

## 19. 路床路盤の弾性係数推定例について

函館開発建設部 東山崎正義  
三浦靖司

### 1. はしがき

31年度函館港第二号埠頭道路舗装の路盤支持力試験に関連して、路床、置換砂、置換切込砂利上において支持力試験を実施し、支持力と路盤厚との関係について考察を行つてみた。その中で路床路盤の弾性係数の推定について、実験室試験の結果と併せて若干の考察をしてみたので、以下その概要を述べることにする。

### 2. 実験方法

土の弾性係数を推定する方法には、

- (1) 三軸圧縮試験による弾性係数測定
- (2) 貫入試験による弾性係数の推定
- (3) CBR 値と弾性係数との関係曲線による推定
- (4) 現場載荷試験結果を用いて弾性理論から求める方法

などが発表されているので、以上四つの方法を用いてその結果を比較してみた。

#### (1) 三軸圧縮試験による方法

この方法は現場試料と実験室試料とを同一状態にできれば、最も望ましい方法であるが、砂、切込砂利の自然試料の採取は不可能であつたし、路床土もほとんどが礫または貝殻を含むため、弾性係数測定用の自然試料は No. 2, No. 4 の 2 点しかとれなかつた。よつてこの方法はほとんどが突固め試料に対して三軸圧縮試験によつて測定した弾性係数と、これと同一含水比、同一密度に突固めた同一試料について測定した CBR 値との関係曲線を用いて現場 CBR 値から推定した弾性係数、貫入指数と弾性係数の関係式を用いて現場貫入指数から推定した弾性係数、および平板載荷試験から支持力係数  $K$  値を測定し弾性理論によつて推定した弾性係数とに対する比較という意味になつた。三軸圧縮試験は路床土 No. 2, No. 4 の自然試料および締固め試料、置換砂、置換切込砂利の締固め試料について行つた。供試体は径 6 cm、高さ 15 cm の二つ割りモールドを用いて成形した。試験は側圧 0.2~0.8 kg/cm<sup>2</sup> で行い、弾性係数は上下面間の歪について断面補正を行つた応力を用い、破壊強度の 1/3 における正割係数をとつた。切込砂利は供試体の径の関係で 2 cm 以下に篩つて用いた。

#### (2) 貫入試験による方法

貫入試験機は土木研究所型といわれるものを使用した。すなわち、貫入棒の直径 2.5 cm、先端の径 3 cm、傾斜角 60°、重錘重量 5 kg、落下高 50 cm、貫入棒の長さ 100 cm のものである。試験方法は所要の深さに達するまで重錘を落下させ、その衝撃による貫入量を測定するようになってゐる。貫入量の増加割合、すなわち、 $n$  回目の貫入指数は、 $(n+1)$  回目の貫入量と  $(n-1)$  回目の貫入量の差を用いて示す。

土の容積圧縮率として横膨張を妨げた場合の弾性係数  $E_v$  (kg/cm<sup>2</sup>) と貫入指数  $PI$  (cm) との間には、粘土、純砂質土を除いた一般の土について、

$$PI = 95.6 \frac{1}{E_v} + 0.15$$

なる式が谷藤博士により与えられている。いまポアソン比を 0.2 と仮定すると、 $E_v$  は次式によつて横膨張を妨げ

ない場合の弾性係数  $E$  に換算される。

$$E = \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} E_\nu = 0.9 E_\nu \quad \text{ここに } \nu \text{ はポアソン比}$$

これを上式に代入して

$$\frac{1}{E} = 0.0116 P \cdot I - 0.00174 \quad (1)$$

が弾性係数と貫入指数の関係となる。

### (3) CBR 試験による方法

室内試験は、(1)の三軸圧縮試験による弾性係数測定に用いられた試料と同一含水比、同一密度のものまたは同一自然試料について行い、荷重板は 7.5 kg とし、貫入 2.5 mm における値をとつた。現場試験は砂層切込砂利層上で行い、室内試験と同様荷重板 7.5 kg 貫入 2.5 mm のものを採用した。

### (4) 現場載荷試験結果から弾性理論によつて推定する方法

路床路盤の各層上で平板載荷試験を実施し、バーミスター理論によつて各層自体の弾性係数を算出する方法である。一般に一樣な半無限弾性体の地盤上に、荷重が剛性円型載荷板を介して負荷されたとすると、円型載荷面の中心における垂直方向の沈下は

$$d = \frac{\pi}{4} \frac{2Pa}{E_2} (1-\mu_2^2)$$

ここに  $d$  : 円型載荷面の中心における垂直の沈下

$P$  : 等分布荷重

$a$  : 円型載荷面の半径

$E_2$  : 一樣地盤の弾性係数

$\mu_2$  : ポアソン比

ポアソン比を 0.5 とすれば上式は

$$d = 1.18 \frac{Pa}{E_2}$$

$$\therefore E_2 = \frac{1.18}{d} Pa = 1.18 aK \quad (2)$$

また路盤構造のように層系をなす場合は、バーミスターによれば上層のポアソン比 0.5、上層の弾性係数  $E_1$ 、下層の弾性係数  $E_2$  とすると

$$d = 1.18 \frac{Pa}{E_2} F_{w0}$$

$$\therefore F_{w0} = \frac{E_2 d}{1.18 Pa} = \frac{E_2}{1.18 aK} \quad (3)$$

沈下係数  $F_{w0}$  は  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $a$  および上層の厚さ  $h$  の函数であり

$$F_{w0} = f\left(\frac{E_1}{E_2}, \frac{h}{a}\right)$$

で表わされ、バーミスター、バーバー、星埜博士などにより求められているが、バーバーによれば

$$F_{w0} = \frac{1 - \frac{E_2}{E_1}}{\left\{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\frac{2}{3}}\right\}^{\frac{1}{2}}} + \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

であらわされる。すなわち、各層上の  $K$ -値がわかれば、(2)、(3)、(4) 式から  $E_1$ 、 $E_2$  を求めることができる。

なお(4)式については  $\frac{E_1}{E_2}$  をパラメーターとした  $F_{w0}$  と  $\left(\frac{h}{a}\right)$  の関係図表を作つておけば便利である。

まず  $E_2$  を求めるには路床上で載荷試験を行つて  $K$ -値を求め、(2)式から計算すればよい。 $E_1$  を求めるには路盤上で載荷試験を行つて  $K$ -値を求め(3)式から  $F_w$  を計算し、図から  $\frac{h}{a}$  に対応する  $E_1/E_2$  を求めて  $E_1$  を計算するのである。なお上記の方法は  $E_1 > E_2$  の時使い、 $E_1 < E_2$  の場合には星埜博士の解を用いて求められる。

本実験においては載荷板は径 30 cm のものを用い、1 分間の沈下量はその荷重によるその段階における沈下量の 1% 以下になれば、沈下の進行が止つたと認めて荷重段階を増す方法によつて、沈下量 1.25 mm における  $K$  値を算定した。

### 3. 試験結果

#### (1) 室内試験

##### i) 弾性係数測定について

室内試験の試料採取箇所、測定結果は表 19-1 に示したとおりである。

表 19-1 室内試験結果一覧表

試料番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
採取箇所	路床 No. 4 (140 m)				路床 No. 2 (60 m)		路盤下層(置換)		路盤上層(置換)				敷地外	
土質名	砂質ローム				砂質土		砂		切込砂利				砂質ローム	
状態	自然土	締固	〃	〃	自然土	締固	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	
三軸試験による弾性係数測定	側圧	0.1	46	90				30						
		0.2	62						203	440	350	378		
		0.5	73			61			230	525	500	556		
		0.8		100	250	90	145	97	446	238	675	525	586	783
		1.2					202							190
	2.0		125											
	湿潤重量	1.67	1.53	1.82	1.67	1.77	1.51	1.86	1.37	1.92	1.88	2.00	2.26	2.10
	乾燥重量	1.07	1.22	1.44	1.28	1.21	1.21	1.72	1.78	1.73	1.68	1.81	2.10	1.82
	含水比	57	25.4	26.4	30.5	46.2	24.8	8.15	5.05	11.0	11.9	10.3	7.6	15.3
CBR 試験	CBR 値	10.3	3.9	6.4	1.43	5	6.4	25.7	35.2	50.2	34.0	49.3	75.7	8.6
	湿潤重量	3.9	3.7			10.0								
	乾燥重量	1.56	1.63	1.84	1.79	1.67	1.57	1.92	1.92	1.99	1.90	2.02	2.25	2.18
	含水比	1.19	1.27	1.45	1.34	1.21	1.25	1.35	1.84	1.82	1.74	1.82	2.10	1.86
	含水比	30.9	28.4	27.4	34.3	37.9	25.1	4.1	4.3	9.5	9.1	11.2	7.1	17.5
貫入試験	指数	現場	1.0			1.0	1.0							
		モル	1.0											
		ド	1.5	1.3	0.5	3.5			2.3					
		ド	1.4	1.2									1.0	
	湿潤重量	1.57	1.67	1.87	1.76	1.65	1.55	1.39					2.14	
	乾燥重量	1.17	1.24	1.47	1.30	1.22	1.25	1.85					1.82	
	含水比	33.6	36.4	27.4	33.6	34.6	24.1	3.6					17.3	
三軸試験	$\phi$	42°30'	40°			47°30'			44°	48°30'	46°	48°30'		
	$C$	0.48	0.15			0.24			0.35	0.60	0.40	0.55		
	$\tau(\delta_3=0.8)$	1.22	0.82			1.11			1.13	1.50	1.23	1.45		

注 貫入指数と弾性係数の関係式にはポアソン比を 0.2 とし、弾性理論式には 0.5 としている。これは便宜的に文献どおりの式を用いたものである。なお、現場データの変動範囲から推して、この程度の仮定の変動は影響がないと考えられる。

弾性体の弾性係数は  $E = \frac{P}{\epsilon}$  であるが、いま同様の考え方を土に適用し、正割係数  $E_s$  を破壊荷重の 1/3 において考えたが、大部分の試料は破壊荷重の 1/2 位まで直線となつたため、 $E_s$  は初期係数  $E_0$  に等しくなつた。また切込については試料成形時のキャッピングの関係と思われるが  $0.4 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$  位まで初期曲線がねたので原点修正を行つた。土の弾性係数は同一土質で、しかも含水比や密度が同じであつても、側圧によつて異なるものであるから、本実験では側圧を  $0.2, 0.5, 0.8 \text{ kg/cm}^2$  と変えて三軸圧縮試験を行つた。その結果は図 19-1 に見られるとおり、側圧大なるほど、弾性係数は大となる傾向を現わしているが、文献<sup>1)</sup>によるものよりはその割合が少なくなつてゐる。各側圧における供試体の密度は 3~8% の差で、剪断強度を求めるためにモールの円を画いたが、試料 5 以外はきれいに一直線に納つたので、この程度の密度差は許容されるものと思う。図 19-2, 3 は粘着力、剪断力と弾性係数の関係をプロットしてみたもので同一土質の時は相関関係ありと考えられる。

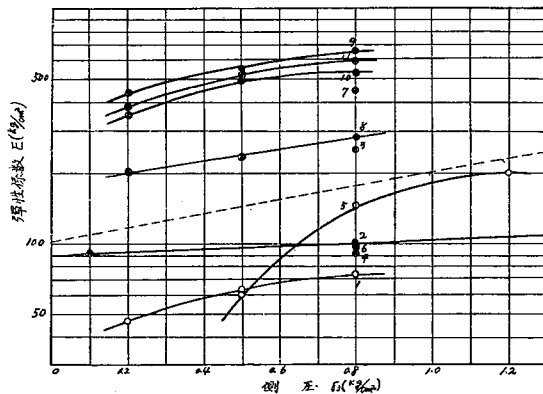


図 19-1 弾性係数  $E$  と側圧  $\sigma_3$  の関係

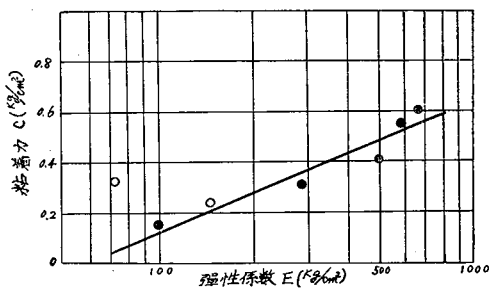


図 19-2 粘着力と弾性係数との関係

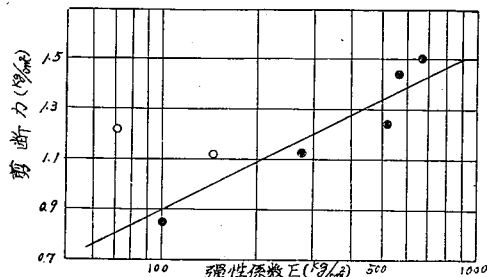


図 19-3 剪断力と弾性係数の関係 ( $\sigma = 0.8 \text{ kg/cm}^2$ )

ii) 貫入指数と弾性係数の関係について

弾性係数と貫入指数との関係式  $\frac{1}{E} = 0.0116 IP - 0.00174$  と測定例を図上にプロットした結果、図 19-4 のよになつた。測定例が少ないため現場載荷試験結果との比較には上式を用いた。モールド内の貫入指数は深さ 10 cm の点のものを用いたが、これは自然試料について現場貫入指数とモールド内の貫入指数とは 8~12 cm の間において大体一致した結果による。

iii) CBR 値と弾性係数との関係について

図 19-5 は三軸圧縮試験によつて求めた側圧  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  の時の弾性係数と室内 CBR 値との関係をプロットしたものである。実線は実験値による関係曲線であり破線は文献値<sup>2)</sup>によるものであるが、文献値には CBR 弾性係数ともに、いかなる条件のもとにいかにして求められたものか明記してない。

(2) 現場試験

現場支持力試験は図 19-6 に示す No. 1 から No. 8 までの 8 地点において、切込砂利上および砂上においてそれぞれ

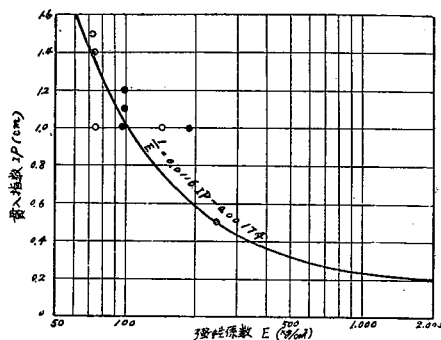


図 19-4 貫入指数  $IP$  と弾性係数の関係

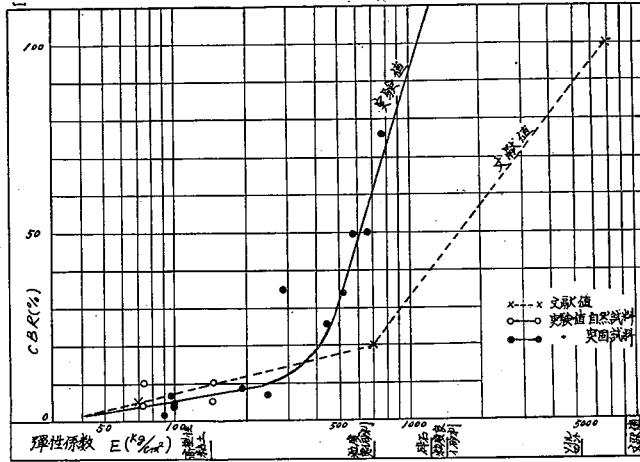


図 19-5 土の弾性係数  $E$  と CBR の関係

平板載荷試験と CBR 試験を行い、また砂層から路床を通して貫入試験を実施した。試験の順序はまず切込砂利上で  $K$  値、CBR 値を測定した後、切込砂利を  $1.5 \text{ m}^2$  の広さに取り除き、砂層上の  $K$  値、CBR 値を測定し、しかるのち貫入試験を行った。したがって貫入試験は路床の  $40 \sim 50 \text{ cm}$  程度の深さまでしかできなかつた。また路床の貫入指数は礫、貝殻の影響をうけて、過小に測定された箇所が多いと思われる。表 19-2 は載荷試験による推定弾性係数と現場貫入指数、現場 CBR 値から推定した弾性係数の比較を示し、太字の部分には砂層上、砂層自体、切込自体のおのおのにおいて載荷試験結果から推定した弾性係数と比較して、比率 2 以内の貫入指数および CBR 値から推定した弾性係数を示す。貫入試験中上部とあるのは表面から  $5 \text{ cm}$  の位置における指数および弾性係数であり、平均とあるのは便宜的にブーシネスク理論の応力の影響値を深さに対するウェイトとして出した貫入指数の平均値および弾性係数である。これは  $K$  値は地表の弾性係数の影響を多くうけ、したがって  $K$  値と貫入指数を関係づけるときは地表面付近の値をとらなければならないか、または深さにおける影響を考慮しなければならないと考えたからである。

また路床上の  $K$  値は測定できなかつたので、砂層上の  $K$  値から砂層上と路床上の貫入指数の比率により求めた。切込上の弾性係数は他に比較すべきものがなかつたので省略したが、 $E = 1.18 \alpha K$  から求めるとよい。

#### 4. あとがき

表 19-2 の結果によると 載荷試験結果から求めた弾性係数と比較して、貫入指数から推定した弾性係数は砂層上、砂層自体とも比較的合うようである。なお上部のものより平均の指数による弾性係数の方がよく合うようである。CBR 値から求めた弾性係数は、砂層自体については実験値によるものの方が合うようであり、切込砂利自体については弾性係数  $1,500 \text{ kg/cm}^2$  以上のものに対しては文献値が、以下のものに対しては実験値の方が合うように思われる。

切込砂利の実験値は弾性係数、CBR とともに  $2 \text{ cm}$  以上の砂利分を  $2 \text{ cm}$  以下のものに入れ換えたものであり、粒度のかなり悪いものを使用したため、実験値は砂および粒度の悪い砂利の CBR 値と弾性係数の関係を与えるものである。粒度のよいものについては文献値の方が正しいとするならば、弾性係数と CBR の関係を一律に同一曲線で現わすこと自体が無理であり、また塑性の高い粘土質土についても別個の曲線で関係づけなければならないものと考察される。

なお CBR 試験、貫入試験における側圧の影響も考慮されねばならない問題である。



表 19-2 載荷試験による推定弾性係数(パーミスター理論)と現場貫入指数、  
現場 CBR 値より推定した弾性係数の比較

測 点 No.			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	備 考	
路	貫入試験	IP	上部平均	0.8 0.70	0.2 0.27	0.2 0.24	0.4 0.36	0.2 0.22	0.3 0.32	0.25 0.26	0.6 0.84	
		E	上部平均	130 157	1750 650	1750 900	340 400	1750 1100	570 480	750 700	190 125	
床	砂上Kと平均IP相対値	K 値 E		13.3 226	21.7 384	37.4 659	22.6 400	14.3 253	17.8 315	19.2 340	13.6 241	砂上 K, 平均 IP 路床平均 IP 上記 K, 式(3)
					14.5 257	15.0 266	27.2 482	27.2 482	13.1 232	19.0 336	(19.2) (340)	18.5 328
置	層	貫入試験	IP	上部平均	0.6 0.67	0.5 0.39	0.5 0.33	0.2 0.30	0.3 0.24	0.3 0.30	0.3 0.62	
			E	上部平均	190 175	247 290	247 320	1730 350	570 400	570 350	値は路床 砂層なし 上のものを示す	570 190
換	砂	載荷試験	K 値 E	14.5 330	15.0 202*	27.2 390*	27.2 680	13.1 230*	19.0 410	上のものを示す		18.5 530
			貫入試験	IP	上部平均	0.6 0.64	0.5 0.44	0.5 0.38	0.2 0.26		0.3 0.30	0.3 0.34
砂	層	貫入試験	E	上部平均	190 240	247 280	247 360	1730 700	570 540	570 440	280 295	
			CBR 試験	CBR E (文献値) E (実験値)	50.8 1700 620	46.6 1500 600	48.5 1550 610	26.2 840 480	54.2 1850 660	33.5 1030 510	64.2 2500 710	920 490
置換切込砂利	切込自体	載荷試験	K 値 E	33.0 1,980	24.2 960	23.0 530	31.4 660	60.8 10,400	48.3 3,860	37.6 1,430	29.3 920	切込上 K 上記 K, 式(2)(4)
			CBR 試験	CBR E (文献値) E (実験値)	57.1 2,050 680	200 — —	90 5,200 1,000	144 24,000 1,800	115 10,500 1,300	100 7,000 1,100	87.1 4,800 960	137.1 21,000 1,700
置換厚 (cm)	切込砂利	砂		20 21	18 18	18 17	20 17	20 8	20 13	24 0	22 17	

(注) IP: 貫入指数 cm E: 弾性係数 kg/cm<sup>2</sup> K: 30 cm 載荷板による支持力係数 kg/cm<sup>2</sup>  
\* 印の箇所は沈下係数として星替の解によるものを用いた。(E<sub>1</sub><E<sub>2</sub>)

文 献

- 1) 北方常治: 炭がら抱束圧縮試験結果について; 土と基礎. No. 19.  
小野・星野・加藤・三木共訳: テルツアギ・ベック土質工学基礎編; p. 96.
- 2) 竹下春見: CBR と他の力学試験との相互関係; 土と基礎. No. 11.