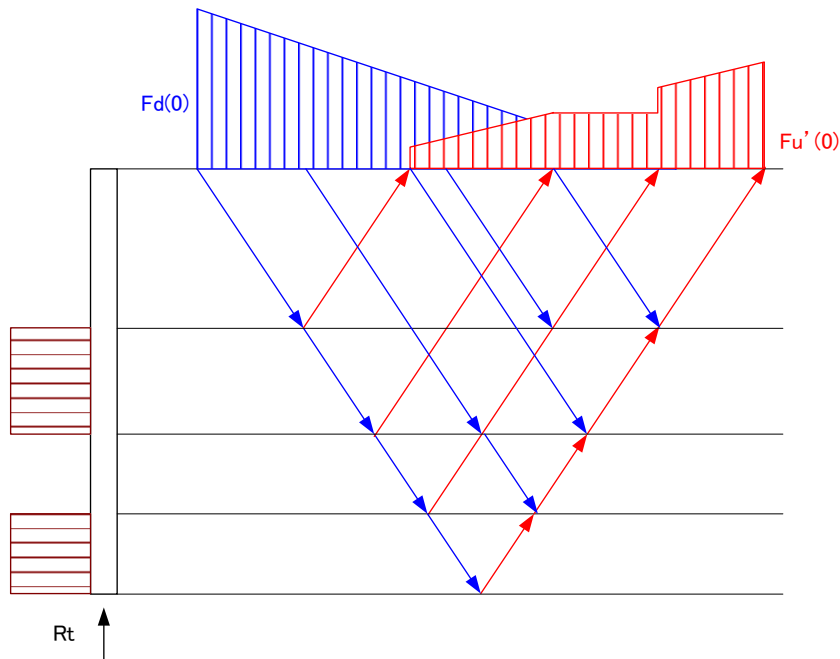


図 2-16 周面抵抗が不連続の場合の杭頭の上昇波形状



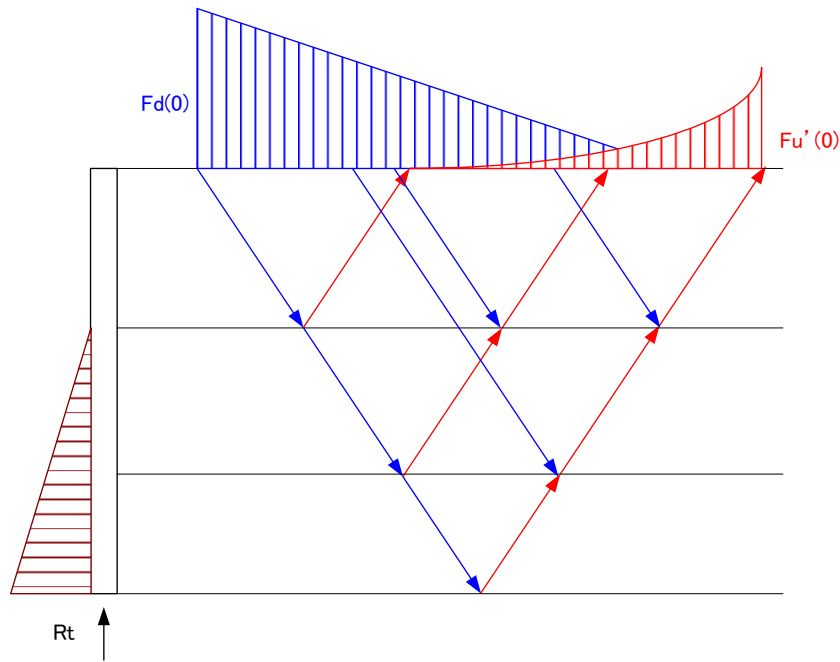


図 2-17 周面抵抗が線形分布の場合の杭頭の上昇波形状

先端からの上昇波が返ってきたときには、式 2.11 を見て分かるように入力  $F_d(0, t_0)$  が周面と先端の合計の抵抗より大きい場合は、上昇波は波形が凹形状となりマイナスとなります（図 2-18）。この場合は十分に抵抗がモビライズされた状態です。逆に  $F(0, t_0)$  の大きさが先端抵抗と周面との合計より小さい場合は、上昇波はプラスとなり、さらに先端抵抗と周面の累計の  $1/2$  との合計より小さい場合には、上昇波形は周面抵抗の  $1/2$  を累積したものより大きくなり波形は凸形状となります（図 2-19）。周面と先端の抵抗が測定中に変化が無いと仮定すれば、 $F(0, t_0)$  の大きさが先端抵抗と周面の累計の  $1/2$  との合計より大きい場合には、上昇波形には凹形状が現れ、周面と先端の抵抗がモビライズされた状態となります（図 2-20）。これがいわゆる「打撃エネルギーが足りている状態」です。逆に上昇波形に凹形状が現れない場合は、抵抗が十分にモビライズされておらず「打撃エネルギーが不足している状態」となり試験結果は過小評価となります。杭頭における上昇波の波形から上記のことを観察することができます。

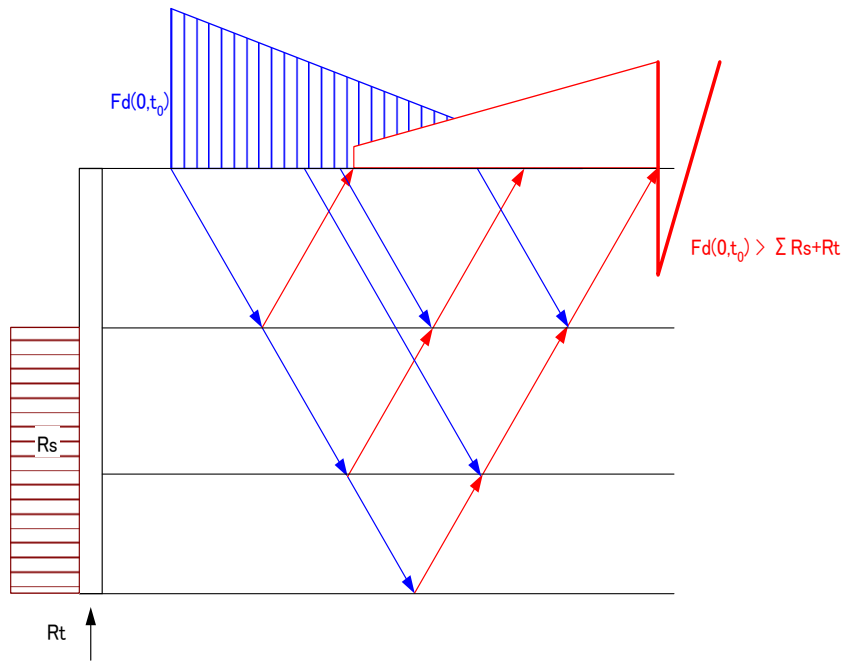


図 2-18 先端からの上昇波形状（入力が十分に大きい場合）

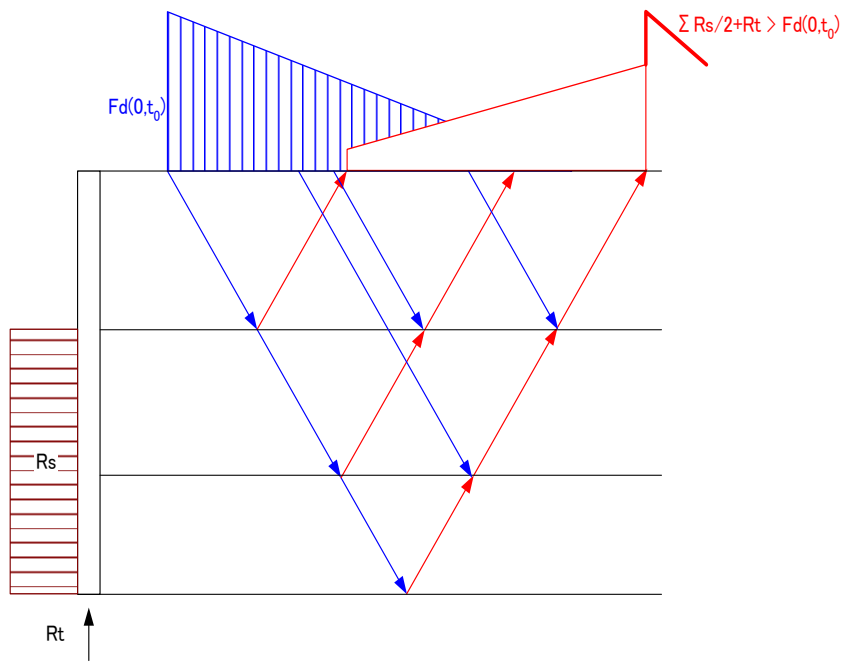


図 2-19 先端からの上昇波形状（入力が小さい場合）

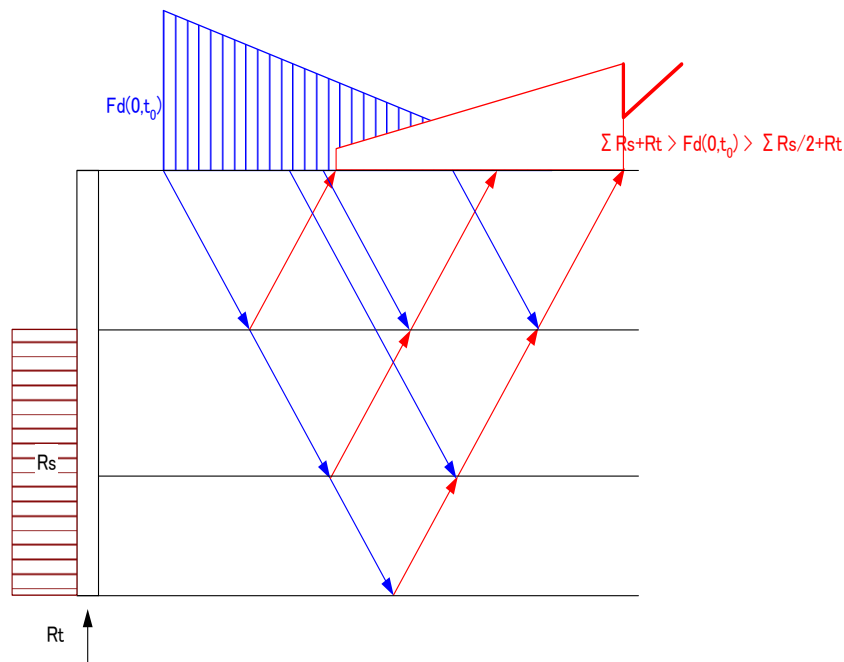


図 2-20 先端からの上昇波形状（抵抗がモビライズされた場合）

#### d) 波形マッチング解析

波形マッチング解析では上記の波動計算により伝搬現象をシミュレーションし、杭頭の上昇波形について計算波形と測定波形を比較することにより地盤抵抗を推定する解析です。図 2-21 に解析イメージを示します。解析では上記で示した接点に作用する地盤抵抗  $R_s$ 、 $R_t$  は最も基本的な Smith モデルでは図 2-22 に示すダッシュポット（動的抵抗成分）とバネ（静的抵抗成分）を並列に付けたモデルを用います。このモデルではバネにはスライダが直列に付いており静的抵抗成分は図 2-23 に示すバイリニアのモデルで表現されます。

解析では地盤パラメータを変えながらモデル上で前述の波動の伝搬を計算することにより地盤強度パラメータに応じた計算上の杭頭の上昇波  $F_u(\text{cal})$  が得られます。これを測定した上昇波形  $F_u(\text{mes})$  と比較し、波形の形状が合うまで地盤強度パラメータを調整します。波形の形状が合った時点で解析が完了し、この時の入力パラメータを正とします。この方法を波形マッチング解析と呼びます。解析結果例を図 2-24 に示します。解析で得られた地盤強度パラメータのうち静的抵抗成分のみを取り出して静的抵抗力（支持力）とします。波形マッチング解析のフローを図 2-25 に示します。

さらに、波形マッチング解析で得られた静的な地盤強度パラメータを図 2-26 に示す静的な一次元のモデルに当てはめて荷重伝達法と呼ばれる静的な計算を行うことにより、押込み試験の結果に相当する荷重～変位量曲線を得ることができます。

波形マッチング解析においては、杭頭で測定した情報のみで周面抵抗の分布と先端支持力を得ることができます。これは衝撃力による载荷時間が短いために反射波形の形状が周面摩擦の分布や先端抵抗の特性を比較的明瞭に表しているからです。先のすなわち、浅い場所の情報は時間的に早く戻り、深い場所の情報は遅く戻りそして先端の情報が最も遅れて戻って来ます。したがって各深度の地盤強度パラメータを変化させると敏感に反射波形の形状に反映されます。この性質のために衝撃载荷試験の測定データに波形マッチング解析を適用することが可能となっています。

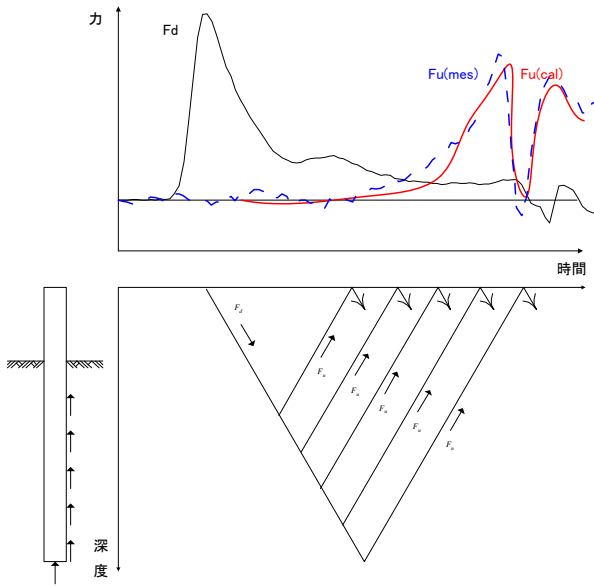


図 2-21 波形マッチング解析のイメージ

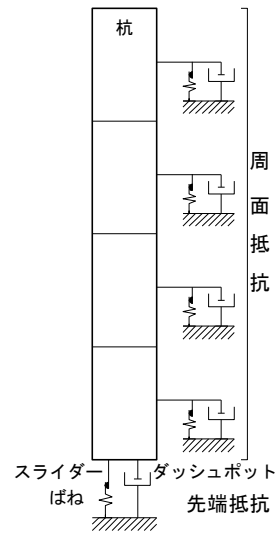
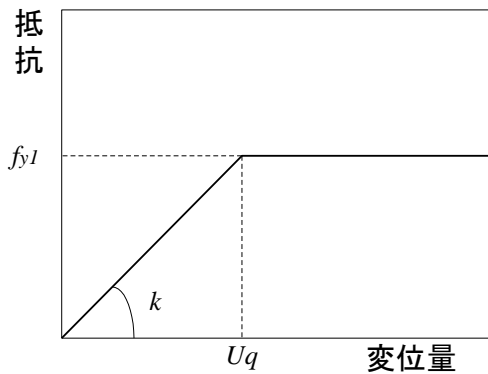


図 2.22 波形マッチング解析における杭・地盤モデル (Smith モデル)



$f_{y1}$ : 降伏抵抗力度  
 $U_q$ : クェーク (限界弾性変位量)  
 $k$ : 周面抵抗力度剛性

図 2-23 波形マッチング解析の静的抵抗モデル (Smith モデル)

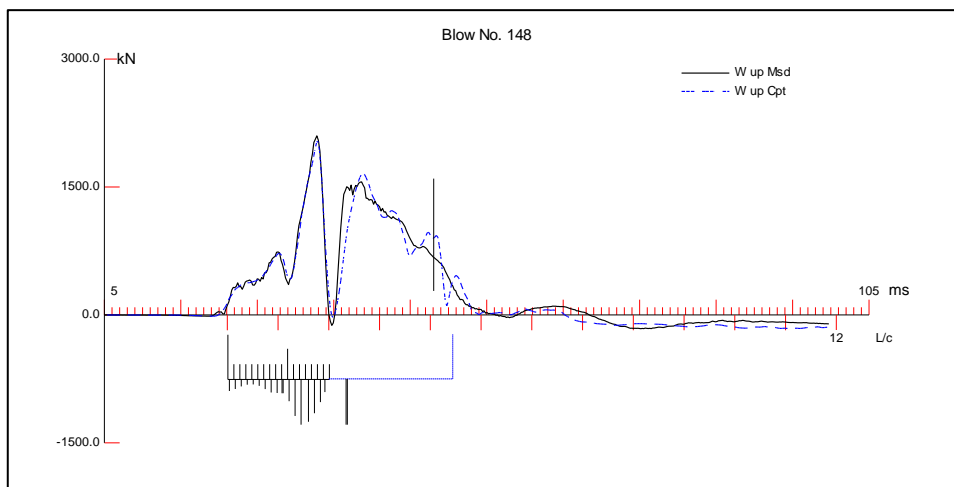


図 2-24 波形マッチング解析の解析例

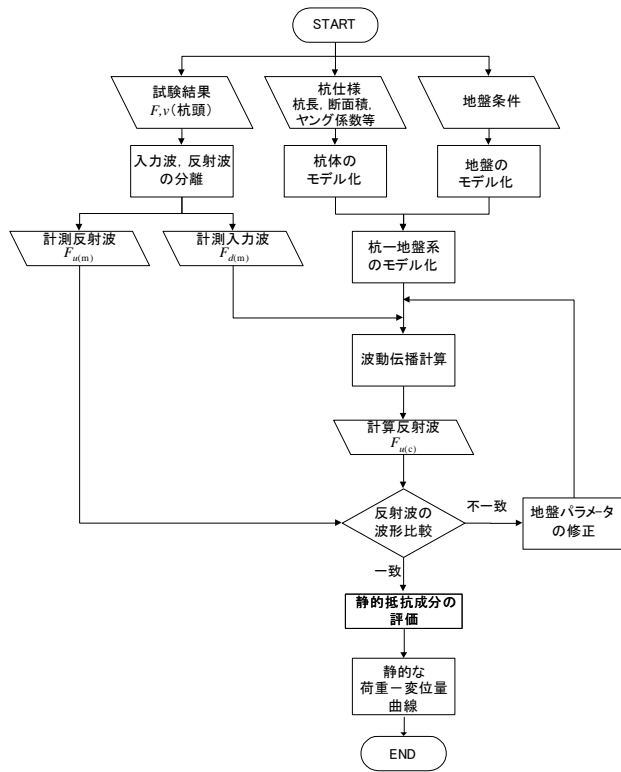


図 2-25 波形マッチング解析フロー

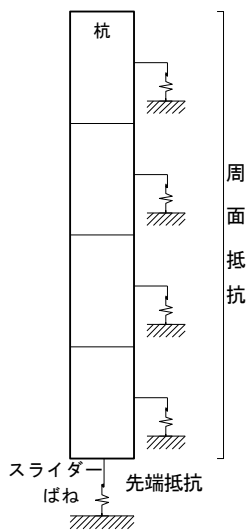


図 2-26 荷重伝達法による杭・地盤モデル

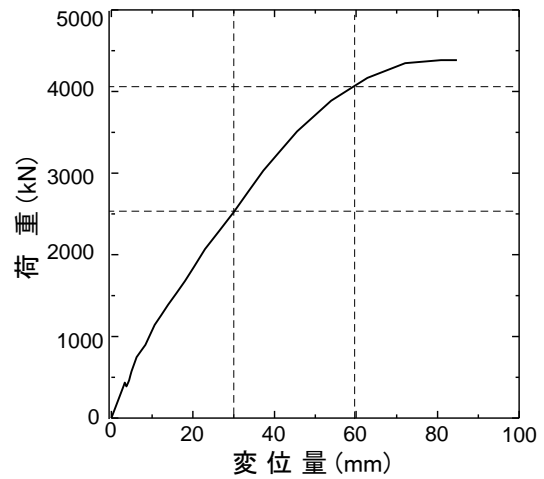


図 2-27 計算静的抵抗～変位量曲線