

打撃反射波による杭の形状推定手法の研究

近藤 次郎 宮崎 祐助
芳賀 孝成 崎本 純治

Study of a Method of Estimating Pile Shapes by Analysis of Impact-Response Waves

Jiro Kondo Yusuke Miyazaki
Takashige Haga Junji Sakimoto

Abstract

The integrity test for estimating pile length and configuration by reflection waves made by hammer blows on the pile head requires a correct understanding and judgment of the method of testing and the results. In this study, experiments were carried out to grasp the relations between pile configuration and reflection waves. The following were made clear as results. (1) Impact waves are reflected at parts where cross-sectional areas change, and the reflection rate is decided by the cross-sectional area ratio and the ratio of change in cross-sectional area. (2) At a part where cross-sectional area changes at a constant rate, the acceleration of the reflection wave becomes zero, and the reflection wave velocity is maintained constant. (3) If the waveform of the impact wave varies, especially the duration, so will the reflection waveform and reflection rate vary. (4) On the job, because of damping of the impact wave due to resistance of the soil and disturbance of the waveform by reinforcing steel, the impact force should be set carefully so as not to be too small.

概要

杭頭を軽ハンマーで打撃し、得られた反射波によって杭長や形状を推定する健全性試験（インテグリティテスト）を実施する場合、試験の方法と結果に対する正しい理解と判断が要求される。この研究では、インテグリティテスト適用の際に必要な判断のうち、最も重要な杭形状と反射波の関係を把握するための実験を行なった。実験の結果、以下のことが明らかになった。(1) 杭頭打撃波は断面積の変化する面で反射し、その反射率は断面積比および断面積変化の割合で定まる。(2) 断面積が一定の割合で変化する区間では反射加速度は0となり、反射波の速度は一定値を保つ。(3) 打撃入力波の波形、特に継続時間が異なると、反射波および反射率が変化する。(4) 実杭では周面地盤の抵抗による入力波の減衰、および鉄筋による波形の乱れが生じるため、打撃力の設定には注意を要する。

1. はじめに

既設杭の健全性を調査する方法として、杭頭を軽ハンマーで打撃し、得られた反射波によって杭の長さや形状を推定するという手法がある。欧米では実用に供する試験機も考案されており、実務に利用されている。この打撃応答による健全性試験（インテグリティテスト）を実施する場合、当然のことながら試験の方法と結果に対する正しい理解と判断が要求される。

この研究では、インテグリティテスト適用に必要な判断のうち最も重要な、杭形状と反射波の関係についての実験を行ない、杭形状に対する打撃反射波の典型パターンを把握するとともに、杭形状推定上の問題を考察した。

2. 理論的背景

一般に、長い弾性棒において、弾性波 σ が不連続面に到達すれば、図-1に示すように、一部は反射率 R で反射し、他はIIへ透過する。

I, IIの材質が等しい場合は、杭断面のインピーダンスの変化が断面積比だけで表わせ、反射率 R は、

$$R = \frac{-1+r}{1+r} \quad (\text{式-1})$$

ここに、 $r = A_2/A_1$

A_1 ：入力側断面積

A_2 ：透過側断面積

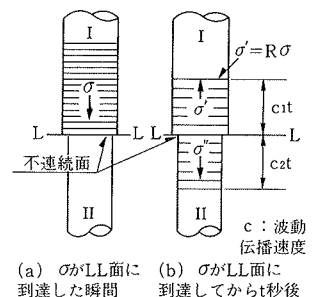


図-1 不連続面における反射と透過

と表わすことができる。

反射率 α は反射波 σ' を用いると、

$$R = \sigma' / \sigma \quad (式-2)$$

であり、また、弾性波は、Thomas Young の式から、

$$\sigma = \frac{v}{c} E, \quad \sigma' = \frac{v'}{c} E \quad (式-3)$$

ここに、 v, v' : 杭体粒子速度

c : 波動伝播速度 E : 杭材の弾性係数

式-2、式-3を式-1に代入して、

$$\frac{-1+r}{1+r} = \frac{v'}{v} \quad (式-4)$$

が得られる。弾性波の加速度を実測し、積分して得られた杭体粒子速度を式-4に代入すると、不連続面の断面積比 $r = A_2/A_1$ が求まるため、杭の断面積の変化を推定する手法が考えられることになる。

3. 打撃反射波の特性

3.1. 実験方法

2. で述べた理論を実杭に対して適用するために、杭欠損状況の変化に対する反射波の関係についての実験を行った。杭断面形状の変化は、(A) 断面積の減少率が異なる場合、(B) 断面積の減少区間長が異なる場合、と二つの

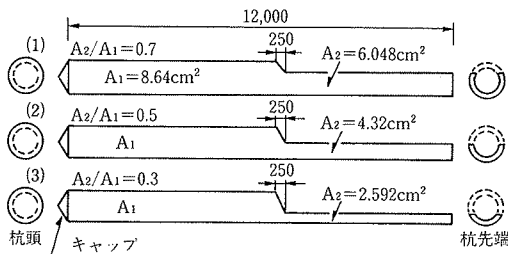


図-2 欠損パターン A 模型杭 3 種

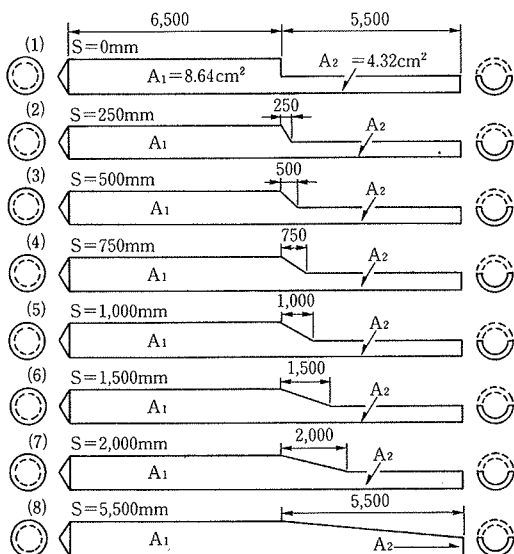


図-3 欠損パターン B 模型杭 8 種

欠損パターンを設定した。図-2、図-3にそれぞれの場合で作製した3種および8種の試験杭を示す。杭材は一般構造用炭素鋼で、杭径 89.1 mm, 肉厚 3.2 mm, 長さ 12 m である。杭頭には打撃力が杭体中を一様に伝播するように円錐形の鉄製キャップを取り付けた。

実験は、杭頭を重量 0.6 kgf および 1.2 kgf の 2 種の鉄ハンマーによって打撃し、その時生じた波動の加速度を、圧電型加速度計で測定した。実験の測定システムを図-4に示す。また、これらの機器の仕様を表-1に示した。

3.2. 実験結果

3.2.1. 断面減少率と反射波 図-5に欠損パターン A での実験結果を示す。なお、この杭頭粒子速度波形は加速度をアナライザーで積分して得ている。断面積減少率 $r = A_2/A_1$ と、入力波に対する反射波の大きさで示される反射率 $R = v'/v$ の関係を図-6に示す。図-6には式-1で求まる R も示した。実測値の反射率 R はすべて理論値より大きめの値となっている。これは図-7に示すように、加速度計を杭頭に接着させているため、欠損部からの真の反射波 W_1 と杭頭で再び反射した波動 W_2 が重なり合い、粒子速度 v' が理論値である W_1 の粒

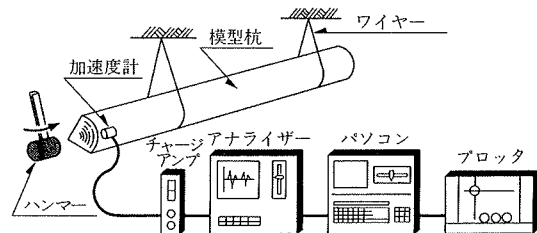


図-4 測定システム

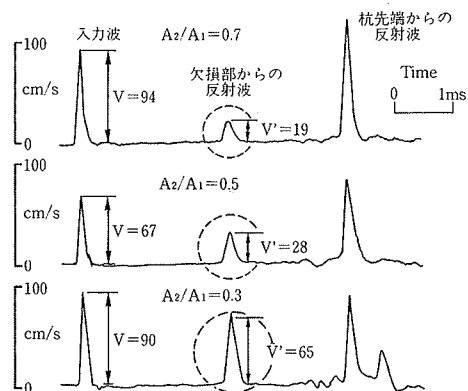


図-5 欠損パターン A 杭の波形 (ハンマー大)

使用機器	形式	主な仕様
加速度計	リオン PV-90B	周波数範囲 1~25,000Hz 感度 1.5 PC/G
測定器 (チャージアンプ)	リオン VM-27	測定範囲 0.01~3,000G
アナライザー	岩通 SM-2100	サンプリング 100kHz まで
パソコン	YHP HP-9826A	CRT, FDD 内蔵
プロッタ	YHP 9872T	用紙自動巻取り

表-1 機器仕様一覧表

子速度より大きい値になるためと考えられる。このことは、加速度計を杭頭から 50 cm, 100 cm と離れた位置に接着した場合の杭頭粒子速度波形が図-8 に示すように、 W_1 および W_2 が分離されて記録され、真の反射波 W_1 の反射率 R が理論値に近い値となっていることから明らかである。すなわち、図-8 に示した $r=0.5$ の場合では $R=-0.33$ となっている。なお、 v' の理論値に対する増大率は、

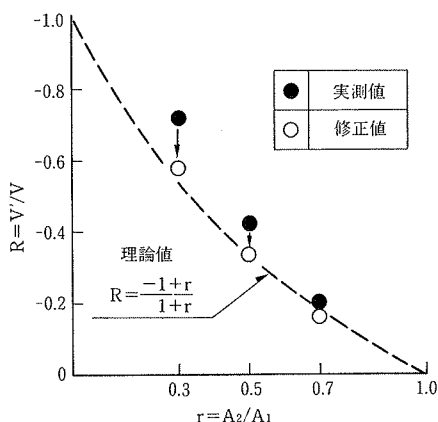


図-6 r と R の関係

3.2.2. 断面減少区間長と反射波

(1) 反射波の継続時間

断面減少区間長 S を変化させたパターン B の試験杭 8 種に対する実験で得られた加速度および速度波形を図 9(1)~(8)に示す。減少区間長 S が 0 mm, 250 mm, 500 mm と大きくなるに従って、断面積減少部からの反射波の継続時間 T は長くなるのが認められる。図-10に断面減少区間長 S と反射波の継続時間 T の関係を示す。 S と T は一次関数の関係となっており、 $T=0.00032 S+0.32$ (ms) (式-5)と表わされる。これは図-9(5)の拡大図に示すように加速度は断面減少が始まる断面 I では正(引張)側に、断面減少が終了する断面 II では負(圧縮)側に卓越して生じているため、速度反射波は断面 I で始まり断面 II で終了する。そのため、 T は S の長さに比例して、式-5 で表現される。なお、式-5 の右辺第 2 項、0.32 ms は、断面が直角状 (r) に減少して T が全く増大しない時の継続時間である。この値は、この実験では杭材が均一で、しかも杭体内を一様に打撃波が伝播するため、杭頭打撃波の継続時間 T_0 に等しくなっている。

(2) 反射波の大きさ

断面減少区間長 S と入射波に対する欠損部からの反射波の大きさの比率 $R=v'/v$ の関係を図-11に示す。欠損部からの反射波の反射率 R は、断面減少区間長 S の増加に伴って対数的に減少し、平均的に、

$$R = -0.61 e^{-\frac{S}{1000}} \quad (\text{式-6})$$

と表わすことができる。しかし、 $S=5,500$ mm の場合には反射波が測定誤差に含まれてしまうほど小さく、その性状も不明確になっている。このように欠損部での反射

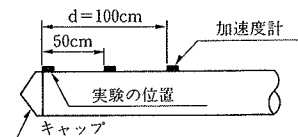


図-7 加速度計の位置 d

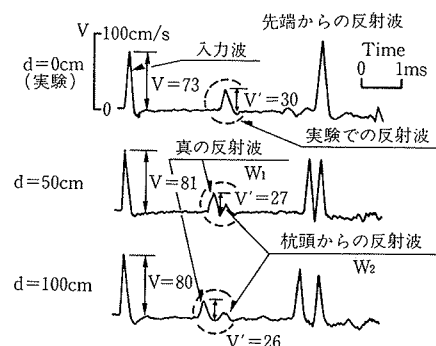


図-8 加速度計の位置と反射波

波の大きさには、前述した杭断面のインピーダンスの変化率 $r=A_2/A_1$ だけでなく、断面減少区間長 S も影響を与えることがわかる。これは、図-9(5)拡大図に示す、断面 I および断面 II で発生する反射波の加速度の大きさが、断面減少の割合で定まるためと考えられる。

4. 模型杭での打撃実験

4.1. 欠損形状と反射波

実際の杭で生じる杭断面の変化、すなわち、欠損部分から生じる反射波の典型パターンを、鋼管模型杭によって検討した。実験を行なった模型杭の欠損状況は(A)クラック、(B)屈折、(C)座屈、(D)断面減少の 4 種類である。図-12~図-16にこれらの模型杭の形状・寸法、および鉄ハンマーで杭頭を打撃して得られた粒子速度波形を示す。なお、計測システムは 3 章で述べた実験の場合と同様である。それぞれの杭の反射波の特徴を以下にまとめる。

(A) クラック (図-12参照)

クラック面において、断面積は連続的に減少、増大する。そのため、クラック面からの反射波(点線内)は、図-12中の拡大図に模型的に示すように、最初に引張波が生じ、次に圧縮波が生じている。

(B) 屈折 (図-13参照)

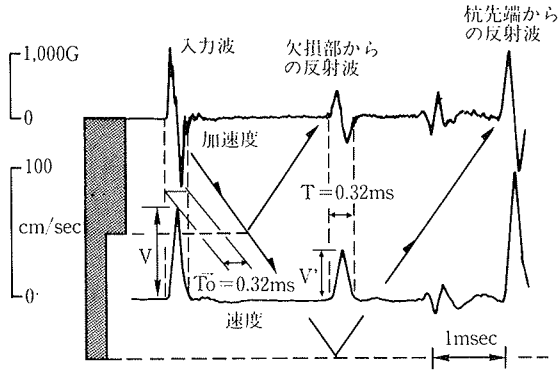
屈折部は、杭中間部に 5° の傾斜をつけて作製した。波形には屈折部からの反射波が認められない。このように微少の屈折の検知は、この方法では困難と考えられる。

(C) 座屈 (図-14参照)

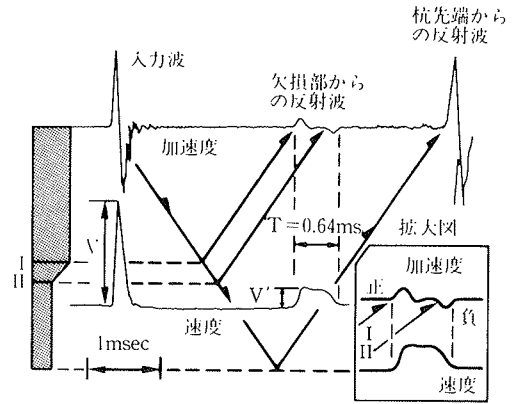
座屈部は、杭先端部に 50 mm の切れ込みを入れて作製した。先端が健全な杭の波形に比べ、先端からの反射波には、点線で囲んだ乱れが若干生じている。

(D1) 断面減少；平坦部なし (図-15参照)

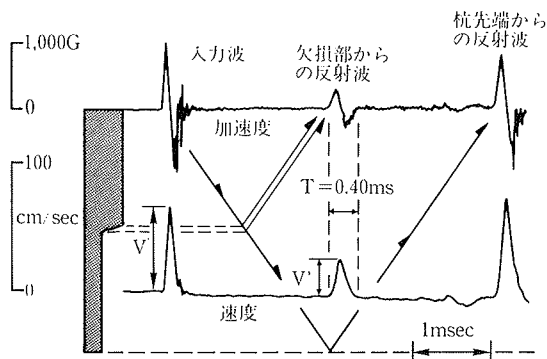
(1) S=0mm



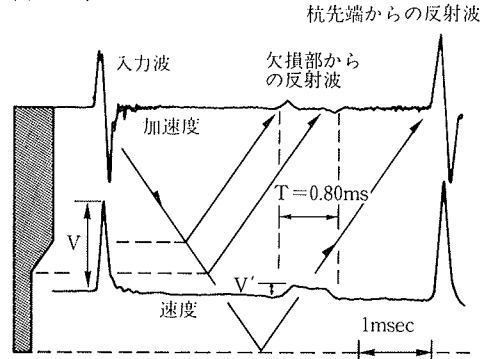
(5) S=1,000mm



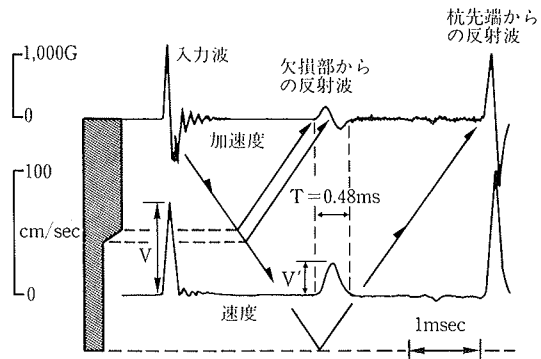
(2) S=250mm



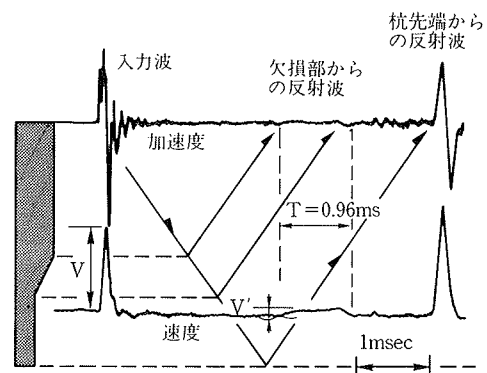
(6) S=1,500mm



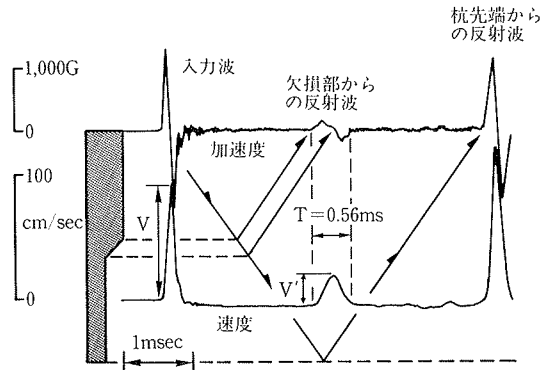
(3) S=500mm



(7) S=2,000mm



(4) S=750mm



(8) S=5,500mm

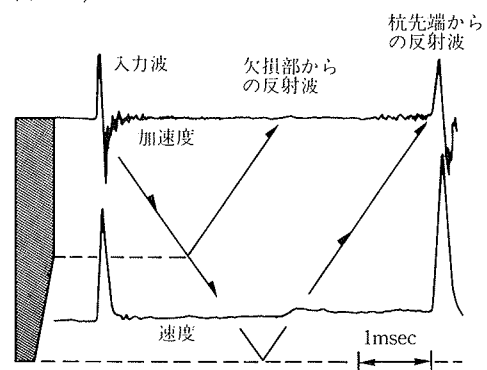


図-9 欠損パターン B 杭の波形

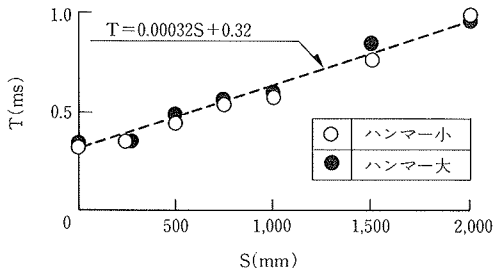


図-10 Sと継続時間 T の関係

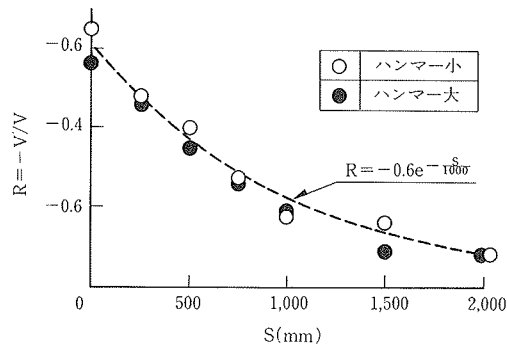


図-11 Sと反射率 R の関係

ハンマー	鉄	硬質プラスチック
平坦部		
なし	0.14	0.47
あり	0.20	0.55

表-2 欠損部の形状と反射率

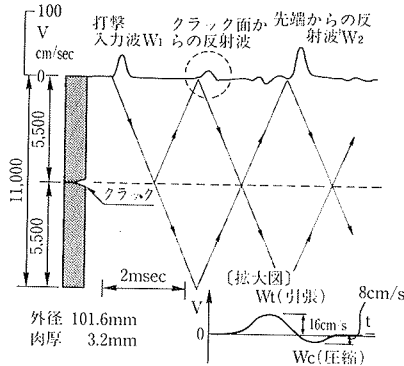


図-12 クラック杭の波形

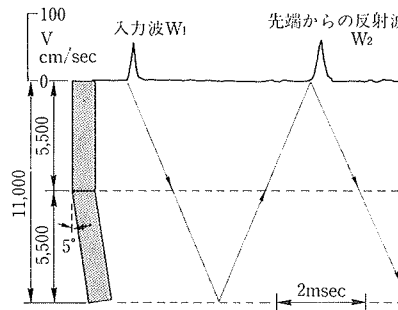


図-13 屈折杭の波形

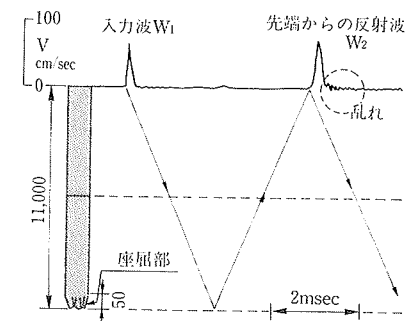


図-14 座屈杭の波形

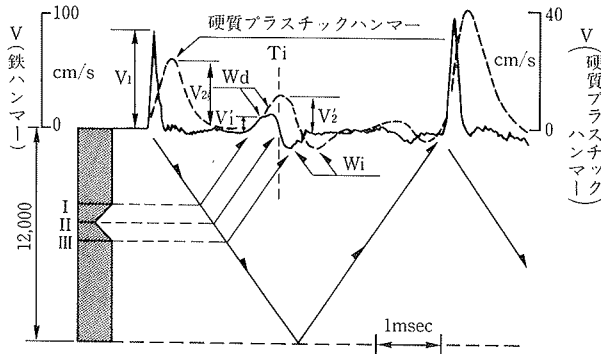


図-15 断面減少杭（平坦部なし）の波形

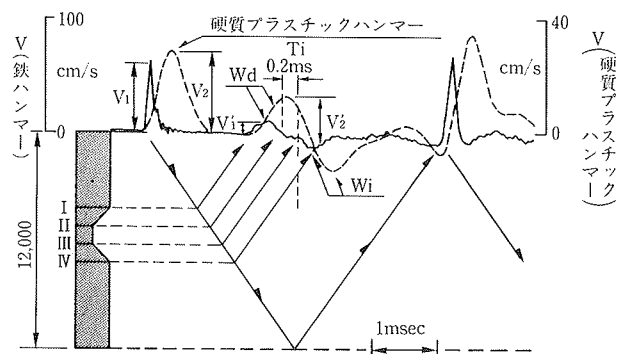


図-16 断面減少杭（平坦部あり）の波形

杭中央部に平坦部なしの凹部がある杭での実験の打撃は、これまでの鉄ハンマー（1.2 kgf）だけでなく、硬質プラスチックハンマー（1.5 kgf）も用いた。鉄ハンマーによる波形では、クラック杭の場合と同様、断面減少区間 I—II からの引張波 Wd に続き、断面増大区間 II—III から圧縮波が対称的に生じている。一方、硬質プラスチックのハンマーでの打撃は、鉄ハンマーでの打撃より入力波の立上がりが遅いため、Wd がピーク値をとる前に Wi が時刻 Ti で重なっている。

(D2) 断面減少；平坦部あり（図-16参照）

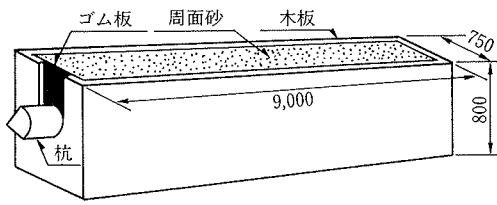
図-16は杭中央部の凹部に平坦部 II—III がある場合の杭の杭頭粒子速度波形である。鉄ハンマーの波形では、平坦部 II—III のため、Wd と Wi の間が約 0.2 ms の間、反射粒子速度 v が $v'=0$ となっている。しかし、硬質プラ

スチックハンマーによる波形では、 $v'=0$ の部分は存在せず、Wd と Wi は重なっている。

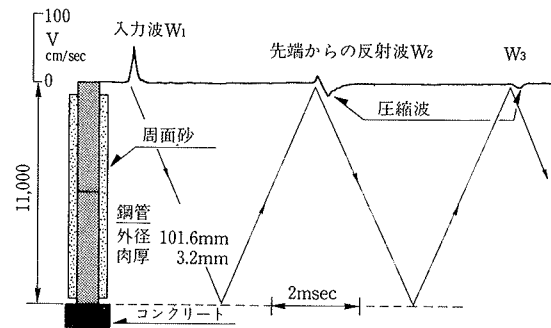
欠損部に平坦部がある場合、およびない場合における欠損部からの反射波の反射率 R を表-2 に示した。反射率はともにハンマーによって異なることがわかる。

4.2. 実杭での問題点

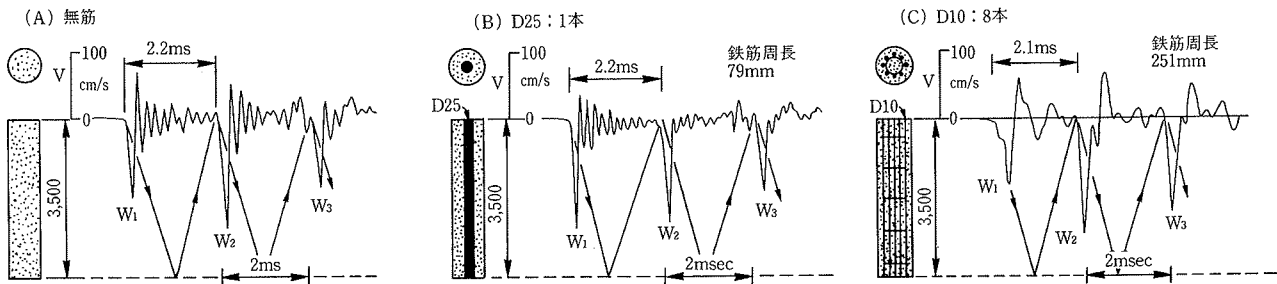
4.2.1. 打撃力の減衰 インテグリティテストを実施する場合の問題点として、杭周面および先端地盤による打撃力の減衰が考えられる。模型鋼管杭における打撃力の減衰を、図-17に示す装置によって検討した。周面抵抗には鬼怒川砂 ($\gamma t = 1.56 \text{ kgf/cm}^3$, 含水比 $w = 70\%$) を用い、杭先端はコンクリート塊へ固定した。図-18に、鉄ハンマーで打撃して得られた健全杭の速度波形を示す。杭先端からの反射波は、これまでの先端が自由端



図一17 周面砂の設置



図一18 周面および先端抵抗がある場合の波形



図一19 模型コンクリート杭3種の波形

の場合の波形とは異なり、圧縮波となっている。また、杭先端からの反射波は、打撃入力波が2往復する間にほぼ減衰している。入力エネルギーの地盤および杭自身による減衰は、杭・地盤によって程度は異なるが、インテグリティテスト実施の大きな障害になると予想される。

4.2.2. 鉄筋の影響 図一19(A)~(C)は、鉄筋量を変化させた3種の模型コンクリート杭を、鉄ハンマーで打撃して得られた粒子速度波形である。なお、コンクリート杭は杭径100mm、長さ3.5mであり、一軸圧縮強度280kgf/cm²のモルタル製である。

(A)~(C)3ケースにおいて、先端からの打撃反射波の到達時間 $T=2L/C$ (L: 杭長) は、約2.2msとなっている。しかし、(C)では、(B)に比べて鉄筋周長が約3倍であり、また、帯筋も使用しているため、波形が(C)および(B)に比べて大きく乱れている。このように、鉄筋による波形の乱れは、実杭へ適用上解決しなければならない問題と考えている。

5. まとめ

この実験から明らかになったことを列挙すると、以下のとおりである。

(1) 杭頭打撃波は断面積の変化する面で反射する。その反射率は、断面積が直角状に変化する場合は断面積比で、また、断面積が徐々に変化する場合は断面積変化の割合で定まる。

(2) 断面積が一定の割合で変化する区間では反射加速度は0となり、反射波による粒子速度は一定値を保つ。

(3) 打撃入力波の波形、特に継続時間が異なると、断面変化面からの反射波形およびその反射率が変化する。

(4) 実杭では、杭材の内部抵抗および地盤の抵抗による打撃入力波の大きな減衰が予想されるため、感度の良い加速度計を用いるか、打撃エネルギーを大きくする必要がある。

(5) また、実杭では、欠損の程度および鉄筋などによるノイズによって計測上の限界があり、それによって推定精度が定まる。

打撃反射波によるインテグリティテストを実務に適用する際の予備知識を得るために、模型杭を使って基礎的な実験を実施した。計測方法、入力エネルギーの大きさなど明確にすべきことは多いが、拡底杭の先端部検査などこの方法の他方面への利用も考えられ、今後実用に向けて実験を重ねていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 境ほか：“非破壊的方法による杭の形状計測”，第22回土質工学研究発表会，(1987)，pp. 1237~1238
- 2) 川端，本間，下坪：“杭の非破壊検査技術の開発(3)一杭の形状計測技術一”，第23回土質工学研究発表会，(1988)，pp. 1457~1458
- 3) Rausche, F., Likins, G. E., Hussein, M.: "Pile integrity by low and high strain impacts", The Third International Conference on Application of Stress Wave Theory on Piles, (1988), pp. 44~55