

ニードル型間隙水圧計のインパルス応答

近藤 博¹・飯沼孝一²・沢田 純³・浦丸 剛³

¹正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-12 神奈川県平塚市北金目 1117)

²正会員 工修 株式会社オオバ 東京支店 (〒153 東京都目黒区青葉台 4 丁目 4 番目 12-101 号)

³学生会員 東海大学 工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒259-12 神奈川県平塚市北金目 1117)

動圧密工法等のメカニズム解明のために、土の高速圧縮試験が実施されている。しかし、試験装置に用いられているセンサの動的特性についてはあまり関心が払われていない。そこで、間隙水圧の測定に用いられているニードルのフィルタ効果について、重複反射理論を用いて検討を試みた。その結果、ニードルの波動伝播特性をインパルス応答の畳込みの和で表現できることが明らかになった。

Key Words: dynamic, high speed compression, pore pressure, multiple reflection

1. はじめに

埋立地などの地盤締固め工法である、動圧密工法のメカニズム解明のための土の高速圧縮試験、杭の動的貫入時の機構解明のための試験及び飽和砂の締固め機構解明のための試験等と、土の高速変形に関連した試験が種々実施されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。しかし、実験に用いられている装置は、基本的には静的試験装置の载荷部のみ変えただけで、三軸室等に収められている圧力計等のセンサについてはほとんど関心がはらわれていない。したがって、動的試験においても、間隙水圧の測定は、一般に図-1 に示すような方法、①ポーラスディスク→導管→圧力計、②ニードル→導管→圧力計、のシステムで計測が行われている。

一方、Lee は動的遠心模型実験で間隙水圧を測定する場合の、土中埋め込み型(ダイヤフラムタイプ)変換器の周波数特性についての理論解を導き、センサ圧力室内の飽和度やポーラスディスクの浸透係数が周波数特性に及ぼす影響について検討している⁵⁾。また、関口らは遠心力場波浪実験に利用するゲージ型間隙水圧計(ダイヤフラムタイプ)の動的応答性に及ぼすポーラスディスクの影響について、Lee の理論による解析と実験を行い、周波数 10Hz 以下においては、ポーラスディスク(検討した目寸法は 40 μ m である)の使用に問題がないことを確認している⁶⁾。

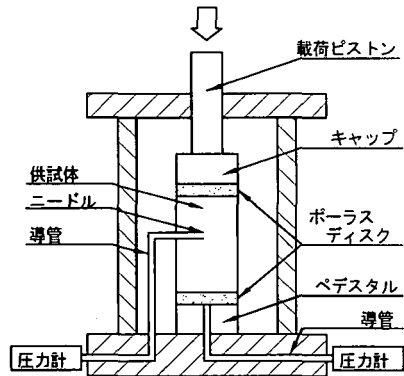


図-1 間隙水圧の測定法

しかし、これらの研究は動的というものの、比較的周波数の低い範囲を対象としており、動圧密工法のメカニズム解明や杭の動的貫入時の機構解明のような、さらに一段上の周波数特性が要求される現象までは検討していない。

本報告は、従来、土質力学の分野では水は非圧縮性として取り扱い、間隙水圧の測定には影響を与えないと考えられていたニードル(導管も含む)のフィルタ効果が非常に大きいことを示す⁷⁾とともに、その効果について多重反射理論を適用し検討したものである。その結果、ニードルのフィルタ効果はインパルス応答の

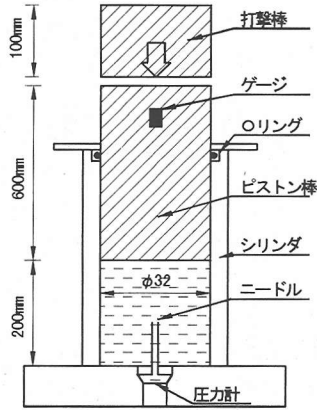


図-2 実験装置の概要

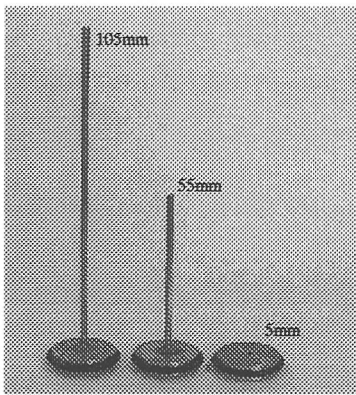


図-3 ニードルの写真

畳込み和で表現できることを示し、実験的にもその妥当性を検証したものである。

2. 実験装置と実験方法

図-2 は実験装置の概要を示したものである。装置は内径 32mm、肉厚 5mm のステンレス製シリンダ、アルミ製のピストン棒(φ31.8×600)及び同製の打撃棒(φ31.8×100)から構成されている。シリンダ底部にはダイヤフラムタイプの圧力変換器が設置されている。また、その上部にはニードルが取り付けられる構造になっている。ピストン棒には各実験時の入射応力が同じかどうかをチェックする目的で打撃端から 10cm の位置にひずみゲージを貼付してある。

実験は、シリンダ底からの水深が一様(20cm)になるようにピストン棒をシリンダ内に設置後、打撃棒を所要の高さから自由落下させピストン棒を打撃することにより液体内に衝撃波を発生させて行った。そのときの、ピストン棒での応力波形及び圧力変換器での圧

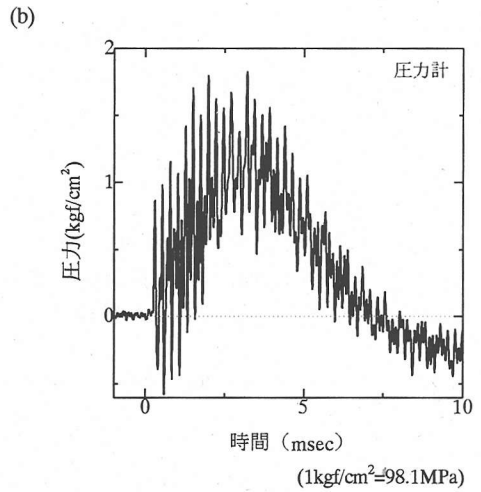
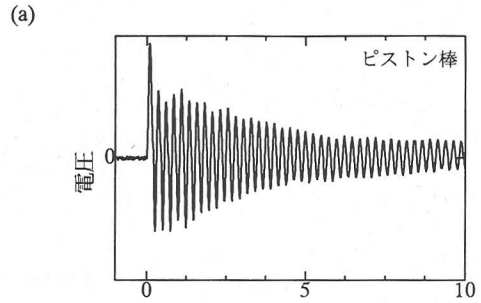


図-4 入力棒と圧力計での測定波形

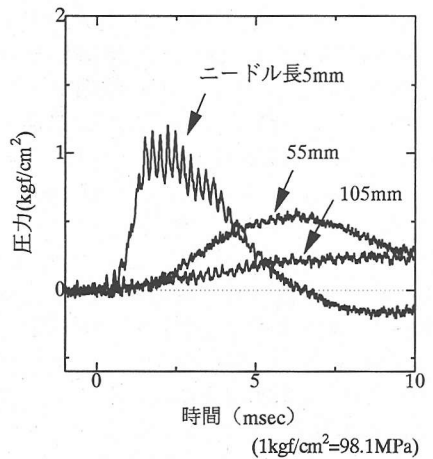


図-5 ニードル設置時の圧力-時間関係

力波形をサンプリング時間間隔 4μsec でデジタル化しコンピュータに取り込んだ。

図-3 は今回実験に用いた供試ニードル(一般に、注射針や細いパイプが利用されている)を示したものである。ニードルの内径は 1.6mm で、長さは 5mm、55mm 及び 105mm の 3 段階とした。また、長さ 5mm のものは図から明らかなように円板に穴が開いた構造になっている。

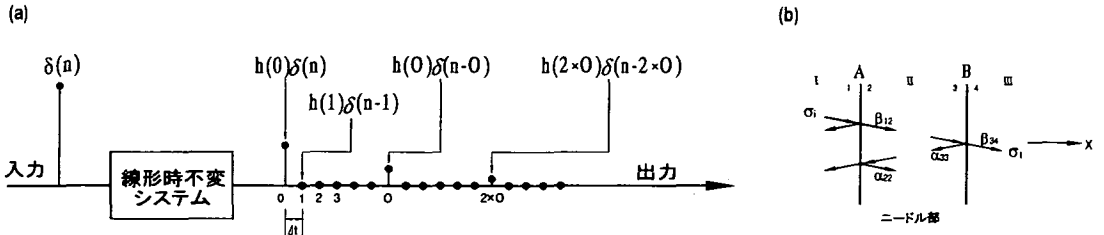


図-6 ニードルのインパルス応答

3. 実験結果

図-4(a)は、ピストン棒に貼付したひずみゲージでの計測波形を、図-4(b)はニードルを設置しないときの圧力変換器での計測波形をひずみゲージでの応力の立ち上がり時点を原点にとり示したものである。ひずみゲージの波形は、打撃棒長に比例した弾性波がピストン棒内を往復しながら減衰していく様子が観測されている。圧力変換器での波形は、ピストン棒と液体の伝播時間分遅れて立ち上がっている。その波形は、水柱に入射された応力波のシリンダー下端とピストン下面での反射成分、ピストン棒内を往復する応力波の入射成分及びピストン棒の下降量に比例した圧力との重ね合わせとなっていると推察される。ピストン棒の下向きの運動エネルギーが減少しだすと、液体内の圧力に負けピストン棒が上向きに運動を始め、液体内に負圧が発生するようである。このときの圧力変換器での観測波形をニードルのフィルタ効果を受けていないので以下原波形と呼ぶ。

図-5は、圧力変換器の上部に長さ 5mm, 55mm 及び 105mm のニードルを設置したときの圧力計での観測波形を示したものである。ニードル長 5mm のときの圧力-時間関係は原波形の平均的な値を示した。ニードル長が長くなるにつれピーク値が減少する傾向とピーク値到達時間が遅くなるのがわかる。また、ニードルを設置することにより高周波の波が除去されることもわかる。このように、ニードルがフィルタ効果を示し、間隙水圧測定に大きく影響していることがわかる。

4. ニードルのインパルス応答⁸⁾

離散化されている信号を表すには、デルタ関数(インパルス関数)を用いると都合がよい。

線形時不変システム(ニードルを線形時不変システムとして扱う)に入力信号としてインパルス関数 $\delta(n)$ を入力したときに、出力に現れる信号をインパルス応答 $h(n)$ といい、次式で表される。

$$h(n) = L\{\delta(n)\} \quad (1)$$

ここに、 $L\{\cdot\}$ は離散時間システムが行う変換処理を表している。

いま、 Q 個の入力信号 $x(n)$ を

$$x(n) = \sum_{k=0}^{Q-1} x(k)\delta(n-k) \quad (2)$$

と表すと、出力信号 $y(n)$ は

$$y(n) = L\left\{\sum_{k=0}^{Q-1} x(k)\delta(n-k)\right\}$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{Q-1} x(k)h(n-k) \quad (3)$$

と表せる。式(3)は畳込み和と呼ばれ、線形で時不変なシステムの応答を表現する最も基本的な式である。

図-6(a)は、ニードルを線形時不変システムとしたときの出力の様子を示したものである。図の左側のパルスは線形時不変システムへの入力パルス $\delta(n)$ 、右側のパルス列は $\delta(n)$ をこのシステムに通したときの出力、すなわち、このシステムのインパルス応答 $h(n)$ を表している。 Δt は入力信号の離散化の時間間隔、 0 はニードル内を弾性波が往復するのに要する時間である。

図-6(b)は、インピーダンスの異なる媒質 I と媒質 II の境界面を A、また媒質 II と媒質 III の境界面を B として、応力波の反射と透過の様子を示したものである。その各境界面の左右に図に示すように 1 及び 2, 3 及び 4 と番号をつけてある。今、媒質 I 内を x 軸の正の方向に伝播する応力波 σ_1 が境界面 A に到達すると、その一部は反射し一部は境界面を通過して媒質 II に伝播していく。このとき媒質 II に生じる応力値は透過係数 β_{12} を用いると $\beta_{12}\sigma_1$ と表せる。媒質 II から媒質 III へ透過するときの透過係数を同様にして β_{32} と表すと、媒質 III への 1 波目の透過係数 σ_{13} は $\beta_{12}\beta_{32}\sigma_1$ と表せる。

また、同様な表現方法で各境界面での反射係数を図示したように α_{21} , α_{32} , と表すと、媒質 III への 2 波目の透過応力は $\beta_{12}\alpha_{21}\alpha_{32}\beta_{32}\sigma_1$ となる。これらの係数を

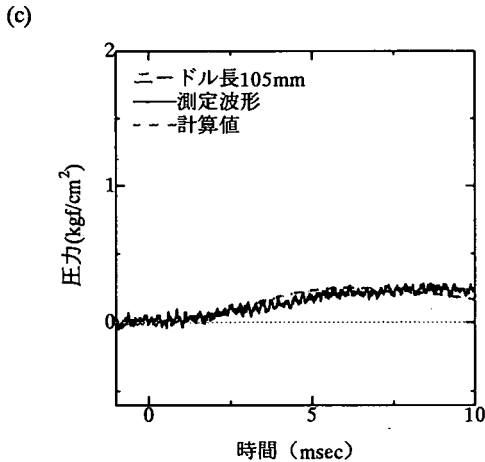
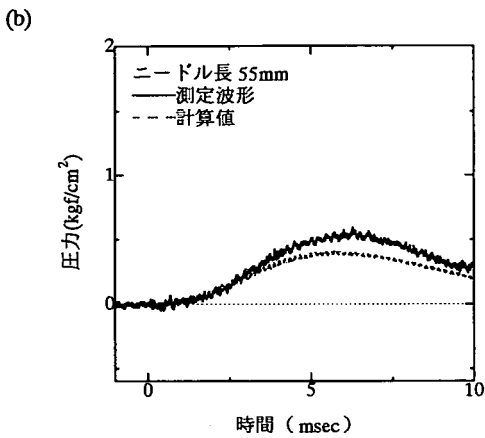
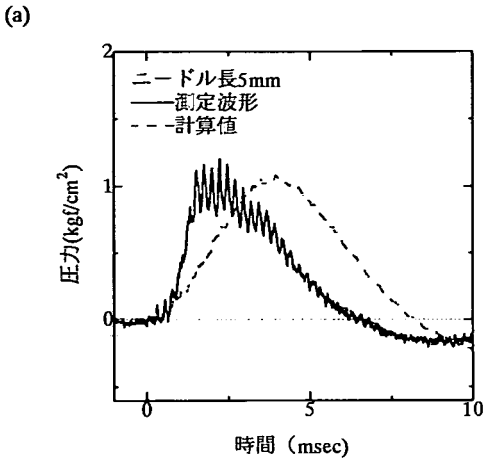


図-7 実験波形と計算波形の比較
(1kgf/cm²=98.1MPa)

用いると、図-6(a)に示したインパルス応答 $h(n)$ の係数列は次式のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} h(n) &= 0 & n &\neq i \times O \\ h(i \times O) &= (\alpha_{22} \times \alpha_{33})^i \times (\beta_{12} \times \beta_{33}) & n &= i \times O \\ &= \alpha_1^i \beta_1 & (i &= 0, 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また、上式の各機能は、ニードルを設置すると、ニードル部のインピーダンスが小さくなるとして、次式により求めた。

$$\alpha_{22} = \alpha_{33} = -\frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}, \quad \beta_{12} = \frac{2A_2}{A_2 + A_1}, \quad \beta_{33} = \frac{2A_1}{A_2 + A_1} \quad (5)$$

5. 考察

図-7 は、ニードルを設置したときの計測波形と原波形を入力信号として、式(3)を適用したときの出力信号を比較したものである。図(a)はニードル長さ 5mm の場合のものであるが、ピーク値はほぼ一致するが、ピーク到達時間に差が見られる。図(b)はニードル長さ 55mm の場合の、図(c)はニードル長さ 105mm の場合のものであるが、ニードル長さが大きくなるにつれ、計測波形と計算値がより一致する傾向を示した。以上から、ニードルのフィルタ効果がインパルス応答の畳み込みで検討できるようである。

そこで、実験することが出来なかった、他の条件での検討を半周期の正弦波(原波形の平均的な形状)を入射応力(図-8,9 の実線)に用いて計算により検討を行ってみた。

図-8 は面積比(200:1)一定で、ニードル長さを変化させたものであるが、ニードル長さが 200mm になると、ピーク値が入力波の 20% 以下、ピーク到達時間が入射応力の 2 倍になるとともに、圧力が長時間継続することがわかる。実際の試験ではニードル長+導管経路長とさらに経路長が長くなる可能性があるのだから波形がひずむことになる。

図-9 はニードル長さ(200mm)一定で、面積比を変化させたものであるが、図-8 と同様な傾向になることがわかる。

また、両図から、出力波形のひずみの程度は、導体の抵抗と同じように(ニードルの長さ)/(ニードルの断面積)の値に比例する傾向を示すこともわかる。

このように、土の高速試験を行う場合は、事前にニードルの動的応答性を検討し、圧力変換器での測定値を、ニードル先端部での圧力値に変換する手法を確立し利用する必要がある。

6. まとめ

ニードルタイプの間隙水圧計の動的特性を検証するための基礎実験を行い以下の知見を得た。

- (1) 間隙水圧測定に与えるニードルの影響が無視できないほど大きい。
- (2) ニードルの動的応答性はインパルス応答の畳み込み

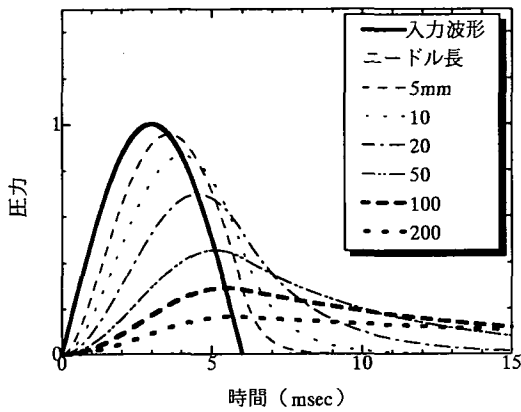


図-8 ニードルの長さの影響

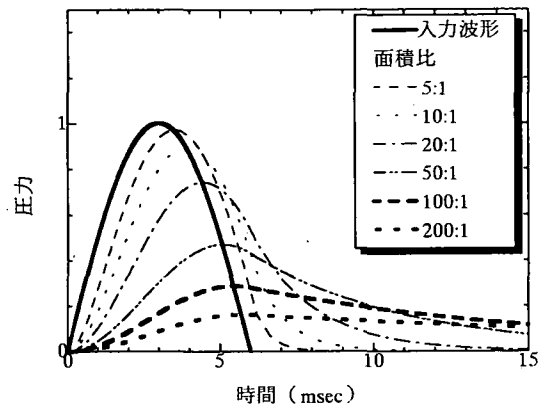


図-9 ニードルの断面積の影響

み和で検討できることが明らかになった。

今後は、この手法を土の高速三軸試験に適用し、土の高速変形時のメカニズムの解明に努力するとともに、ポラスディスクのフィルタ効果特性及び周波数特性等についても同様の手法で検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 朝日秀定, 沢田義男, 岡田努: 衝撃応力の粘土に及ぼす影響, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp. 1745~1748, 1982.
- 2) 鈴木正人, 石原研而, 浅見郁樹: 衝撃力を受けた粘性土の挙動, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp. 1741~1744, 1982.
- 3) 保国光敏, 山田功: 衝撃三軸試験による緩い砂の締め固め試験, 土と基礎, Vol. 33, No. 2, pp. 51~57, 1985.

- 4) 四宮圭三, 兵藤正幸, 安福規之, 村田秀一: 重錘落下締め固め工法における砂質土の圧縮性評価のための三軸試験, 土木学会論文集, No. 469/III-23, pp. 111~120, 1993.
- 5) Lee, F.H.: Frequency Response of Diaphragm Pore Pressure Transducers in Dynamic Centrifuge Model Tests, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 201~207, 1990.
- 6) 関口秀雄, 北勝利, 下村泰造, 長尾雄一: 間隙圧計の動的応答性, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp. 773~774, 1994.
- 7) 近藤博, 杉山昇: 動的試験における間隙水圧計の問題点, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 45~46, 1993.
- 8) 例えば川嶋弘尚, 酒井英昭: 現代スペクトル解析, 森北出版, pp. 43~48, 1989.

(1997. 2. 20 受付)

IMPULSE RESPONSE OF NEEDLE-TYPE PORE PRESSURE TRANSDUCERS IN HIGH SPEED TEST OF SOIL

Hiroshi KONDO, Kouichi IINUMA, Jun SAWADA and Takeshi URAMARU

Recently, the high speed compression test has carried out in order to elucidate the mechanism of dynamic consolidation. However, detailed studies for the dynamic property of sensors used for this kind of test equipment has not been performed. The dynamic property of needle which is used for measuring pore pressure with in soils is examined using a multiple reflection theory. The results revealed that the transmission property of waves of the needle can be expressed in a convolution sum of the impulse response.