

# 5. 打撃式杭打ち機構に関する研究

## —緩衝材と打込み特性—

建設省土木研究所 \*持丸修一・江本平・境友昭

### 1. まえがき

打撃式杭打機では、杭を破壊することなく打撃の力を杭に効率良く伝達し、かつ音の発生を少なくするため、ハンマとアンビルもしくは杭頭部の間に緩衝材を挿入する。現在、緩衝材としては主に木製のものが多く用いられているが、その耐久性の向上が望まれている。また、杭打機についてはその低騒音化に対する要望には根強いものがある。しかしながら、緩衝材の特性と杭打時の騒音や杭の打込み性能との関連性についてはまだ定量的に把握されていないのが現状である。

本論文は、打撃式杭打機の性能向上の一環として実施した一連の研究のうち、緩衝材の物性と杭の打込み特性の関係について示すものである。

### 2. 調査方法

#### 2.1. 既存の緩衝材の物性調査

##### 2.1.1. 既存の緩衝材の種類

本調査に用いた緩衝材の仕様を表-1に示す。直径は打撃実験に使用するため、実験装置のキャップの内径(205φ)と同じにした。

##### 2.1.2. 試験方法

緩衝材の弾性的性質を知るために、アムスラー材料試験機を使用して軸方向載荷試験を行った。

#### 2.2. 打撃模型実験装置による実験

##### 2.2.1. 打撃模型実験装置

実験装置の仕様を表-2に、装置全景を写真-1に示す。ハンマは振り子式で、最大落下高さは30cmである。緩衝材を納めるキャップは、底面を杭頭に溶接し、ガタツキを無くする構造とした。これは、本装置が横置き式のためである。

##### 2.2.2. 測定方法

ラムの落下高さは、緩衝材なし、フォステロン、赤樫の場合は、15cm、その他はすべて30cmで行い、各打撃毎に図-1に示す測定点で杭の軸方向のひずみ、音響インテンシティ、音圧、杭表面の振動加速度を測定した。

表-1 実験用緩衝材の仕様

名称	直径 (mm)	長さ (mm)	質量 (g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	バネ定数 (kgf/cm)	
赤 樫	気乾	205.7	150.1	4.905	0.78	114,000	$2.52 \times 10^6$
	湿	206.1	150.0	4.851	0.97	100,000	$2.22 \times 10^6$
赤ダマ パンパ	A	205.0	105.0	16,370	-	14,000	$0.44 \times 10^6$
	B	#	#	16,781	-	16,000	$0.50 \times 10^6$
	C	#	#	3,746	1.14	700	$0.02 \times 10^6$
フォス テロン	1枚	205.7	13.5	603	1.35	39,000	$7.27 \times 10^5$
	2枚	#	27.0	1,213	1.36	47,000	$4.26 \times 10^6$
	4枚	#	53.9	2,451	1.38	38,000	$1.75 \times 10^6$
フォー ステン	8枚	#	107.8	4,887	1.37	39,000	$0.90 \times 10^6$
	S	*196	*32.8	2,997	3.01	1,400~3,700	$0.14 \sim 0.38 \times 10^6$
血イネ	P	*195	*32.1	2,340	2.44	800~2,400	$0.08 \sim 0.24 \times 10^6$
	1枚	198.5	**13.8	1,426	-	-	$0.015 \times 10^6$
血イネ	2枚	#	**22.3	2,851	-	-	$0.022 \sim 0.026 \times 10^6$
	3枚	#	**30.5	4,278	-	-	$0.058 \sim 0.046 \times 10^6$
	6枚	#	**55.5	8,556	-	-	-

\* 納入時の寸法

\*\* 右図の寸法



### 2.3. 杭打ちシミュレーション

土木研究所で開発した波動方程式による杭打ち解析プログラムによりシミュレーションを行った。

#### 2.3.1. 波動方程式による杭打ち解析プログラム

波動方程式による杭打時の挙動の解析手法として1960年にE. A. L. Smith<sup>1)</sup>により、杭打時のハンマー杭-地盤系の挙動を、杭をバネでつながれた質点系、地盤を弾塑性バネとダッシュポットによって表わすモデルが提唱された。その後、この方法を改良した幾つかの杭打ち解析プログラムが開発されている。しかし、これらのモデルに用いられるパラメータの決定には不明確な点が少なくない。本調査で用いた解析プログラムの特徴は、大きく2つあり、差分法をベースとして、①波動方程式の差分に用いる  $\partial_t, \partial_x$  は、 $C \cdot \partial_t = \partial_x$  の関係を保つよう定め（ここで、 $C$ は杭系の波の速度、 $x$ は変位、 $t$ は時間である）、②杭要素のバネ定数をインピーダンスに置換えたことである。<sup>2)</sup>

#### 2.3.2. 打撃模型実験の杭打ちシミュレーション

打撃模型実験のシミュレーションは、①緩衝材なし、②フォステロン8枚、③フォーステン（スチール）の3つの場合について行った。

#### 2.3.3. 実杭打機による施工例のシミュレーション

実際の実杭打機をモデルとしたシミュレーションを行い、杭頭応力波形と貫入量について検討した。実杭打機として3機種の油圧ハンマーをとりあげた。杭は、何れの場合も鋼管杭である。

## 3. 調査結果

### 3.1. 既存の緩衝材の物性

実験により得られた応力-歪曲線から求めた緩衝材の弾性係数およびバネ定数は表-1右欄に示すとおりである。



写真-1 打撃模型実験装置全景

表-2 打撃模型実験装置仕様

項目	仕様	項目	仕様		
ハンマ	直径 cm	20	鋼管杭	外径 cm	13.98
	長さ cm	220		内厚 cm	0.6
	断面積 cm <sup>2</sup>	314		断面積 cm <sup>2</sup>	25.2
	質量 kg	540		長さ m	28.6
	落下高さ cm	30		質量 kg	562
キャップ内径 cm	21	装置全長 m	36.3		

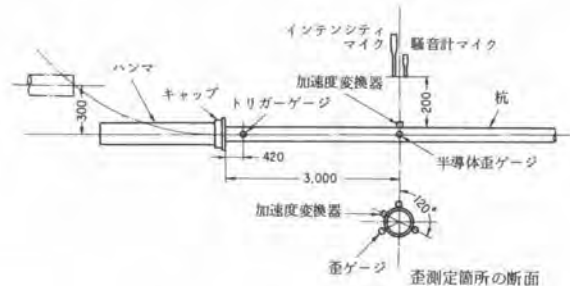


図-1 測定点配置図

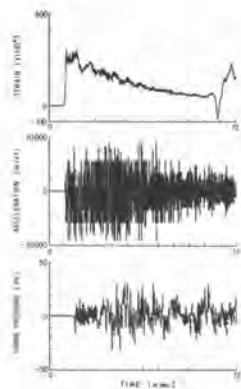


図-2 緩衝材なしの打撃実験結果

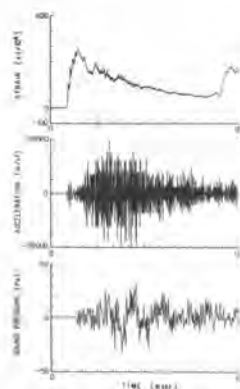


図-3 赤紙の打撃実験結果

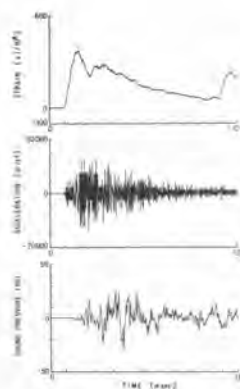


図-4 フォステロン(8枚)の打撃実験結果

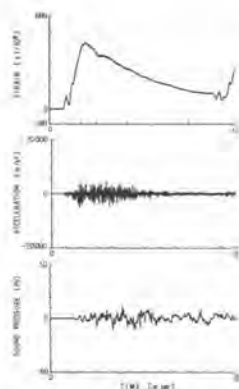


図-5 フォーステンの打撃実験結果

### 3.2. 打撃模型実験装置による実験

打撃模型実験装置を用いた各種緩衝材の実験結果を、図-2～5に示す。応力波形を見ると、その立ち上がりは緩衝材が入ると緩やかとなり、それも弾性係数の小さな緩衝材になるほど緩やかとなる。

### 3.3. 杭打ちシミュレーション

#### 3.3.1. 打撃模型実験の杭打ちシミュレーション

計算結果を実測の応力波形とともに示すと図-6～8のようになる。上段にシミュレーションによる波形を下段に実測波形を示す。直接打撃の場合は、シミュレーションでは応力の減衰が階段状となる。階段の1ステップの時間は0.85msで、丁度ハンマ(2.2m)の中を波動が往復する時間に等しい。実測波形ではこの様子はあまり明瞭ではないが、約0.9msの時間間隔で波形に変化がみられる。フォステロン8枚の場合は、実測波形、計算波形のいずれも直接打撃の場合より最大値に達するまでの時間が延びて、全体に滑らかになっている。打撃力の最大値は実測19.6tfに対し、計算値は19.7tfと良好一致を示している。

#### 3.3.2. 実杭打機のシミュレーション

実杭打機の実測値とシミュレーションによる計算値を比較すると、図-9のようになる。上段に計

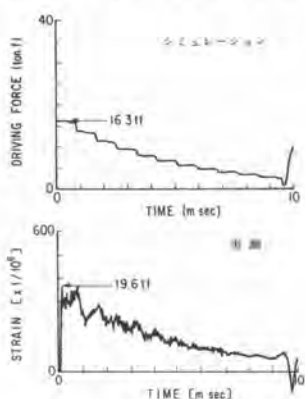


図-6 緩衝材なしのシミュレーション結果

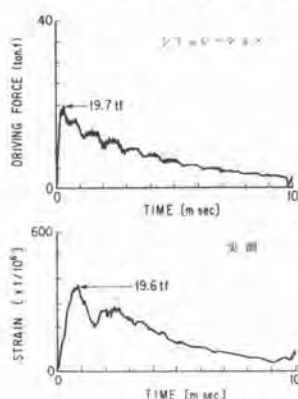


図-7 フォステロン(8枚)のシミュレーション結果

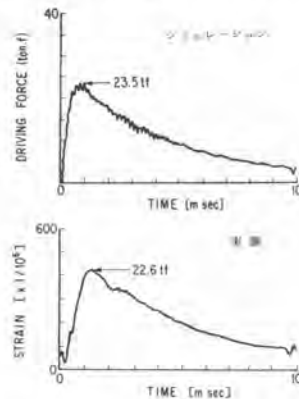


図-8 フォーステン(S)のシミュレーション結果

算結果による応力波形と貫入量を、  
下段に実測の応力波形、打撃力F、  
貫入量S、およびリバウンド量Rを  
示す。応力の波形、最大値ともに実  
測に近い結果が得られている。

### 3.4. 杭打ちシミュレーションによ る最適な緩衝材の検討

本解析に用いたシミュレーション  
プログラムは実杭打機のシミュレ  
ーションの場合、一部現実と合わない

点もあったが、機構がシンプルな杭打機では比較的良くシミュレート  
できることがわかった。そこで、油圧ハンマTを例として、地盤条件  
を一定にしたまま緩衝材の条件を変えて、貫入量が最大となる条件を  
求めた。緩衝材は架空のものであるが、密度は $1.0\text{ g/cm}^3$ で弾性係数  
は① $E=5\times 10^2\text{ kgf/cm}^2$ 、② $E=5\times 10^3\text{ kgf/cm}^2$ 、③ $E=5\times 10^4\text{ kgf/cm}^2$   
の3種類として、各緩衝材毎に、厚さを変えて計算した。この時の最適応力波  
形（貫入量が最大となる波形）を図-10に示す。この計算に使った緩衝材①、  
②は、実際に使われているものより貫入量の増大に効果があることがわかった。

### 3.5. 打込み特性の優れた緩衝材の試作

これまでの打撃実験およびシミュレーション結果から、貫入特性に  
優れた緩衝材の試作を行った。基本的な考え方は、緩衝材と杭とのイン  
ピーダンスを整合させるようにすることである。この考え方に従って緩  
衝材のインピーダンスを階段状に5段階に変えた緩衝材（複合クッション）  
3種類を試作した。打撃実験結果の一例を図-11に示す。木製の緩衝  
材（赤樫）に比べて応力波形の立ち上がりも緩やかで、加速度、音圧  
も小さく、緩衝材として優れた特性をもつことがわかった。

## 4. あとがき

打撃式杭打機において、緩衝材の物性と杭の打込み特性の関係は、杭頭応力波形によって把握でき、  
杭打ち特性の優れた緩衝材の波形はその立ち上がりも緩やかであることがわかった。打撃力を効率良  
く杭に伝えるためには、緩衝材と杭とのインピーダンスを整合させることが必要であることを示し、  
この考え方に基づいた緩衝材を試作し、打撃模型実験によって所期の特性を有することを確認した。  
今後は、新型緩衝材の実杭打機での杭の打込み試験等による性能の確認を行う予定である。

### 参考文献

- 1) E. A. L. Smith "Pile-Driving Analysis by the Wave Equation" ASCE, SM4, pp.35~61, Aug. 1960.
- 2) 境 友昭「波動方程式による打撃式杭打機構の解析」第20回土質工学会研究発表会, 1985.

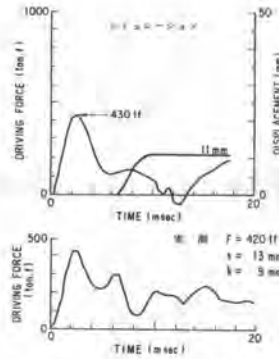


図-9 実杭打機のシミュレ  
ーション結果

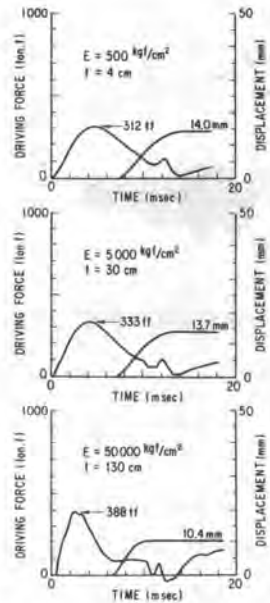


図-10 シミュレーションに  
よる緩衝材の検討

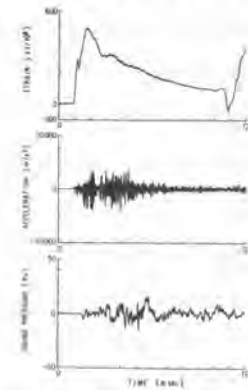


図-11 複合クッションの  
打撃実験結果