

(i) n 回目のロッド頭の変位 U_{0n} およびロッド先端の変位 U_{Ln} は次式となる。

$$U_{01} = U_0(1 - e^{-2\alpha}) \quad (n=1), \quad U_{0n} = U_0(1 - e^{-2\alpha})(1 + \alpha - 2\alpha^2)/(1 - \alpha) \quad (n=2, 3, 4, \dots) \quad (7)$$

$$U_{L1} = U_0(1 - e^{-2\alpha})(1 - \alpha^2)/(1 + \alpha) \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

(ii) n 回目のロッド頭および先端の変位速度 $\dot{U}_{0n}, \dot{U}_{Ln}$ はそれぞれ次式となる。

$$\dot{U}_{01} = \dot{U}_0 e^{-2\alpha c t} \quad (n=1), \quad \dot{U}_{0n} = 2\alpha^{n-1} \dot{U}_0 e^{-2\alpha c t - 2(n-1)\rho} \quad (n=2, 3, 4, \dots) \quad (9)$$

$$\dot{U}_{L1} = \alpha^{n-1} (1 + \alpha) \dot{U}_0 e^{-2\alpha c t - (n-1)\rho} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

(iii) n 回目のロッド頭および先端の応力 σ_{0n}, σ_{Ln} はそれぞれ次式となる。

$$\sigma_{01} = \sigma_0 e^{-2\alpha c t} \quad (n=1), \quad \sigma_{0n} = 0 \quad (n=2, 3, 4, \dots) \quad (11)$$

$$\sigma_{L1} = \alpha^{n-1} (1 - \alpha) \sigma_0 e^{-2\alpha c t - (n-1)\rho} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

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、衝撃波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的に断される。この間にロッドに伝わったエネルギー $U_1 = U_0(1 - e^{-4\alpha})$ 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 $n \rightarrow \infty$ とおいて求め、次式となる。

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

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 ($\alpha < 0$) の場合にも上式を用いて近似的に扱っているが、厳密には文献(3)の(2.24)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 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 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 U_1 にも差が生じるからである。残りのエネルギー $U_0 e^{-4\alpha}$ はハンマーが運動エネルギー $(\frac{1}{2} W_0 \dot{U}_1^2)$ として持っていることになり、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下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 t_2 を求める。1 回目の衝突から T 時間後新たな時刻 t' および変位 U' の原点にとると、ロッド頭の nT 時間後の変位 U_{0n}' は、(7) 式で $n = n' + 1$ 、さらに $\alpha' = \alpha/4$ とおいて

$$U_{0n}' = 2U_0(1 - e^{-2\alpha})\alpha(1 - \alpha^2)/(1 - \alpha) \quad (14)$$

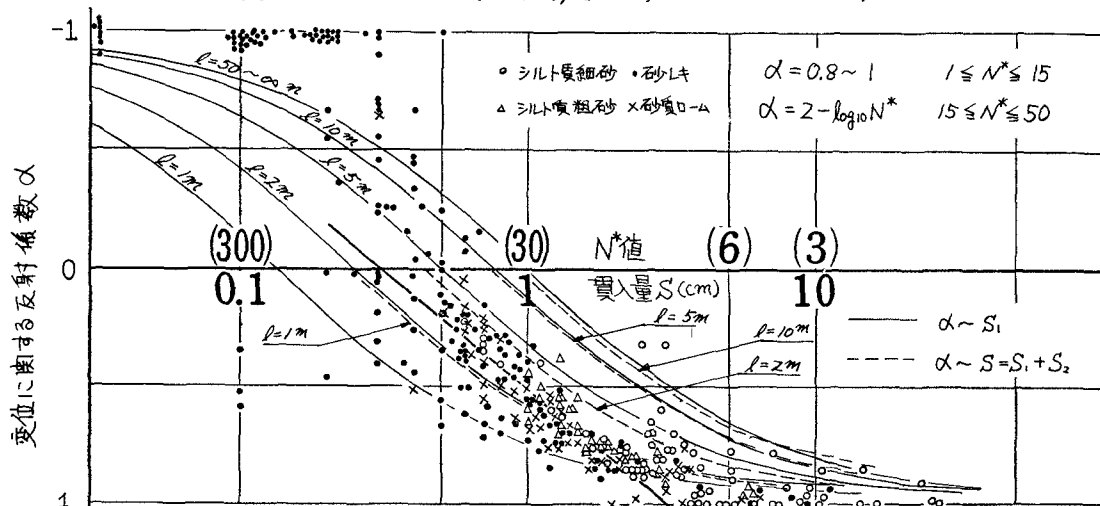


図-3 反射係数 α と貫入量 $S (30/N)$ との関係^{4), 6)}

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 は、

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

となる。2回目の衝突までの時間 t_2 は、(14)式、(15)式を等置して求める。

$$2U_0(1 - e^{-2m}) \frac{\alpha(1 - \alpha^{\frac{t_2}{T}})}{(1 - \alpha)} - v_0 e^{-2m} t' - \frac{g}{2} t'^2 = 0 \quad (16)$$

ここで(16)式の第一項の $\alpha^{\frac{t_2}{T}}$ を t_2 について、MacLaurin展開をして整理すると

$$B \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(D t_2)^n}{n!} \right\} - F t_2 - 490 t_2^2 = 0 \quad (17)$$

となる。ただし、 $B = 2U_0(1 - e^{-2m})\alpha/(1 - \alpha)$ 、 $D = (\log \alpha)/T$ 、 $F = v_0 e^{-2m}$ である。これを計算機で必要な精度まで解いて t_2' を決定できる。

これより、 t_2 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、(15)式を t' で微分して、 $t_2' = t_2 - T$ とおいて求める。

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

2回目の衝突による貫入量 S_2 は、 v_2 の速度で打撃されるロッドの貫入の問題として、2, 3. で述べたと同様に取扱うことができる。すなわち、(13)式の U_0 の代わりに $v_2 l / cm$ とおけばよいことになる。

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

同様の手順を繰り返せば、3回目以後の衝突による貫入量も求めることができるが、多くのひずみ濃縮の実験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。最終貫入量 S は

$$S = S_1 + S_2 = (v_0 + v_2) \frac{l}{c m} (1 - e^{-2m}) (1 + \alpha) / (1 - \alpha) \quad (20)$$

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

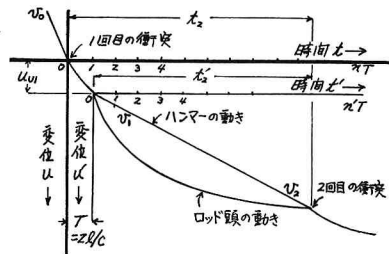


図-4

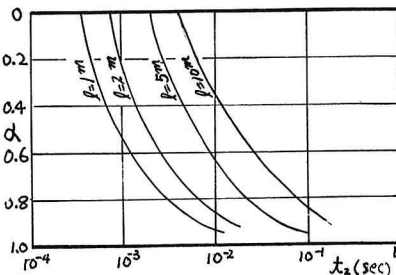


図-5 $t_2 - \alpha$ の関係

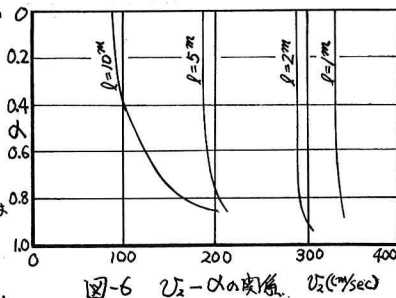


図-6 $v_2 - \alpha$ の関係

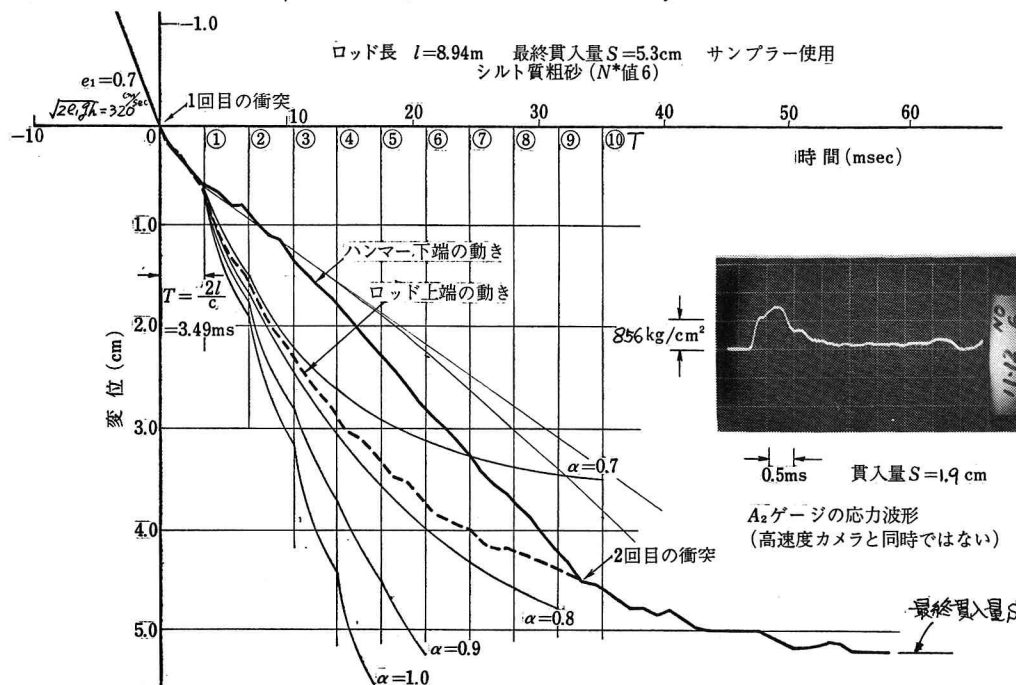


図-7 高速度カメラによるハンマーとロッド頭変位の測定例。(詳細は文献(4)を参照されたい)

(20)式の関係を図-3に破線で示した。

5. 実測値の検討 図-7は、深度7m (ロッド長 $l=8.94m$) に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上端の変位の状態を、高速度カメラで観察したものである。⁴⁾ この例では、ハンマーの1回目衝突時の速度は、ガイド棒などの摩擦により、 $\sqrt{2e_1 g h} = 320 \text{ cm/sec}$ (e_1 は摩擦効率³⁾) に減少している。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、 $v_1 = 320 \text{ cm/sec} = 88 \text{ cm/sec}$ となり、実際のハンマーの落下速度 (143 m/sec) の方が大きい値を示すが、これは一回目の衝突によるエネルギーの伝達が行なわれていないことと、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ンゲージの観測波形より、2回目の衝突位置をよみとり、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で先端地盤は砂しき、(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。地盤の硬士の相違により、 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るが(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。

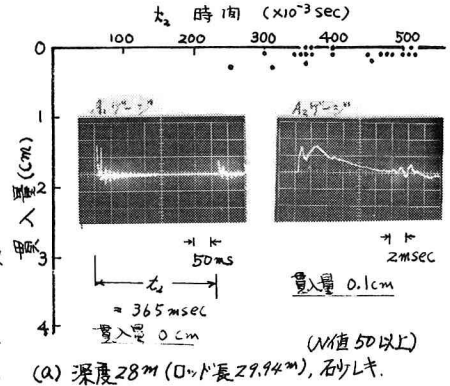
6. まとめ 土質特性とN値との相関を論じるための手がかりを得るため、St. Venant 解の一般解を用いて厳密な意味でのロッド長の影響を考慮して二、三の考察を行ない、つぎの結果を得た。

- (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、室内実験などで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は、(12)式の関係によって決定される。今後、ロッド先端部での破壊領域などが決定できれば、N値と地盤の強度・変形特性などの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タiffネス (Apc) によって決まる量で、³⁾ ロッドの貫入時の各瞬間においてもこの約合は保たれているものである。
- (4) 変位または時間に関する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、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。
- (6) 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。⁷⁾

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7回土工学会研究発表会，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，16.1.21, 16.12.1973。
- 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，16.2, 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，16.1, 1973。
- ⑤ 同上，(第2報)，同上，16.2, 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，16.1.22, 16.2, 1974。
- ⑦ 宇都・冬木・近藤・松村；ホプキンソン構法タイプの土の動的試験方法，土と基礎，16.1.22, 16.3, 1974。



(a) 深度28m (ロッド長29.94m)，砂しき。

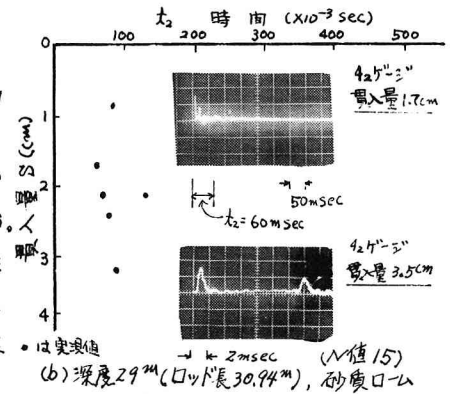


図-8 ひずみ波形より求めた t_2 の例