

N 値 を 考 え る

3. 標準貫入試験の機構（その1）

東海大学教授 宇 都 一 馬
東海大学 冬 木 まもる 衛

3.1 ま え が き

標準貫入試験の機構は（その1）と（その2）に分けて執筆することになっている。（その1）では主として打撃を受けたロッドの貫入時の挙動の理論的取り扱いと、この理論と実験結果から得られた JIS の問題点やロッドの貫入機構、ロッド先端地盤の影響、エネルギーによる貫入効率などについて筆者らが担当し、（その2）では主としてサンプラーの地盤への貫入時の挙動を中心に、実物実験や理論解析による検討結果について、大阪市立大学西垣好彦先生が担当し、次回にご報告なさる予定である。

ロッド状の物体がハンマーの打撃によって、被貫入体の中へ貫入する現象は非常に興味ある問題である。この種の現象には、金づちによってなされるくぎの運動、リベット銃や削岩機用キリによる打撃破壊、クイの打込みの問題などがあり、これらは動的貫入の問題として取り扱うことができ、地盤調査として現在使用されている標準貫入試験におけるロッドの運動も、この種の代表的な一例である。

筆者らは、この種の高速度現象を忠実に測定しうる測定器系選定のための基礎実験を行ない、さらに、ハンマーによって打撃されたロッドがどのようにした地盤に貫入するかという、貫入機構の問題と、ハンマーの持っている位置エネルギーの何割が実際の貫入に関するかという貫入効率の問題などに関する一連の研究を行ってきた。

本文は、これらの研究によって得られた結果の概要を述べてあり、詳細については、文献¹⁾²⁾³⁾を参照されたい。

3.2 St. Venant 解の一般化による理論的取り扱い

衝撃現象の中で単純かつ基本的な問題である縦衝撃を受ける棒については、数多くの研究がなされている。これらには、St. Venant の剛体による縦衝撃を受ける棒の解⁴⁾、De. Juhasz および H.C. Fischer の図式解法⁵⁾、Smith⁶⁾、Hirsch⁷⁾ らのクイ打ちに関する数値計算による解法などがある。これらの中で、筆者らは、ロッドに生じる観測ヒズミ波形が St. Venant 解の基本波形とよく一致すること、さらに、この解の数学的な取り扱いが簡単になることから、

ロッドの全体的な挙動はこの理論によって解析し、局所的な問題は特性曲線を用いた図式解法によった。

St. Venant 解は、図—3.1 (a) に示すように一端を剛体で支持された弾性棒が剛体とみなされるハンマーで打撃される場合について解いたものである。また、北郷⁸⁾、鈴内⁹⁾は図—3.1 (b) に示すように先端地盤の支持条件をバネにおきかえて解き、それぞれ動的貫入の問題、クイ頭の動的座屈の研究を行なっている。これらの研究に対して筆者らは、図—3.1 (c) に示すように、ロッド先端地盤を半無限長の一次元弾性棒と考えて St. Venant 解の一般化を行なった。これによると、ロッド先端において地盤の定数（強度、変形）と密接な関係があると考えられる地盤からロッドへの反射係数 α を考慮した解で得られる。

いま、図—3.1 (c) に示すように、長さ l のロッドが W_0 の重量のハンマーで打撃される場合に生じる変位 u は、図—3.1 の記号を用いて、一般に

$$u = f(ct - x) + g(ct + x) \dots\dots\dots (3.1)$$

で表わされる。境界条件を打撃端でハンマーの慣性力に等しい力が発生するとすれば

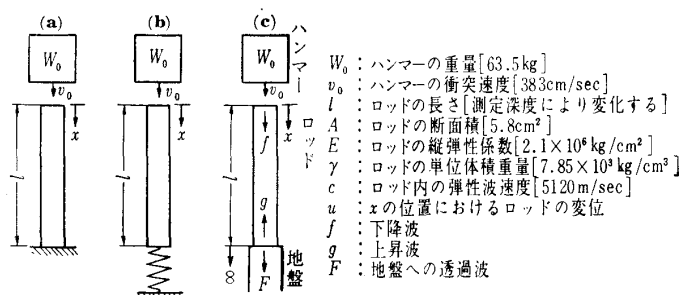
$$AE \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{W_0}{g} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right)_{x=0} \dots\dots\dots (3.2)$$

となる。ここで $m = Al\gamma / W_0$ とおけば、式 (3.2) は

$$\frac{l}{m} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right)_{x=0} = C^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} \dots\dots\dots (3.3)$$

で表わされる。

ロッド先端では、変位に関する反射の割合を考えて、



図—3.1 St. Venant 解の一般化

講 座

$$\alpha = \frac{g(ct+l)}{f(ct-l)} \quad (3.4)$$

とする。この α は、変位に関する反射係数 α_u で、ロッド先端の地盤を一次元弾性棒と仮定した場合、その断面積、単位体積重量および弾性波速度をそれぞれ A_s, γ_s, c_s とすれば

$$\alpha = \alpha_u = \frac{A\gamma c - A_s\gamma_s c_s}{A\gamma c + A_s\gamma_s c_s} \quad (3.5)$$

で表わされる量である。St. Venant 解では $\alpha = -1$ に相当する。

初期条件はハンマーの衝突の直後においてつぎのようにとる。ロッドの上端の変位速度は、ハンマーの速度に等しくなるが、上端を除いた他の部分では、変位、変位速度およびヒズミは0に等しい。すなわち

$x=0$ において、

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{t=0} = v_0 \quad (3.6)$$

$0 < x \leq l$ において、

$$(u)_{t=0} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{t=0} = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{t=0} = 0 \quad (3.7)$$

となる。

これらの条件から、図—3.1 (c) に示す下降波 f と上昇波 g を決定できる。

$ct-x=z$ とおき、式(3.4)の関係からロッド上端 $x=0$ において

$$g(z) = \alpha f(z-2l) \quad (3.8)$$

となる。また、式(3.8)を式(3.3)に代入して

$$\left. \begin{aligned} f'(z) &= \exp\left(-\frac{m}{l}z\right) \left\{ \int \exp\left(\frac{m}{l}z\right) Q_z dz + C \right\} \\ Q_z &= -g''(z) + \frac{m}{l}g'(z) \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

が得られる。下降波は式(3.9)で、上昇波は式(3.8)でそれぞれ決定される。

まず、第一波 $0 \leq z \leq 2l$ を求める。 $z < 0$ では衝撃に関係がないので、式(3.9)で $Q_z = 0$ とおき初期条件式(3.6)から

$$f_1'(z) = \frac{v_0}{c} \exp\left(-\frac{m}{l}z\right) \quad (3.10)$$

となり、さらに式(3.7)の条件から第一下降波は

$$f_1(z) = \frac{v_0 l}{cm} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{m}{l}z\right) \right\} \quad (3.11)$$

となる。上昇波は、式(3.8)から

$$g_1(z) = \alpha \frac{v_0 l}{cm} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{m}{l}(z-2l)\right) \right\} \quad (3.12)$$

で表わされる。

つぎに、第二波、 $2l \leq z \leq 4l$ を決定する。第二下降波で

は $T=2l/c$ のとき $x=0$ における速度の連続性、式(3.13)の関係を境界条件にとる。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{T=0} = \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{T=+0} \quad (3.13)$$

式(3.13)を式(3.10)に代入すると

$$\begin{aligned} f_2(z) &= -\frac{v_0 l}{cm} \exp\left(-\frac{m}{l}z\right) + \frac{v_0 l}{cm} (1+4\alpha) \\ &\quad + \alpha \frac{v_0}{c} \left(4l-2z-3\frac{l}{m}\right) \exp\left(-\frac{m}{l}(z-2l)\right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

が得られる。第二上昇波では式(3.8)、式(3.14)から

$$g_2(z) = \alpha f_2(z-2l) \quad (3.15)$$

となる。同じようにして、第三波、第四波も決定できる。衝撃の瞬間から $T=2l/c$ 時間後、すなわち、波頭がロッドを1往復した衝撃面でのハンマーとロッドと変位速度について考える。上昇波が衝撃面にもどる寸前 $T=(2l/c)_-$ では、ロッド上端とハンマーは $v=v_0 e^{-2m}$ なる速度で一体となって変位しているが、上昇波が衝撃面にもどった瞬間 $T=(2l/c)_+$ では、ロッド上端は $v=v_0(e^{-2m}+\alpha)$ なる速度をもっている。 $\alpha > 0$ のとき、ハンマーの速度より、ロッド上端の速度のほうが αv_0 だけ大きくなり、この瞬間からハンマーとロッドは離れることになる。すなわち、衝撃から $T=2l/c$ 時間後に、ロッド上端は自由端となり式(3.3)の境界条件は適用できなくなり、以後、ロッドは減衰振動することになる。

標準貫入試験の実用範囲内では、土は鋼より軟らかい(dynamic stiffness が小さい)と考えてよいから、 $\alpha > 0$ としてよい。高田ら¹⁰⁾が削岩機用キリの動的応力について行なった実験でも同様の結果を得ている。

一般に、 n 回目の下降波を f_n 、上昇波を g_n とすると、区間 $2(n-1)l \leq z \leq 2nl$ ($n=1, 2, 3, \dots$) において

$$\left. \begin{aligned} f_n &= \alpha^{n-1} \frac{v_0 l}{cm} \left[1 - \exp\left(-\frac{m}{l}\{z-2(n-1)l\}\right) \right] \\ g_n &= \alpha^n \frac{v_0 l}{cm} \left[1 - \exp\left(-\frac{m}{l}\{z-2nl\}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

となる。

実際の標準貫入試験の数値を式(3.16)に代入し、第一下降波のロッド頭部 $x=0$ の変位 u 、変位速度 v 、および応力 σ の基本波形は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} u &= 1.014(1-e^{-367t}) & [\text{cm}] \\ v &= 383e^{-367t} & [\text{cm/sec}] \\ \sigma &= 1572e^{-367t} & [\text{kg/cm}^2] \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

となる。ここに、 t : sec, σ : 圧縮を正で示してある。

また、衝撃から t 時間後に、ハンマーからロッドに伝わるエネルギー U_t は、ヒズミエネルギーの2倍になるの¹¹⁾¹²⁾

$$U_t = 4763(1 - e^{-743t}) \quad [\text{kg} \cdot \text{cm}] \quad \dots\dots (3.18)$$

となる。また、衝撃から $T=2l/c$ 時間後におけるロッド頭部の変位 u_T 、変位速度 v_T 、応力 σ_T およびそれまでにロッドに伝わったエネルギー U_T は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} u_T &= 1.014(1 - e^{-2m}) & [\text{cm}] \\ v_T &= 383e^{-2m} & [\text{cm/sec}] \\ \sigma_T &= 1572e^{-2m} & [\text{kg/cm}^2] \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.19)$$

$$U_T = 4763(1 - e^{-4m}) \quad [\text{kg} \cdot \text{cm}] \quad \dots\dots (3.20)$$

となる。

3.3 貫入試験

JIS A 1219-1961 に規定される標準貫入試験方法によって、実物大の貫入試験を行ない、 N 値の測定と同時に、ロッドに接着したヒズミゲージによって打撃応力を、また、高速度カメラによってロッド頭部の変位の測定を行ない、ロッドの地盤への貫入機構を調べた。実地地点は、平塚市にある東海大学湘南校舎内で、この調査地点の土質柱状を図-3.2 に示す。

図-3.3 に打撃応力測定のプロック・ダイアグラムを示す。

3.3.1 JIS の問題点

3.2 で扱った St. Venant 解では、ロッドは同一断面積

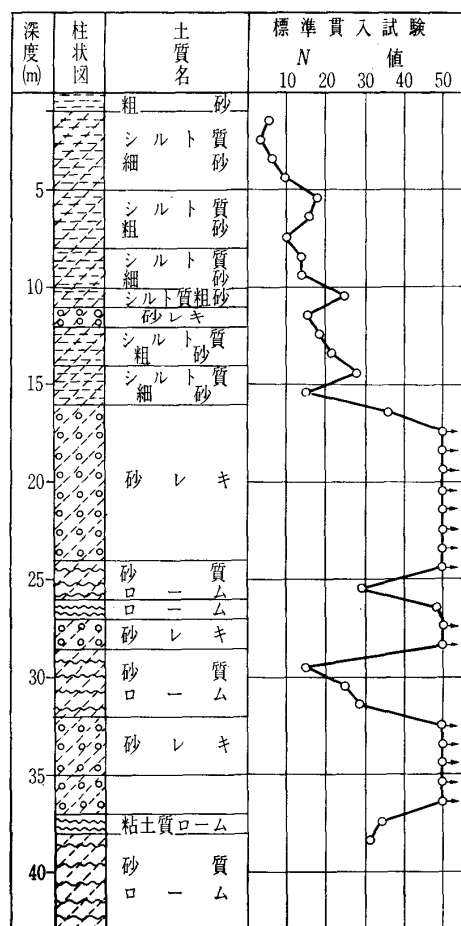


図-3.2 土質柱状図

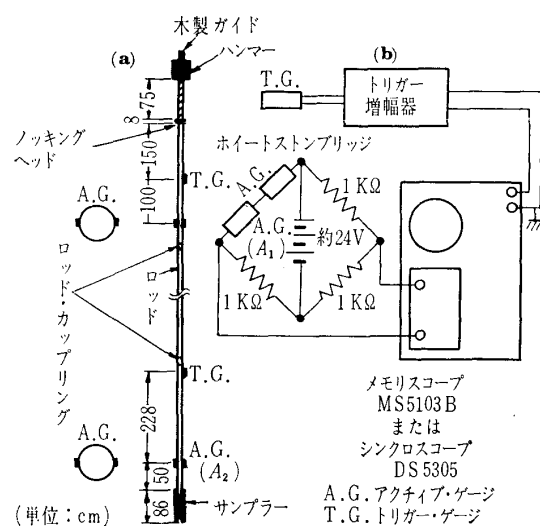


図-3.3 ロッドに生じる打撃応力測定のプロック・ダイアグラム

をもつ弾性棒と仮定したが、実際に行なわれる標準貫入試験においては、その構造上、ハンマーをロッドに正確に落下させるためのガイド棒、ハンマーの打撃を直接受けるノッキングヘッド、ロッドを継ぎ合わせるためのロッドカップリングおよび試料を採取するためのサンプラーなどが必要となり、これらによる断面積の変化が応力波形に及ぼす影響を調べる必要がある。

このような目的で図-3.4 に、ロッドの長さが一定 ($l=11.94 \text{ m}$) で鋼製のガイド棒をつけた場合 (a)、鋼製のガイド棒のかわりに木製のガイド棒を使用した場合 (b)、さらに (b) の状態でサンプラーのかわりにサンプラーと同じ長さのロッドを使用した場合 (c) の各応力波形を、この状態における特性曲線図とともに示した。実測応力波形と特性曲線図とをあわせて考察すると、これらが実測波

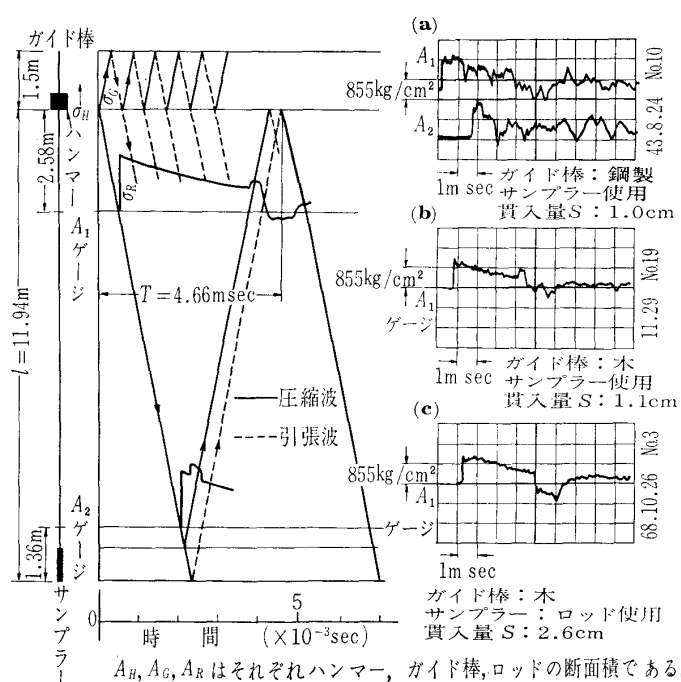


図-3.4 ガイド棒、サンプラーの影響 ($l=11.94 \text{ m}$ の場合)

講 座

形に及ぼす影響が明らかになる。実際の貫入試験は図-3.4 (a) の状態で行なわれるものであるが、以下の 1)～4) 項の検討結果から、ロッドの全体的な挙動を調べるための実験は、図-3.4 (b) の条件で行なってよいものと思われる。

1) ガイド棒

実際の貫入試験では、打撃の瞬間にガイド棒にもロッドに生じる応力と同じ大きさの引張波が生じ、上端へ伝播する。このときのハンマー、ロッドおよびガイド棒に発生するそれぞれの応力 $\sigma_H, \sigma_R, \sigma_G$ は図-3.4 の記号を用いて

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \frac{A_G + A_R}{A_H + A_G + A_R} \sqrt{2E\gamma h} = 51 \quad (\text{kg/cm}^2) \\ \sigma_R &= -\sigma_G = \frac{A_H}{A_H + A_G + A_R} \sqrt{2E\gamma h} = 1521 \quad (\text{kg/cm}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.21)$$

で表わされる¹⁴⁾。図-3.4 (a) の観測波形にはガイド棒に発生した引張波の影響が現われて複雑な波形になる。しかし、ガイド棒は最終的にはエネルギーの伝達には関与しないし、貫入時のロッドの運動も平均的に考えてよいから、解析の簡単化のため、この貫入実験においては、すべて図-3.4 (b) の状態で行なった。すなわち、鋼製のガイド棒を木製のガイド棒におきかえ、ガイド棒に引張波は発生しない状態にしてある。

2) ノッキングヘッド²⁾¹⁴⁾

ロッドの断面積よりノッキングヘッドの断面積が大きいので、ハンマー、ノッキングヘッドおよびロッドとの間で応力波の反射や透過が起こる。この場合、ハンマーがロッドを直接打撃してロッドに発生する応力より大きくなるが、ノッキングヘッドの長さがわずかに 8 cm であり、ロッドの長さ比べてきわめて小さいので、この影響は波形のごく初期の部分に現われることになる。したがって、ノッキングヘッドはロッドと同一断面積のものとして取り扱ってよい。これは図-3.4 (a) (b) (c) や他の観測波形²⁾³⁾ からわかる。

3) ロッドカップリング²⁾¹⁴⁾

ロッドとロッドカップリングの断面積が異なるので、この二つの不連続面で前項 2) で述べたことと同じように応力波の反射と透過が起こり、ロッドとカップリングの上下

面で応力の増減があるが、この場合もロッドカップリングの長さが小さいので、全体からみれば無視してよい。ただし、ロッドとカップリングの締め付けが不十分な場合には、引張波の伝播がスムーズにいかないようである。

4) サンプラー²⁾¹⁴⁾

前項 2), 3) と同じように、この場合もロッドとサンプラーの断面積が異なるので、応力波は不連続面で反射と透過を起こし、図-3.4 (b) (c) の中央部分の反射波の部分をみてわかるようになりかなり複雑な応力状態になることがわかる。

5) ハンマーの形状について²⁾

ハンマーの形状が応力波形に及ぼす影響を調べたものが図-3.5 である。ハンマーが特に細長くないかぎり応力波形の相違はないようである。現在実用に供されている程度のハンマーの形状 (長さ/直径=1～2) であれば、形状の相違が N 値に及ぼす影響はほとんどないと考えられるが、この試験方法が JIS 規格の標準試験であることと、次項 6) で述べる同じ理由から、形状を規定する必要がある。

6) ロッド断面積の影響について²⁾

ボーリング用ロッドには何種類かがあるが、6.35 kg のハンマーを 75 cm から落下させた場合、これらのロッド断面積の相違による応力波形の変化を図-3.6 に示してある。ハンマーからロッドに伝わるエネルギーはいずれも一定であるにもかかわらず、応力波形が異なること、すなわち、ロッドの変位速度が異なることになるから、ロッド先端での地盤を破壊するときの変位速度に相違が生じることになる。

このような問題における地盤の動的破壊機構には現在不明な点が多く残されており、さらに、JIS に規定されている標準試験であることを考慮すれば、このように広範囲の種類のロッドを使用することを許すのは問題であろう。

3.3.2 ロッドの貫入機構²⁾

ハンマーの打撃によるロッドの地盤への貫入時の挙動を高速カメラによって直接観察した一例を図-3.7 に示す。図-3.7 でハンマー下端とロッド上端の動きは、2,000～3,000コマ/sec で測定したものを 1 コマずつプロットしたものである。図-3.7 に示してある細線は、式 (3.16) で

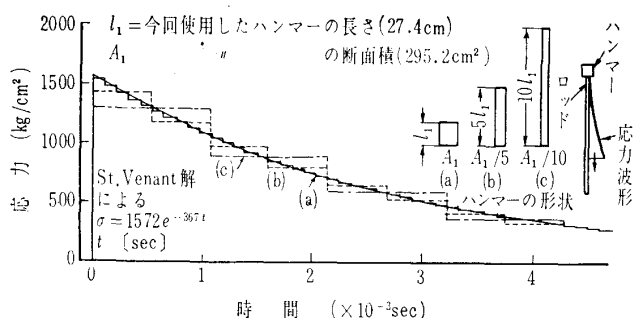


図-3.5 応力波形に及ぼすハンマーの形状の影響

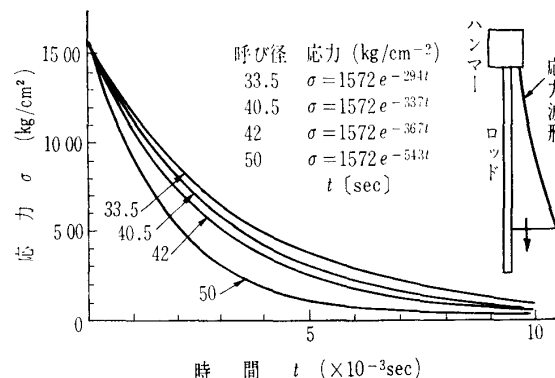
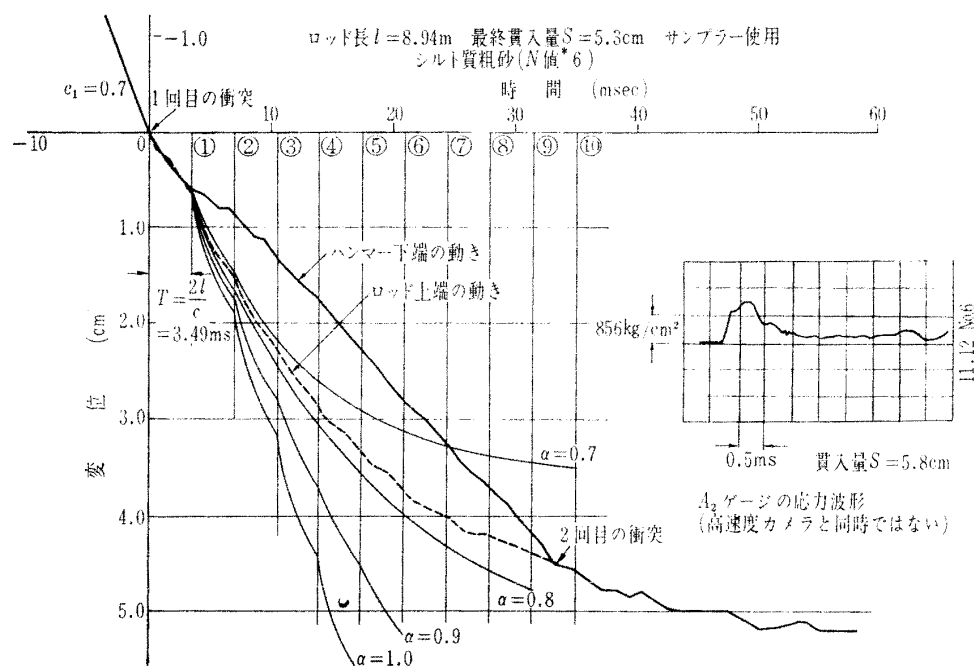


図-3.6 ロッド径の影響

図-3.7 高速度カメラ測定結果の一例 (注: e_1 は摩擦効率である)

与えられる種々の地盤状況によって得られる反射係数 α による理論的な変位曲線である。いま、弾性波頭がロッドを1往復する時間を $T=2l/c$ とすると、一般に、 nT ($n=1, 2, 3, \dots$) 時間におけるロッド頭部およびロッド先端部のそれぞれの変位 u_{Un} , u_{Ln} は

$$\left. \begin{aligned} u_{U1} &= u_0(1 - e^{-2m}) & (n=1) \\ u_{Un} &= u_{U1} + 2u_0(1 - e^{-2m}) \frac{\alpha(1 - \alpha^{n-1})}{1 - \alpha} & (n=2, 3, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

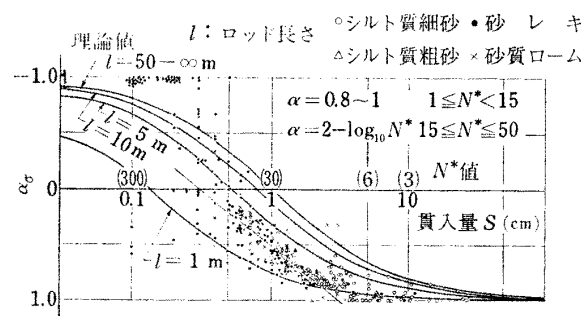
$$u_{Ln} = u_0(1 - e^{-2m}) \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} (1 - \alpha^n) \quad (3.23)$$

ここに、図-3.7の数値を用いて、 $u_0 = v_0 l / cm = 1.043$ cm、で表わされる。

図-3.7において、衝突の瞬間（1回目の衝突）から $T=3.49$ msec 時間後に、衝撃面に引張波が返ってきてロッド上端の変位速度は、ハンマーの速度よりも大きくなり、ハンマーとロッドは一時離れることがわかる。さらに、およそ $9.5T$ の位置で2回目の衝突をして、さらに貫入の進むようすがみられる。最終の貫入量 S は、式 (3.19) で与えられる $u_T \approx 0.6$ cm、ロッドの減衰振動中の貫入量 3.9 cm および2回目の衝突以降の貫入量 0.3 cm の三つの部分からなることがわかる。自由振動中の α の値は、平均して 0.79 程度である。なお、図-3.7中に示した応力波形は、ほぼ同じ貫入量における、ロッド先端部 A_2 ゲージのものである。

この測定結果と同じ方法によって得られた他の測定結果²⁾も合わせて考察すると、つぎのようなことが明らかになった。

ロッドの貫入は一定の周期をもった波状的な動きになる

図-3.8 実測 α -貫入量 S の関係

もので、そのようすは、ロッド長さの相違と地盤からの反射係数 α によって異なる。ハンマーの衝突から応力波がロッドを1往復した T 時間後にロッドとハンマーが離れて、エネルギーの伝達が一時中断される。ロッド長が短い場合には、かなり平均的な動きとなり、2回目以降の衝突の影響を考慮する必要がある。

3.3.3 先端地盤の影響²⁾

前述したように、地盤からロッドへの反射係数 α は、地盤の動的特性を代表する有意な値であることがわかってきた。そこで、図-3.7中のロッド先端部 A_2 ゲージの応力波形と同じ写真を種々の地盤について約1,000枚観測してあり、これらの観測波形を A_2 ゲージの理論応力と重ね合わせて比べることによって、波形の立上がりから2msecの位置での応力に関する逆算の反射係数 α_s を求め、この α_s と貫入量 S との関係をプロットしたのが図-3.8である。これから α_s と N 値の間には、

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 2 - \log_{10} N^* & 15 \leq N^* \leq 50 \\ \sigma &= 0.8 \sim 1 & 1 < N^* < 15 \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

なる実験式が得られた。ここに、 N^* は1打撃ごとの実測 N 値である。なお、図-3.8の関係をj得るには、ロッド長

講 座

さや減衰などの影響まで考慮した2, 3の方法がある。これらについては、改めてつぎの機会に述べる。

3.4 エネルギーによる貫入効率の取り扱い³⁾

ハンマーの打撃による貫入効率を調べるために、ハンマーが最初にもっていたエネルギーが、①ガイド棒などの摩擦の損失、②ハンマーとロッドの衝突時の変形や音などの損失、③長いロッドを伝ばするときの損失などによって、最終的にロッド先端の地盤に何割が到達するかを、前述3.3と同じ実験装置と、さらに、ロッド長さを約120 mに水平につるした実験装置によって、打撃応力の減衰状況や、変位を観測して、エネルギーに関する効率の型で整理し、検証した結果、ロッド先端に達したエネルギーが貫入量に比例すると仮定すれば¹⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} N &= N^* & (l < 20 \text{ m}) \\ N &= (1.06 - 0.003 l) N^* & (l \geq 20 \text{ m}) \end{aligned} \right\} \dots (3.25)$$

なる N 値の修正式が得られた。ここに、 l はロッド長、 N^* は実測 N 値、 N は修正 N 値である。

3.5 ま と め

以上に、標準貫入試験の機構（その1）の執筆を担当した筆者らが今までに行なったこれに関する研究結果の概要を述べたが、きわめて舌足らずになったことをおわびしたい。しかし、問題点を提起することを本講座の特徴であるとうけたまわっているので、舌たらずの上にさらにこれらも含めてまとめるとつぎのようなことがいえる。

1) 理論解析によって得られた St. Venant 解の一般解と特性曲線を用いた図式解は、従来の方法よりも、実際の貫入試験におけるロッドの挙動をよりうまく説明しうる方法である。さらに実物大の研究を進める場合に、 N 値と地盤定数との関係を論ずるときへの発展性がある。

2) ロッドの先端地盤を一次元弾性棒と仮定した、St. Venant 解の一般解によると、ロッドの挙動は地盤とロッドの dynamic stiffness によって決定される反射係数 α によって決まる。これには、従来の研究による方法より波動論的に適正な地盤の情報が含まれるものである。

3) JIS A 1219-1961 土の標準貫入試験方法で規定される範囲内のロッド、ロッドカップリング、ノッキングヘッドなどの形状の相違による打撃応力の違いは微小であるが、土の動的な破壊機構が不明である現状から、サウンディング法としては一種類のロッド径のものに統一したほうがよいと思われる。またハンマーはとくに細長いものは用いないかぎり影響はないが、上と同じ理由で形状の規定が望ましい。

4) ロッドとハンマーの動きは、ロッド先端からの反射波が打撃面に戻った瞬間から離れる。このためにエネルギーの伝達は一時的に中断される。その後、ロッドは波状的に貫入する。これからロッド長さの違いによって、貫入の挙動

がかなり異なる。ただし、ロッド長が 10 m を越すとほぼ一定とみなしている。

5) したがって、土カブリ圧の影響を調べるための実験研究では、貫入機構の相違によるロッド長の影響を考慮する必要がある。Gibbs, Holtz の研究ではこのような意味のロッドの長さの検討はなされていない。

6) ロッド長さが短い (10 m 以内) 場合には、長い場合に比べてかなり連続的な動きとなる。また、一回の衝撃でハンマーの落下エネルギーが完全にロッドに伝えられないので、ガイド棒を含めたロッド長さが N 値に影響する。すなわち、ロッド長さが異なると、土カブリ条件や地盤条件が同じでも測定した N 値は違った値になる。

7) このように、標準貫入試験はその貫入機構からみると、非常に問題点の多いサウンディング法であることがわかった。それはロッドの長さの違いによって貫入の挙動が異なるという根本的な問題点が存在し、しかも、この問題点が土の強度や変形特性にも密接に依存する。

8) よって、今後土の動的強度や変形特性を Hopkinson 棒法¹⁷⁾その他の試験法によってより明確にすると同時に、ロッド長さの影響を考慮した N 値の再評価をする必要がある。

9) さらに、Hopkinson 棒法によれば、 N 値と土性との対応、 N 値による砂質土の流動化の判定、土性による N 値の修正、土カブリ圧による N 値の修正などが、従来より明確になるものと思われる。

10) ロッド長さが大きい場合には、長柱としての座屈による曲げ変形によってエネルギーの損失があり、 N 値に影響することが従来から指摘されているが、この曲げ変形は、地盤へのロッドの貫入が終わってから生ずるようである³⁾。むしろ、ノッキングヘッドやロッドカップリングなどとロッドとの継目に生ずる反射波や透過波によって起こる過大な応力で、継手部に局部座屈が生ずることのほうがよりエネルギー損失に関与するものと思われる。

11) ロッド長さが大きい (20 m 程度以上) 場合、ロッドは不連続的な動きとなる。また、同一地盤においては、ほぼ同じような貫入挙動を示すので、標準貫入試験は深い地盤のサウンディングに適しているようである。

12) 図-3.8 からわかるように、 N 値 15~60 程度の地盤に対しては、標準貫入試験がかなり有効なサウンディング法であり、得られた結果も有意な値となろう。これは、砂質地盤に対する現状の N 値の評価を裏づけるものである。

13) 一方 N 値 15 以下の地盤では、貫入によってハンマーやロッドの位置エネルギーの増加の影響が考えられるので、妥当なサウンディング法とはいえない。このような地盤に対しては、むしろ静的なサウンディングやハンマーの落下高さを低くしたり、ハンマーの重量を小さくして打撃エネルギーを小さくした他の動的サウンディング法が適当であろう。

14) ロッド長が大きい場合には、 N 値に与える自重の影響が考えられるが、これも、 N 値がある程度大きい範囲 ($N=15$ 以上) においては、ロッド先端部における自重による応力よりも、ロッドに生ずる打撃応力のほうがはるかに大きいので考慮する必要はないものと思われる。

15) 落下方式の相違による打撃エネルギーの損失は、コンクリート法の場合 0.6~0.7, 慎重な落下で 0.8~0.9 であり²⁾³⁾, 大きな差がある。しかし、これらのバラツキには大きな差はないので、落下方式をいずれかに統一したほうがよいものと思われる。

本文をまとめるに当たり、東海大学近藤博助手、大学院生森原幹雄君の絶大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森田・宇都・冬木・近藤・森原：標準貫入試験におけるロッドの貫入機構に関する理論研究と基礎実験, 東海大学紀要工学部, No. 2, 1972.
- 2) 森田・宇都・冬木・近藤・森原：標準貫入試験におけるロッドの貫入機構に関する実験的研究, (第1報), 東海大学紀要工学部, No. 1, 1973.
- 3) 森田・宇都・冬木・近藤・森原：標準貫入試験におけるロッドの貫入機構に関する実験的研究, (第2報), 東海大学紀要工学部, No. 2, 1973.
- 4) たとえば, A. E. H. Love: A Treatise on the mathematical theory of elasticity, Cambridge Univ. Press. 1944.
- 5) H. C. Fischer: On longitudinal impact. Appl. Sci. Res., 1958.
- 6) E. A. L. Smith: Pile-driving analysis by the wave equation, Proc. A. S. C. E., Vol. 86, SM4, 1960.
- 7) C. H. Samson, T. J. Hirsch and L. L. Lowery: Computer study of dynamic behavior of piling, Proc. A. S. C. E., Vol. 89, ST4, 1963.
- 8) 北郷 繁：動的貫入試験に関する研究
(その1) 土と基礎, Vol. 8, No. 6, 1960.
(その2) 土と基礎, Vol. 9, No. 1, 1961.
(その3) 土と基礎, Vol. 9, No. 2, 1961.
- 9) 鈴内克洋：打撃荷重による鋼管杭の頭部変形の研究, 運輸技術研究所報告, Vol. 12, No. 2, 1962.
- 10) 清水 哲・高田 勝：さく岩機用きりの動的応力, 日本機械学会誌, Vol. 60, No. 467, 1957.
- 11) 森田・宇都・首藤・冬木： N 値の補正 (主としてロッド長さの影響について), 第4回土質工学研究発表会, 土質工学会, 1969.
- 12) 森田・宇都・冬木：棒の地盤への動的貫入機構—標準貫入試験を対象にして (第2報), 第5回土質工学研究発表会, 土質工学会, 1970.
- 13) 森田・宇都・冬木：シンクロスコープを用いた打撃応力の測定, 第23回年次学術講演会講演集, 土木学会, 1967.
- 14) 宇都一馬：クイの打込み (弾性波としての打撃応力について), 橋梁と基礎, Vol. 1, No. 7, 1967.
- 15) 竹中準之介：深い砂レキ層の N 値の修正法, 土と基礎特集号, Vol. 13, No. 2, 1965.
- 16) H. J. Gibbs and W. G. Hotlz: Research on determining the density of sand by spoon penetration testing, Proc. of the 4th I.C.S.M.F.E, Vol. 1, 1957.
- 17) F. E. Hauser: Techniques for measuring stress-strain relations at high strain rates, Experimental, S.E.S.A. 1966.

(原稿受理 1973.11.12)

*

*

*