

## 統計解析処理による地山しらすの判別分類

(Identification and Classification of the Original Ground Shirasu  
by Means of Statistical Analysis)山 内 豊 聡\* (Toyotoshi Yamanouchi)  
後 藤 恵 之 輔\*\* (Keinosuke Gotoh)  
新 開 節 治\*\*\* (Setsuji Shinkai)キーワード：基準／切取り斜面／現地調査／しらす  
／設計／測定／土の分類／統計的解析／特殊土  
(IGC : C7/D1/E6)

## 1. ま え が き

しらすは第四紀の火山噴出物で、成因上は軽石流の非  
ないし弱溶結部およびその二次堆積物であり、自然の乱  
さない状態では緩い岩相を呈しているが、乱したものは  
砂質の粒状体である。自然状態のいわゆる地山しらすの  
工学的性質は、決して均一なものではなく、溶結の程度や  
物理的・化学的性質によって、また場所や深さによって  
かなり相違し、しらす地帯における各種工事の設計を難  
しくしている。したがって、しらすの切土工の斜面勾  
配、斜面保護工および排水工等の設計においては、この  
地山しらすの工学的性質の相違が考慮されねばならず、  
工学的な立場から地山しらすの判別分類法を確立するこ  
とが肝要である。

しらすの切土工設計のためのしらすの判別分類法につ  
いては、これまでも建設省九州地方建設局<sup>1)</sup>、農林水  
産省九州農政局<sup>2)</sup>、日本国有鉄道<sup>3)</sup>、日本道路公団福岡建  
設局<sup>4)</sup> および鹿児島県<sup>5)</sup> でそれぞれその試案などが示さ  
れ、各機関ごとに実用に供されてきた。しかし、これら  
の分類には、分類の指標としてしらすの硬度のみを用い  
るか、あるいは露頭観察やボーリングの結果も加えるな  
ど不統一な点が多いため、分類の目的を明確にしたうえ  
で、統一的な分類法を確立することが希求されていた。

このような経緯を踏まえて、昭和 51 年 11 月から土  
質工学会内にしらす基準化委員会が設置され、真しな討  
議が重ねられた。その結果、しらす地帯では、地山しら  
すの切土斜面設計をいかにすべきかが、跡を絶たない地  
山斜面災害を防止するうえで現実に緊急問題であり、そ

の基準化には地山しらすの判別分類法が確立されねばな  
らないとの結論<sup>6)</sup>に達し、土質工学会基準「硬さによる  
地山しらすの判別分類法」<sup>7)</sup>が作成された。この基準は、  
しらす切土工の設計施工指針の決定に寄与することを目  
的として、工学的立場からしらすの判別分類を行うため  
に制定されたものである。

分類の指標として従来の判別分類法に共通しているの  
は、現場において簡易に測定できる土壤硬度計による地  
山しらすの指標硬度である。「硬さによる地山しらすの  
判別分類法」(以下単に基準と呼ぶ)においても、この指  
標硬度を採用することになり、84か所の調査資料につ  
いて統計解析を行った結果、地山しらすの硬度を 5 グル  
ープに分けることができたので、それぞれのグループに各  
機関で従来から使われてきた極軟質しらす、軟質しら  
す、中硬質しらす、硬質しらすおよび溶結凝灰岩の名称  
を与えて、地山しらすの判別分類を行っている。本論  
は、この判別分類基準の背景となる、主成分分析を主と  
する統計解析の結果を述べるとともに、指標硬度の信頼  
限界を求めて、本基準と従来の各機関における判別分類  
法との関係について言及するものである。

## 2. 土壤硬度計と指標硬度の定義

材料の硬度は、それが大きければ貫入抵抗や切削抵  
抗、弾性係数などが高い<sup>8)</sup>というように、その材料の力  
学的性質をよく表すが、特に材料が土の場合には、硬度  
はこのような力学的性質のみならず、地盤の生来の状態  
を表現する物理的性質とも大きくかかわっている。すな  
わち、しらすの硬度は、固結力、粒度、密度、間隙比、  
堆積状態、方向性、風化状態および含水比などの物理的  
性質が相互に関連し合った結果として測定<sup>9)</sup>されるもの  
で、このことが、しらすを硬度により判別分類できるこ  
との、そもそのゆえんである。

この硬度の測定法としては、現地調査の用を考えれば  
高度の技術を必要とせず、簡便でしかも客観的に行える  
方法が望ましい<sup>10)</sup>。現時点では、これらの条件を満足す  
るものとして山中<sup>11)</sup>による土壤硬度計があり、従来、し

\* 九州大学工学部水工土木学科 教授 (福岡市東区箱崎 6-10-1)

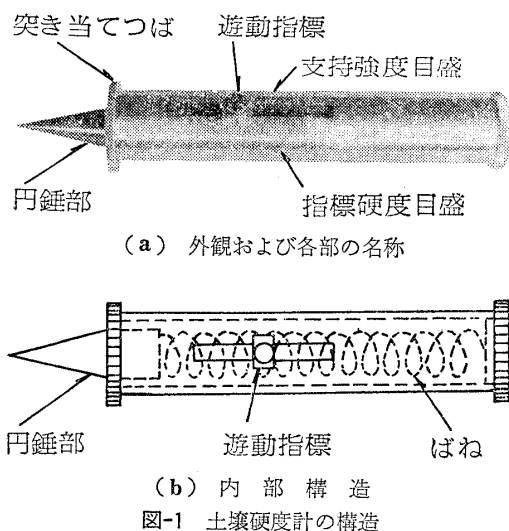
\*\* 九州大学工学部水工土木学科 助教授 (福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*\* 元建設機械化研究所 次長

(1980.10.2 原稿受付・討議期限 1983.1.1)

らすの現地調査において各方面で使用されてきている。したがって、基準においても、硬度の測定法としてこの土壤硬度計を採用することとなった。

山中<sup>12)</sup>によれば、土壤硬度は粒子の結合力に抗して土壤内部により硬度の大きい材料をめり込ませるに要する力と定義されている。基準では、8 kgf (78.45 N) の荷重に対して 40 mm 縮小するばねを用いた土壤硬度計によって測定した値を、しらすの硬度としている。この土壤硬度計は一般に山中式土壤硬度計と呼ばれており、図-1 に示すような構造をもち、高さ 40 mm、底面直径 18 mm、頂角 12°40' の円錐体の一部を土中に圧入させるに要する抵抗を、ばねの縮小長さによって読みとるものである。この縮小長さを mm 単位で表して指標硬度といい、ばねの縮みのみに従って移動する遊動指標により指標硬度目盛上に指示される。



なお、図-1 (a) に見られるように、土壤硬度計には支持強度目盛も付されているが、これは円錐部のうち土中に圧入された部分の底面における単位面積当たりの抵抗値を読みとるためのもので、判別分類には用いない。

### 3. 統計解析の手法および調査地点

地山しらすを判別分類するには、分類の指標となる硬度の境界値すなわち境界硬度を決定しなければならない。その決定のためのフローチャートを図-2 に示す。まず、現地における調査資料に基づいて主成分分析を行い、その結果から硬度の群別分類を行う。次に、各群に属する硬度の度数分布が正規分布となるかを  $\chi^2$  検定により調べ、正規分布であれば、 $F$  検定および  $t$  検定を行って群別分類の有意性を確かめる。有意性が確認されれば、最後に、群別分類された各群の（平均硬度±標準偏差）によって境界硬度を決定する。硬度の度数分布の正規性あるいは群別分類の有意性が確認されない場合に

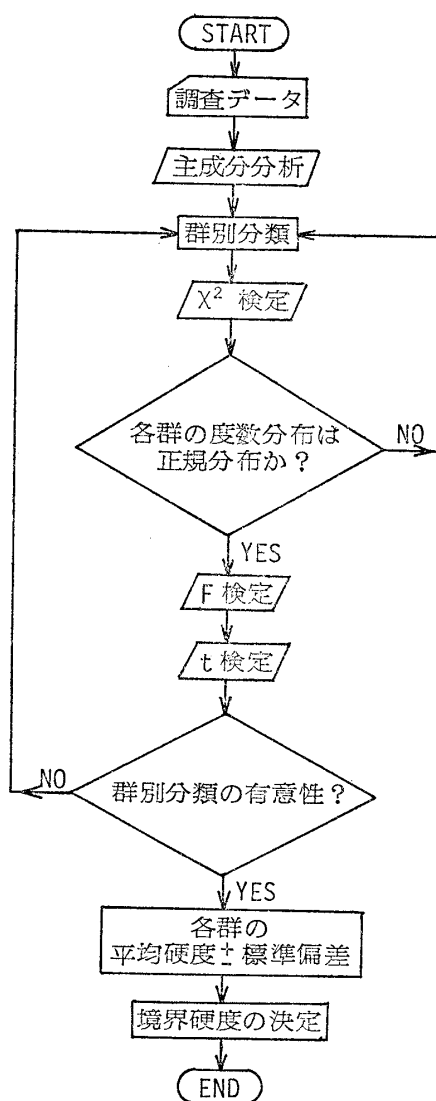


図-2 統計解析のフローチャート

は、主成分分析の結果に戻って再度群別分類をやり直し、正規性あるいは有意性が確認されるまで以上の操作を繰り返す。

本論と同様にしらすの判別分類を統計解析により試みたものに、春山<sup>9)</sup>の研究があるが、地山しらすを風化しらす、普通しらす、硬しらすというように現地の観察によって判別しておき、以後各しらすについて統計処理を行って、境界硬度を求めている。これに対して、本論では、何らの現地観察も混じえず、すなわち春山のように最初からしらすを判別しておくことはしないで、現地で得られた調査データに対し数的処理を施すのみで、境界硬度を決定していることを強調しておく。

解析に用いた調査資料は、建設省九州地方建設局九州技術事務所<sup>13)</sup>が昭和 51 年と 52 年の両年度にわたり、しらす地帯において行った 84 か所の調査結果である。調査地点を示せば図-3 のとおりで、調査は鹿児島、宮崎両県内の高速道路、一般国道および主要地方道の切土

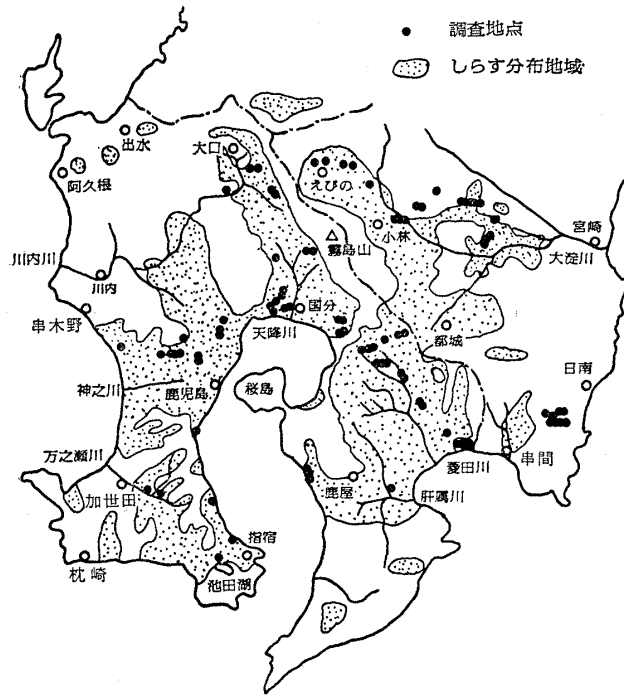


図-3 調査地点の分布

斜面を対象としており、調査地点1か所につき3点を選んで各試験結果を得ている。

#### 4. 統計解析の結果

上記の調査資料から、自然含水比( $w$ ):  $x_1$ 、土粒子比重( $G_s$ ):  $x_2$ 、間隙比( $e$ ):  $x_3$ 、均等係数( $U_c$ ):  $x_4$  および指標硬度( $H_v$ ):  $x_5$  の5変量を選び、主成分分析を行う。ここで、これら5変量を用いたのは、次の理由による。すなわち、(1) 前述のように、しらすの硬度は粒度、密度、間隙比、含水比その他の物理的性質が相互に関連し合った結果としての測定値であることから、後二者の物理量に直接その値を採用し、前二者についてはそれぞれ均等係数、土粒子比重を代表させたこと、および(2) しらすの硬度の影響因子が粒度、密度、間隙比、含水比だけでなく、これらの物理量のみでしらすの硬度を表すことができなくて、固結力、堆積状態、方向性、

表-1 固有値および累積寄与率

| 主成分   | $z_1^*$ | $z_2^*$ | $z_3^*$ | $z_4^*$ | $z_5^*$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 固有値   | 2.372   | 0.876   | 0.751   | 0.621   | 0.379   |
| 累積寄与率 | 0.47    | 0.65    | 0.80    | 0.92    | 1.00    |

表-2 固有ベクトルおよび因子負荷量

| 主成分<br>規準変量 | $z_1^*$ |        | $z_2^*$ |        | $z_3^*$ |        |
|-------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|             | 固有ベクトル  | 因子負荷量  | 固有ベクトル  | 因子負荷量  | 固有ベクトル  | 因子負荷量  |
| $z_1^*$     | 0.504   | 0.776  | -0.137  | -0.128 | 0.001   | 0.009  |
| $z_2^*$     | 0.482   | 0.746  | -0.023  | -0.022 | 0.647   | 0.561  |
| $z_3^*$     | 0.416   | 0.641  | -0.596  | -0.558 | -0.008  | -0.007 |
| $z_4^*$     | 0.372   | 0.573  | 0.787   | 0.737  | 0.087   | 0.075  |
| $z_5^*$     | -0.450  | -0.693 | -0.077  | -0.072 | 0.757   | 0.656  |

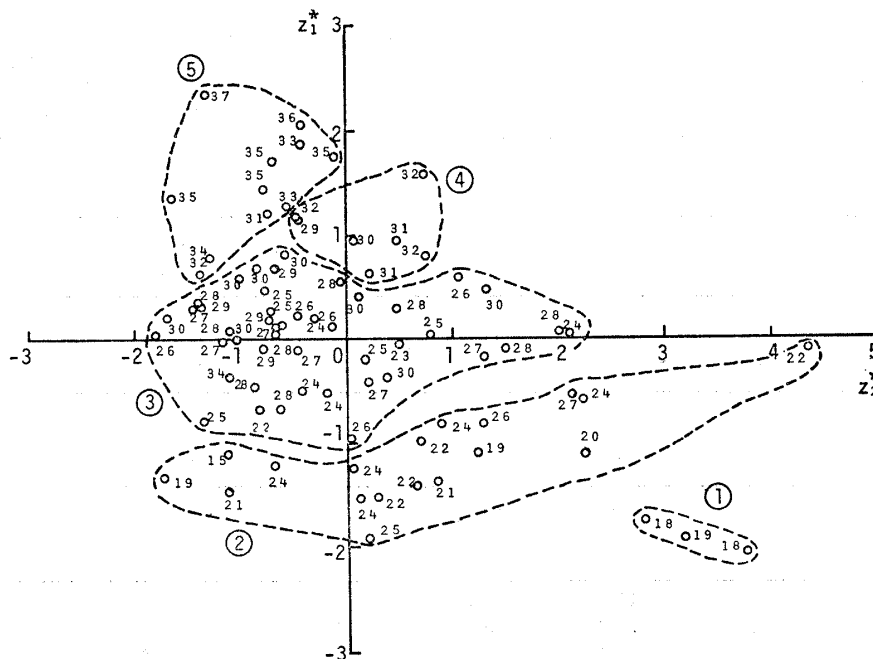


図-4 主成分分析による群別分類

風化状態なども考慮せねばならないため、指標硬度そのものを変量として採用したことによる。

上記5変量を用いて主成分分析を行う場合、変量間に単位の相違があるため、各変量をそれぞれ平均0、分散1となるように規準化して、その影響を除いておく必要がある。

計算の結果、固有値とその累積寄与率は表-1、累積寄与率が0.80までの主成分に対応する固有ベクトルと因子負荷量は表-2のとおりである。一般に、累積寄与率が80%程度を目安として主成分の個数を決めるが<sup>14)</sup>、ここでは以後の処理(硬度の分布を2次元平面上で見る)を考えて、第2主成分までを採用する。第1、第2主成分は表-2の固有ベクトル値を用いて、それぞれ次のように表される。

$$z_1^* = 0.504x_1^* + 0.482x_2^* + 0.416x_3^* + 0.372x_4^* - 0.450x_5^* \quad (1)$$

$$z_2^* = -0.137x_1^* - 0.023x_2^* - 0.596x_3^* + 0.787x_4^* - 0.077x_5^* \quad (2)$$

規準化された測定値  $x_i^*$  ( $i=1\sim5$ ) を上式に代入して、 $z_1^*$ 、 $z_2^*$  の値を求め、 $z_1^*$ 、 $z_2^*$  を両軸とする座標平面上にこれらの値の組をプロットすれば、図-4 のようになる。図中、各点に付した数値は指標硬度 (mm) を意味し、この値が同程度の大きさとなる群ごとに各点を5群にまとめれば、破線で示すような①～⑤に分けることができる。ここで5群に分けたのは、従来、しらすが極軟

質、軟質、中硬質、硬質の各しらすおよび溶結凝灰岩の5種に分類されていたことに依拠している。また、第③群と第④群は1つの群にまとめられそうであるが、上記の5群に分けることを考慮して2つの群に分離し、それぞれの群で硬度が同程度の大きさとなるようにまとめている。

各群に属する指標硬度の度数分布が正規分布であるか否かをみるために、表-3に示す測定値の平均値および標準偏差を基として理論的度数分布を求め、 $\chi^2$  検定を行った。図-5は硬度の測定値の度数分布および $\chi^2$  検定の結果で、これより明かなように、第②群は5%の有意水準で、第③群と第⑤群は10%の有意水準でそれぞれ正規分布とみなすことができる。ここでは、第①群と第④群については、資料数が少ないために $\chi^2$  検定を行っていないが、第②、③、⑤群の結果から、いずれの群の度数分布も正規分布の理論的度数分布と大体よい一致を示すと考えてよいであろう。

この結果に基づいて、各群相互の $F$  検定と $t$  検定を行って、群別分類の有意性を調べた。検定の結果は表-4のとおりで、群別分類の有意性が認められ、各群はそれぞれ別個の性質をもつしらすであると判定される。

そこで、これら5種類に分類されたしらすを指標硬度で判別するために、各群の(平均硬度 $\pm$ 標準偏差)をとれば、第①群は17.8~18.8、第②群は19.5~25.1、第③群は25.0~29.6、第④群は29.9~32.1、およ

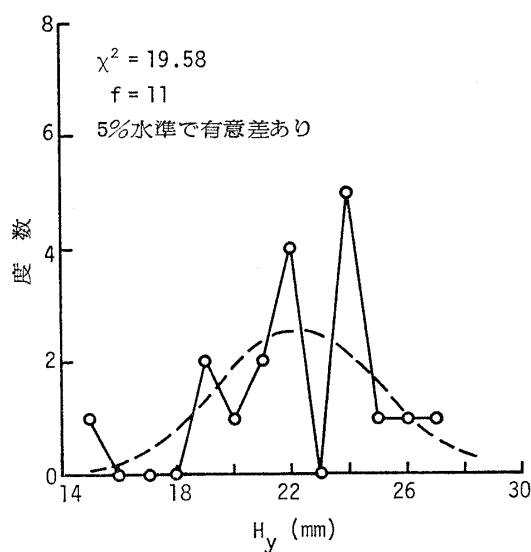
表-3 各群に属する指標硬度の統計値

| 群 | 資料数 | 平均硬度<br>$H_y$<br>(mm) | 平均値との差の<br>平方和 | 分散<br>$\sigma^2$ | 不偏分散<br>$U^2$ | 母平均の95%<br>信頼区間<br>(mm) | 測定値のばらつき<br>$H_y \pm \sigma$<br>(mm) |
|---|-----|-----------------------|----------------|------------------|---------------|-------------------------|--------------------------------------|
| ① | 3   | 18.3                  | 0.67           | 0.22             | 0.335         | 16.9~19.7               | 17.8~18.8                            |
| ② | 18  | 22.3                  | 141.62         | 7.87             | 8.33          | 20.9~23.7               | 19.5~25.1                            |
| ③ | 45  | 27.3                  | 247.65         | 5.50             | 5.63          | 26.6~28.0               | 25.0~29.6                            |
| ④ | 7   | 31.0                  | 8.00           | 1.14             | 1.33          | 29.9~32.1               | 29.9~32.1                            |
| ⑤ | 11  | 34.2                  | 31.64          | 2.88             | 3.16          | 33.0~35.4               | 32.5~35.9                            |

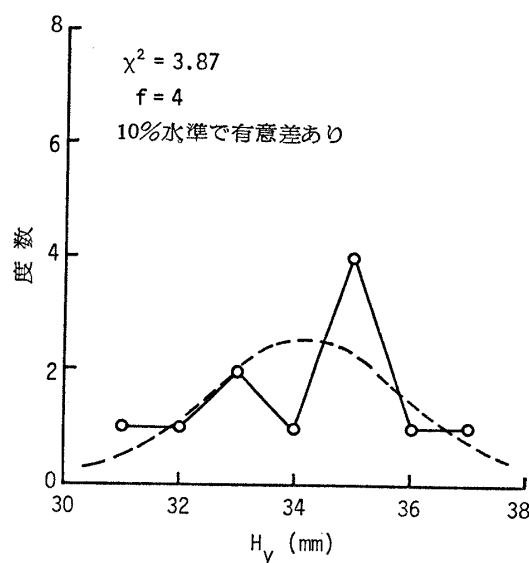
表-4 群別分類の検定

| 群 | 資料数 | 自由度 | 平均   | 平方和    | $F$ 検 定 |                     | $t$ 検 定 |        |
|---|-----|-----|------|--------|---------|---------------------|---------|--------|
|   |     |     |      |        | 不偏分散    | 分散比                 | $w^2$   | $t$    |
| ① | 3   | 2   | 18.3 | 0.67   | 0.335   |                     |         |        |
| ② | 18  | 17  | 22.3 | 141.62 | 8.33    |                     |         |        |
|   | 21  | 19  | 4.0  | 142.29 |         | 24.9*               | 7.49    | 2.34*  |
| ② | 18  | 17  | 22.3 | 141.62 | 8.33    |                     |         |        |
| ③ | 45  | 44  | 27.3 | 247.65 | 5.63    |                     |         |        |
|   | 63  | 61  | 5.0  | 389.27 |         | 1.48 <sup>non</sup> | 6.38    | 7.09** |
| ③ | 45  | 44  | 27.3 | 247.65 | 5.63    |                     |         |        |
| ④ | 7   | 6   | 31.0 | 8.00   | 1.33    |                     |         |        |
|   | 52  | 50  | 3.7  | 255.65 |         | 4.23*               | 5.11    | 4.03** |
| ④ | 7   | 6   | 31.0 | 8.00   | 1.33    |                     |         |        |
| ⑤ | 11  | 10  | 34.2 | 31.64  | 3.16    |                     |         |        |
|   | 18  | 16  | 3.2  | 39.64  |         | 2.38 <sup>non</sup> | 2.48    | 4.22** |

non: 有意差なし, \*: 5% で有意差あり, \*\*: 0.5% で有意差あり

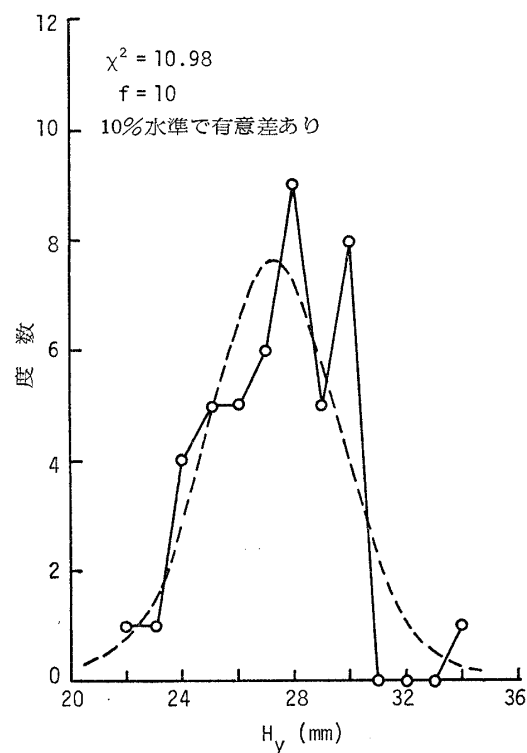


(a) 第②群



(c) 第⑤群

図-5 指標硬度の度数分布



(b) 第③群

び第⑤群は 32.5～35.9 の範囲にあり (表-3 参照), 各群の境界硬度は 19 または 20, 25, 30 および 32 または 33 と考えることができる。ここで第①, 第②群の境界硬度 19 または 20 については, 後述のように指標硬度が測定の際につきにより  $\pm 1\text{mm}$  の変動をもつことから, 20 の round number を採用した。また, 第④, 第⑤群の境界硬度 32 または 33 については, 次のように洗掘抵抗試験の結果<sup>13)</sup>を援用することができる。

すなわち, 洗掘抵抗試験は建設機械化研究所が開発した洗掘抵抗機<sup>15)</sup>により行い, 試験面にノズルからの圧力水を 10 秒間噴射し, その洗掘深さを測定するものであ

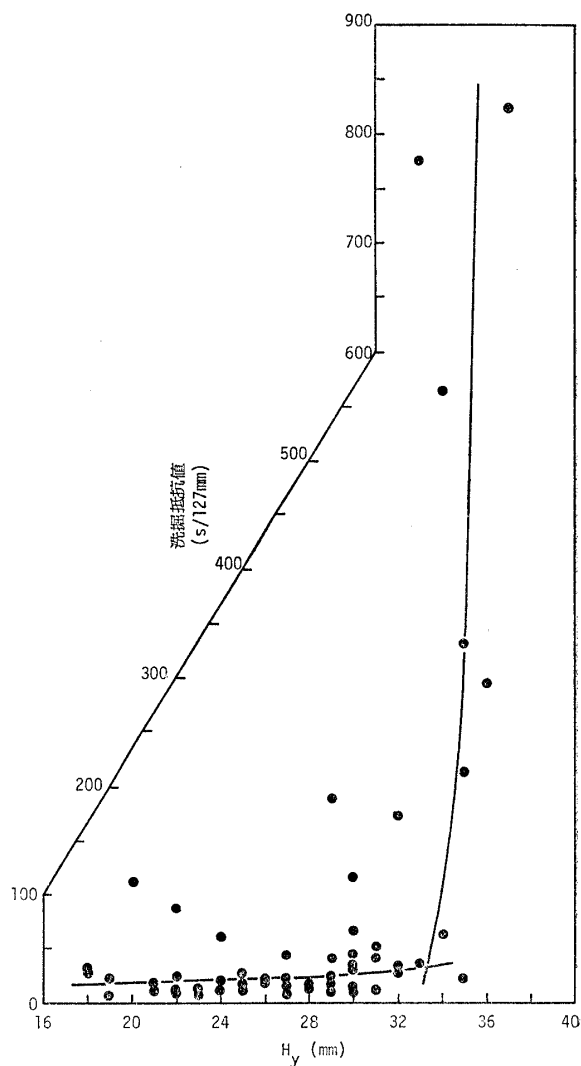


図-6 指標硬度と洗掘抵抗値の関係

る。結果は洗掘抵抗値として次式で表される。

洗掘抵抗値 ( $s/127\text{mm}$ )

$$= \frac{127(\text{mm})}{10\text{秒間に洗掘された深さ}(\text{mm})} \times 10(s) \quad (3)$$

これによって得られた洗掘抵抗値と指標硬度の関係を図-6に示す。この図から明らかなように、洗掘抵抗値は指標硬度が33mm付近から急増し、この指標硬度の値を境として、地山しらすの性質が著しく変化していることがわかる。したがって、この洗掘抵抗試験の結果から、第④、第⑤群の境界硬度を33に設定した。

以上により、しらすは指標硬度20mm以下、20~25mm、25~30mm、30~33mm、33mm以上の5群に分けられ、それぞれに従来から使われてきた極軟質しらす、軟質しらす、中硬質しらす、硬質しらすおよび溶結凝灰岩の名称を対応させれば、表-5に示す地山しらすの判別分類表<sup>7)</sup>が得られることとなる。

表-5 硬さによる地山しらすの判別分類

| 分 類      | し ら す     |         |           |         | 溶 結 凝 灰 岩 |
|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
|          | 極 軟 質 しらす | 軟 質 しらす | 中 硬 質 しらす | 硬 質 しらす |           |
| 指標硬度(mm) | 20以下      | 20~25   | 25~30     | 30~33   | 33以上      |

## 5. 指標硬度の信頼限界

統計解析に用いた指標硬度のデータは、1測定地点につき3か所の試験位置を選び測定したものの平均値である。1試験位置については、10回の測定を実施し、その平均値をもってその位置での測定値としている。

3か所で測定した指標硬度の平均値( $\bar{H}_y$ )をどの程度信頼し得るか、その95%信頼区間を求めた結果は、図-7のとおりである。図中の実線はそれぞれ最小自乗

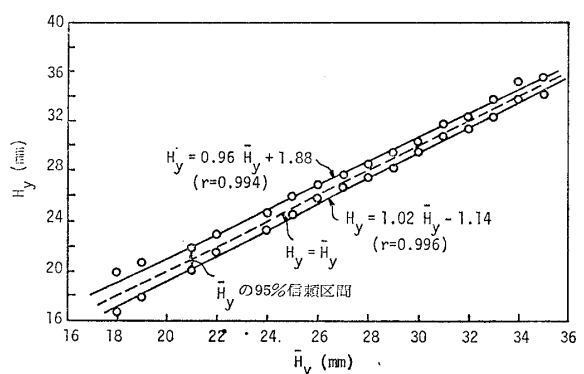


図-7 平均硬度の95%信頼区間

表-6 判別分類のための境界硬度の比較

| 境界硬度の上下界 | 基 準 | 建設省 | 農林水産省  | 鹿児島県 | 春山 |
|----------|-----|-----|--------|------|----|
| 19~21    | 20  |     | 20くらい  |      | 20 |
| 24~26    | 25  | 25  | 25前後   | 25   | 26 |
| 29~31    | 30  | 30  | 31     | 30   | 31 |
| 32~34    | 33  | 33  | 33, 34 | 34   | 35 |

法による上下界を示すが、これによれば、 $H_y$ と $\bar{H}_y$ の関係はおおよそ $H_y = \bar{H}_y \pm 1$ となる。したがって、先に求めた各しらすの境界硬度は、測定のばらつきを考慮するとき、 $\pm 1\text{mm}$ の変動をもつことになる。表-6はこの結果を踏まえて、基準<sup>7)</sup>と各機関<sup>1), 2), 5)</sup>および春山<sup>9)</sup>の境界硬度を比較したもので、従来の判別分類法にも妥当性が認められるとともに、春山による硬質しらすと溶結凝灰岩の境界硬度は少し高すぎるようである。

## 6. む す び

本文は、土質工学会基準「硬さによる地山しらすの判別分類法」における、各しらすを区分する境界硬度について、統計解析による数値決定の経緯を述べたものである。これまでの各機関による地山しらすの判別分類法においては、境界硬度は経験に基づいて定められ、理論的根拠に欠けていた。しかし、本論では、このような経験や事前の観察によらず調査データに数的処理を施すのみで、理論に裏打ちされた境界硬度の設定に成功した。

また、統計解析に用いた指標硬度の平均値について、その信頼限界を求め、基準と従来の各機関による判別分類法との間で、境界硬度の比較を行った。その結果、両者は指標硬度の測定値のばらつきの範囲内で一致し、経験に基づく従来の判別分類法にも妥当性のあることが判明した。

終わりに、貴重な調査資料を提供して頂いた建設省九州技術事務所と、統計計算の遂行に協力頂いた本学学生・中村州章君(現日本道路公団)に深甚の謝意を表する次第である。

## 記 号 説 明

- $e$  = 間隙比
- $f$  = 自由度
- $G_s$  = 土粒子比重
- $H_y$  = 指標硬度
- $\bar{H}_y$  = 指標硬度の平均値
- $r$  = 相関係数
- $U^2$  = 不偏分散
- $U_c$  = 均等係数
- $w$  = 自然含水比
- $x_i$  = 変量
- $x_i^*$  = 規格化された変量
- $z_i^*$  = 規格化された主成分
- $\sigma$  = 標準偏差

## 参 考 文 献

- 1) 建設省九州地方建設局(1976):「シラス地帯の土工に関する設計施工マニュアル」。
- 2) 猿山光男・榎倉克幹・菅原利男(1972):「南九州に分布するシラス・灰石の実用的分類について」,「第7回土質工学会発表会発表講演集」, pp. 69~72。
- 3) 日本国有鉄道(1978):「構造物設計標準(土構造物)」,土質工学会しらす基準化委員会検討資料より引用。

- 4) 日本道路公団福岡支社 (1972): 「九州縦貫自動車道鹿児島線シラス地帯土工部設計規準 (案)」.
- 5) 鹿児島県シラス対策研究会 (1976): 「シラス地帯における土工設計施工指針と運用」.
- 6) 山内豊聡 (1979): 土質工学会 基準案「地山しらすの判別分類基準」について, 「土と基礎」, Vol.27, No.8, pp.53~54.
- 7) 土質工学会 (1981): 土質工学会 基準「硬さによる地山しらすの判別分類法」, 「土と基礎」, Vol.29, No.4, pp.45~46.
- 8) 山本健太郎・飯塚幸三 (1974): 「硬さ」, コロナ社, p.10.
- 9) 春山元寿 (1975): 硬度によるシラスの工学的判別分類法, 「応用地質」, Vol.16, No.2, pp.40~47.
- 10) 土質工学会 (1981): 硬さによる地山しらすの判別分類法の解説, 「土と基礎」, Vol.29, No.4, pp.47~48.
- 11) 山中金次郎・松尾憲一 (1962): 土壌硬度に関する研究 (第1報), 「日本土壌肥科学雑誌」, Vol.33, No.7, pp.343~347.
- 12) 山中金次郎 (1965): 土壌のコンシステンシーの測定法, 連結度・圧砕度・硬度の測定法, 「土壌の物理性」, No.11・12, pp.1~8.
- 13) 建設省九州地方建設局九州技術事務所 (1977): 「シラスの分類に関する調査業務」.
- 14) 河口至商 (1973): 「多変量解析入門Ⅰ」, 森北出版, pp.44~45.
- 15) 土質工学会 (1979): 「土質試験法——第2回改訂版——」, pp.711~714.