

◆ 報文 ◆

インティグリティ試験を用いた場所打ち杭の品質管理

市村靖光* 大下武志** 塚田幸広***

1. はじめに

近年、打込み杭に替わって場所打ち杭や埋込み杭のシェアが増加している。特に場所打ち杭は、平成6年度の施工実績(道路橋)の約7割を占めている。これは環境問題に対応するため、騒音・振動の少ない工法へと移行していることを示している。一方、場所打ち杭においては工場で製造される鋼管杭やPHC杭に比較して、現場条件の影響を受けやすく、所定の支持力を確保するためには高度な品質管理が不可欠となる。しかしながら、現状では施工後の品質確認は行われておらず、掘削完了時の掘削孔の深さを検尺テープで、また形状を超音波等で測定するのが一般的である。したがって、実際の杭形状を必ずしも測定しているわけではなく、場合によっては地下水などの影響で出来上がった杭の形状が設計通りとはならないことも考えられる。これは、これまでに非破壊的な調査法が確立されておらず、コストのかかる杭打設後の掘削調査やコアボーリングといった手法でしか地中の杭の形状を評価することができなかつたためである。以上のことを鑑み、非破壊的かつ迅速、低成本でコンクリート打設後の杭形状を推定しようとするインティグリティ試験(Integrity Test、以下ではITと称す)の適用が欧米を中心に増加している¹⁾。この手法では、全数検査が可能であり、わが国においても標準的な手法として普及を図る必要があり、コンクリート打設後の品質管理に用いる際の有効性を明らかにすることを目的に、全国規模で現場試験を実施した。

2. 試験原理

ITは、図-1に示すように杭頭をハンドハンマで軽打することにより低レベルのひずみを発生させ、そのときの杭の応答を加速度計等で計測する試験法である。打撃により発生した入力波は、杭の材質が均一で断面積に変化がない場合には、一定の

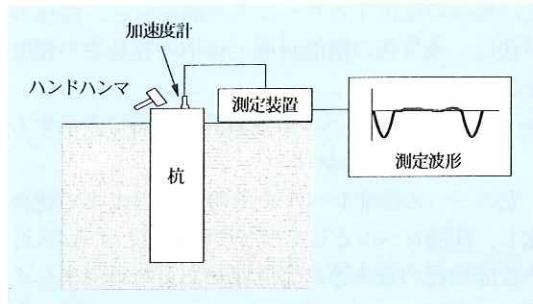


図-1 IT の方法

速度で振幅を弱めながら進んでいくが、杭の断面変化や地盤変化がある場合には反射波が生じる。反射波は、不連続面いわゆるインピーダンスの変化によって生じるものである。最も顕著なインピーダンスの変化は杭先端であり、杭頭を打撃して反射波が戻ってくるまでの時間は、波動が杭を1往復する時間に等しく、波動の伝播速度がわかれば、杭長が推定できる。

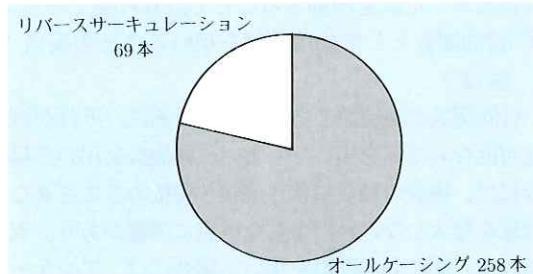


図-2 工法別杭本数

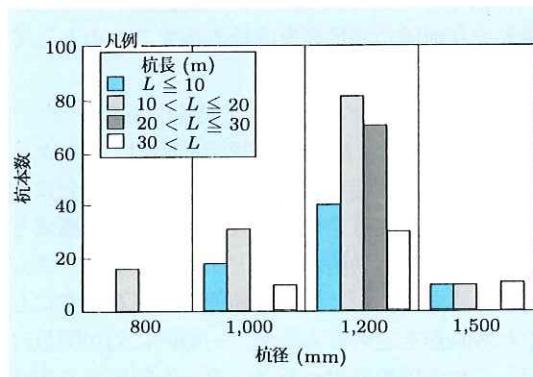


図-3 杭径・杭長別の杭本数

表-1 試験現場の概要

| 現場名 | 測定装置 (表-2参照) | 杭条件 | | | | 地盤条件 | | |
|-----|-----------------|-----------|------------|----|---------------|------------|----------|----------|
| | | 杭長 (m) | 杭径 (mm) | 本数 | 施工法 | 中間層の 有無 | 先端地盤 | 周面地盤 |
| A | c | 45.0 | 1,200 | 10 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | シルト質粘土 |
| B | c | 18.5 | 1,000 | 10 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | 砂、シルト |
| C | c | 17.0 | 1,200 | 9 | オールケーシング | 無 | 未風化泥岩 | シルト質砂、泥岩 |
| D | c | 7.5 | 1,000 | 10 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | 砂礫 |
| E | c | 10.0 | 1,200 | 10 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | 砂礫 |
| F | b | 52.0 | 1,200 | 16 | リバースサーキュレーション | 無 | 礫まじり中砂 | シルト |
| G | b | 34.5 | 1,200 | 4 | リバースサーキュレーション | 有 | 土丹 | シルト |
| | | 30.0 | 1,200 | 4 | リバースサーキュレーション | 有 | 礫まじり砂 | シルト |
| | | 28.5 | 1,200 | 4 | リバースサーキュレーション | 有 | 中砂 | シルト |
| | | 28.0 | 1,200 | 4 | リバースサーキュレーション | 有 | 中砂 | シルト |
| H | b | 41.5 | 1,000 | 6 | リバースサーキュレーション | 有 | 礫まじり中砂 | シルト、細砂 |
| | | 42.5 | 1,000 | 4 | リバースサーキュレーション | 有 | 礫まじり中砂 | シルト、細砂 |
| I | b | 19.5 | 1,200 | 8 | オールケーシング | 無 | 泥岩 | シルト質粘土 |
| | | 21.0 | 1,200 | 15 | オールケーシング | 無 | 泥岩 | シルト質粘土 |
| J | a | 46.0 | 1,500 | 11 | リバースサーキュレーション | 有 | 砂質シルト | 砂、シルト |
| K | a | 20.0 | 800 | 16 | リバースサーキュレーション | 有 | シルト質粘土 | シルト、砂 |
| L | a | 13.0 | 1,200 | 15 | オールケーシング | 有 | 砂 | 砂 |
| M | b | 19.0 | 1,500 | 4 | オールケーシング | 有 | 砂礫 | 砂礫、礫まじり砂 |
| | | 19.5 | 1,500 | 6 | オールケーシング | 有 | 砂礫 | 砂礫、礫まじり砂 |
| N | c | 23.5 | 1,200 | 10 | オールケーシング | 有 | 砂 | 砂 |
| O | b | 14.5 | 1,200 | 4 | オールケーシング | 有 | 砂礫 | 砂礫、粘土 |
| | | 14.5 | 1,000 | 4 | オールケーシング | 有 | 砂礫 | 砂礫、粘土 |
| P | b | 6.0 | 1,200 | 18 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | 粘土 |
| Q | a | 12.5 | 1,200 | 10 | オールケーシング | 有 | シルト | 砂礫、砂 |
| R | a | 10.0 | 1,000 | 8 | オールケーシング | 有 | 凝灰角礫岩 | 粘性土、砂礫 |
| | | 19.0 | 1,000 | 5 | オールケーシング | 有 | 凝灰角礫岩 | 粘性土、砂礫 |
| S | a | 8.5 | 1,500 | 10 | オールケーシング | 有 | 風化岩 | 粘性土 |
| T | a | 18.5 | 1,000 | 12 | オールケーシング | 無 | 砂礫 | 砂、シルト |
| U | a | 13.0 | 1,200 | 9 | オールケーシング | 無 | 粘土まじり砂礫 | 砂礫、粘土 |
| V | c | 6.0 | 1,200 | 3 | オールケーシング | 無 | 花崗岩 | 砂 |
| | | 5.5 | 1,200 | 9 | オールケーシング | 無 | 花崗岩 | 砂 |
| W | b | 11.0 | 1,200 | 6 | オールケーシング | 有 | 風化花崗岩 | シルト、砂 |
| | | 11.5 | 1,200 | 9 | オールケーシング | 有 | 風化花崗岩 | シルト、砂 |
| | | 12.0 | 1,200 | 9 | オールケーシング | 有 | 風化花崗岩 | シルト、砂 |
| X | c | 21.5 | 1,200 | 15 | オールケーシング | 有 | 花崗岩 | 強風化花崗岩 |
| Y | a | 27.0 | 1,200 | 10 | オールケーシング | 無 | 玉石まじり砂質土 | シルト |
| Z | c | 17.0 | 1,200 | 2 | オールケーシング | 無 | 凝灰岩 | シラス |
| | | 21.0 | 1,200 | 4 | オールケーシング | 無 | 凝灰岩 | シラス |
| | | 21.5 | 1,200 | 4 | オールケーシング | 無 | 凝灰岩 | シラス |

3. 現場試験の概要

3.1 試験杭の諸元

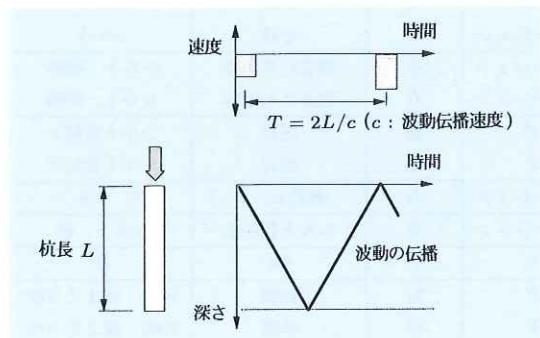
試験を実施したのは、表-1に示した全国26現場、総計327本の場所打ち杭である。図-2は施工法別の杭本数で、全体の約8割がオールケーシング

工法によるものである。また、図-3は杭径および杭長の分布を示しており、最小杭長は5.5m、最大杭長は52mである。

試験には、現在欧米を中心に広く利用されている測定装置a、b、cの3種類を用いた。これらの装

表-2 測定装置の種類

| 測定装置 | 仕様 |
|------|---|
| a | 装置構成：コンピュータ+コンディショナ 14bitA/D、HDDにデータ保存 加速度計：水晶圧電型（特殊粘土で設置） |
| b | 装置構成：専用機 最大ゲイン 100db 12bitA/D、512Kbyte メモリ 加速度計：ジルコチタン酸鉛セラミック圧電素子型 (特殊粘土で設置) |
| c | 装置構成：専用機 16bitA/D、350回計測可能 加速度計：水晶圧電型（グリスで設置） |



置の概要は表-2に示す通りで、基本的な測定原理には差がなく、加速度計の設置方法、フィルター処理方法などが若干異なっている。今回の現場試験では、F現場の同一杭に対して、これら3種類の装置による測定を行っている。その結果、杭先端からの反射波の到達時間は3者ともほぼ一致しており、測定性能は同じ水準にあると判断した。

3.2 試験方法

試験手順は、以下に示す通りである。

- ① 現場での試験本数は10本以上とし、試験杭が10本に満たない場合は全数を対象とする。また、このうちの1本を基準杭とする。
- ② 剣削完了時に従来通り検尺テープにより杭長(L_m)を測定する。次に、コンクリート打設から十分な養生期間を置いた後、基準杭に対してITを実施し、検尺長を用いて式(1)から波動の伝播速度(C)を算定する(図-4参照)。

$$C = 2L_m/T \quad (1)$$

ここで、 T : ITで計測した波動が杭中を1往復する時間

- ③ 基準杭以外の試験杭に対してITを実施し、基

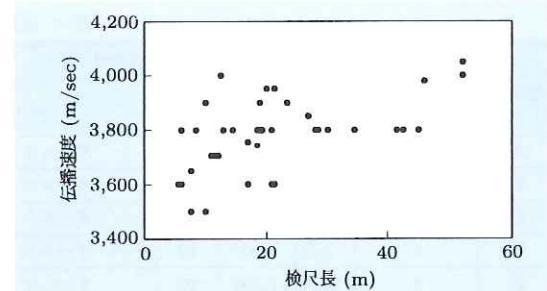


図-5 検尺長と伝播速度の関係

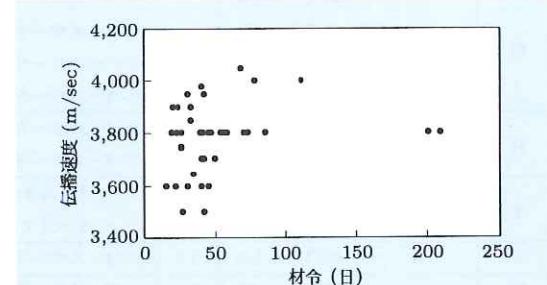


図-6 材令と伝播速度の関係

準杭で得られた伝播速度を用いて式(2)により杭長(L_i)を推定する。

$$L_i = CT/2 \quad (2)$$

また、ITでは杭頭中央部にセンサを設置し、10cm程度離れた位置をハンマで打撃し、再現性のある波形を採取した。

4. 現場試験の結果

4.1 伝播速度の分布

図-5は、基準杭での計測結果から得られた伝播速度と検尺長の関係を示している。伝播速度は最も多い3,800m/secを中心として3,500~4,050m/secの範囲に分布している。一般に、場所打ち杭での伝播速度は3,800~4,000m/sec程度と言われており²⁾、杭長が短い場合に若干低めのものが含まれているが妥当な値を示していると考えられる。また、杭長に比例して伝播速度が大きくなる傾向が見られる。これはコンクリートのヤング係数が深度方向に対して増加することに起因していると思われる。また、図-6は伝播速度と杭の材令の関係を示したものである。この図からは伝播速度が材令とは関係なくばらついていることがわかる。これは全ての試験杭が材令7日以上であったため、コンクリート強度がほぼ設計強度まで発現されて

おり、材令の影響が現れなかったと考えられる。

4.2 設計長と検尺長の差

図-7は、設計長(L_d)と検尺長(L_m)の差($L_m - L_d$)を示したものである。試験杭全体の9割は、検尺長の方が設計長よりも長めになっており、ほとんどの杭で設計長以上に掘削していることがわかる。さらに、このうちの半数は設計長に対する検尺長の差が+10cm以内であった。また、全体の1割は設計長よりも検尺長の方が短かったが、その差は-10cm以内となっていた。

4.3 杭長の推定精度

ITで杭長を推定するためには、杭先端からの反射波が明確に捉えられている必要がある。今回の現場試験では、ほとんどの杭で先端反射が確認できていた。その1例がY現場の試験杭で、図-8に地盤条件とともに測定波形を示す。図中の速度比は、ハンマ打撃時に発生する最大速度に対する比を表したものである。また、先端反射が明確な試験杭に対して、検尺長を真の杭長と仮定し、IT計測長との差($L_i - L_m$)を比較した。その結果を図-9に示す。

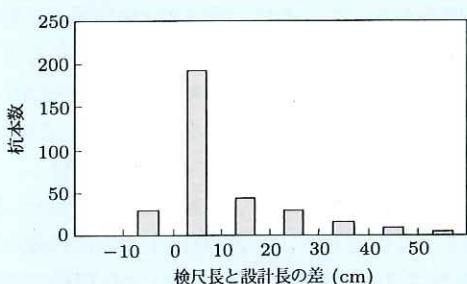


図-7 検尺長と設計長の差

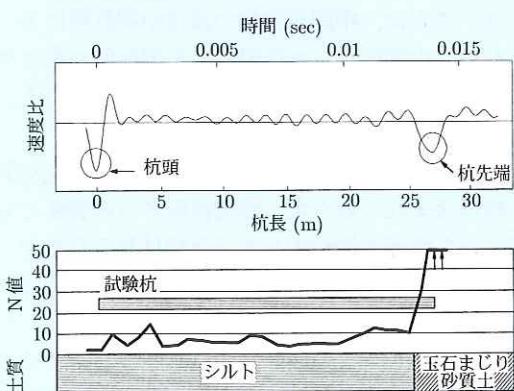


図-8 先端反射が明確な場合の測定波形と地盤条件

この図は計測長と検尺長の差を検尺長に対する割合で示したもので、実際の伝播速度と基準杭から得られた伝播速度の違いによる誤差も含まれているが、試験杭全体の7割が±2%以内の範囲に収まっている。加えて、±4%以上の差が生じているのは全体の1割に過ぎない。さらに、杭長別の推定精度を比較したものが図-10である。この図か

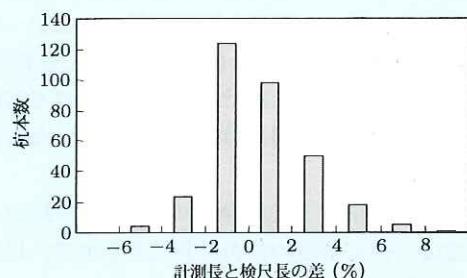


図-9 IT 計測長と検尺長の差

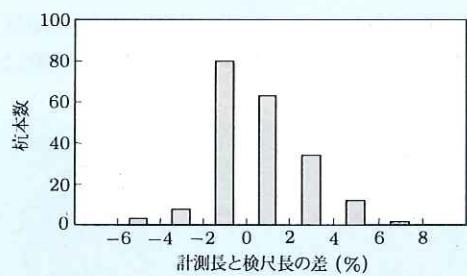
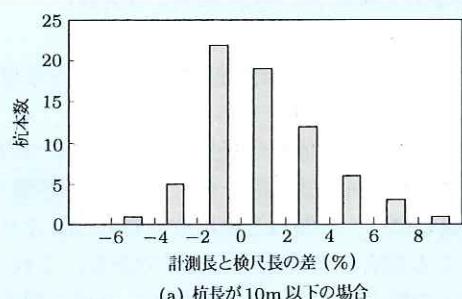


図-9 IT 計測長と検尺長の差

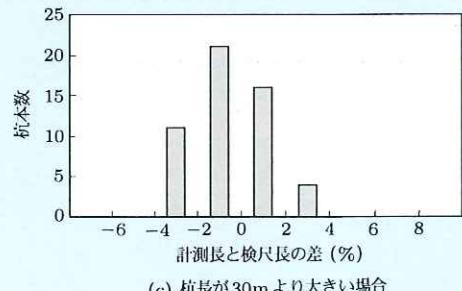


図-10 杭長別のIT計測長と検尺長の差

らは、杭長の違いによる顕著な差は見られないが、ITでは杭長が小さいほど長めに、また杭長が大きいほど短めに計測される傾向にある。特に杭長が10m以下では、長い杭に比較して±4%以上の差が生じた割合が1割程度高くなっている。これは、計測のサンプリングタイムは杭長の大小に関わらず一定にしているため、短い杭ほど計測精度が低下するためだと考えられる。また、施工法、杭径と推定精度の間には特別な関係は見られなかったが、杭径が800mmの場合には全ての杭で±4%以内に収まっている。これは杭径が小さいほど表面波(杭頭表面からの反射波)の影響が少ないためだと考えられる。

次に、推定精度と地盤条件の関連を整理した。ここでは、推定精度の良否を判定する上で、以下の3つの基準を設定した。

- ① 計測長と検尺長の差が±3%以内である
- ② 計測長と検尺長の差が±3%より大きい
- ③ 先端反射が確認できない

±3%という値は、伝播速度のばらつきを考慮して設定した一つの目安である。

図-11は、先端地盤の種別毎に上記の3つの基準に含まれる杭本数の割合を示している。砂質土、岩の場合には、計測長と検尺長の差が±3%より大きくなる割合が各々14%、12%である。これは、粘性土の場合の5%に比較して2.5~3倍に相当する。この理由として、砂質土や岩では杭と地盤のインピーダンスの差が小さく、反射波を明瞭に捉

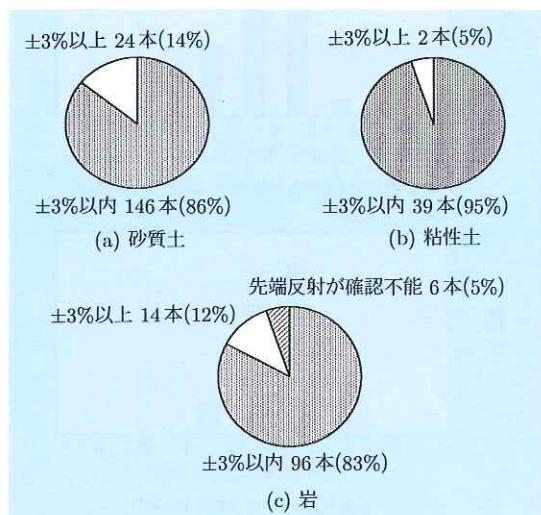


図-11 先端地盤の種別と推定精度の関係

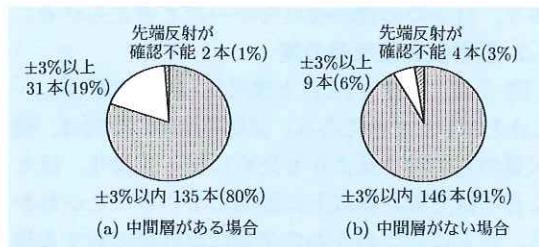


図-12 中間層の有無と推定精度の関係

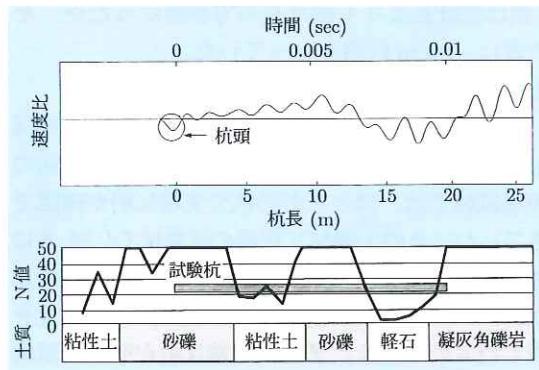


図-13 中間層がある場合の測定波形と地盤条件

えることが難しいことが挙げられる。特に、岩に限っては先端反射を確認できず、杭長が推定できない場合があった。また、図-12は中間層の有無と推定精度の関係を示している。中間層が有る方が無い場合に比べて、計測長と検尺長の差が±3%より大きくなる割合が3倍強になっている。これは、中間層の影響で先端へ透過する波動が減衰し、先端反射が不明瞭になることに起因すると思われる。このような例として、N値50以上の非常に硬い中間層(厚さ3m程度)が存在していたR現場での測定波形を図-13に示す。この現場では、先端地盤も硬質の岩であり、一層先端反射が小さくなっている。さらに、中間層が杭のほぼ中間位置にあつたため、中間層からの反射波と先端反射が重なり合い、先端反射の判別を困難なものにしている。

4.4 杭形状の推定

今回の試験杭には、拡底杭などの断面変化がある杭は含まれておらず、測定波形からの判断でも明らかな断面欠損が生じていた杭は見られなかった。このため、ITによる杭形状の推定可能性について、リバースサーキュレーション工法でケーシングを利用した杭の波形について考察した。この工法では杭頭に杭径よりも大きなケーシングを用いるため、杭頭付近で断面変化(減少)が存在する。

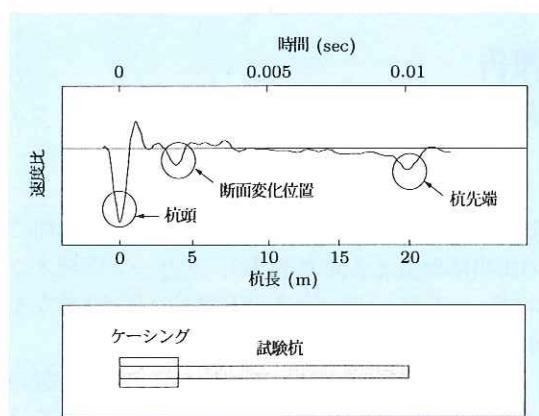


図-14 断面変化のある杭の測定波形

したがって、測定波形では入力と同成分の反射波が観測されるはずである。実際、K現場での試験杭では、図-14に示すように断面減少と思われる反射波を確認することができ、ある程度大きな断面変化を捉えることが可能であることを示唆している。

5. 結論

今回の現場試験から、ITの適用性に関して以下のことがわかった。

- ① 杭長52m程度までであれば、先端反射を確認することができる。
- ② 杭径1,500m程度までであれば、表面波の影響を大きく受けることはない。
- ③ 現在広く用いられている3つの方式の測定装置では、ほぼ同様の結果が得られる。
- ④ 従来から行われている検尺に対する杭長の推定誤差は、概ね±2~4%以内である。
- ⑤ 中間層がない場合には、許容される精度で適用できる。

⑥ 中間層が存在する場合には、波動の減衰が著しく、先端反射を捉えることができない場合がある。

⑦ 先端地盤が岩の場合には、杭とのインピーダンスの差が小さく、先端反射が不明瞭となることがある。

今後は、50mをこえる長尺杭での測定精度について検討するとともに、中間層が存在する場合など試験が困難な地盤条件を定量的に示し、ITの適用範囲をより明確にしなければならない。また、ハンマの種類、センサの固定法など試験条件の違いが測定波形に与える影響を定量的に評価し、試験手順の標準化³⁾を行い、試験法、解析法を含めた試験マニュアルを作成する予定である。

さらに、ITは地震などで損傷を受けた杭の被災度判定への適用も考えられ⁴⁾、現在土木研究所と土木研究センター、阪神高速道路公団、民間12社による「橋梁基礎構造の調査方法の開発」に関する共同研究を実施している。

謝辞：本論文の対象とした現場試験は、建設省の全国7つの地方建設局、及び北海道開発局管内の実現場で行ったものである。関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Seitz, J.M. : Pile integrity by low strain impacts-A state-of-the-art, Proc. of the 4th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, pp.627-637, 1992.
- 2) Seitz, J.M. : Low strain integrity testing of bored piles, Proc. of the 2nd Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, pp.94-102, 1984.
- 3) 塚田幸広、市村靖光、森芳徳：インティグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法に関する調査、土木研究所資料第3531号、1998。
- 4) 塚田幸広、市村靖光：杭基礎の調査法・補強法に関する新技術、土木施工、Vol.38, No.6, pp.70-75, 1997.

市村靖光*



建設省土木研究所
材料施工部
施工研究室研究員
Yasumitsu ICHIMURA

大下武志**



同 施工研究室長
Takeshi OSHIIITA

塚田幸広***



建設省東北地方建設局
酒田工事事務所長
(前 施工研究室長)
Yukihiko TSUKADA