

インテグリティ試験における波動伝播速度の遅速に関する基礎研究

A Fundamental Study on the Deacceleration of Wave Propagation Velocities in Integrity Tests

近 藤 博 (こんどう ひろし)

東海大学教授 工学部

外 岡 弘 敬 (とのおか ひろたか)

東海大学大学院工学研究科 博士前期課程

木 村 修 一 (きむら しゅういち)

東海大学大学院工学研究科 博士後期課程

本 間 重 雄 (ほんま しげお)

東海大学教授 工学部

1. はじめに

1995年の阪神淡路大震災では、建造物の基礎が甚大な被害を受けた。その基礎構造物の被災程度を確認するためにインテグリティ試験¹⁾ (以下、IT 試験と記す) が多用された。IT 試験は、杭の品質管理のうえで、杭の欠損部や、杭の形状を波動理論により非破壊的に測定する方法である。しかし、杭の欠損部等を推定するのに重要となる地盤拘束状況が杭体の波動伝播速度に与える影響についてはいまだ未解明である。

杭中の波動伝播速度について、田中ら²⁾は、超大型三軸圧縮試験装置を用い、模型杭に作用させる拘束圧を8段階 ($0.5 \sim 6.0 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$) と変化させ弾性波伝播速度を調べた。その結果、弾性波速度は若干のばらつきはみられるが、 $2.0 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ 付近までは拘束圧の増加に応じて遅くなり、それ以上では一定となると報告している。また、今田ら³⁾は人工地盤中にテフロン杭を埋設して行ったIT試験結果から、地盤拘束が弾性波に及ぼす影響として、杭の根入れ長が大きくなるほど、すなわち、側圧が大きくなると波動伝播速度は速くなると、田中らとは逆の結論を報告している。

本研究は、側圧装置で模型杭の一部に拘束圧を作用させる方法を採用するとともに、模型杭と周辺土の摩擦に着目した打撃試験を行った。その結果、杭中の波動伝播速度の遅速について新しい知見を得たので報告する。

2. 周面摩擦確認実験

2.1 静的摩擦実験

図-1は実験装置の概要を示したものである。側圧装置は、高さ10 cm、内径23.5 cmのモールド (以下側圧装置 A) で、モールド内側面に沿って厚さ0.12 cmのゴムチューブが設置してある。ゴムチューブを介して空圧により、所定の側圧 ($1.0, 2.0, 3.0 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ の3段階) を標準砂を介して模型杭に作用させた。この他に、高さ20 cmのモールド (以下側圧装置 B) も準備した。模型杭に所定の側圧を作用させたのち、載荷装置により、模型杭を1 mm/minで変位させ、そのときの周面摩擦力を測定した。

次に、模型杭の周面にグリスを塗布し周面摩擦を低減した実験も行った。模型杭の詳細については3.1で述べ

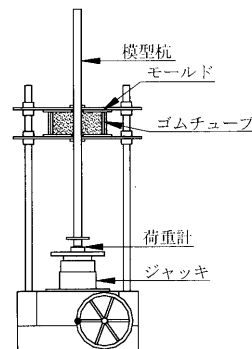
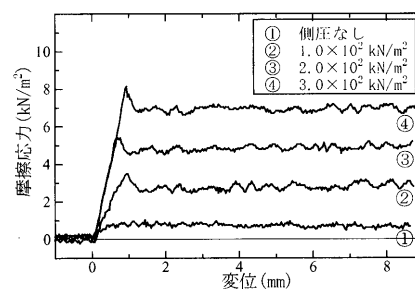
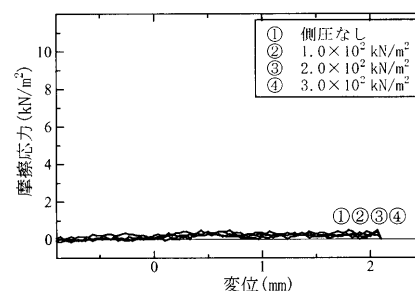


図-1 静的摩擦実験装置の概要



(a) 摩擦あり



(b) 摩擦低減

図-2 静的摩擦実験結果

る。

2.2 実験結果と検討

図-2は、静的摩擦試験での、摩擦応力-変位関係を示したものである。図-2(a)は摩擦がある場合、図-2(b)は摩擦を低減した場合の関係を示している。図から、摩擦がある場合では、変位約1 mmで最大の摩擦を示し、その後はほぼ一定値に収束することがわかる。また、側圧ゼロの線は、モールドに詰めた供試土の自重によ

て生じる摩擦応力を示している。しかし、摩擦低減の場合は、側圧をあげても、摩擦応力はほぼゼロで一定値を示した。よって、このような方法により、杭の挙動に及ぼす側圧と摩擦の影響を分けて検討できることになる。

3. 打撃試験と方法

3.1 模型杭

図一3は、アクリル製模型杭（直径3.5 cm）の概要を示したものである。模型杭 A（長さ100 cm）は、側面拘束条件と伝播波の減衰との関係を調べるためのものである。また、模型杭 B は、側面拘束条件と波動伝播速度の遅速の関係を調べるためのものである。模型杭 B は、長さ100 cm であるが、側面拘束部分を明確にするために、40, 20, 40 cm と3分割し、その中央部を拘束した。模型杭の上下の端から25 cm の位置に半導体ひずみゲージを貼付し、上のゲージをゲージ①、下のゲージをゲージ②とした。模型杭のポアソン比は0.3、弾性係数は 3.9×10^6 kN/m²、密度は1.238 kN/m³である。

3.2 実験方法

(1) 波動減衰実験

図一4は、波動減衰実験の概要を示したものである。側圧装置は2.1で述べた、静的摩擦実験に用いたのと同様である。この実験では、硬質ゴム台の上に模型杭 A を鉛直に立て、その中央部にモールドを設置し、静的試験と同様な方法で所定の側圧を作用させた。その後、模型杭と同径同材質の長さ10 cm のハンマーを所定の高さから自由落下させて打撃試験を行った。そのときの、ゲージ①、②での弾性波を計測し、拘束条件と波動減衰の関係を観察した。

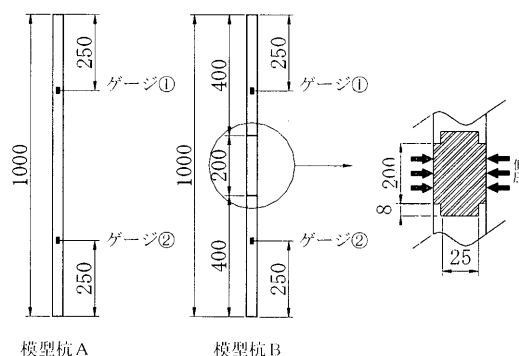
(2) 波動伝播速度実験

側圧の波動伝播速度に与える影響を調べるために、側圧の作用範囲が明確な、3分割にした模型杭 B を用いて実験を行った。3分割した模型杭の中央部の長さが20 cm なので、側圧装置 B を用いた。他の実験方法は波動減衰実験と同様である。模型杭を打撃したときに発生する弾性波をゲージ①、②で測定し、ゲージ①、②から得られた波形の立上り部の時間差を観察することにより弾性波の伝播速度に対する検討を行った。

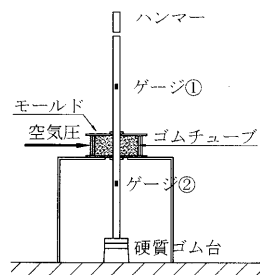
4. 実験結果と検討

4.1 波動減衰

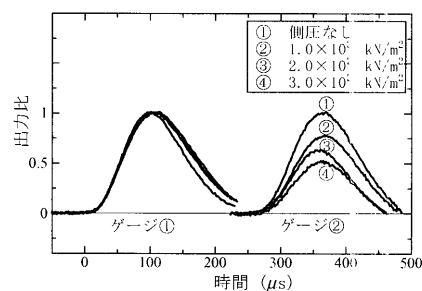
図一5は模型杭 A を用いて打撃試験を行ったときの、摩擦ありの場合と摩擦低減の場合の実験波形を示したものである。波形はゲージ①の立上り位置を合わせ、かつ、ゲージ①の応力値の最大値を出力比1として示した。側圧なしは、側面を拘束しないで実験したものである。図一5(a)から摩擦あり（低ひずみ試験に近い打撃試験を行ったので、模型杭の変位はほぼゼロであるが、摩擦ありとして分類した）の場合、側圧が高くなるにつれ、すなわち、摩擦力が大きくなるにつれ、ゲージ②の出力比が小さくなるのがわかる。一方、摩擦を低減した場合、側圧が大きくなっても、ゲージ②の波形に波動の減



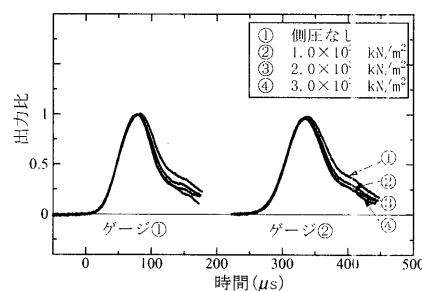
図一3 模型杭の概要



図一4 波動減衰実験の概要



(a) 摩擦あり



(b) 摩擦低減

図一5 波動減衰実験の波形

衰は見られず、ほぼ一定の値がでていることがわかる。

以上の結果から、波動の減衰は、側圧のみの作用では起こらず、摩擦（付加質量）の影響で生じていることがわかる。

4.2 波動伝播速度

図一6は模型杭 B を用いて打撃試験を行ったときの、摩擦ありの場合と摩擦低減の場合の実験波形を示したものである。波形の表示方法は図一5と同様である。波形に、図一5と異なり乱れが見られるのは、模型杭の分割面での、応力波の反射等に起因した密着度の微妙な変化

論 文

の影響と考えられる。

図-6 (a)は摩擦ありの場合の実験波形である。ゲージ②の波形の立上り部に着目すると、側圧が大きくなり、周面摩擦が増加するにつれ、立上り時間が遅れていく様子がわかる。図-6 (b)は摩擦低減の場合の実験波形である。側圧が作用すると、ゲージ②の立上り時間が少し早くなり、伝播速度が大きくなる傾向が見られるが、側圧をさらに大きくしても立上り時間はほぼ同じになった。

図-7は、図-6の側圧 $3.0 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ でのゲージ②の波形の立上り部を拡大して示したものである。図中の矢印は波形立上り位置を示す。また、矢印①は、気中の波動伝播速度 c_0 ($=2100 \text{ m/s}$)から推定される立上り位置を示したものである。これから、側圧が同じでも、拘束条件により、波動伝播速度の変化に差異があることがわかる。

図-8は、図-6から読み取った、杭の拘束条件と波動伝播速度の関係を示したものである。 Δ 印は摩擦低減を、 $\circ$ 印は摩擦ありの場合を表している。図中の●印は気中での波動伝播速度を、また、図中の数値は、気中での波動伝播速度 c_0 ($=2100 \text{ m/s}$)と各拘束条件での波動伝播速度との比を示したものである。

杭が拘束され、横方向ひずみがゼロの場合の波動伝播速度は次式で表される。

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1)$$

ここに、 c_1 : 波動伝播速度、 E : 杭の弾性係数、 ρ : 杭の密度、 ν : 杭のポアソン比である。

式(1)に、アクリルのポアソン比0.3を入れ、波動伝播速度を計算すると、気中に置かれた杭の波動伝播速度の1.16倍になる。しかし、実験では横方向ひずみがゼロにならないため、図に示したように約1.03倍を示した。

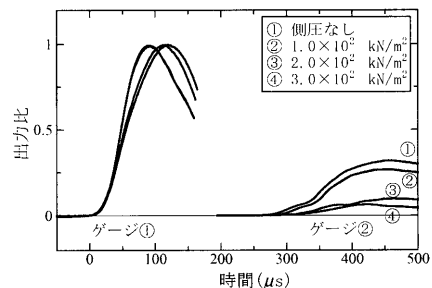
また、杭に周面摩擦(付加質量)が作用する場合には波動伝播速度が遅くなることがわかる。よって、杭の拘束条件は、側圧と摩擦を分けて検討する必要があることが明らかになった。

このことから、軟弱地盤に施工された杭の場合には、側圧を受けるが、摩擦が小さいので杭中の波動伝播速度が速くなり、 N 値の大きな地盤に施工された杭の場合には、側圧の影響より摩擦の影響が優位になり、杭中の波動伝播速度が遅くなると推察される。

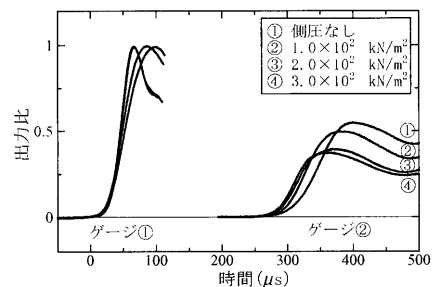
5. ま と め

側圧装置を利用して行った、模型杭の静的摩擦実験と打撃試験の結果から、拘束条件と波動伝播速度の遅延に関して次のようなことが明らかになった。

- ① 杭に側圧のみが作用(周面摩擦応力 ≈ 0 の状態)すると、杭中の波動伝播速度が若干速くなる。しかし、側圧をさらに大きくしても波動伝播速度はほぼ同じ値を示した。
- ② 杭に作用する周面摩擦(付加質量)が大きくなると、杭中の波動伝播速度は遅くなる。また、波動伝播速度は周面摩擦応力と反比例な関係になる。



(a) 摩擦あり



(b) 摩擦低減

図-6 波動伝播速度実験の波形

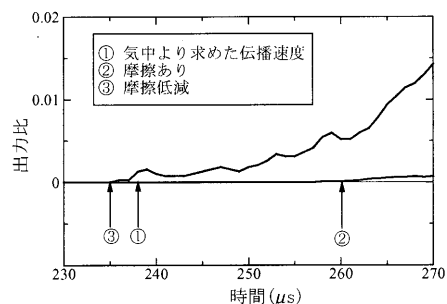


図-7 立上り部拡大図

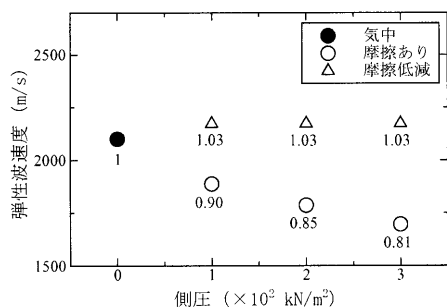


図-8 杭の拘束条件と波動伝播速度

参 考 文 献

- 1) 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, 38巻, 6号, pp. 70~75, 1997.
- 2) 田中伸治・二木幹夫・長尾俊昌・阿倍秋男・矢部淳二・鈴木裕之: 品質調査のためのインテグリティ試験, 第33回地盤工学会発表会講演集, pp. 1521~1522, 1998.
- 3) 今田和夫・松本樹典・仲田慶正: 模型杭を用いたインテグリティ試験における地盤拘束の影響に関する研究, 土木学会論文集, No. 652/Ⅲ-51, pp. 91~102, 2000.

(原稿受理 2003.3.24)