

東海大学工学部

正会員 宇都一馬

正会員 ○ 冬木 衡

正会員 近藤 博

1. まえがき　近年、地盤の代表的なサウンディング法の一つである標準貫入試験によって得られるN値の再検討の必要性が指摘されている。¹⁾ すなわち、標準貫入試験方法そのものないしは、N値全般についての再検討であり、また同時に地盤調査法として標準貫入試験の適しない場合を明確にすることが必要とされる。

筆者らも、数年来ロッドの地盤への動的貫入機構に関する基礎的な研究を行なっており、その結果標準貫入試験のメカニズムに関するいくつかの興味ある現象が明らかになった。^{2), 3), 4)} 主な結果を列記すると、① 標準貫入試験はロッド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、ロッド長さの相違により貫入の挙動が異なるという根本的な問題点が存在し、しかもそれが土の強度・変形特性にも密接に依存するからである。³⁾ ② この原因は、ロッドヒハンマーはロッド先端からの反射波が打撃面にもどった瞬間から離れ、エネルギーの伝達が一時中断されることによるものである。^{3), 5)} ③ このような観点から、現行のJIS A 1219-1961に關して若干の考察を行ない内訳点を指摘した。⁴⁾ ④ また、さらに定量的な考察を行なう必要から、ハンマーの持つ位置エネルギーの何割が実際の貫入の仕事に與与するかといった貫入効率の問題を、エネルギーの効率の型で整理し、それらの値を実験的に決定した。⁵⁾ などである。

本報告は、地盤特性とN値の相関を論じるための手がかりを得るために、厳密な意味でのロッド長の影響を考慮して、二三の考察を行なったものである。

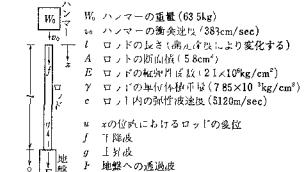
2. St. Venant 解の一般解による理論的取扱い　上記研究における理論的解析には、ロッド先端地盤を一次元弾性棒と仮定したSt. Venant 解の一般解を用いた(図-1参照)。この解はロッド先端部での地盤からの反射係数 α を考えるだけの非常に簡単なものであるが、ロッドの貫入時の挙動の概念を把握するには有効で、さらに地盤特性などとの相関を論じる場合への発展性があるものである。以下に述べるのは、変位に関する反射係数 α が、 $0 < \alpha \leq 1$ の場合すなわち、地盤がロッドより柔らかい場合に対する解で、衝突からT時間後ハンマーとロッドが離れるとしたものである(図-2参照)。St. Venant 解の一般解の詳細は文献(3)を参照されたい。

図-2に示す各回目の下降波は、変位 f_n 、応力 σ_{jn} および変位速度 U_{jn} に関する、区间 $z(n-1)\ell \leq z \leq n\ell$, ($n=1, 2, 3, \dots$)において、次式で与えられる。ただし、 $z = ct - x$ である。

$$f_n(z) = \alpha^{n-1} U_0 [1 - e^{-\frac{z}{c}(z-2(n-1)\ell)}] \quad (1)$$

$$U_{jn}(z) = \frac{\partial f_n}{\partial z} = \alpha^{n-1} U_0 e^{-\frac{z}{c}(z-2(n-1)\ell)} \quad (2)$$

$$\sigma_{jn}(z) = E \frac{\partial f_n}{\partial x} = -\alpha^{n-1} U_0 e^{-\frac{z}{c}(z-2(n-1)\ell)} \quad (3)$$



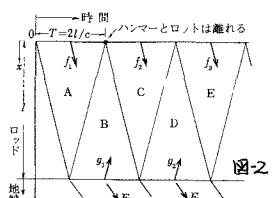
同様に、上昇波は区间 $z(n+1)\ell \leq z \leq z(n+1)\ell$ において次式となる。ただし、 $z = ct + x$ 。

$$g_n(z) = \alpha^n U_0 [1 - e^{-\frac{z}{c}(z-z(n+1)\ell)}] \quad (4)$$

$$U_{gn}(z) = \frac{\partial g_n}{\partial z} = \alpha^n U_0 e^{-\frac{z}{c}(z-z(n+1)\ell)} \quad (5)$$

$$\sigma_{gn}(z) = E \frac{\partial g_n}{\partial x} = \alpha^n U_0 e^{-\frac{z}{c}(z-z(n+1)\ell)} \quad (6)$$

ロッドの任意の時間、任意の位置における変位、変位速度および応力の量は、図-2の領域A, B, C, ……において、それぞれの下降波と上昇波を重ね合わせることにより求めることができる。ロッド頭($x=0$)およびロッド先端($x=\ell$)においては、それぞれ“れづぎ”的に表わせる。



(i) nT ごとのロッド頭の変位 U_{nT} およびロッド先端の変位 U_{LnT} は次式となる。

$$U_{nT} = U_0(1 - e^{-2m}) \quad (m=1), \quad U_{nT} = U_0(1 - e^{-2m})(1 + d - 2d^2)/(1 - \alpha) \quad (m=2, 3, 4, \dots) \quad (7)$$

$$U_{LnT} = U_0(1 - e^{-2m})(1 - \alpha^m)/(1 - \alpha) \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

(ii) n 波目のロッド頭および先端の変位速度 V_{nT}, V_{LnT} はそれぞれ次式となる。

$$V_{nT} = U_0 e^{-\frac{m}{T} c t} \quad (m=1), \quad V_{nT} = 2d^{m-1} U_0 e^{-\frac{m}{T} c t - 2(m-1)d^2} \quad (m=2, 3, 4, \dots) \quad (9)$$

$$V_{LnT} = \alpha^{m-1}(1 + \alpha) U_0 e^{-\frac{m}{T} c t - (m-1)d^2} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

(iii) n 波目のロッド頭および先端の応力 $\sigma_{nT}, \sigma_{LnT}$ はそれぞれ次式となる。

$$\sigma_{nT} = \sigma_0 e^{-\frac{m}{T} c t} \quad (m=1), \quad \sigma_{nT} = 0 \quad (m=2, 3, 4, \dots) \quad (11)$$

$$\sigma_{LnT} = \alpha^{m-1}(1 - \alpha) \sigma_0 e^{-\frac{m}{T} c t - (m-1)d^2} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

このとき、圧縮応力を正としてある。なお、標準貫入試験における諸定数は、図-1 および表-1 に示した。

3. 1回目の衝突によるロッドの貫入量 S_1 すでに述べたように、衝撃頭がロッド内を一往復すると、ロッドとハンマーは離れエネルギーの伝達は一時中断される。この間にロッドに伝わったエネルギー $E_T = U_0(1 - e^{-2m})$ によってなされる貫入量 S_1 は、(7) 式あるいは(8)式において $d=0$ とおいて求まり、次式となる。

$$S_1 = U_0(1 - e^{-2m})/(1 + \alpha)/(1 - \alpha) \quad (13)$$

図-3 に示した実線は、(13)式による $S_1 - \alpha$ の関係をロッド長をパラメータにして描いたものである。図では、ロッドより地盤が硬い ($N < 10$) の場合にもと式を用いて近似的に扱っていいが、厳密には文献(3)の(3.24)式以下によるべきもので、これに関しては別の機会に述べる。図中にプロットされた点は、実際の標準貫入試験において測定されたひずみ波形から逆算された α とそのときの貫入量 S_1 との関係を示したもので、理論値と対応する傾向にある。これによると、同一地盤特性 (α) でも、ロッド長の相違により貫入量 S_1 は大きく異なることがわかる。これは当然のことであって、接触時間 T はロッド長によって異なり、この間に伝えられるエネルギー E_T も差が生じるからである。残りのエネルギー $U_0 e^{-2m}$ はハンマーが運動エネルギー $(\frac{1}{2} M_0 v^2)$ として持つていいことになり、ロッド長が短い場合にはこのエネルギーも大きく、2回目の衝突による貫入量 S_2 を考慮する必要が生じる。

4. 2回目の衝突によるロッドの貫入量 S_2 図-4 は、ロッド頭とハンマード端の変位の状態をあらわす模式図で、図中の記号を用いて2度目の衝突までの時間 τ_2 を求めめる。1回目の衝突から T 時間後を新たに時間 τ_2 および変位 u_{nT} の原点にとると、ロッド頭の nT 時間後の変位 U_{nT} は、(7)式で $n=n+1$ 、さらに $\alpha' = \alpha - S_1/T$ をおいて

$$U_{nT} = 2U_0(1 - e^{-2m})\alpha'(1 - \alpha'^{\frac{n}{T}})/(1 - \alpha) \quad (14)$$

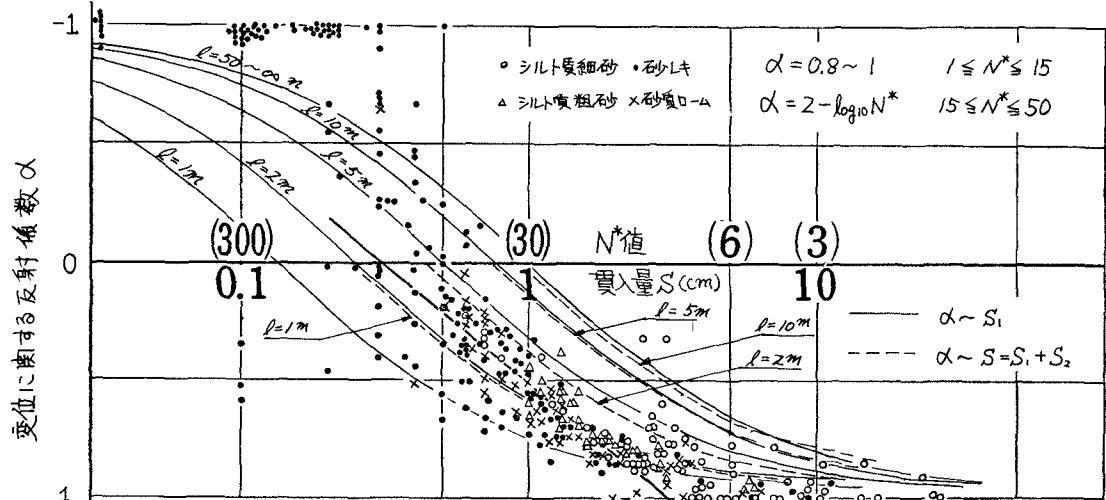


図-3 反射係数 α と貫入量 $S (30^m/N)$ との関係^{4), 6)}

表-1

標準貫入試験の諸定数

$$m = A D N / W_0 \quad (\text{ロッド長: } m, \text{ 貨入量: } N, \text{ 重り質量: } W_0)$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} = 383 \text{ cm/sec}$$

$$U_0 = U_0 g / C = 1.014 \text{ cm}$$

$$U_0' = E U_0 / C = 1572 \text{ kg/cm}^2$$

$$U_0 = D_0 h = 4763 \text{ kg/cm}$$

$$T = 2D_0/C \quad (\text{ロッド長: } D_0)$$

となる。一方、ハンマーはロッドから離れる直前の速度 $v_1 = v_0 e^{-2m}$ を初速度として自由落下すると考えてよいから、 t' 時間後の変位量 $u_{1t'}$ は、

$$u_{1t'} = \int_0^{t'} (v_0 e^{-2m} + g t') dt' = v_0 e^{-2m} t' + \frac{g}{2} t'^2 \quad (15)$$

となる。2回目の衝突までの時間 αT は、(44)式、(55)式を等置して求まる。

$$2U_0(1-e^{-2m})\frac{\alpha(1-\alpha^T)}{(1-\alpha)} - v_0 e^{-2m} \alpha T - \frac{g}{2} \alpha^2 T^2 = 0 \quad (16)$$

$=$ ニイヒ式の第一項の α^T を t' について MacLaurin 展開をして整理すると

$$B \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha t')^n}{n!} \right\} - F t' - 490 t'^2 = 0 \quad (17)$$

となる。ただし L , $B = 2U_0(1-e^{-2m})\alpha/(1-\alpha)$, $F = (\log \alpha)/T$, $F = v_0 e^{-2m}$

である。これを計算機で必要な精度まで解いて α^T を決定する。

こより、左は $t_2 = t_2' + T$ として求まる。2回目の衝突の際のハンマーの速度は、(55)式を t' で微分して、 $t_2' = t_2 - T$ とおいて求まる。

$$v_2 = v_0 e^{-2m} + g(t_2 - T) \quad (18)$$

2回目の衝突による買入量 S_2 は、 v_2 の速度で打撃されるロッドの買入

の問題として、2., 3. で述べたと同様に取扱うことができる。すなわち、

(19)式の U_0 の代わりに $v_2 l / cm$ とおけばよいことになる。

$$S_2 = \frac{v_2 l}{cm} (1 - e^{-2m}) \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \quad (19)$$

同様の手順を繰り返せば、3回目以後の衝突による買入量を求めることが可能であるが、多くのひずみ波形の実測結果および高速度カメラによる観察より、2回目までのものまで考えればよいであろう。最終買入量 S は

$$S = S_1 + S_2 = (U_0 + U_1) \frac{l}{cm} (1 - e^{-2m}) (1 + \alpha) / (1 - \alpha) \quad (20)$$

となる。図-5 は $t_2 - \alpha$ の関係、図-6 は $v_2 - \alpha$ の関係を示す。また、

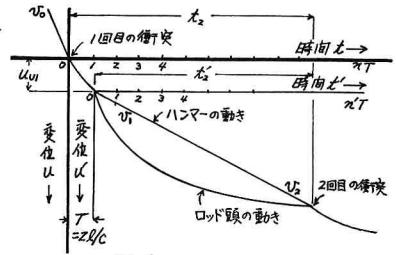


図-4

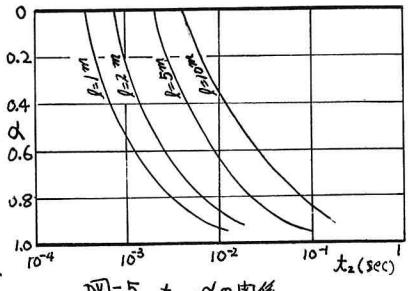


図-5 $t_2 - \alpha$ の関係

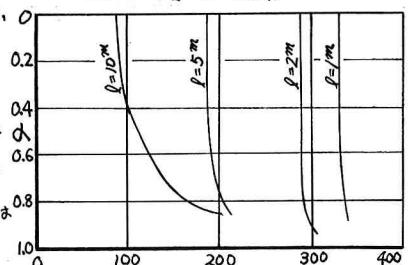


図-6 $v_2 - \alpha$ の関係 v_2 (cm/sec)

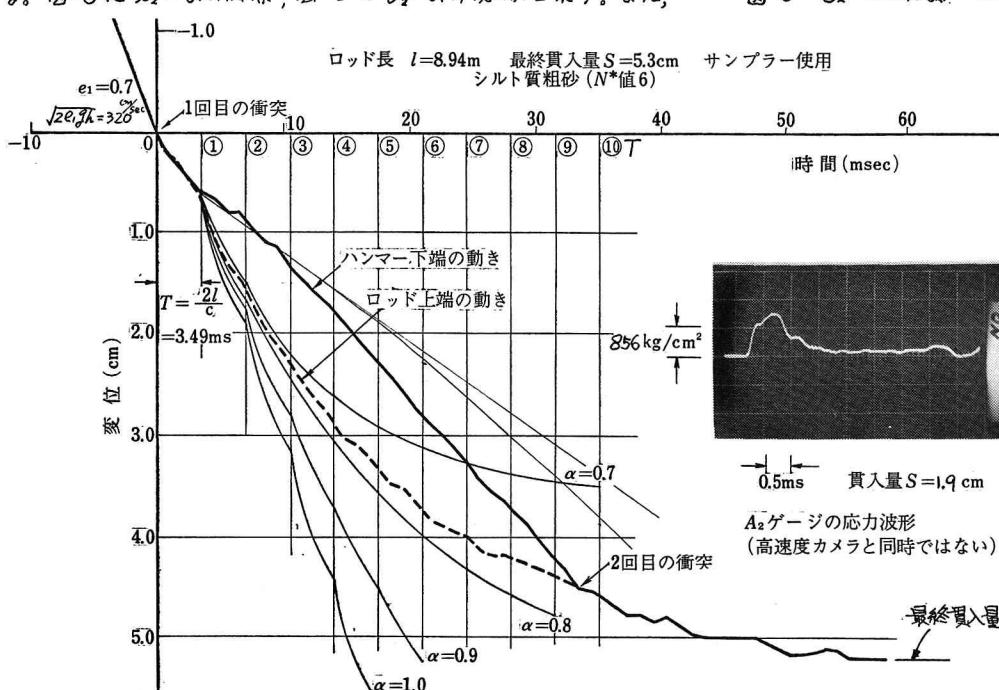


図-7 高速度カメラによるハンマーとロッド頭変位の測定例。(詳細は文献(4)を参照下さい)

(20)式の関係を図-3に破線で示した。

5. 実測値の検討 図-7では、深度7m(ロッド長 $l=8.94m$)で先端土質がシルト質粗砂における貫入試験におけるある一打撃の間のハンマーとロッド工端の変化の状態を、高速度カメラで観察したものである。この例では、ハンマーの1回目の衝突時の速度は、ガイド棒などとの摩擦により、 $\sqrt{2e_1 g h} = 320 \text{ cm/sec}$ (e_1 は摩擦効率⁴⁾) に減少していく。図中に示した理論値は、このようにエネルギー損失の影響を考慮してある。これによると、 $v_f = 320 e^{-2m} = 88 \text{ cm/sec}$ となり、実測のハンマーの落下速度(143 cm/sec)の方が大きめの値を示すが、これは一回目の衝突によるエネルギーの伝達が完全に行なわれてないところであり、文献(5)の衝突効率に関する考察の裏付けとなるものである。 t_2 の値に関しては、ほぼ満足すべき値となった。

図-8は、ロッドに貼ったストレーナージの初期波形より、2回目の衝突位置をみたり、これをそのときの貫入量に対して示したものである。(a)は深度28mで先端地盤は砂利地盤、(b)は深度29mで、砂質ロームと相違があるが、ロッド長はいずれもほぼ30mである。地盤の硬さの相違により、 t_2 時間に大きな差があるのは、地盤特性を論じるとき示唆的である。(b)においては、打撃エネルギーは地盤の破壊に、そのほとんどが消費されますが、(a)においては、地盤は破壊されずに弾性変形のみが先じ、後にリバウンドとなってロッドを上向きに押し上げるものと考えられる。

6.まとめ 土質特性とN値との相関を論じるための手がかりを得たため、St.Venant解の一般解を用いて厳密な意味でのロッド長の影響を考慮して、三の考察を行ない、つぎの結果を得た。

- (1) ロッドの地盤への貫入速度は(10)式によって推定することができ、実測値とあわせて検討すればかなりの精度で決定できることになる。地盤の破壊に支配的である初期の部分の貫入速度は数 m/sec のオーダーである。このように、地盤の破壊時の速度を推定できることは、室内実験などの試験条件を決定するための重要な指標となる。 (2) ロッドと地盤との接触面での力の釣合には、(2)式の関係によって決定される。以後、ロッド先端部での破壊領域などを決定できれば、N値と地盤の強度・変形特性などを相関を明らかにする。
- (3) St.Venant解によれば、地盤特性は α に集約され、ロッドの挙動は α の値のみによって決定される。地盤を弾性体と仮定したときには、 α はロッドと地盤のダイナミックスティフネス(APC)によって決まる量³⁾で、ロッドの貫入時の各瞬間にあってもこの約合は保たれていくものである。 (4) 变位または時間に掛けての積分値であるエネルギーの収支をとることによって、さらに定量的な取扱いができる、打撃エネルギー量、貫入量、リバウンド量などを総合的に考慮することが有効と考えられる。 (5) いずれにしても土の強度・変形特性を明確にする必要がある。

最後に、本研究の解析に当っては、大学院生 松村弘君の協力を得た。ここに記して、謝意を表します。

- 参考文献 ①竹中・西垣；標準貫入試験に関する基礎的研究(1)，第1回土質工学研究発表会，1972。 ②三木五三郎；講座「N値を考える」1.講座の開始にあたって、土と基礎，Vol.21, No.12, 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理論研究と基礎実験、東海大学工学部紀要, No.2, 1972。 ④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), 同上, No.1, 1973。 ⑤同上, (第2報), 同上, No.2, 1973。 ⑥宇都・冬木；講座「N値を考える」3.標準貫入試験の機構(1), 土と基礎, Vol.22, No.2, 1974。 ⑦宇都・冬木・近藤・松村；木ピキンソン構造タイプの土の動的試験方法, 土と基礎, Vol.22, No.3, 1974。

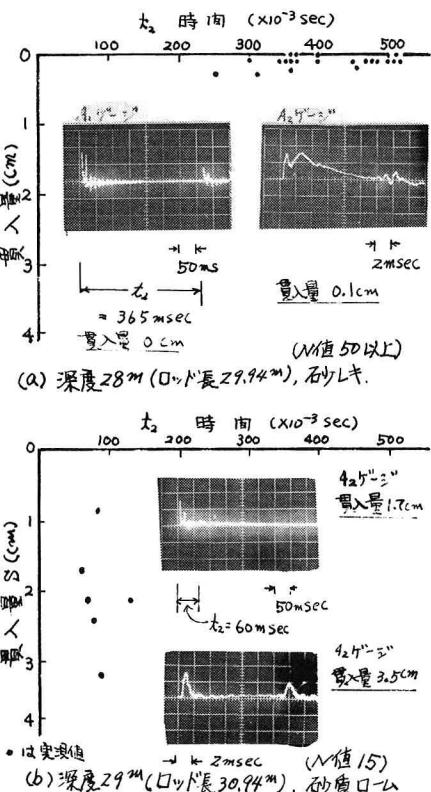


図-8 クリック波形より求めた t_2 の例