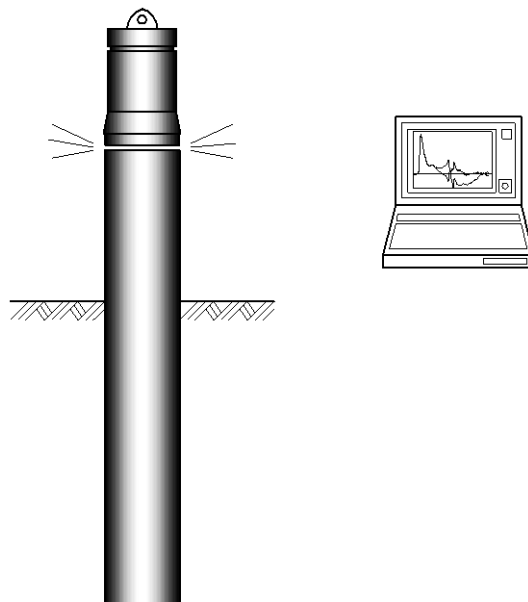


PDP

杭の事前打ち込み解析



株式会社 シーズエンジニアリング

はじめに

杭の事前打込み解析（PDP：Pile Driving Prediction）は、ハンマー打撃時の杭の挙動と地盤抵抗をシミュレートする解析方法である。

打ち込み工法の妥当性を検討する方法で、杭施工に最適なハンマー、杭の肉厚・材質等の仕様等を決めることができる。

<特徴>

- 杭施工に最適なハンマーを選定することができる
- 杭の肉厚・材質等の仕様を選定することができる
- 杭体応力（圧縮応力・引張応力）を予測できる
- 1打撃当たりの貫入量を予測できる
- 打撃回数の予測ができる
- 地盤パラメータは、過去の衝撃載荷試験結果に基づいて設定しているため、信頼性が高い。

1. 杭の事前打ち込み解析の概要

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 1-1）し，一次元波動理論に基づいた波動伝播モデルにより，杭頭にハンマーの計算上の打撃力を受けた杭～地盤の挙動をシミュレートする解析方法である。

図 1-2 に杭の事前打ち込み解析実施フローを示す。

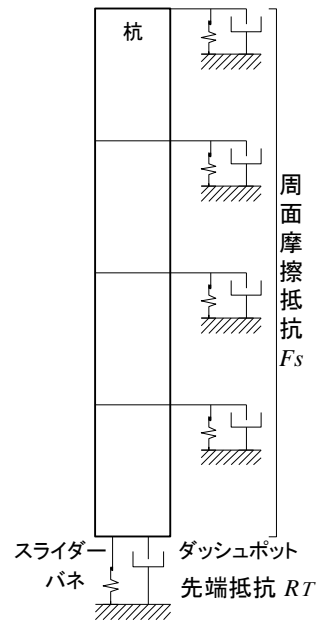


図 1-1 杭地盤系のモデル

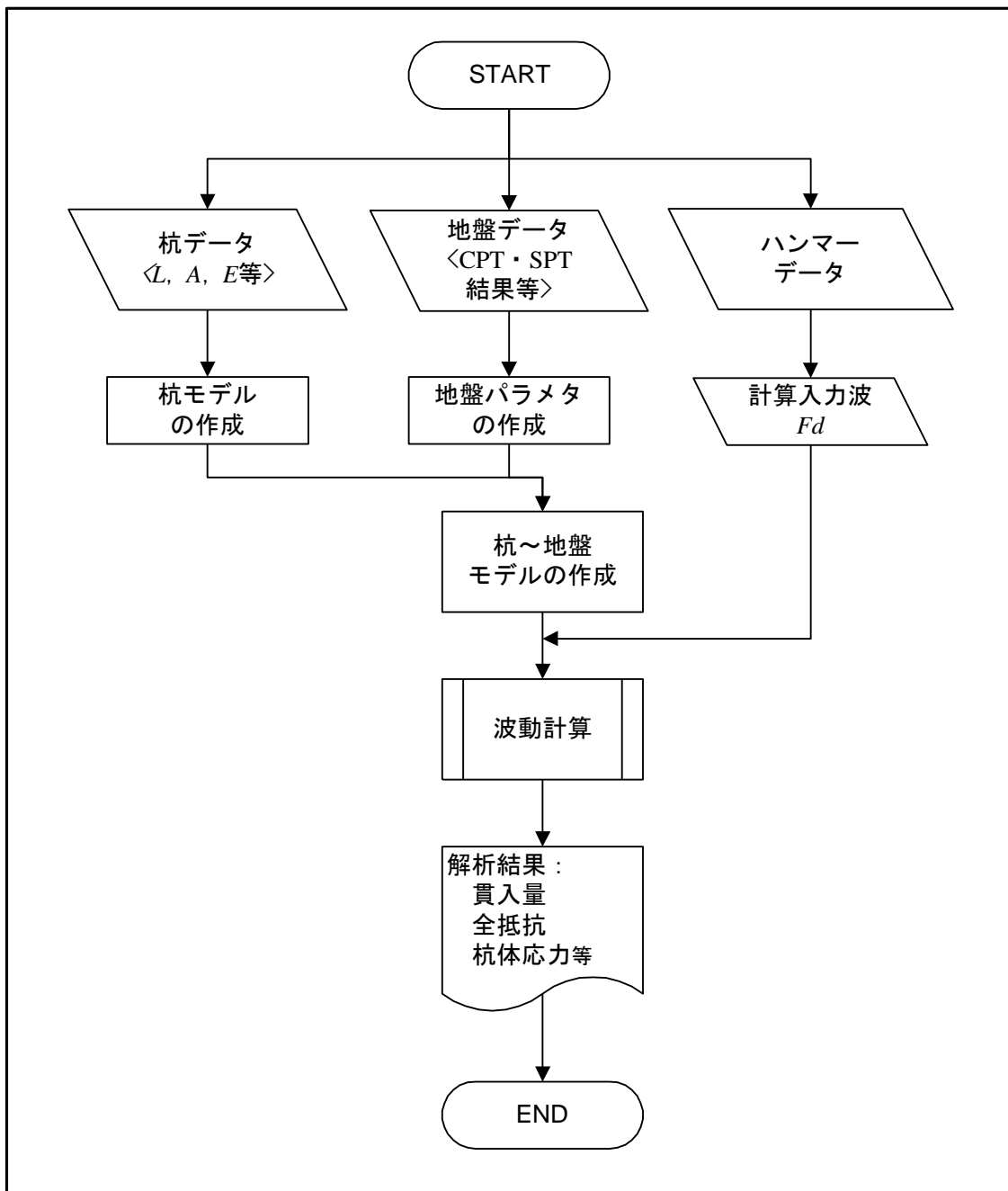


図 1-2 杭の事前打ち込み解析実施フロー

2. 解析方法

2.1 杭のモデル化

杭は、一次元の弾性体としてモデル化される。波動計算に必要な杭に関するパラメータは、以下の通りである。

- ・ 杭径
- ・ 杭長
- ・ 杭の肉厚
- ・ 杭の断面積
- ・ 杭材のヤング係数
- ・ 杭材の密度

例えば鋼管杭の場合で、途中に板厚の変化がある場合は、そこでブロック分けし、それぞれのパラメータを設定する必要がある。一次元モデルであるため、十字リブ等の三次元的な形状変化はモデル化できない。その場合は、十字リブを含めた断面積に換算してモデル化することとなる。

また、合成杭のようなヤング係数が異なる杭は、合成断面を考慮して、等価断面積、等価ヤング係数などとする。根固め球根は杭材と一体とみなすかどうかで判断が分かれる。

通常波動計算を行う場合、0.5～1.0m の要素に分割して離散的に計算を行う。従って、テーパ杭のようにパラメータが暫変する杭は、厳密なモデル化は出来ない。例えばテーパ杭の場合は、要素ごとに断面積を変化させる階段状のモデルとなる。

2.2 地盤モデル

衝撃荷重を載荷された杭周辺の地盤モデルは、杭が大きな速度（1.0m/s 程度）で地盤に貫入するため、変位に依存する静的抵抗力と速度や加速度に依存する動的抵抗力を考慮できるモデルを採用する必要がある。したがって、Smith モデルを採用する（図 2-1）。

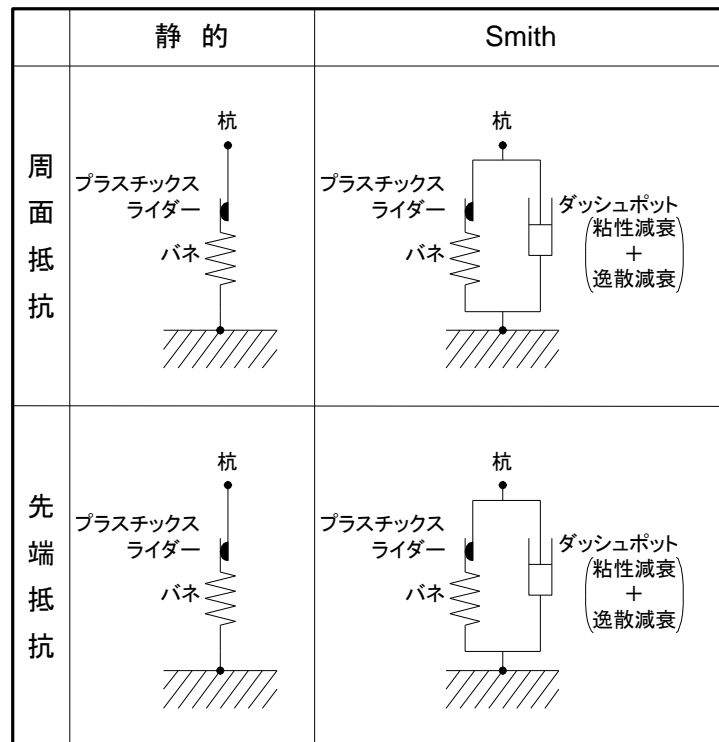


図 2-1 杭に作用する地盤抵抗モデル

Smith モデルの特徴は、以下の通りである。

- ・ 静的抵抗力をバネとプラスチックライダーによる弾塑性モデルで表現している。
- ・ 動的な抵抗力を速度に比例する抵抗力として表現しており、加速度に比例する抵抗力は無視している。
- ・ 周面抵抗力も先端抵抗力も同じ形のモデルを採用している。

$$R_s = k \times u$$

$$R_d = C \times V$$

R_s : 地盤の静的抵抗力

R_d : 地盤の動的抵抗力

k : バネ定数

C : ダンピング (減衰定数)

u : 杭の変位量

V : 杭の速度

したがって、杭打設時の地盤の抵抗力 R は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} R &= R_s + R_d \\ &= k \times u + C \times V \end{aligned}$$

R : 杭打設時の地盤の抵抗力（静的抵抗力+動的抵抗力）

バネ定数 k は図 2-2 に示すとおり、地盤パラメータ、降伏強度 f_{y1} とクェーク U_q （限界弾性変位）で、地盤の弾塑性モデルの傾きとして表すことができる。

地盤パラメータの設定は、過去の衝撃載荷試験結果に基づいて設定している。

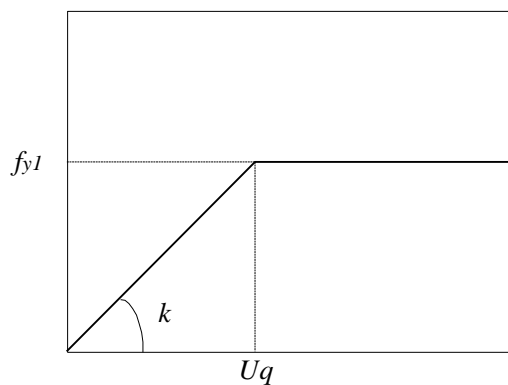


図 2-2 地盤の弾塑性モデル

2.3 ハンマーデータ

ハンマーはプログラムのライブラリから選択し、ハンマーエネルギーとハンマー効率を設定し、ハンマーの計算上の打撃力を与え、入力波 Fd を求める。ライブラリに登録されていないハンマーにおいてもモデル化することができる。

ライブラリに登録されているハンマータイプは以下の通りである。

- ・ディーゼルハンマー
- ・油圧ハンマー
(BSP, Banut, 日立, Hydroram, IHC, Junttan, Menck, 日本車輛, Uddcomb)
- ・スチーム／エアーハンマー

ライブラリに登録されていないハンマーを使用する場合、モデル化に必要なデータは、以下の通りである。

- ・ラム形状（長さ・直径・ラム重量等）
- ・打撃速度
- ・アンビル（長さ・直径等）

2.4 波動計算

設定した杭・地盤の一次元のモデルに対して，計測された入力波（ハンマーの打撃力）を杭頭の境界条件として，特性曲線法と呼ばれる波動伝播計算方法により，逐次杭体を伝播する波動を計算する。

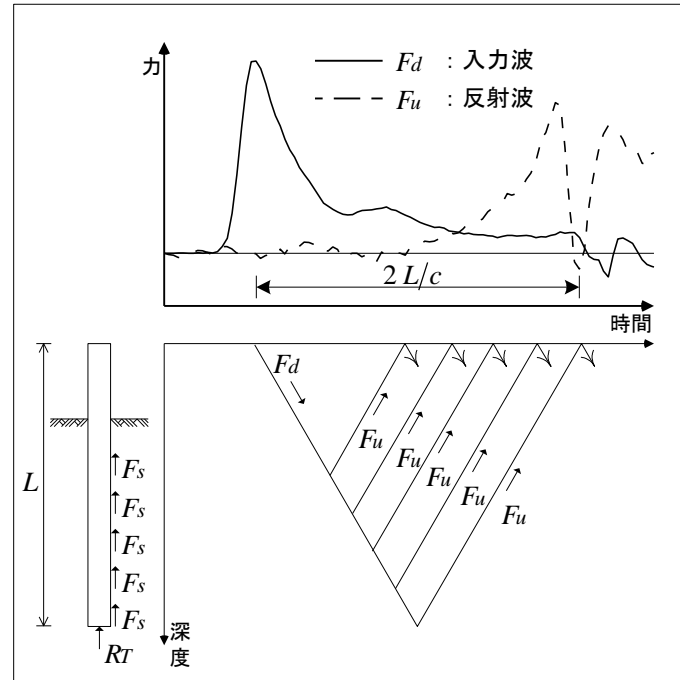


図 2-5 特性曲線法による波動伝播計算

特性曲線法においては，杭を通常 0.5～1.0m に要素分割し，各接点で杭体の断面変化もしくは地盤の抵抗による反射を逐次計算する。

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

$$F(t) : \text{杭体軸力} \quad F(t) = A_p \cdot E \cdot \varepsilon(t)$$

$$v(t) : \text{粒子速度} \quad v(t) = \int \alpha(t) dt$$

$$Z : \text{インピーダンス} \quad Z = \frac{E \cdot A_p}{c}$$

E : ヤング係数

A_p : 断面積

c : 応力波速度

3. 特性曲線法

(1) 杭の中間部での波動伝播

n 番目の接点の時間 t に注目すると、接点 n での波動の反射と透過は図 3-1 の様に表される。

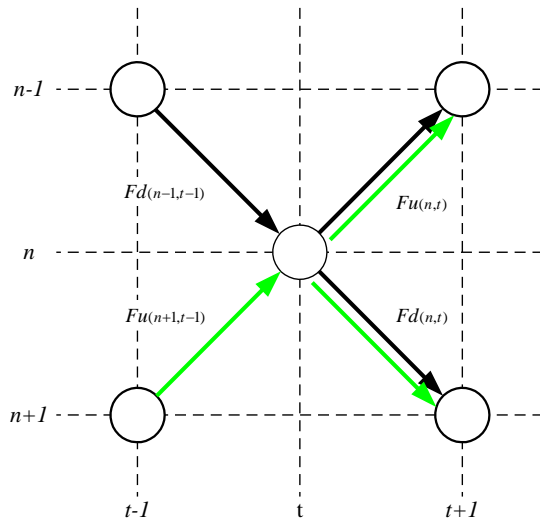


図 3-1 接点での反射と透過

① 接点 n で断面変化のある場合

n 番目の接点で杭の断面変化がある場合の n 番目の接点での反射と透過は以下の通りとなる。

1) 接点 $n-1$ から来た入力波 $Fd(n-1, t-1)$ の接点 n での反射と透過

$$Fu(n, t)1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot Fd(n-1, t-1)$$

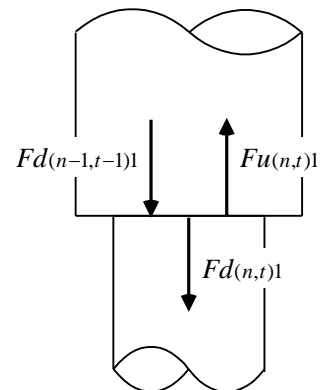
$$Fd(n, t)1 = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot Fd(n-1, t-1)$$

Z_1 : 接点 n より上の杭のインピーダンス

Z_2 : 接点 n より下の杭のインピーダンス

$Z = \frac{EA}{c}$ (インピーダンス E : ヤング係数,

A : 杭断面積, c : 応力波速度)



2) 接点 $n+1$ から来た反射波 $Fu_{(n+1,t-1)}$ の接点 n での反射と透過

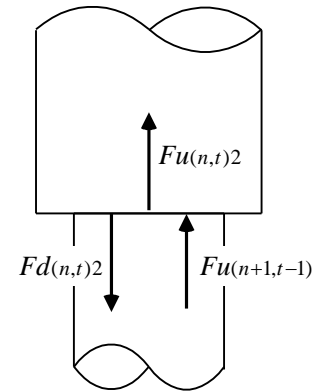
$$Fd_{(n,t)2} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot Fu_{(n+1,t-1)}$$

$$Fu_{(n,t)2} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot Fu_{(n+1,t-1)}$$

したがって、接点 n からの反射(上昇)波 $Fu_{(n,t)}$ と入力(下降)波 $Fd_{(n,t)}$ は、以下の通りとなる。

$$Fu_{(n,t)} = Fu_{(n,t)1} + Fu_{(n,t)2}$$

$$Fd_{(n,t)} = Fd_{(n,t)1} + Fd_{(n,t)2}$$

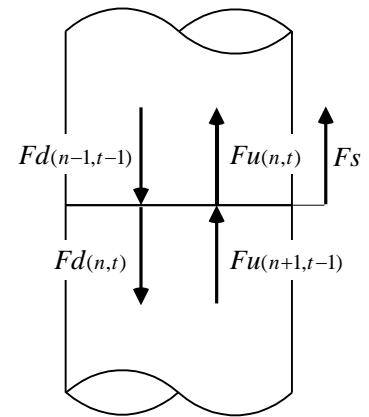


② 接点 n に周面摩擦力が作用する場合

接点 n に周面摩擦力が作用する場合は、接点での力の釣り合いと速度の連続性から、接点 n での反射と透過は以下の通りとなる。

$$Fu_{(n,t)} = Fu_{(n+1,t-1)} + \frac{Fs}{2}$$

$$Fd_{(n,t)} = Fd_{(n-1,t-1)} - \frac{Fs}{2}$$



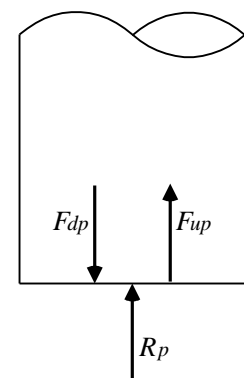
(2) 杭先端での波動伝播

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。

この式が示すとおり、先端への入力波が先端の抵抗より大きい場合は、反射波はマイナスすなわち引張り波となる。また逆に入力波が先端抵抗より小さい場合は、反射波はプラスすなわち圧縮波となる。

$$Fdp + Fup = Rp$$

$$Fup = Rp - Fdp$$



(3) 特性曲線法の計算の流れ

以上の各接点での計算を特性曲線上で表現すると以下の通りとなる。 F_s , R_p は、波動計算で得られる、その時の変位、速度から地盤パラメータにより計算される。

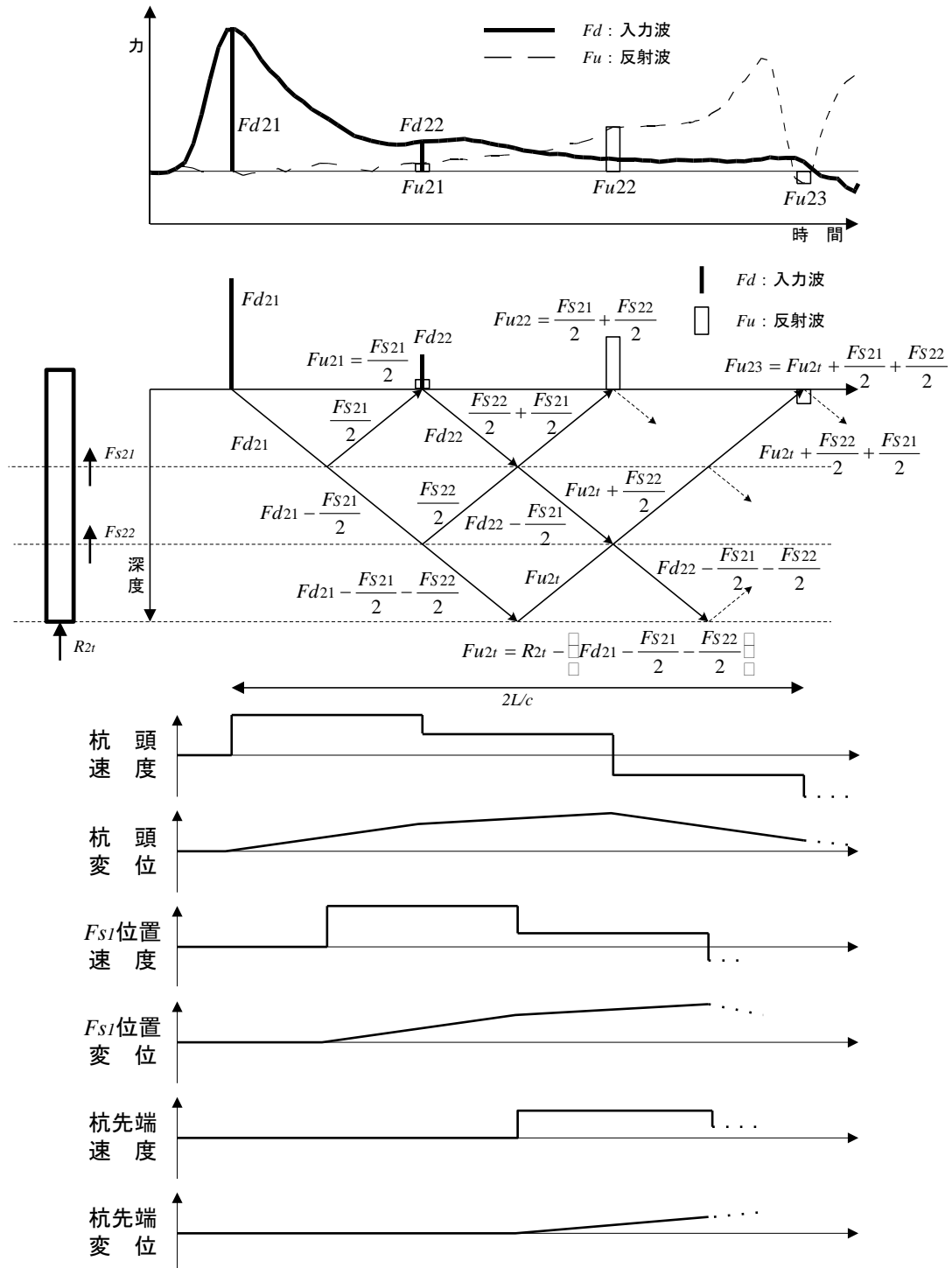


図 3-2 特性曲線法の計算

4. 解析結果例

File	TEST1		
Pile	D600 x T100 x L11.000		
	PC		
Hammer	D-6055	Embedded length	6.00
Ram mass	6 ton		
Hammer efficiency	40%		
Drop height	1.5 m		
Input energy	88.2 kNm	Modeled static resistance	
Trasfered energy	35 kNm	Shaft	452 kN
		Toe	1781 kN
Final set head	4.6 mm	Total	2233 kN
Final set toe	4.5 mm	Mobilised static resistance	
		Shaft	452 kN
Maximum compression stress	48 MPa	Toe	1781 kN
Location	-5.0 m	Total	2233 kN
Maximum tension stress	-4.5 MPa		
Location	-9.4 m		

