

アースダム用土の締固め特性について

渡 辺 忠

Study on the Compaction Curve Characteristics of the Soil Materials for the Earth Dam

Tadashi WATANABE

The soil compaction curve can be obtained by the compaction effect, the moisture content, the compaction energy and the degree of saturation.

When the axes of coordinates of the compaction curve are changed, various types of compaction curve and many merits in these types can be found.

The author studied the limit condition of the soil compaction, by these types and then found that the relation between the compaction energy and its effect depended upon the elastic strength of the soil. And the author applied these rules of the soil compaction to the data of the soil test concerning the soil materials for the earth dam.

緒 言

アースダム用土の施工に関しては、プロックターがアースダムの施工に関連して、締固め試験の意義とその工事への適用方法を公にして以来、このような考え方は少なくとも築堤盛土工の基準となり、現在、広く各国で実用に供されていることは、周知のことである。この試験によって、とくに、土の含水比とそれに対応した乾燥密度の変化を知ることができる。

このように、土の締固めに関する要素の中で、含水比の影響が非常に大きいために、土の締固めにおけるエネルギーと締固め効果の関係について明瞭な説明がなされていないだけでなく、その考え方についても、多くの問題が残されている。筆者は、このことについて、さきに実験的な研究結果を発表¹⁾したが、それらの実験結果を総合して、締固めに関する考え方をまとめておく必要を感じ、ここに発表する次第である。

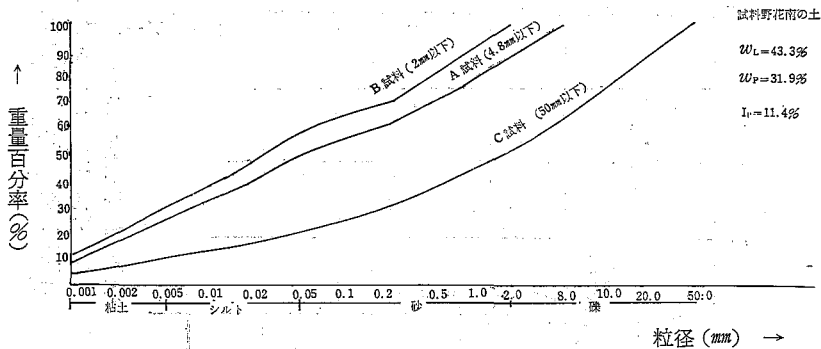
I. 土の種類、締固めエネルギーが異なる場合の締固め曲線

突固め試験における最大乾燥密度 ($\gamma_{d \max}$) と最適含水比 (w_{opt}) の関係は、図1に示すように、土質および突固めエネルギーの大きさによつて異なる。(1図参照)

1. 粒度と最大乾燥密度

同一の土について粒度 4.8mm 以下と 2mm 以下の2種類の試料に篩分けて、JIS A1210の規定による突固め試験を行なったところ、図2(a)に示すように $\gamma_{d \max}$ において 0.1g/cm^3 , w_{opt} において約4%の差が生じた。このことは、同じ土についてではなく、図2(b)におけるように、すでに粒度配合の異なる2種類の土に対して試験を行なった結果を示している。もちろん、図1のように粗な峰延の土と粘質な幌向の土、その中間の野花南の土というように土の種類が異なれば、 $\gamma_{d \max}$, w_{opt} の値が異なるのは当然である。したがって、施工にあたっては、実際に施工

図2(b) 粒度加積曲線



する材料そのものについて突固め試験を実施しなければ意味がないのであって、土質試験の操作の都合によって篩分けた試料における $r_{d \max}$ は、むしろ小さめにでているから設計上安全ではあるが、 w_{opt} は大き過ぎることになるので注意を要する。

また図2(b)におけるような粒度配合を有するC試料、すなわち粗粒土においては、含水比が小さくなると乾燥密度 (r_d) が大きくなる傾向が表われ、 r_d は含水比 (w) との対応において催滑効果だけでなく、振動に対する抵抗効果による影響を受け、 $w \div 5\%$ 付近において最小乾燥密度 $r_{d \max} = 2.3 \text{ g/cm}^3$ が表われる。このように、土質と締固め方法の組合わせの如何によっても $r_d \sim w$ 曲線の傾向が異なるから、現地転圧における $r_{d \max}$ および w_{opt} は、室内試験におけるそれと異なることに留意しなければならない。

2. 土の種類と限界飽和度

図3は、土の種類が全く異なる120種類のアースダム用土について、JISの締固め試験を実施した結果であるが、図において $r_{d \max}$ および w_{opt} を示す点を結ぶと、ほとんど一の曲線で示される。そこで、これらの試料の飽和度 S を求めると、図4におけるように約半数の試料の S は85.84%であって、その前後のちらばりはきわめて小さい。このように、 $r_{d \max}$, w_{opt} の状態を表わしている飽和度を限界飽和度 S_{lim} とよぶことにする。

このように、 $r_{d \max} \sim w_{opt}$ 線は S_{lim} 線と一致すると考えられるので、 r_d , w および S の関係式(1)に

$$r_{d \max} = \frac{G r_w}{1 + \frac{w_{opt} \cdot G}{S}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 r_w = 水の単位重量、 G = 土粒子の比重であるが、 G の値について、アースダム用土235試料の測定値は、図5におけるように、ちらばりが小さいので、その平均値 $G = 2.70$ を用いることができる。

$S = 85.84\%$, $G = 2.70$ を代入すると、 $r_{d \max} \sim w_{opt}$ 曲線は(2)式のようになり、各用土の $r_{d \max}$,

$$r_{d \max} = \frac{231.76}{85.84 + 2.7 w_{opt}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

w_{opt} の値は、土の種類が異なるにかかわらず、この曲線上にのることがわかる。また、この曲線は、 $r_{d \max} \div 1.20 \sim 2.00 \text{ g/cm}^3$, $w_{opt} \div 10 \sim 40\%$ の範囲では、実用上ほとんど直線とみなすことができ、近似的に(3)式で表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} r_{d \max} &\div -0.026 w_{opt} + 2.2 \\ w_{opt} &\div -33.33 r_{d \max} + 76.5 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

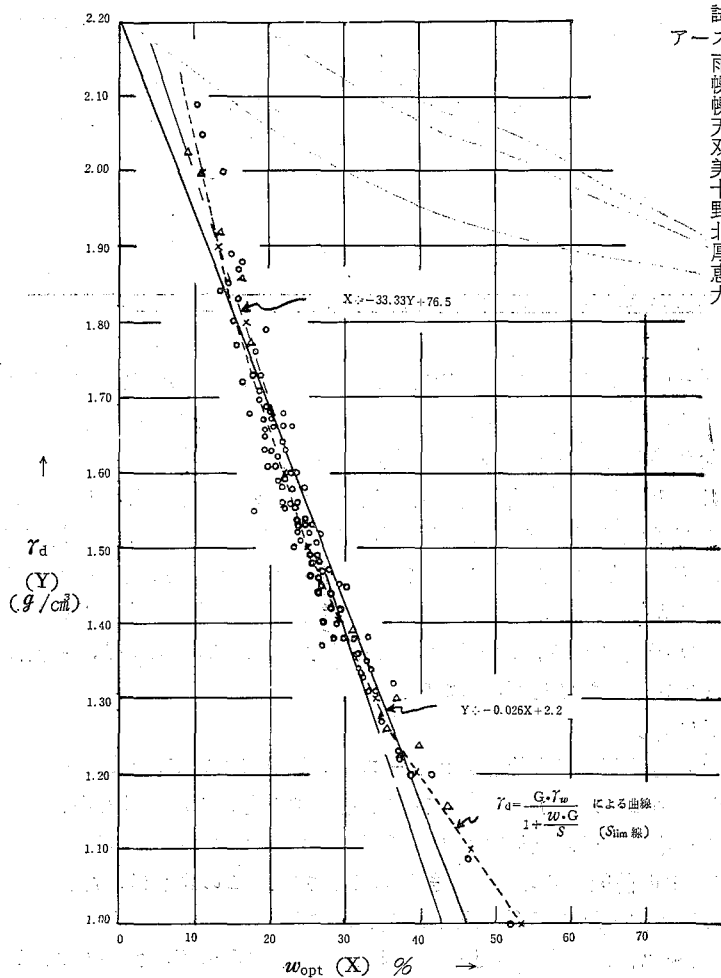
図3 締め固め曲線($\gamma_{d \max} \sim w_{ppt}$ 線)

図4 飽和度度数分布

アースダム 12地区 120試料
 平均値 85.84%

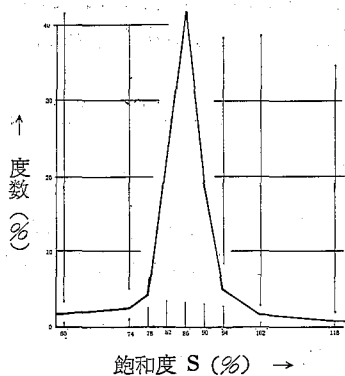
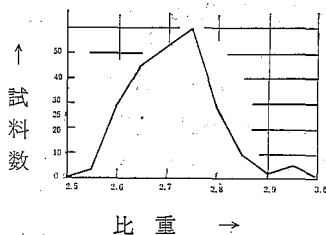


図5 比重度数分布

(アースダム 12地区; 235試料)
 平均値 2.70
 中央値 2.69



いま、図6におけるように、 $r_d \max$ を最小間げき比 ($e_{\min}$) で表わすと、 $e_{\min}$ と w_{opt} の関係は、(4)式となり、これに、 G と S の実測平均値を代入すると、(5)式で表わされる。この式によれば、 $e_{\min}$ は w_{opt} に関する1次式であって、図6におけるように、 $e_{\min} \sim w_{\text{opt}}$ 線すなわち S_{lim} 線は原点0すなわち $e = 0$ 、 $w = 0$ を通る直線となり、実用上、きわめて有利である。なお、(5)式は近似的な(5')式によって代用しても差支えない。

$$e_{\min} = \frac{G}{S} w_{\text{opt}} \dots\dots\dots(4)$$

$$e_{\min} = 0.0315 w_{\text{opt}} \dots\dots\dots(5)$$

$$w_{\text{opt}} = 32 e_{\min} \dots\dots\dots(5')$$

一般に、土の工学的分類にあたって、粒度および稠度が用いられているが、アースダム用土の適性の判定においては、この S_{lim} 線上の位置を知ることによって、最もよくその目的を達することができる。

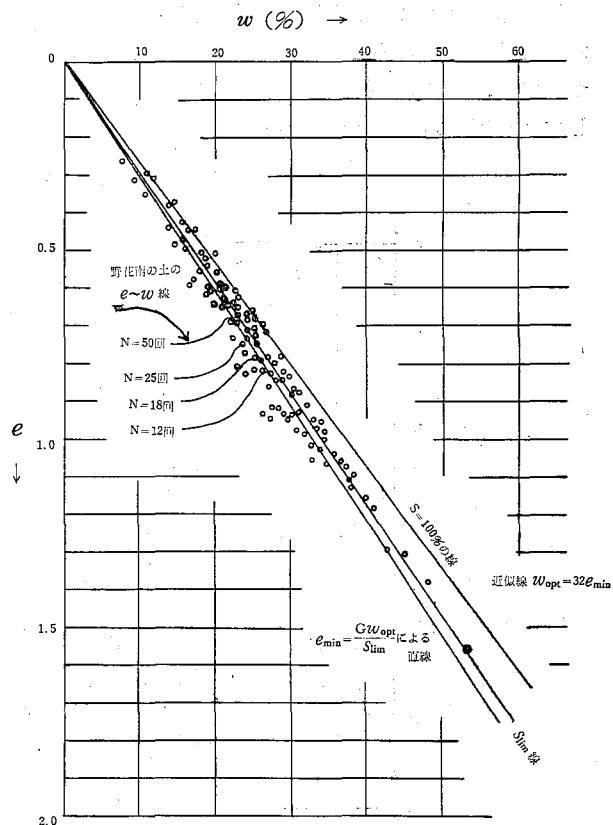
3. 締固めエネルギーと最大乾燥密度

特定の土に特定の締固めエネルギーを与えた場合の $r_d \sim w$ 線は周知のとおりであるが、締固めエネルギーを変えた場合の $r_d \sim w$ 線は、図1に示すとおり、同一種類の土についてはほぼ平行な曲線で表わされる。筆者は、これをエネルギーに関する等高線と解し、等エネルギー線すなわち N 線と称している。

図1における実験によると、締固めエネルギーを増大させた場合も、飽和度がある限界 (S_{lim}) に達するともはや締固め効果を期待することはできず、各 N 線における r_d の最大値は S_{lim} 線上にあるのではないと思われる。このように、土の種類が変わっても、また、締固めエネルギーを変化させても、締固めの限界が S_{lim} 上に表われるならば、 S_{lim} 線は、含水比およびエネルギーに対する土の締固め効果の限界状態を表わしており、締固めの限界線というべき非常に重要な意味をもった線である。そこで、筆者は、 S_{lim} 線の性質をさらに確かめるために行なった特殊突固め装置¹⁾ による各 w に対する $e \sim N$ の関係を、締固め曲線の表示方法を変えて、整理したので、以下言及しようとするものである。

図6 締固め曲線 ($e_{\min} \sim w_{\text{opt}}$ 線)

試料 (図3と同じ)



あり、言いかえると最小限度に必要なエネルギー、 $N_{\min}(r_{di}, w_i)$ である。

この r_{di} 線上で特殊な位置として、 S_{lim} 線との交点 C すなわち $r_{di}(S_{lim})$ を挙げることができる。この点で示される含水比 ($w_{\max}$) 以上に含水量が増加すると、 r_{di} という密度は得られなくなり、 r_d は w の増加につれてかえって減少し、 N_{opt} (or $N_{\min}$) もまた小さくなるのである。このように、 r_{di} と S_{lim} の交点で表わされる w の値は、 r_{di} を得るのに必要な最大限の含水比 ($w_{\max}$) を意味し、このときのエネルギーは $w_{\max}$ に対して必要最小限度の N すなわち $N_{\min}$ を示しており、別な表現をすれば $w_{\max}$ に対して最適なエネルギー (N_{opt}) である。なお、逆に考えると r_{di} に対して N_i が必要最小限度の N 、すなわち $N_{\min}$ とすれば、この時の含水比は、 $w_{\max}$ であると同時に w_{opt} である。このように、ある特定の密度 (r_{di}) が S_{lim} 線との交点において示す $w_{\max}$, $N_{\min}$ は、 r_{di} を一定としたときの土の締固めにおける限界の状態を示すものである。

締固め曲線において、含水比と密度の関係だけを知ろうとするときは、 $r_{d \max}$ および w_{opt} という表示方法だけで十分であるが、締固めエネルギーとの関係を示し、さらに、 $r_{di}(S_i)$ と $r_{di}(S_{lim})$ を区別して扱う場合には、特別な表示方式を用いたほうが便利である。筆者は、上記の状態について、 $N_{opt}(r_{di}, w_{\max})$ 、あるいは $N_{\min}(r_{di}, w_{\max})$ 、また、 $w_{opt}(r_{di}, N_{\min})$ 、あるいは $w_{\max}(r_{di}, N_{\min})$ が適当であると思う。括弧の中の第1の文字については、この要素に特定の値 (N_{di}) をもっているという意味であり、第2の文字、たとえば $w_{\max} N_{\min}$ については r_{di} 上の特定の点、 $r_{di}(S_{lim})$ に対するものであって、任意の w 値 (w_i)、あるいは任意のエネルギー (N_i) に対する $N_{opt}(r_{di}, w_i)$ あるいは $w_{opt}(r_{di}, N_i)$ と区別されるべきものである。なお、括弧外の文字については、限界状態 $N_{\min}$, $w_{\max}$ で示してもよいし、括弧の中の土の状態に対して適当な状態 N_{opt} , w_{opt} と表現してもよい。

2. N 線について

図7における N 線のうちある特定の値 (N_j) を取りあげると、この N_j 線は、従来の締固め曲線を表わし、一定の締固めエネルギーを与えたときの r_d と w の関係を示すものである。この場合、筆者の記号方式によれば、 $r_{d \max}$ は $r_{d \max}(N_j, w_{\max})$ 、あるいは $r_{dopt}(N_j, w_{\max})$ 、 w_{opt} は $w_{\max}(N_j, r_{d \max})$ あるいは $w_{opt}(N_j, r_{d \max})$ となる。また、 N 線上の密度を区別しようとする場合は、 $r_{dopt}(N_j, w_k)$ となる。

3. w 線について

w 線を矢印 A'A の方向にたどれば、一定含水比において、土に締固めエネルギーを加えることによって密度が増大することを示している。実際に、現地地で用土を採取し含水調整をして締固める状況はこの w 線によって表わされている。土取場の土の状態を E ($r_d = E$, $w = E$) 点とすれば、土を採取、運搬、敷均する過程において F 点に達し、含水調整において加水すれば G 点に達する。 $w = G$ 状態において N_0 あるいは N_j なるエネルギーで締固めると H 点、あるいは、C 点に達する。もし、この土が含水飽和すればそれぞれ I, D 点に達し、さらに、 σ_c なる圧縮圧力が働くならば圧密現象が起こり、その過程は IK あるいは OK で示される。ここで H 点で示される土の状態は、 S_{lim} に達していない $r_{di}(S_i)$ の状態であって、この含水比における締固め不完全の状態を示しており、同じ含水状態においてなおエネルギーを増やすことによって C 点の状態に到達させることが可能であることを示している。

なお、土の含水状態は、人工による調整のほかに、自然気象条件によって変化し、含水膨脹あるいは乾燥収縮、亀裂の発生などいろいろな障害が考えられるが、このことについては別に

稿を起こして述べることにする。また締固めた土について将来締固めエネルギー以上のエネルギーが与えられるような载荷が予想される場合は、図における DK なる圧密現象や CB なる不飽和状態における圧密現象が発生する。したがって、土を締固めるにあたっては、このような含水状態や载荷状態などの将来の状態の変化を考慮して、適当な $r_d (S_i)$ あるいは $r_d (S_{lim})$ を選ぶべきである

Ⅲ. 締固め曲線の種別と限界飽和度

締固め曲線は、 r_d 線 (or e 線), w 線, N 線, S 線によって組み立てられていて、これらの各線のもっている意味についてはⅡ章で述べ、さらに、 $r_d \sim w$ 曲線を $e \sim w$ 曲線で表わすことによって、 S_{lim} 線を原点 0 を通る直線として表わすことができ、実用上有利になることについてはⅠ章で述べたとおりであるが、これらの各線が締固め曲線図において示される座標を変換することによって、締固め曲線をいろいろなタイプに種別することができる。これらのタイプには、使用する目的に応じで、それぞれ長所、短所があり、締固め要素を表わしている e , w , N , S の各線の利用価値が異なる。しかし、ここでは、各タイプの表示法についてはその相違点を挙げるだけにとどめ、本稿の主旨である e と N の関係をよく表現している $e \sim N$ 曲線について詳しく述べることにする。

1. 空けき体積率～水体積率曲線

締固め曲線における締固め効果を空けき体積率 (v_v) あるいは土体積率 (v_s) ($v_v = 100 - v_s$) にとって縦軸に表わし、含水状態を w として横軸にとれば、締固め曲線は図 8 のようになる³⁾。図において、ガス体積率 (v_a) は点線で表示され、 S 線および w 線は原点 Q および 0 を通る放射状の直線となり、また $S = 100\%$ の線と $v_a = 0\%$ の線は一致する。

この図は、図 6 の $e \sim w$ 曲線と似ているが、 e と v_v の値は図 8・b で示すように曲線的な関係で示される。したがって S_{lim} 曲線の限界点を明確に表わすことができる。すなわち、始点 P は $v_s = 0$, $v_v = 100$, $v_w = 85$, $v_a = 15$, 終点 Q は、 $v_s = 100$, $v_v = 0$, $v_w = 0$, $v_a = 0$ の状態である、このように、図 8・a によれば、土の締固め過程における、土粒子、水およびガスの体積率と飽和度の関係を一目で知ることができるという利点である。

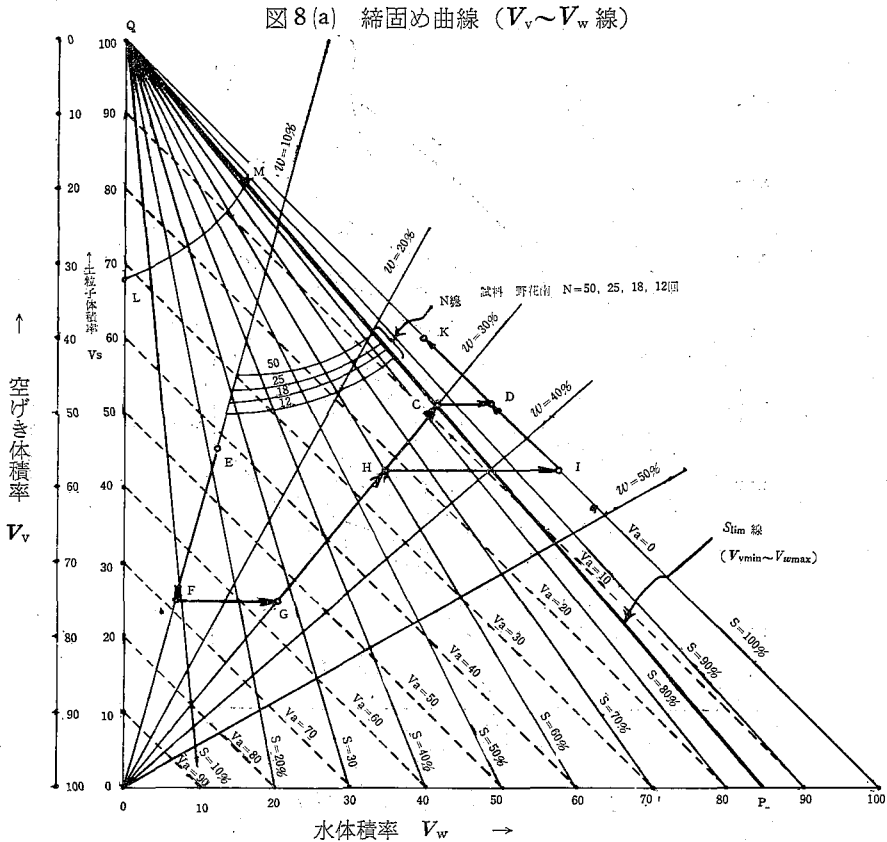
さきに、図 7 において、現地における用土の採取、施工、施工後の変化 (圧密) 状態を説明したときと同じ記号を用いるならば、図 8・a において、採取、運搬、敷均し → EF, 含水調整 → FG, 締固め → GH, あるいは GC, 自然含水 → HI or CD, 圧密 → IK, あるいは DK の過程で表わされる。

2. 間げき比～飽和度曲線

図 9 におけるように縦軸に間げき比 e をとり、横軸に飽和度 S をとると、 w 線は、 $w = 30\%$ の AB 線、 $w = 50\%$ の CD 線のような線で表わされる。この線は次式で表わされる曲線である。

$$w = \frac{v_w}{v_s} \frac{G_w}{G_s} = \frac{G_w}{G_s} S \cdot e \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{ここに} \begin{cases} S = \frac{v_a}{v_w}, & e = \frac{v_a}{v_w} \\ v_s = \text{土粒子の体積} \\ v_w = \text{水の体積} \\ G_s = \text{土粒子の比重} \\ G_w = \text{水の比重} \end{cases}$$



いままで、飽和度は、締固め図の左上に極を有する放射線で表わされていたのに対して、図 9 では、直角座標の横軸に変換され、したがって、限界飽和度 S_{lim} 線は、縦軸に平行な直線で表わされる。

このように、いままで直線で表わされていた w 一定状態の締固め過程が曲線で表わされることと対称的に、いままで曲線で表わされていた等エネルギー線すなわち N 線は、近似的な直線として表わすことができる。このことは、図 8 における Q を極とする極座標の S 線と横軸に平行な e 線との交点の高さが等しい曲線すなわち LM 線は図 9 に移すことによって直線で表わされるのであって、締固めにおける N 線はこの LM 曲線に近以しているため、図 9 におけるように、縦軸を e 横軸を S とする座標で表示することによって、 N 線は近似直線とみなすことができるのである。締固め曲線図の各要素を表わす線のうち、 N 線だけが土質試験を実施しなければ決められないのであるが、この N 線が近似直線で表わされることの実用上の意味は大きい。

3. 間ゲキ比～締固めエネルギー曲線

一定含水比で土が締固められる過程は、図 1, 8 の直線および図 9 の曲線で示されるが、締

図 8(b) e と V_v の関係

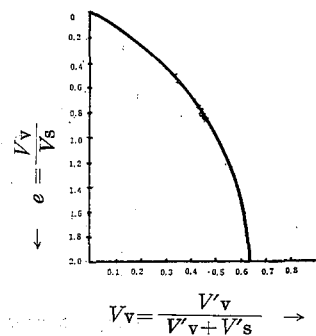
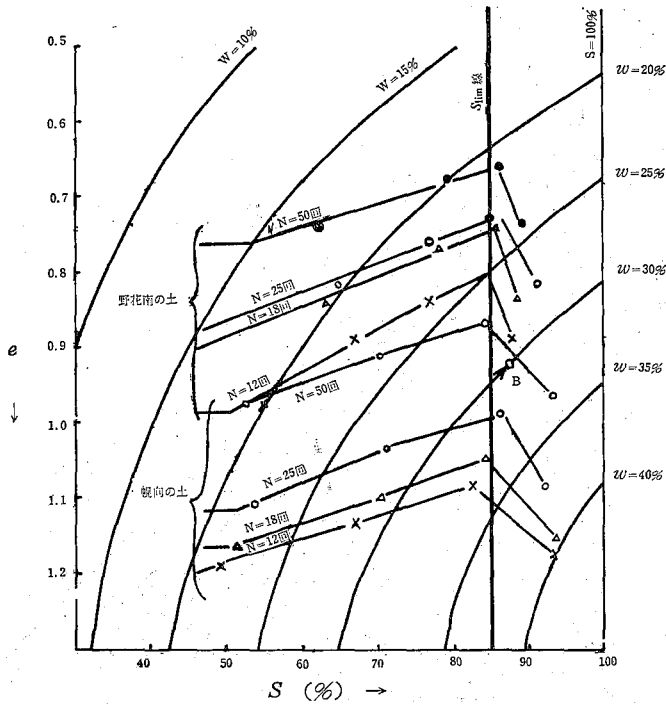
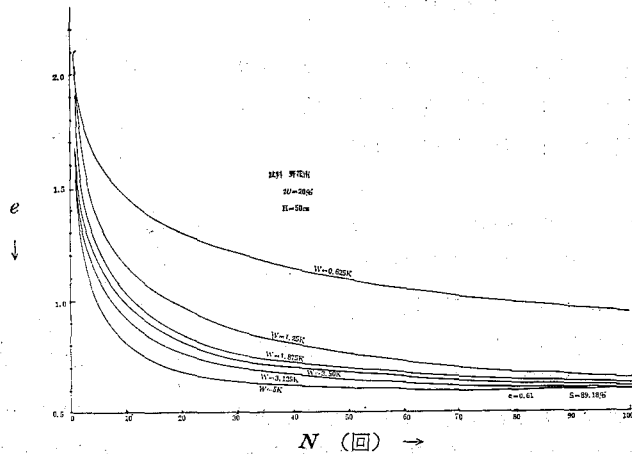


図9 締固め曲線 ($e \sim S$)図10 締固め曲線 ($e \sim N \sim w$)

固めエネルギーとの関係を明瞭にできない欠点がある。このため、図10のように、ランマーの重きを変えて間ゲキ比 e と突固め回数 N の関係を求めると、いずれの場合も一定含水比のもとでは、 $S \approx 85\%$ 、 $e = 0.84$ に達すれば、突固めエネルギーをいくら増加しても締固め効果の上らない限界状態に達する。もちろん、重いランマーでは少ない回数で早く限界状態に達することは明らかである。この図を e と $\log N$ の関係で整理すると図11となり、丁度、圧密試験における間ゲキ比と圧縮圧力の関係と同様に、試料の初期状態および圧縮の最終状態の区間を除

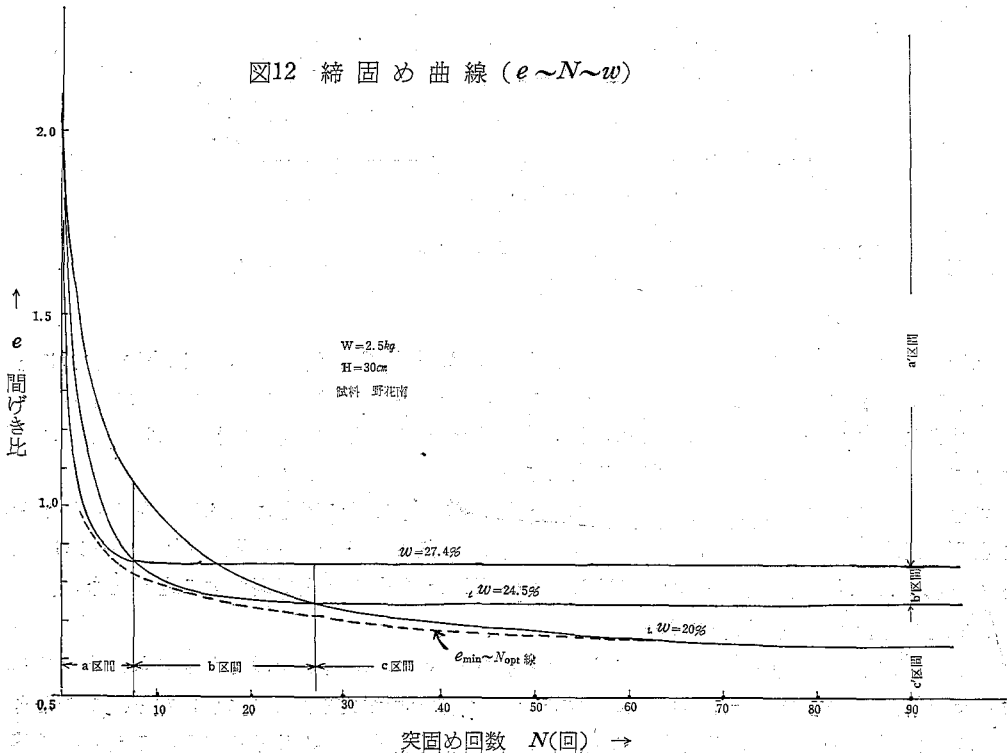
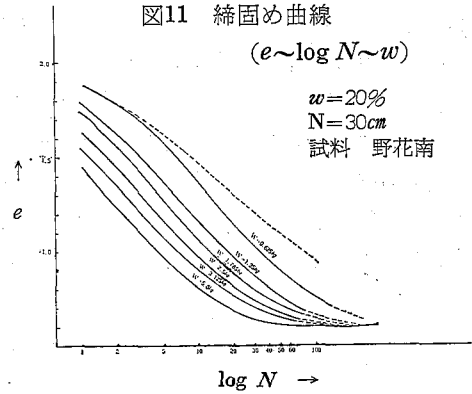
けば、ほとんど直線とみなすことができる。
したがって $e \sim N$ 線のこう配すなわち (7) 式

$$\left. \begin{aligned} \text{圧縮係数 } a_v &= \frac{e_1 - e_2}{N_2 - N_1} = -\frac{\Delta e}{\Delta N} \\ \text{圧縮指数 } C_c &= \frac{e_1 - e_2}{\log_{10} \frac{N_1}{N_2}} \end{aligned} \right\} \cdots (7)$$

を用いて、締固めエネルギーに対する締固め効果の関係を図示することができる。

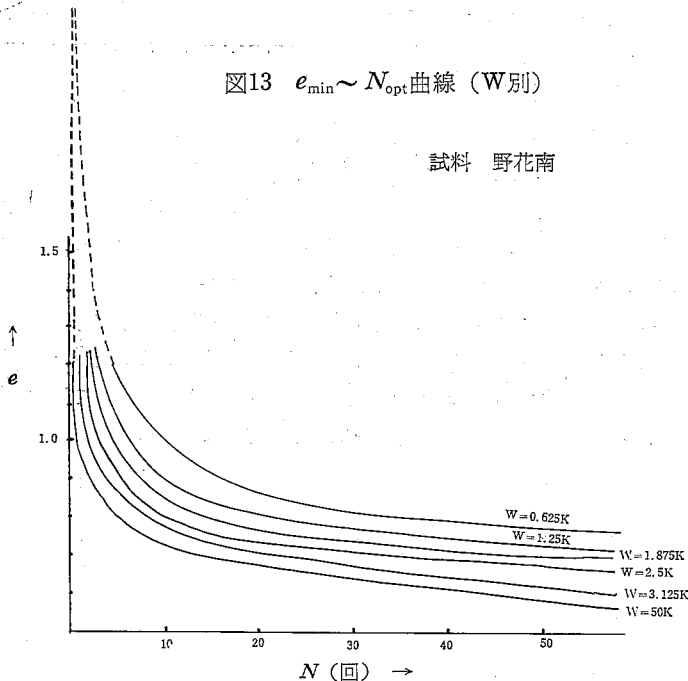
同じ試料について、初期含水比 w を変えて、一定荷重のランマーを用いて締固めた場合の間ゲキ比と突固め回数の関係を図示したのが図12であって、含水比が高いほど、早く限界状態に達するが、どの含水比においても、限界に達したときの飽和度はほぼ一定で $S \approx 85\%$ となる。

図におけるように、 N の大きさを3つに区分して各区分における w と e の関係を比較すると、 N の小さい a 区間では $w=27.4\%$ の e が最小であり、b 区間では $w=24.5\%$ の e が、 N の大きい C 区間では $w=20\%$ の場合の e が最小である。すなわち w が大きい場合は小さい N で早く限界状態に達するが最小間ゲキ比の値は大きく、 w が小さければ限界状態に達し難いが最小間ゲキ比は小さくなることを表わしている。このことは、図1によってもうかがい知ることができるのであるが、図12によれば、 e と N との直接の対応状態によって表わすことができるのである。いまこれらの異なる w 線を無数に描いた場合、これらの曲線群が、図の左下の



部分で描く軌跡を点数で描くと、この線は、土が各含水比のもとで限界締固めの状態に達したときの最小間ゲキ比 ($e_{\min}$) とその $e_{\min}$ に対して最も適当な突固め回数 (N_{opt}) の関係を示している。

さらに、ランマー重量 W を変えて $e_{\min} \sim N_{\text{opt}}$ の関係を求めると、図13におけるように、ほぼ平行な曲線がえられる。ここで突固めエネルギーによって生ずる突固め仕事量 C. E. (Compaction effort) は、(8)式で表わされ、突固め回数 N に定数 K を掛けたものとして表わされるから、図における N は C. E. すなわち締固めエネルギー E に読み替えることができる。



$$\text{C. E.} = \frac{\text{ランマー重量} \times \text{落下高さ} \times \text{突固め回数} \times \text{の数}}{\text{モールド容積}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{C. E.} = K \cdot N$$

図12が、いままでの締固め曲線の表示法図1, 7, 8, 9と異なる点は、横軸に N をとることによって w 線が曲線となり、いままで一定エネルギーにおける N 線が曲線あるいは近似直線が表わされていたのに対して図15では、はっきりと縦方向の直線で明示されており、さらに、図14に示すように、 S 線が曲線になることである。

さらに、図7において、現地で用土を採取施工しなお施工後に圧密される過程を説明したときと同じ記号を用いるならば、図15において、採取、運搬、敷均 $I \rightarrow EF$, 含水調整 $\rightarrow FG$, 締固め $\rightarrow GH$ or GC , 自然含水 $\rightarrow HI$ or CD , 圧密 $\rightarrow IK$ or DK の過程で表わすことができる。

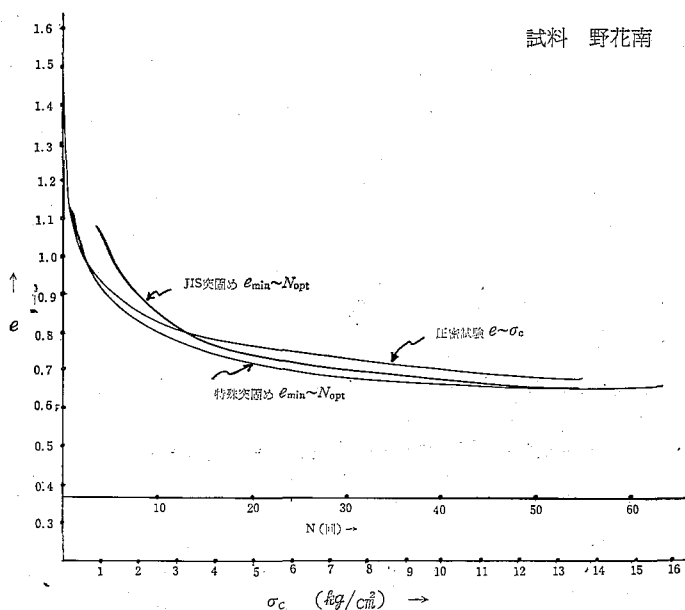
4. 締固めエネルギーと限界飽和度

図10~13によれば、いかに含水比を変化させ、締固めエネルギーを増加させても、含水飽和度が $S \div 85\%$ というある一定の状態に達すると、締固め効果は生じないようになる。このときの S 線は、土の種類が異なるときの S_{lim} 線 (図1) と同性質のものであるので、これらの状態

発揮されないようになるためであろう。したがって、これ以上、土を締固めるには、圧縮方式を変え、たとえば、圧密方式の圧縮エネルギーを加えるなど、間ゲキ水圧を逸散させる方法を講じなければならないのである。

この $e_{\min} \sim N_{\text{opt}}$ 線のもつ最も大きな意義は、締固め試験における間ゲキ比と最適エネルギーの関係を表わす $e_{\text{lim}} \sim N_{\text{opt}}$ 線と、圧密試験において各荷重による最終間ゲキ比と圧縮圧力 σ_c との関係を表わしている $e_{\text{lim}} \sim \sigma_c$ 線とを、同じ場で比較できることである。図15において、圧縮エネルギーと圧縮効果の関係は、締固めにおいては S_{lim} ($S \doteq 85\%$) 線、圧密においては $S = 100\%$ の線で表わされる。すなわち、土が一定含水比のもとで締固められる過程は上述のように $\rightarrow \text{GC}$ であるが、含水比を小さくし締固めエネルギー N_{opt} を増加しながら土の最小間ゲキ比が減少する過程は $\rightarrow \text{BC}$ で示され、圧密現象によって間ゲキ比が減少する過程は $\rightarrow \text{DK}$ で示されるのである。そこで、圧密試験における $e \sim \sigma_c$ 線と図14の $e_{\min} \sim w_{\text{opt}}$ 線を対応させると、図15のようにほぼ平行な状態で比較することができる。このことは、図16の横軸で示されている N と σ_c の縮尺を加減することによって、この2つの曲線はほとんど一致させうることを表わしている。

図16 $e_{\min} \sim N_{\text{opt}}$ 線および $e \sim \sigma_c$



IV. 締固めエネルギーと最小間ゲキ比の関係

1. 圧縮応力と土の弾性的、塑性的挙動

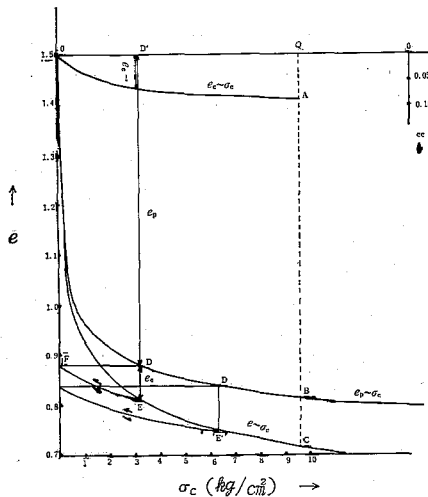
土に加えられるエネルギーによって、土には、弾性、塑性、流動の各変形がおこる。現地転圧においては転圧力によって、土が集団で移動してエネルギーが土粒子の配置転換に有効に働かない場合が起こるが、室内実験においては試料の周辺を拘束しているので流動変形はおこらない。

突固め試験において、弾性、塑性変形を区別して測定することは困難であるので、さきの $e \sim E$ 線と $e \sim \sigma_c$ 線の相似性を利用することにする。締固めに用いた土について圧密試験を行

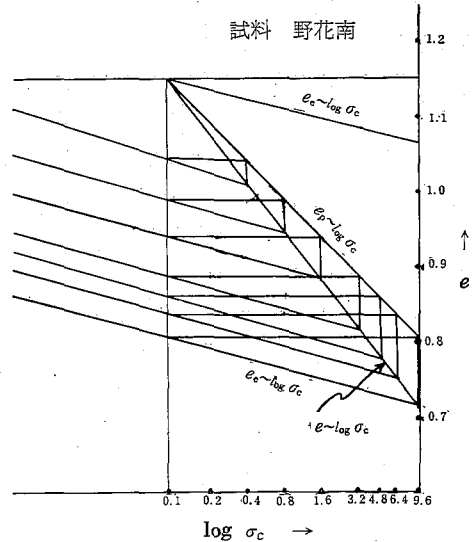
えば、図17におけるような圧密応力(σ_c)と間ゲキ比(e)の関係がえられる。図において e_e は弾性変形、 e_p は塑性変形による変形量である。図において、図形BCOあるいはQAOは e_e と σ_c 、図形QBOは e_p と σ_c の関係を表わしており、 $e_p \sim \sigma_c$ 曲線は早く限界に達し、 $e_e \sim \sigma_c$ 曲線も限界値に接近してはいるが、 $e_p \sim \sigma_c$ 線に比べると、その限界値は遙かに大きいことが推定される。図16の関係を片対数表で整理すると図18のように近似直線で表わすことができ、 $e_p \sim$

図17 $e, e_p, e_e \sim \sigma_c$ 線

試料 野花南

図18 $e, e_p, e_e \sim \log \sigma_c$ 線

試料 野花南



$\log \sigma_c$ 線と $e_e \sim \log \sigma_c$ 線の違いはこう配の相違で表わされる。

いま、図16において、一度0 D' という圧力を加えその最終効果を確認めたのち、除荷して再圧密すれば、すなわち、先行圧力0 D' を受けた土を圧密すれば、圧密曲線はFECで示すような曲線で表わされる。この曲線において、FE区間は弾性変形だけの区間であり、EC区間は弾性および塑性変形の区間である。このような試料においては、先行圧力、 $\sigma_{pre} = 0 D' (= FD)$ のもとで弾性変形、 $e_e = DE$ を示すような弾性強度(E)の限界内では、その後に加える圧力(σ_c)の大きさが $\sigma_c \leq \sigma_{pre} (= 0 D')$ である限り、言い換えると、Stress-Strain図の弾性限であるE点までの領域においては、弾性変形だけが起り塑性変形は起こらないのである。このように、弾性変形だけに用いられる弾性変形エネルギーは、圧力を取除くことによって全部吐き出されるポテンシャルエネルギーである。これに反して、土に永久変形を起こさせるためには、この弾性限Eを起るような圧力を加えることにより、すなわち、塑性変形エネルギーを土の内部に蓄積させることによって達成されるのである。

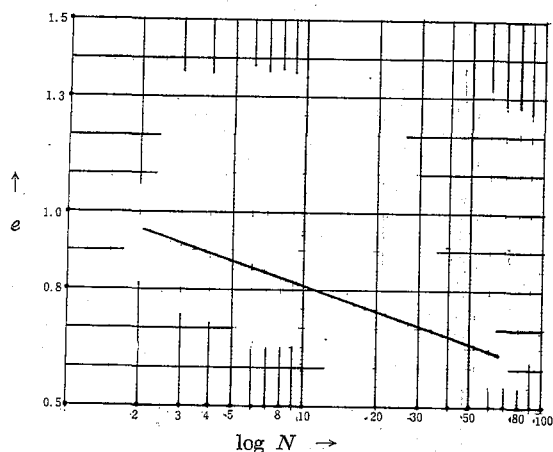
2. 締固めエネルギーと限界曲線

ここでは、 $e \sim N$ 線と $e \sim \sigma_c$ 線の相似性を根拠にして、締固め効果を論ずることとする。土に加える締固めエネルギーを次第に増大させてゆく過程は、丁度、ある先行圧力を与えられた土にそれ以上の圧力を加えてゆく過程と類似している、その土の持っている弾性限以下の締固めエネルギーを加えたのでは最小間ゲキ比(S_{lim} 線上の e_{min})を減少させることはできない。すなわち締固めにおいては S_{lim} 線上の含水比(w_{max})を小さくし、 w_{max} に適したエネルギー(N_{opt})を加えることによって、エネルギーを増大させることができ、弾性限を越えることがで

きる。このようにして増大したエネルギーによって、土には塑性変形すなわち永久変性 ($e_p = 0$) が生じ、それが土の内部に蓄積されると同時に、弾性強さもまた増大するのである。

このように、土の弾性強さが大きくなるにつれて、締固め効果は次第に発揮され難くなってゆくものであって、このような過程は、図15の $e_c \sim \sigma_c$ および $e_p \sim \sigma_c$ の関係から類推することができるが、締固めエネルギーが増大するにつれて締固め効果がある限界値に接近してゆく状況は、図12~15の S_{lim} 線すなわち $e_{min} \sim N_{opt}$ 線で表わされている。ここで、この曲線を片対数グラフにおとし、 $e_{min} \sim \log N_{opt}$ 線として整理すれば、図19のように、締固めにおける最小間ゲキ比と最適エネルギーの関係を近似直線で表わすことができることの実用上の価値は大きいと思われる。

図19 $e_{min} \sim \log N_{opt}$ 線



R. R. PROCTOR (1933) による締固め曲線、すなわち $r_d \sim w$ 線では、一定エネルギーを与えた場合の r_d と w の関係を知るうえでは非常に便利であり、また、締固め限界の状態すなわち S_{lim} 線が r_d と w との対応状態で示されているのであるが、図15の表示方法によれば、一定含水比で土を締固める場合の e と N の関係を知ることができ、さらに、締固めの限界状態である S_{lim} 線を e と N との対応状態で示すことができ、締固めエネルギーとその効果の関係を求めるうえで、有利である。

いま図15の S_{lim} 線をCBの方向にたどるならば、含水比を小さくしてその w に適当なエネルギー (N_{opt})、あるいは最小限度に必要なエネルギー (N_{min}) を加えてゆけば、それに対応する間ゲキ比 (e_{min}) は、次第に小さくなることを示していることは先述のとおりであるが、締固めにおける理論上の密度の限界値は、含水比に対応させると $r_d \sim w$ 図における S_{lim} 線で表わされる⁴⁾と言われている。図15においてもまた、理論上の最小間ゲキ状態は S_{lim} 線で表わされているはずであって、この限界線をCB方向にたどることによって、最適締固めエネルギーを増加させていった場合の理論上の最高密度を表わす点を見出すことができる。このような限界点は、図8の表示によれば、 $v_s = 100$, $v_v = 0$, $v_w = 0$, $v_a = 0$, $S = \text{不定}$ という。 S_{lim} 線の原点Qで示されることになる。しかしこのような限界点に達する過程において必要な締固めエネルギーは、図18, 19で示すように、土の弾性強さの増加とともに増大し、限界点に達するのに必要なエネルギーは、無限大といわねばならない。

V. 摘

要

筆者は、従来用いられてきた締固め曲線において、 S_{lim} 線すなわち $r_{d\max} \sim w_{out}$ 線は、土質および締固めエネルギーが異なった場合における土の締固めに関する限界曲線として非常に有用な曲線であることを強調した。この S_{lim} 線は、図7の表示法によれば原点0を通る直線となって実用性が増し、また、図8の表示法によれば、そのうえさらに、土の3相状態を一目で知ることができるという利点がある。

締固め図の中で、 N 線だけはその土について試験しなければならないが、従来の方法では、 N 線は曲線で表わされる。そこで、図9の方式によって S 線の座標を変換すれば、 N 線を近似直線にすることができると同時に、 S_{lim} 線は直角座標において縦軸に平行な線で表わされる。この S_{lim} 線を $e_{min} \sim N_{opt}$ 線として曲線で表わしたのが図15の表示法であり、 N 線は直線で表わされ、 e と N の関係を直角座標をもって表わすことができる。この方法による S_{lim} 線は圧密試験における $e \sim \sigma_c$ 線と近似した関係をもつので、締固め土の圧縮特性を知るうえで、きわめて有用な線である。

土の締固めは、土の内部に塑性変形エネルギーが蓄積されることによるものであって、塑性変形エネルギーの蓄積によって土に与えられた弾性強度が増大すれば、土は次第に締固まりにくくなる。このような e と N の関係は図12の S_{lim} 線によって示されるのである。この S_{lim} 線を $e_{min} \sim \log N_{opt}$ 線として整理することによって、近似直線をもって表わし、実用性を増すことができる。

なお、 S_{lim} 線上における e の値すなわち e_{min} は土の間ゲキ比と力学的性質との関係を求めるうえで、非常に有用であることについては、筆者がすでに発表⁵⁾しているとおりである。この論文において、筆者は、土の締固めに対する含水状態とエネルギーの影響を、かなり経験的に取り扱っているが、今後さらに、実験を重ね理論的に追求する必要があると感じている。

文 献

- 1) 渡辺 忠(1964) アースダム用土の力学的性質に関する実験的研究 開発局土木試験所報告 P.1—P.117
- 2) 赤井浩一(1966) 土質力学 P.120—P.122
- 3) 久野悟郎(1966) 土質工学 P.57—P.58
- 4) 河上房義(1964) 土質力学 P.181
- 5) 渡辺 忠(1964) アースダム用土の力学的性質について 土質工学会誌 12 No.5 3—10; 12 No.6 3—7
- 6) 最上武雄, 福田秀夫(1967), 土質工学 P.283.