

球体落下試験による現場 CBR の簡易測定について

村 山 朔 郎*
植 下 協**

1. 緒 言

球体落下試験¹⁾は著者らが考案した路床土耐力試験であって、動的に CBR を求める試験であるとも考えられる。

その原理は、一定重量、一定直径の球体を一定高さから路床土に落下させ、そのとき路床土に生ずるくぼみの直径（これを D 値とよぶ）から地耐力を知ろうとするものである。

路床土の D 値と CBR 値との関係は著者らの研究によって理論的にも実験的にも確立できており、この試験法によると正規の CBR 試験に比してずっと簡単に CBR を求めることができる。

また D 値から直接簡単な計算で必要なタワミ舗装厚を設計することができるので、この試験によるとタワミ舗装厚設計のための路床土調査がきわめて簡易化される。

2. 測定装置と D 値測定における注意

球体を一定高さから路床土に落下させるために 図-1 に示すようなさげ振り

つきガイドを用いた。

球体落下によって生じたくぼみの直径 D は物指で直接測定してもよいが、次記の D 値記録装置を使うのが測定が迅速にできるし計測にも便利である。ここで注意しなければならないことは、土は 図-2 に示すようにくぼみの縁が明瞭な線となるようにはくぼまないから、 図-2 に示すように球面と地表面との交線によって D を想定して D 値を測らねばなら

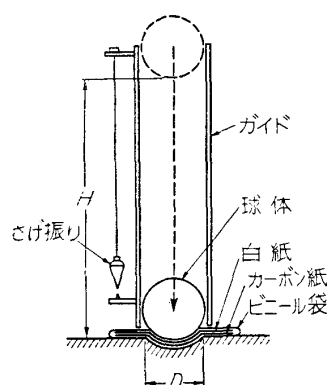


図-1 球体落下式試験実施のための装置

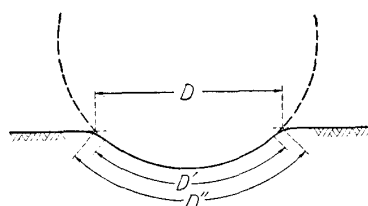


図-2 D 値測定の注意

ないことである。

すなわち D 値記録装置は 10 cm 四方ぐらいの薄い記録用白紙と複写用カーボン紙をあわせて両者を湿らないようにビニールの袋に入れたもので、これを路床土におき、軽くガイドの下端で押え、ついでガイドを鉛直に保ってガイド上端の一定高さより球体を落下させれば、記録用白紙には 図-3 に示すように球体によるカーボン紙の痕跡ができる。この場合もし、記録用白紙に 図-2 に示す D'' の部分だけ痕跡ができるとすれば、 D 値が大きくなるほど記録用白紙上の痕跡の直径と D 値とはかけ離れるはずであるが、実際は 図-2 の D' の部分しか痕跡がつかず、 D' と D とを実測によって比較した結果、 図-4 に示すように実用上等しいとみてよいことがわかった。ゆえに D を直接測る代りに上記記録装置によって D' を測定してもよい。

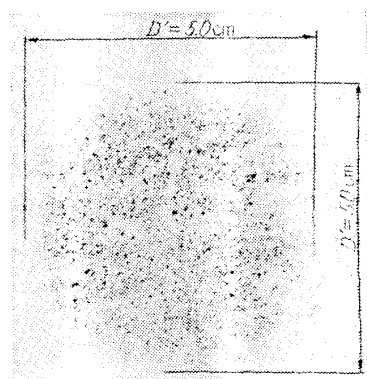


図-3 記録用白紙上の球体の痕跡

球体落下試験の指数としてくぼみの深さをはかることも一応考えられるが、こゝで用いる D 値の測定の方が容易で精度も高い。

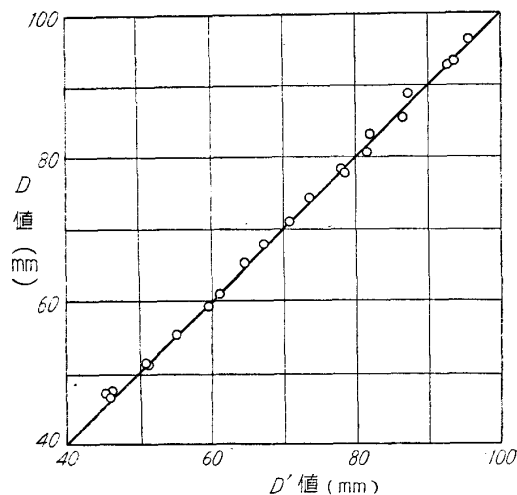
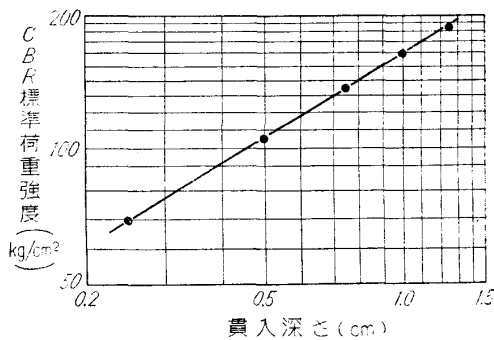


図-4 D 値と D' 値との実験的關係

* 工博 京都大学教授，工学部土木工学科，
** 工博 京都大学助教授，工学部土木工学科，



図—5 CBR 標準荷重強度—貫入深さ曲線
(両対数紙上)

3. CBR と D 値との関係についての理論的考察

CBR の標準になる 荷重強度—貫入深さ関係を両対数紙上であらわせば 図—5 のように直線となる。ゆえに CBR 標準荷重強度 $P(\text{kg}/\text{cm}^2)$ は次のように表わせる。

$$P = 162 Z^{0.61} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに Z は CBR 貫入ピストン (直径 5 cm, 断面積 19.63 cm^2) の貫入量を cm で表わしたものである。

一般に地表面で直径 d (cm) の円板による載荷試験をおこなうと、載荷板の沈下量 Z (cm) と載荷板の荷重強度 $P(\text{kg}/\text{cm}^2)$ との間には次のような関係がある²⁾。

$$P = a \left(\frac{Z}{d} \right)^b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに a, b は土の種類によって決まる定数である。 b は $\left(\frac{Z}{d} \right)$ が大きくなると小さくなる傾向があるが、取扱う $\left(\frac{Z}{d} \right)$ の変化範囲が小さければ定数とみなしうる。

$d = 5 \text{ cm}$ の CBR 貫入ピストンの断面程度の載荷試験の場合に対しても、(2)式が成立すると仮定して、(2)式中の d が 5 cm のとき (2) 式が (1) 式と同一になるように係数 a, b を決めると、

$$P = 432 \left(\frac{Z}{d} \right)^{0.61} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ゆえに CBR が $\eta\%$ の土については、荷重強度

と貫入深さとの関係は次式であらわせる。

$$P = 4.32 \eta \left(\frac{Z}{d} \right)^{0.61} \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に球体を最下端が Z_D となるだけ (図—6 参照) 土中へ押し込むに要するエネルギー $E (\text{kg} \cdot \text{cm})$ を求めると、

$$E = \int_0^{Z_D} A_Z \cdot p dZ \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここに A_Z は球体の地表より Z (cm) の深さにおける水平断面積 (cm^2)、 P は地中へ球体が貫入するとき Z の深さの水平断面に鉛直に働いたと考えた荷重強度 (kg/cm^2) で、いずれも Z と d の函数である。

ここで球の地中に貫入している部分を計算の便宜上、回転放物線で近似する。球の中心 O を通る鉛直断面上で、鉛直な球軸の地表面の高さの点 O_Z を原点にとり、 Z 軸を鉛直下方に、 x 軸を水平方向にとる。ゆえに地中における球の鉛直断面 ACB は次式で近似される。

$$Z_D - Z = cx^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで係数 C は $Z=0$ で $x = \frac{D}{2}$ となるようにきめると、

$$C = \frac{4Z_D}{D^2} \quad \text{となり次式をうる。}$$

$$Z_D - Z = \frac{4Z_D}{D^2} x^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

深さ Z における球の水平断面積 A_Z は、

$$A_Z \approx \pi x^2 = \frac{\pi D^2}{4 Z_D} (Z_D - Z) \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表わせる。また (4) 式における d は (7) 式より次のように近似する。

$$d \approx \frac{D}{Z_D^{0.5}} (Z_D - Z)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (9)$$

そこで球体の反力が鉛直応力のみよりなるとして、(4)、(7) および (9) 式を (5) 式に代入すれば次式をうる。

$$E = \frac{4.32 \pi}{4} \eta \frac{D^{1.39}}{Z_D^{0.70}} \int_0^{Z_D} (Z_D Z^{0.88} - Z^{1.88})^{0.70} dZ$$

上式の積分のため OZ_D 間を 10 等分し、シンプソンの公式を適用して上式を近似積分すれば、貫入に必要なエネルギー E は次のように求められる。

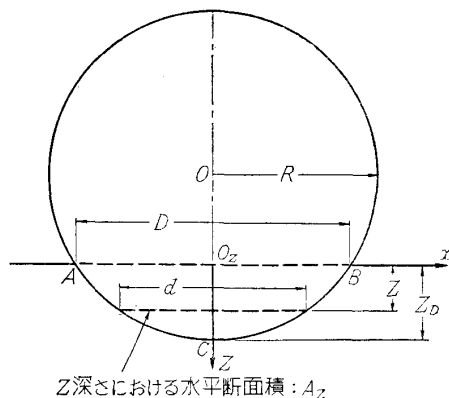
$$E = 1.01 \eta D^{1.39} Z_D^{1.62} \quad \dots\dots\dots (10)$$

この試験法では球体貫入のために必要なエネルギー E は球体の落下によって与えるが、落下によって与えたエネルギーの全部が球体貫入のために使われるわけでないから、有効係数を乗じて貫入のために供給したエネルギーを表わすと、

$$E = k \cdot W (H + Z_D) \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここで W は球体の重量 (kg)、 H は落下前の球体の最下端より地表までの距離 (cm) である。

なお Z_D (cm) は球の性質から次のようにあらわせる。



図—6 球体を地中に押し込んだ場合の各ディメンジョン

$$Z_D = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

こゝで R は球体の半径 (cm) である。(12) 式を (10), (11) 式に代入し, (10), (11) 式を等置して η について解くと,

$$\eta = \frac{k \cdot W \left(H + R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \right)}{1.01 D^{1.39} \left(R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \right)^{1.62}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

を得る。これが CBR $\eta\%$ とくぼみの直径 D cm すなわち D 値との関係をあらわす一般式である。

4. CBR と D 値との関係についての実験的考察

実験は室内および現場で, 直径 9.04 cm, 重量 4.07 kg の真ちゅう製球体を高さ 60 cm から落下させておこなった。

まず室内実験から述べると, JIS A 1211 動荷重成形供試体試験に従い, CBR モールド中に突固めた供試体の CBR 値をまず供試体の表面 (JIS に従って正規の

CBR 試験面) で求め, 次に CBR モールドに入ったままの供試体の裏面に球体を落下させて D 値を求めた。この場合, 供試体は 4 日水浸のものを使ったが, 供試体の表と裏で CBR 値が異なると考えられるので, あらかじめ 46 箇の供試体で 4 日水浸供試体の表の CBR $\eta\%$ と裏の CBR $\eta'\%$ の関係を実験的に調べてみた結果,

$$\eta' = 0.949 \eta^{0.938} \quad \dots\dots\dots (14)$$

という関係があったので, この関係を利用して, まず供試体表面で得られた CBR を供試体裏面の CBR に換算し, その換算した裏面の CBR と裏面で直接球体を落下して求めた D 値との関係を 図-7 の○印のようにプロットした。

つぎに 2 つの現場 (比叡山ドライブウェイおよび大阪市庭窪浄水場) でおこなった実験結果を述べる。現場実験では, 現地で JIS A 1211 に従った正規の現場 CBR 試験を一つおこなうたびにその附近で 4 ~ 6 箇の D 値を測り, その平均値を求めて CBR 測定値と対比した。その結果は 図-7 の●印のようになった。

図-7 におけるすべての実測点の k 値の平均を求めると, 0.45 となり, この値を (13) 式に代入して理論曲線

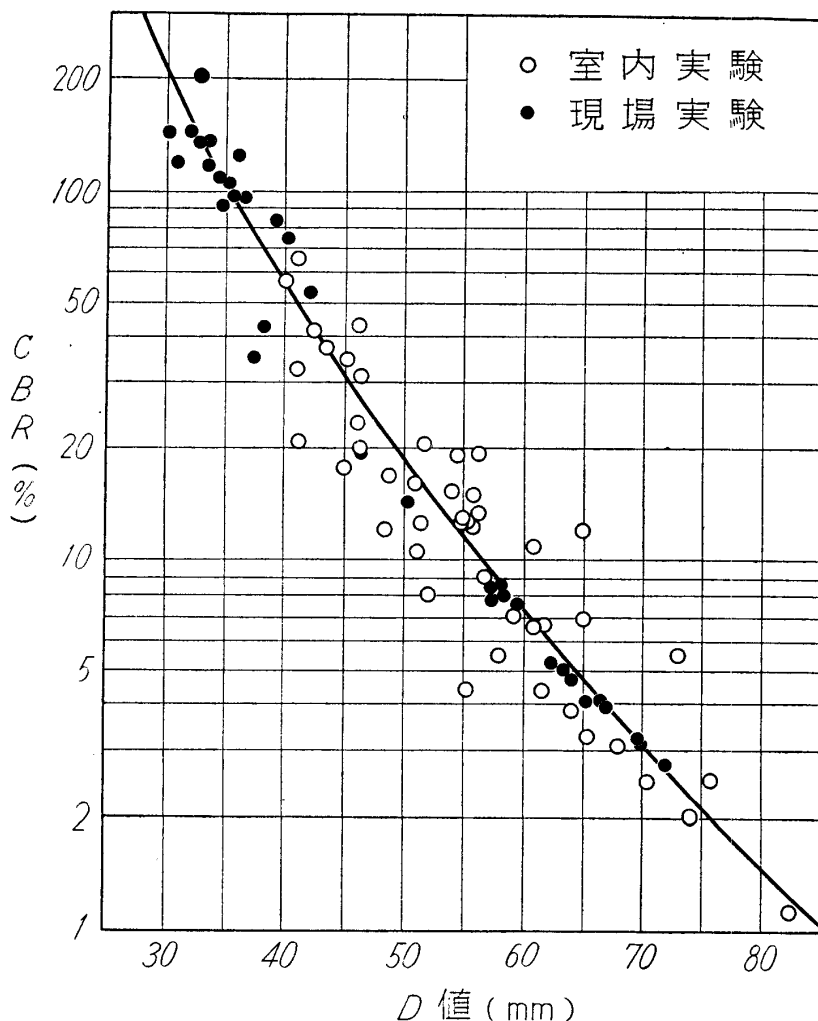


図-7 CBR と D 値との関係 (現場および室内実験による)
球体の直径 9.04 cm, 重量 4.07 kg, 落下高 60 cm.

を描くと 図-7 の実線のようにになった。この理論曲線はきわめてよく実測値を代表している。

図-7 によると, 室内実験結果は現場実験結果よりも実測点のバラツキが大きい, これは室内試験では供試体の表面の CBR から (14) 式のような関係式を用いて供試体裏面の CBR を推定する操作を含んでおり, しかも一つの測定 CBR と一つの測定 D 値としか対応させることができないのに対して, 現場実験では, 一つの測定 CBR に対し, その附近で 4 ~ 6 箇の D 値を測定して, その平均したものと対応させたことによると考えられる。

5. D 値によるタワミ舗装厚設計公式

わが国で一般に利用されている CBR からタワミ舗装厚を設計する曲線³⁾ をもとにし, 図-7 に示した CBR- D 値関係を利用して, D 値による舗装厚設計曲線を描くと 図-8 の実線で示す 3 本の設計曲線が得られる。こゝで 図-8 の設計曲線はほぼ次式で表わせることがわかった。

$$T = a D^3 \quad \dots\dots\dots (15)$$

こゝに T は必要舗装厚 (cm), D は cm で測った D 値, a は設計輪荷重によってきま

る定数で 3.6
t 輪荷重のとき
は、0.135,
5.2t 輪荷重の
ときは 0.16,
8t 輪荷重の
ときは 0.19と
すればよい。

式(15)で設
計すると、図
—8 の設計曲
線を利用する
場合に対し図
の点線の部分
で、わずかに
(舗装厚にし
て 1 cm 程度)

相異なるにす
図—8 D 値による舗装厚設計曲線 (D 値
測定は球体は直径 9.04 cm, 重量
4.07 kg, 落下高 60 cm の場合)

のように簡単な設計公式であらわし得ないから、球体落
下による路床土調査法はタワミ舗装厚を設計する上にき
わめて都合の性質をもっていると考えられる。

6. D 値測定の必要精度について

こゝで舗装厚を誤差 10% 以内の精度で設計するた
めに必要な D 値測定の許容誤差限界を考慮してみる。(15)
式を微分すれば、

$$dD = \frac{1}{3} \cdot \frac{dT}{T} \cdot D \quad (16)$$

討 論

○福岡正巳 (建設省土木研究所)

試験装置の詳細な設計図について、具体的に試験方法
の御説明を願いたい。

○植下 協 (発表者)

この試験法に必要な道具は砲丸 (著者らの用いたのは
直径 9.04 cm, 重量 4.07 kg の真ちゅう製) と図—A に
示すガイドだけで、試験装置といってもきわめて簡単だ。
試験方法は測定地点に記録紙 (ポリエチレンの袋に複写
用タイプ用紙とカーボン紙をあわせて入れたもの) をお
き、その上に左手でガイドを鉛直に立て、右手で球体の
直径のあたりをもち、ガイド上端に球体の直径がくるよ
うな位置 (図—B 参照) で右手をはなせば、球体は正し
く 60 cm の落下高で測定地表面の記録紙上に落下し、複
写紙にくぼみの痕跡を残すことになる。複写紙をとりだ

を得る。こゝで $\frac{dT}{T} = 0.1$ とおくと、

$$dD = \frac{1}{30} D \quad (17)$$

となり、 $D = 4$ cm のときは許容誤差限界 $4Da = 1.3$ mm,
 $D = 7$ cm のときは $4Da = 2.3$ mm となる。この程度の測
定は D 値を慎重に 4~5 回測定し、それらを平均するこ
とによって十分達せられる。

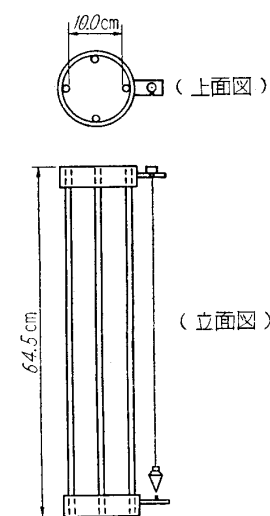
7. 結 言

タワミ舗装厚設計法として CBR 試験による方法は今
日広く信頼され利用されているが、現場ではその試験を
一々実施するのが面倒なため敬遠される傾向にある。そ
こで著者らは現場でもっと簡単に CBR を求めることが
できる球体落下試験を考案して、その理論的実験的研究
をおこなった結果をこゝに述べた。すなわちこの球体落
下試験は理論と実験がよくあい、精度も簡易試験として
はかなりよく、またこの試験結果からたゞちにタワミ舗
装厚が設計できる簡単な公式を見出すことができたの
で、この試験法は路床土調査法としてきわめて優れてい
ると考えられた。

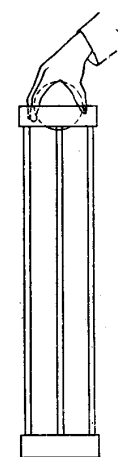
文 献

- 1) 村山朔郎, 植下協, 斎藤 実: 球体の落下による
CBR 値の測定法について, 土木学会第 13 回年次
学術講演会講演概要 (1958), pp. 67~68.
- 2) Osterberg, J.O.: General discussion for sympo-
sium on Load Tests of Bearing Capacity of
Soils, 50 th Annual Meeting A.S.T.M., Special
Technical Publication, No. 79 (1947), pp. 128
~139.
- 3) 竹下春見: 路床土支持力比試験方法, 土質試験法
解説 (第 1 集) (1955), p. 121.

してこの痕跡の直径 (2 方向の値の平均値を用いる) を



図—A 落下高 60 cm で
直径 9.04 cm の球体



図—B 球体の
落下させる
直前の位置

はかり、図—
7 を用いれば
CBR が推定
できる。たゞ
し測定の確実
を期するため
には、この測
定を 5 回ぐら
いおこなって
平均値を用い
ることが必要
だ。