

# 九州地方における火砕流の工学的性質と問題点

福富幹男・金光勝明  
江頭義昭・田中 弘

## Properties of Pyroclastic Flow in Kyushu

Mikio FUKUTOMI  
Katsuaki KANEMITSU  
Yoshiaki EGASHIRA  
Hiroshi TANAKA

### Abstract

This report draws on a large volume of material from surveys that have been conducted on the Aira "shirasu" and Aso calderas—two of the pyroclastic flow sources that are distributed about Kyushu—to consider certain aspects of their engineering characteristics. In particular, concerning the various kinds of "shirasu" layers of the Aso calderas, N-values at different depths and physical characteristics were statistically analyzed along with the results of various kinds of bedrock testing of Aso's pyroclastic flow deposits.

The report shows that the permeability coefficient of pyroclastic flow is easily influenced by type and direction of excavation, and that critical pressuer is often found to occur at low water head.

Finally, many examples from investigations are given to examine problems in geological engineering that would be faced in the construction of dams in pyroclastic flow regions.

### 1 まえがき

九州地方においては、硫黄島、開聞岳、桜島、霧島山および阿蘇山などの火山を南々西—北々東方向に結ぶ琉球火山帯と双子山、由布岳、久住山、金峰山および雲仙岳などの火山を北東—南西方向に結ぶ山陰火山帯などが形成されており、桜島、霧島山（新燃山）および阿蘇山などは現在でも火山活動を続けている。

千藤<sup>(1)(2)</sup> (1965)によると、九州地方の火山帯あるいは岩石区は、図—1に示すように、古琉球火山帯、琉球火山帯、山陰火山帯、瀬戸内火山帯および大陸系玄武岩類からなっており、中新世初期から中期にかけての古琉球火山帯の活動で始まり、中新世後期に瀬戸内火山帯、鮮新世後期に大陸系火山活動と考えられる玄武岩類が活動した。第四紀に入り更新世初期から中期にかけて古琉球火

山帯や瀬戸内火山帯が再び活動し、更新世中期から後期にかけては大陸系の玄武岩類や山陰火山帯の活動と琉球火山帯の激しい活動があったという。

これら中新世以降の噴火活動がもたらした火山岩、火山砕屑岩および火山砕屑物などの噴出物は表層部に広く分布しており、その二次堆積物の分布を含めると、九州本土の面積のおおよそ半分にも達する。火山噴出物は九州本土においては地形学、地質学および土質工学などの研究テーマの対象として従来からよく取り扱われており、また土木、建築、水資源および材料などの人間生活に関連した工学分野とは火山噴出物の存在を避けて通れないほど関係が深い。九州の火山噴出物の中で、とくに分布地域が広く、かつ従来から土木地質的に特殊な扱いを受けている代表的地層が始良カルデラおよび阿蘇カルデラの火砕流堆積物である。

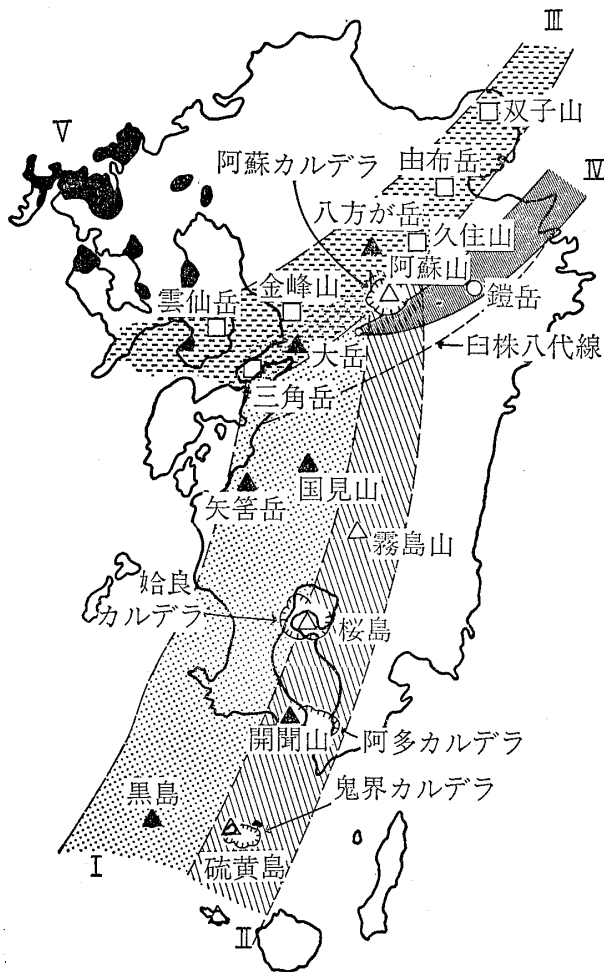


図-1 九州における火山帯 (千藤; 1965)  
Fig. 1 Volcanic zone in Kyusyu

当社が、1967年福岡事務所開設以来実施してきた各種の地質調査もとくにこれら始良カルデラおよび阿蘇カルデラの火砕流堆積物を対象としたものが計163件に及びかなりの比率を占めるに至ったので、筆者らはこれらの火砕流堆積物に関する数多くの調査資料を基にして、工学的性質や問題点などについて取りまとめを行なった。今後の火砕流堆積物に対する土木工学発展の一助となれば幸いと考へ、ここにその成果の一部を紹介し、大方の御批判を仰ぎたい。

なお、本文の取りまとめに際しては、諸発注機関の調査資料を使用させていただいたので、この紙上を借りて深く御礼を申し上げる次第である。

## 2 対象とした火砕流堆積物

九州地方に分布する火山噴出物は、地質時代、噴出源、成因、構成岩相および分布地域などの点からそれぞれ数多くの層に分類されており、互いに複雑に重なり合

っている。これらすべての火山噴出物を対象にして取り扱うことはきわめて困難である。したがって本文では、分布が広域で、社会的要求度が高く土木地質的に難問を投げかけられる頻度が多いこと、既往の研究対象としてより数多く取り扱われ、分布や分類などが比較的明確になされつつあること、および統合整理するという手段として各種調査や試験データが多いことなどの点を考慮して、始良カルデラ源の火砕流堆積物（軽石流、いわゆるシラスの一部）と阿蘇カルデラ源の火砕流堆積物に限定して取り扱うことにした。

したがって、本文では始良カルデラおよび阿蘇カルデラ以外の阿多カルデラや九重火山等の火砕流堆積物をはじめ、新期の火山砕屑物などは除外した。なお、始良カルデラ源の火砕流堆積物の場合、比較上、その二次的堆積層をも区分して対象とすることにした。なお、これらの火砕流堆積物の分布は図-2に示す。

## 3 文献による地質層序と分類

### 3-1 シラス

まずシラスという語源について述べる。太田(1964)<sup>(3)</sup>、波多江(1967)<sup>(4)</sup>らによると、シラスは火砕流堆積物のほか、時には凝灰岩、珪藻土質堆積岩、浜砂および河砂などをも対象にして古くから南九州方面で用いられてきた俗語であり、“白砂”または“白洲”から由来したといわれており、学術用語としても定義が明らかにされないまま各人各様の取り扱い方をし、慣行的には、シラスとは白色砂状の火山噴出物という概念で用いられてきたようである。しかるに、太田(1964)<sup>(3)</sup>は、「シラスとは地質時代、成因、噴出源などに関係なく単に白色砂質堆積物を指す地方的な俗語であって、その岩相が白色かつ砂質でありさえすれば良い」とシラスを定義づけ、学術的にはシラスという俗語を用いない方が良いと提案し、二次シラスについても「二次シラスとはシラスと呼ばれているものから二次的に生じたような印象を与える堆積物を指す地方的な俗語であって、その岩相が上記の印象を与えさえすればよく、従って通常明らかな層理を示す」と定義し、併せて表-1に示すようなシラス層序を試案として提唱した。

シラスに関する地質学的な研究は、古くはKOTO, B.<sup>(5)</sup>(1916)の海底火山噴出説にはじまり、山口(1938)<sup>(6)</sup>により、鹿児島湾北部地域について、灰石層、灰砂層として区分され、1943年にはMATUMOTO, T.<sup>(7)</sup>により始良カルデラおよび阿多カルデラの存在が提唱され、TANEDA, S.ら(1957)<sup>(8)</sup>はシラスの生成機構を熱雲式噴出と考えるにいたった。

また、沢村<sup>(9)</sup>、湊・勝井<sup>(10)</sup>などによって始良火山を噴出源とした軽石流もしくは熔結凝灰岩（シラス）<sup>(3)</sup>、および二次シラスの名称が用いられており、太田<sup>(3)</sup>以降では、荒牧・宇井<sup>(11)</sup>、種子田・入佐<sup>(12)</sup>、大木・早坂<sup>(13)</sup>および小林・岩松・露木<sup>(14)</sup>などの研究においても阿多カルデラおよび始良カルデラの火砕流堆積物を他の噴出源のものと分層し、おもに軽石流と降下軽石とに層序区分している。

さらに、太田<sup>(3)</sup>以降では、地質学者の間ではシ

ラスを学術的な層序区分とは区別し、俗語的な取り扱いが一般に行なわれている。俗語的な扱いの場合でも各火山噴出源の火砕流のうち、軽石流（非熔結部）、降下軽石およびこれらの二次堆積層を対象にしてシラスという用語を適用しているようである。

一方、工学的分野、とくに土質工学の分野では、土木建築物などの基礎地盤として、あるいは防災対策上、もしくは農業土木などの必要性もあって、シラスについては“特殊土”としての取り扱いをし、シラスの性質、土

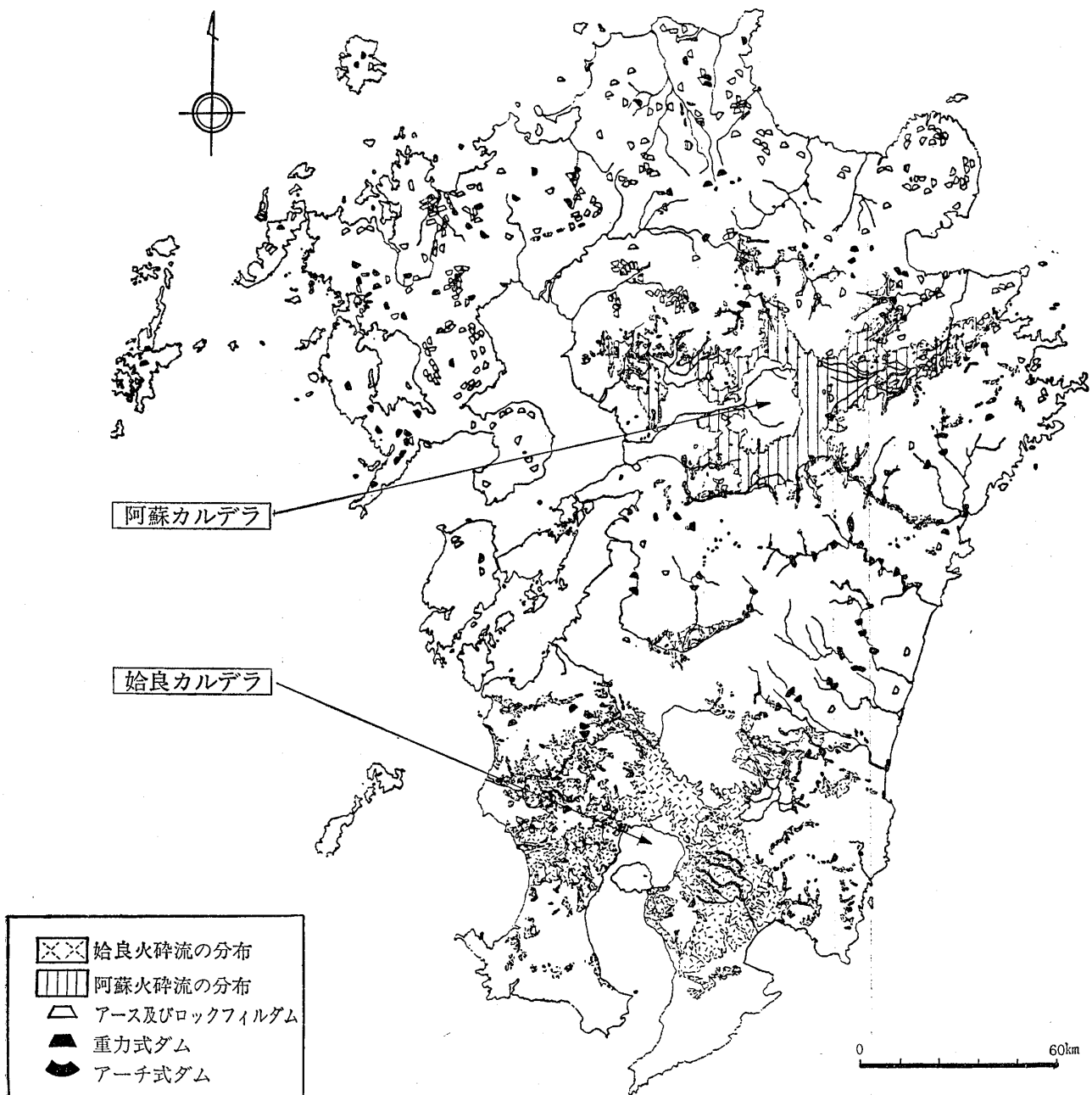


図-2 始良火砕流堆積物および阿蘇火砕流堆積物の分布

Fig. 2 Distribution of Aso volcano pyroclastic flow and Aso volcano pyroclastic flow

粒子の構造、物理的性質、静的強度特性、動的強度特性（液状化を含む）、斜面安定問題、材料としての性質および土質力学的扱い方などについての研究、室内外での実験などが従来から熱心に行なわれてきており、その成果の数は莫大なものがある。

しかし、これらの研究分野でも現場施工者においても、従来は、地質学分野の場合と同様に、シラスに対してはそれぞれの立場や目的により各人各様の取り扱い方をし、シラスの判別・分類定義についても広義、狭義を含め統一したものがなく、はなはだ混乱をきたしている状態にあったように考えられる。しかるに、シラスの扱われ方についていくつかの例を挙げると、室内外での土

質試験や現場測定等においては、当然のことながら他の通常の土の場合と同様に、“乱さないシラス”と“乱したシラス”<sup>(15)</sup>とに区分することが行なわれ、土質工学会（1969）では、「シラスの物理性質の試験方法」を提案し、現在広く利用されている。また、土質試験や原位置でのシラスの状態を検討する際には、“飽和シラス”および“不飽和シラス”<sup>(16)</sup>という呼び方が広く行なわれている。また、山内(1974)は、えびの地震で発生した噴砂などの例からシラス地盤での液状化の研究を進める過程で、“きれいなシラス”および“きたないシラス”とに区分して扱っている。また、“一次シラス”を“ふつうシラス”、その風化層について、“風化シラス”とするもののほか、堆積条件

表一1 シラス地域層序（太田：1963）  
Table-1 Geological succession of “Shirasu” area  
(OHTA : 1963)

地質時代	南九州	対 比	
現 世	桜島火山降下軽石層(ボラ)	燃島貝層	
	黒色火山灰層 {クロボク クロニガ}	*燃島シラス層	
更 新 世	新期ローム層 {上部ローム層 中部ローム層 下部ローム層}	(立川ローム) (武蔵野ローム)	
	*二次堆積軽石層	*入戸軽石流	
	*始良火山大隅軽石流		
	*大隅降下軽石層		
	*阿多火山池田軽石流		
	*池田降下軽石層		
	旧期ローム層	(下末吉ローム)	
	阿多火山中央円頂丘		
	第3間氷期	垂水砂礫層	
	第3氷期	(両カルデラ中間部の陥落) (始良・阿多両カルデラの形成)	(始良層, *磯層 琉球人松貝層 *城山貝層)
	*始良火山軽石流(旧期)		
	*阿多火山軽石流(旧期)		
	阿多火山降下軽石層	(多摩ローム)	
	ローム層		
第2間氷期	大根占砂礫層		
第2氷期	*竜ガ水層		
第1間氷期	安山岩層	花倉層 河頭貝層 吉田貝層	
	*国分層群上部層		
第1氷期	*国分層群 {中部層 下部層}	吉田植物化石層	
鮮新世	*隼人軽石流	萩の元軽石流	
新第三紀	中新~鮮新世		
	*第三系(加治木付近)		
	第三紀安山岩		

\* シラスと呼ばれたことのある堆積物

から、“二次シラス”について、“成層シラス”もしくは“水成シラス”，あるいは，地質時代もしくは地形を考慮したものと考えられる“沖積シラス”および“洪積シラス”という呼び方をしているもの，弱熔結のシラスについて，“固結シラス”もしくは“かたシラス”と呼んでいるものもある。

しかるに，1971年から1975年にかけて，シラスを工学的に分類もしくは判別する試みが各方面で数多くなされてきた。露木(1972)<sup>(17)</sup>は，シラスの判別のための露頭における観察項目(山中式土壤硬度計を用いた場合の硬さによる分類，ピックの貫入量による分類，熔結度を含む)をあげ，それぞれの項目毎に分類を行なっている。

猿山・靱倉・菅原(1972)<sup>(18)</sup>は，“シラス・灰石の実用的分類”として，灰石(熔結凝灰岩と固結シラスとに細分)，シラス(シラスと風化シラス)，降下軽石および二次シラス(洪積二次シラスと沖積二次シラス)とに分け，それぞれに成因，肉眼観察，ハンマーによる感触，山中式土壤硬度計，コア状況，N値，比抵抗値，極限圧，変形係数および透水係数を組み合わせて表わしている。山内・村田(1973)<sup>(19)(20)</sup>はシラスの破壊理論の考え方から，シラスを“非弾性シラス”，“半弾性シラス”，“準弾性シラス”<sup>(21)(22)(23)</sup>および“塑性シラス”の4種に分類した。春山(1971)は，シラスの物理特性や山中式硬度計によるかたさにより，表一2に示すような工学的分類を提案した。さらに，鹿児島県シラス対策研究会(1975)<sup>(24)</sup>では，「シラス地帯における土工設計施工指針」を定めており，その中で，「シラスの分類は，山中式土壤硬度計による硬度をもって判別するものとし，現地の状況を十分把握したうえ，客観

的な総合判定を行なうものとする」などの判定基準を前提として，シラスを，“硬質シラス”，“中硬質シラス”，“軟質シラス”および“沖積シラス”などに分類し，それぞれの土質の定義を与え，この分類に基づいて法面勾配および法面保護工などの土工指針を示している。また，建設省(1974)<sup>(25)</sup>でも類似の土壤硬度計による硬度等を適応させた工学的分類を行なっている。

このように，シラスの工学的分類においては，最近では地質学的な成因もしくは岩相によって大分類を行ない，狭義のシラス(一般にカルデラから噴出した軽石流，降下軽石が主体となっており，“沖積シラス”は別途の扱いにしているものが多い。また高熔結の軽石流は多くの場合除外している)については，多くの場合，とくに山中式土壤硬度計による硬度によって判別基準を設定している。

### 3-2 阿蘇火砕流堆積物

阿蘇カルデラは，南北約25km，東西約18kmの規模をもつといわれており，始良カルデラの東西約23km，南北約17kmとほぼ同程度の大きさをもつものである。

阿蘇カルデラの形成については，古く伊木(1901)<sup>(26)</sup>によって論ぜられ，MATUMOTO, T. (1943)<sup>(6)</sup>は，長年の研究に基づき，いわゆる“Aso lava”の分布とその岩石学的研究を発表して阿蘇火山の構造を明らかにした。また，MATUMOTO, H. (1963)<sup>(27)</sup>は阿蘇火山の火山岩石類全般の研究をし，さらに，これまで阿蘇火山の火砕流が3回とされていたのに対し，4回の活動を唱えるにいたった。小野(1965)<sup>(28)</sup>はカルデラ東部の研究により火砕流を3回とし，そのうちの“Aso-Ⅲ火砕流”を岩石記載の性

表一2 シラスの工学的分類(春山:1971)

Table-2 Engineering division of “Shirasu” (HARUYAMA:1971)

分 類	判 別 の 方 法
A. 自然地盤のシラス	
A-a 風化シラス	指標硬度 26mm以下
A-a-1 軽石流の非溶結部	
A-a-2 二次タイ積層	
A-a-3 降下軽石	
A-b ふつうシラス	指標硬度 26~31mm
A-b-1 軽石流の非溶結部	
A-b-2 二次タイ積層	
A-c 固結シラス(弱溶結のシラス)	指標硬度 31mm以上
A-d シラス様タイ積物(凝灰質砂層・砂レキ層)	
A-d-1 細粒シラス	粒径0.42mm以下の部分が90%以上を占める。
A-d-2 粗粒シラス	粒径0.074~2.0mmの砂分を70%以上含み，レキ分までも含む。
A-e 降下軽石	均等な軽石レキのみからなる。
B. 乱された地盤のシラス	シラス本来の構造・組織が乱されていること。
崩壊地，溪床タイ積物，土地造成地，築堤・盛土	

質の相異によりさらに“ⅢA”と“ⅢB”とに区分したが、<sup>(29)</sup>1960年には、火砕流を4回に修正し、“Aso-1”，“Aso-2”，“Aso-3”および“Aso-4”に分類し全域的に適用できるものとした。<sup>(30)</sup>渡辺・小野（1969）による層序表を表一3に示す。

阿蘇火砕流堆積物には、地域もしくは阿蘇カルデラとの位置関係および火砕流活動直前の旧地形（不整合面）の形状によって異なるが、表一3の渡辺らの層序（カルデラ西部，白川中流域）および表一4の齊藤（1978）<sup>(31)</sup>の熊本市および花房台地付近における層序の例でもわかるように、各火砕流堆積物の間に、それぞれ熔岩流もしくは堆積岩類が挟在し、この存在が土木地質的にも水理地質的にも重要な意味をもつことになる。

阿蘇火砕流堆積物の岩石学的な判別分類の方法は、その代表的な例として、渡辺・小野（1969）<sup>(30)</sup>の識別表を表一5にあげておく。

阿蘇火砕流堆積物に属する一部に対して、郷原ら（1964）<sup>(32)</sup>が八女粘土層と命名したものがある。八女粘土層については現在でも分布、岩相および成因において必ずしも明確でない点もあるが、福岡県八女市付近の段丘（標高25m～35m，比高10m）の上部に分布する粘土化した粗粒の浮石層が代表的なものとみてよいようであり、中～北部九州では広く第四系の鍵層として扱われている。この八女粘土層の成分は、<sup>(32)</sup>前述の文献によると、角閃石と両

輝石を多く含み、粘土鉱物はおもにハロイサイトからなりその一部は加水ハロイサイト化をうけているという。

この八女粘土層は新期の阿蘇火砕流堆積物の末端相であると考えられており、一般には4回目の火砕流堆積物（小野その他のAso-4）に位置づけられている。

熊本県植木地方を中心にして、鋭敏比が高く、土工上種々困難を伴うハロイサイトを主とする火山性粘土が分布しており、これは“灰土”と俗称され、土質工学的に“特殊土”として扱われているものである。これは阿蘇火砕流堆積物の非熔結部および低熔結部の風化部のうち粘土化したものを指し、一般的には熔結度の劣る部分を伴う3回目および4回目の火砕流が素材となって生成されていることが多いようである。この灰土に対してはとくに高速道路の建設などに伴い1967年頃から土質工学的にも、土木施工上も数多くの研究が行なわれてきており、その成果の多くは、土質工学会編（1974）の「日本の特殊土」や「施工技術」特別増大号（1971）<sup>(33)</sup>「日本の特殊土—その基本的性質から設計・施工まで—」および九州地方建設局編（1972）<sup>(34)</sup>「阿蘇火山灰土文献集」などにまとめられている。

阿蘇火砕流堆積物については、熔結した岩相が主体をなすため土質工学分野では前述の特殊土としての“灰土”（多くは火山灰土の一部としての扱い）に関するもの以外ではほとんど対象とならないが、ダムや橋梁などの構

表一3 大峰付近層序（渡辺，小野：1969）  
Table-3 Geological succession near Omine  
(WATANABE & ONO : 1969)

沖積層	} 阿蘇火砕流活動期
崖錐	
託麻砂礫層	
菊池砂礫層	
Aso-4火砕流	
高遊原溶岩	
大峰火砕丘	
布田層	
Aso-3火砕流	
Aso-2火砕流	
秋田・岩戸・瀬田裏溶岩	
Aso-1火砕流	
下陣礫層	
先阿蘇火山岩類	
白亜系	

表一4 熊本市周辺の層序（齊藤：1978）  
Table-4 Geological succession around  
Kumamoto city (SAITO : 1978)

時 代	層 名	層厚(m)			
沖 積 世	河 成 堆 積 物				
洪 積 部	上	ウ ル ム 期	保 田 窪 礫 層	1~5	
			託 麻 礫 層	20~30	
			阿蘇Ⅳ期火砕流堆積物	20~30	
			木 柑 子 物	1~5	
			阿蘇Ⅲ期火砕流堆積物	20~45	
	中	間 氷 期	リ ス ー ウ ル ム	花 房 層	上 部 砂 礫 層 6~7
				中 部 砥 川 溶 岩	40~50
				下 部 砂 礫 層	5~20
	中 部	リ ス 期	阿蘇Ⅱ期火砕流堆積物	15~25	
		ミンデルーリス期	合 志 層	60~110	
ミンデル期		凝灰角礫岩(含複輝石安山岩礫)			
		基盤岩類(白亜紀層・片岩・角閃石安山岩)			

表-5 大峰付近の阿蘇火砕流の識別表(渡辺, 小野: 1969)

Table-5 Recognition table of Aso volcano pyroclastic flow near Omine (WATANABE&amp;ONO: 1969)

ユニット*	岩相	本質岩塊	噴出後の結晶化	基質中の包有物	備考(地域外)	
Aso-3 (4A)	白一灰色, 非溶結の軽石流	発泡のよい軽石(比重≒0.5)。角閃石斑晶がみえる。ときに縞状軽石を含む。	ガラス質	外來岩片の大部分は先阿蘇火山岩類の安山岩	先第三紀の緑色岩を含む	
Aso-3 (3C)	暗褐一黒色, 非一弱溶結の岩滓流	発泡のわるい岩滓(比重=1.2-1.6)。火山弾構造普通。斜長石・輝石の斑晶にとむ。しばしば花崗岩片を含む。	ガラス質脱ガラス化		(とくに下部に)(類一)本質の黒曜石片, 白一褐色, 無斑晶の軽石を含む	
Aso-2B	黒一暗褐一赤褐色, 非一弱溶結の岩滓流	発泡のわるい岩滓(比重≒1.0)。火山弾構造普通。ほとんど無斑晶。白一灰色の岩片(安山岩)を含むことが多い。	(ガラス質)脱ガラス化 気相晶出			カルデラ東側ではガラス質。
Aso-2A	黒一灰褐一暗赤色, 強溶結の溶結凝灰岩	レンズは無斑晶または少量の斜長石斑晶を含む。	(ガラス質)脱ガラス化 気相晶出			カルデラ東側ではガラス質, 西縁では強く結晶化, 西縁の一部では二次流動。
Aso-1	黒一暗灰一暗赤色, 強溶結の溶結凝灰岩	レンズは少量のやや大型(7mm)の斜長石斑晶と, ときに斜長石・輝石の集斑晶を含む。レンズはしばしば扁平度少なく, 楕円体形	(ガラス質)脱ガラス化 (気相晶出)			崖を遠望すると不明瞭な成層構造のみえることがある。溶結と脱ガラス化のため, かたいことが多い。しばしば(とくに表層部が)赤色を呈する。

\* ( )内は本地域に分布する subunit

造物の基礎, トンネル掘削, 斜面の安定(岩塊崩落や落石を含む)および水源などの土地質学の分野で岩盤および軟岩の領域として取り扱われることがほとんどである。

その場合の工学的分類は, 対象とする目的によって異なるが, 一般にはまず阿蘇火砕流堆積物を時代, 成因および噴出源などの異なる他の地層と地質学的に層序区分を行ない, そのうえで阿蘇火砕流堆積物に対して, 定性的に分類されている。

その一つは, 多くの場合, 岩石の熔結度(硬さ)の程度により, “高熔結”, “低熔結”(もしくは“弱熔結”)および“非熔結”に分類し, 各々定量的な諸性質と関係づける分類方法である。

また, おもに地質学的な観点から, 高熔結部については外観上“緻密”および“多孔質”に大分類するとか, 岩石学的には岩相の変化から, “安山岩質”(比較的均質で緻密), “ガラス質”(黒曜岩のレンズを伴うのでその発達状況でさらに細分することがある), および“軽石質”もしくは“凝灰角礫岩質”などの分類を行なう場合もある。土地質学的分類では柱状節理や板状節理などの割目が発達していることから, その性質とその頻度等により分類することもしばしば試みられる。

しかし, 土地質学の分野で現在もっとも普遍的に用

いられている阿蘇火砕流堆積物についての岩石や岩盤の分類は, 田中の分類, 建設省土木研究所の分類(下釜ダム等における分類基準, 岩質, 割目間隔および割目状況によって細分し, その組合せにより総合評価するもの), 国鉄の切取土砂・岩石分類および農林省の分類など, 他の岩盤に適用されている分類の基準に準拠する手法であるが, 筆者らのこれまでの経験ではダム等の構造物の基礎の場合, 建設省土木研究所の分類もしくはこれを若干改変した分類方式の方が, 幅広く適用されやすく, 客観性が得られやすいように感じられる。

しかし, 水源等における地層内の水理問題を扱う場合には, 火砕流地帯では, その地質学的な分布, 層序, 成因, 熔結度および割目の性状と間隔などにより, 例えば, 通水機構(ダルシーの法則に適應するものと適應しないもの)が異なるし, 割目が水平方向か垂直方向かで透水性の大きさが異なったりするようであり, 筆者らは火砕流地帯および類似の地質構成からなる地帯を対象とする水理地質学的観点からの岩石および岩盤の分類基準を思考しつつあるので別の機会に発表したいと考えている。

### 3-3 浮石火砕流の<sup>14</sup>C年代

本文で対象とした始良カルデラ源および阿蘇カルデラ源の火砕流堆積物の地質時代については, 前述した表-1の太田(1963)<sup>(3)</sup>の層序および表-4の斉藤(1978)<sup>(31)</sup>の

表一6 火砕流の<sup>14</sup>C年代  
Table-6 <sup>14</sup>C age of pyroclastic flow

	地 層 名	<sup>14</sup> C 年 代	記 載 者(発表年次)
1	始良火砕流堆積物	22,000±850年B. P.	郷原(1965)(35)
2	同上(入戸軽石流)	16,350±350年B. P.	荒牧(1965)(36)
3	同上(入戸軽石流)	23,400±800年B. P.	一色ら(1965)(37)
4	同上(入戸軽石流)	26,000±695年B. P.	横山(1971)(38)
5	阿蘇火砕流堆積物(Aso-4)	33,000± $\frac{3,000}{2,200}$ 年B. P.	有明海研究グループ(1965)(32)
6	同上	26,400~35,100>43,000年B. P.	荒牧(1969)(32)
参 考	阿多火砕流堆積物 加久藤火砕流上部層	24,500±900年B. P. >50,000年B. P.	荒牧ら(1965)(39) 種子田ら(1971)(40)

層序などにみられるように、更新世の後半の噴出物と考えられ、<sup>14</sup>C測定によりその年代がかなり明らかになってきている。文献により<sup>14</sup>C年代を要約すると、表一6のとおりである。

#### 4 シラスの工学的性質

いわゆるシラスの性質に関して従来から一般に知られている内容を要約し、当社がこれまでに実施した調査資料を基にして統計的にまとめた深度毎のN値や物理的性質について述べる。

##### 4-1 シラスの一般的性質

シラスと俗称されているものには種類が多いが、始良カルデラ源の軽石流(例えば、入戸軽石流、坂元軽石流)に関して、地質学分野、土質工学分野および土木工学分野などで知られている一般的性質について要約する。

##### ○ 分布・層序・構造

1) いわゆるシラスは、始良カルデラの熱雲型噴火に伴って生じた噴出物が堆積した火砕流堆積物(軽石流)を主体とするため、高標高の山陵地およびこれによって遮られた地域、噴出前の河谷や低平地を埋めつくしたと考えられ、鹿児島県本土面積の50%余り、宮崎県南半部(県の20%)に分布する。その量は約3,000億tにも達するといわれ、その分布がおおよそ標高300m以下であるが、この範囲だけに限れば80%以上にも及ぶ広域がシラスに覆われていることになり人間の生活に関係が深い。したがって災害等が発生すると過大評価され、ただちに原因はシラスだということになりがちでもある。

2) 前述したように、他の成因による火山噴出物や堆積層を伴うため、層序が複雑であり、また、始良カルデ

ラ源の噴出物でも熔結度に差異があるし、軽石流のほか降下軽石も含まれ、これらの二次的堆積層(段丘上に分布する更新世の二次シラスと沖積低平地の二次シラス)や水成のシラスなどもあり、また、分布する地域によっても岩相が変化し、それぞれ地質工学的な性質が異なる。

3) シラスの範疇に含まれる低熔結のシラスに地質構造上の節理が発達しており、非熔結の場合でも潜在的な節理がみられ、しばしばこの面に沿って剝離を生じたり木の根が伸びていたりする。

4) シラスは、砂およびシルト粒子を主体とするが、多孔質(粒子内空隙を有する)の軽石礫を含み、その径は1cm以下、1~3cm、5~10cm、15~30cmおよび最大120cmなどのものがあり、その混入量は場所や深度により異なる。この軽石の存在はシラスの諸特性に影響を及ぼす。また、安山岩礫をも伴うが、一般には径5cm以下のことが多く、混入量も少ない(時として層状に安山岩礫が集中して多く混入することがあり、礫径も大きい)。

5) シラスを構成する鉱物は、火山ガラス(80%程度)が主体で、斜長石、石英および紫蘇輝石などの主成分鉱物のほか、普通輝石、角閃石および磁鉄鉱などを含む<sup>(41)</sup>(大庭1973)。火山ガラスは、電子顕微鏡下では繊維状、海綿状および破片状などを示す。

シラスの化学組成では、分布する地域によって差異が認められるが、大略的には、SiO<sub>2</sub> 64~72%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13~16%、Na<sub>2</sub>O 3.2~4.1%、K<sub>2</sub>O 1.8~3.1%、CaO 1.9~3.5%およびFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.1~2.8%などが多いほか、TiO<sub>2</sub>、FeO、MnO、MgOおよびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>などを含む。なお、H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>は2.3~3.9%、H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>は0.3~0.7%である。



## ○ 物理的性質

1) 粒度組成上では、大部分は礫分 0~20%、砂分 60~80%、シルト分 5~30%、粘土分 0~10%の範囲内にあり、三角座標では、砂および砂質ロームに、統一土質分類では非塑性であり、SW または SP に相当する。またシラス粒子は摩耗や破壊をうけやすく細粒子化する。

2) シラスの土粒子の比重 ( $G_s$ ) は大部分が 2.3~2.5 の範囲内であり、通常の土より軽いのを特徴とする。また、乾燥密度 ( $\gamma_d$ ) が 0.90~1.25g/cm<sup>3</sup>、湿潤密度 ( $\gamma_w$ ) が 1.10~1.45g/cm<sup>3</sup> であり、小さい値を有する。

3) シラスの間隙比 ( $e$ ) は多くの場合 0.9~1.5 の範囲内にあり、比較的大きい。間隙率は 63~84% である。シラス中の軽石の体積の 80% 程度は粒子内空隙である (春山<sup>(42)</sup> 1972)。

4) シラスの自然含水比 ( $W_n$ ) はおおよそ 16~45% であり、自然含水比 ( $W_n$ ) が 30% をこすとセン断抵抗が急激に減小すると言われている。飽和度 ( $S_r$ ) は 30~60% の範囲内に入るものが多い。

5) 地山のシラスの弾性波速度値は  $V_p$  で 200~1,800 m/s、 $V_s$  で 80~900m/s 程度である。

## ○ 力学的性質

1) シラスの一軸圧縮強さ ( $q_u$ ) は、0.3~2.4kg/cm<sup>2</sup> の範囲のものが多いが、シラスの分類に応じ変化している。

2) シラスのセン断強さは、これまでの結果によると、直接セン断試験で  $C=0.15\sim0.30\text{kg/cm}^2$ 、三軸試験の圧密非排水試験で  $C_u=0.02\sim0.30\text{kg/cm}^2$ 、 $\phi_{Cu}=35^\circ\sim50^\circ$ 、非圧密非排水試験で  $C_{uu}=0.15\sim0.97\text{kg/cm}^2$ 、 $\phi_{uu}=20^\circ\sim38^\circ$ 、排水試験で  $C_D=0.15\sim0.43\text{kg/cm}^2$ 、 $\phi_D=28.8^\circ\sim42.0^\circ$  などの範囲内にあるがデータ数が少ないので参考にとどまろう。また、セン断強さは“飽和シラス”と“不飽和シラス”，あるいは“ふつうシラス”と“風化シラス”によっても異なっている。

2) 突固めの試験結果では、最適含水比 25~51%、最大乾燥密度 0.89~1.58g/cm<sup>3</sup> の範囲のものが多いが、シラスの分類上の種類によって異なる。また、CBR 値は水浸で 11.5~28.0%、非水浸修正で 12.6~55.0% の範囲内にあり、通常の土より大きい値を示している。

4) シラスの透水係数 ( $k$ ) は、乱さない試料による室内試験結果で、 $k=10^{-3}\sim10^{-6}\text{cm/s}$  のオーダー、現場試験結果で  $k=10^{-2}\sim10^{-5}\text{cm/s}$  のオーダー、締固め試料で  $k=10^{-3}\sim10^{-4}\text{cm/s}$  のオーダーである。

5) 山内や春山によると、乱さないシラスの強さは、粒子間の摩擦と粒子構造によって成立ち、構造による強さは表面エネルギー効果、インターロッキング効果およ

び熔結効果からなるものと考えられ、シラスのセン断抵抗角と見かけの粘着力は粒子のインターロッキング効果によるもので、とくに見かけの粘着力はインターロッキングによって生ずる体積変化に基づいており、インターロッキングは粒子の配列様式、形状および表面の状態などにより異なるという (春山・山内 1966, 山内 1977, 他多数)。

シラスが砂質土にもかかわらず粘着力を有することは特筆すべき特徴であり、乱した土でも粘着力を有している。

6) シラスは、水の浸透圧や掃流力および滴水や跳飛水などに対して弱い。すなわち、動的な水の作用に対して弱く破壊しやすい性質をもっていることが顕著な特徴である。

例えば三谷・安達<sup>(45)</sup> (1969) によると、シラス地山の自然斜面では洗掘抵抗値と勾配の間には相関があり、洗掘抵抗値 50sec/12.7cm 以上ではほとんど直立し、30sec/12.7cm 程度では 1~2 分の勾配でも十分なようだという。

藤本<sup>(46)</sup> (1976) によると、シラス斜面では斜面の雨水侵食は、一般的な侵食の形態的進行と同じように、層状侵食、リル侵食およびガリ侵食に分類され、雨滴の落下で斜面を打つと、刻々の衝撃力により、斜面土塊が破碎、飛散、剝離され、微粒子が空隙をふさいで斜面の雨水流出量を増大せしめ、分散、剝離した土粒子が下方へ洗い流され層状侵食を起こすことになる。これが進んで斜面に土柱が形成されはじめ、かつリル侵食およびガリ侵食へと進んでゆくという。また藤本はシラスがパイピングを起こす原因を研究し、都城市周辺におけるシラス・ドリリーネ (陥没地) を明らかにしている。

シラスが水に弱い理由として、山内<sup>(44)</sup> (1977) は限界間隙比説を提唱し、拘束力を因子として破壊時のダイレイタンスー指数に相当する点の間隙比が水分が増すほど小さくなることに起因していると論じている。また、この他にもシラスの比重が軽いこと、分離率が高いこと、含水量が多くなるとセン断抵抗が減ること、植生が付きにくいことなどを理由とする考え方もある。

7) シラスは、振動、衝撃および繰返しの荷重のような動的な力に対しても弱く、破壊しやすいことも特徴のひとつである。また地震に弱いことも、日向沖地震 (1961・2) やえびの地震 (1968・2) における斜面崩壊や川内川流域の噴砂で判明している。

山内<sup>(47)</sup> (1969, 1974) によると、“きれいなシラス” (えびの地区) はふつうのシラスよりも液状化しやすいという。

これらのことは、シラスに対し標準貫入試験、杭打ちなどを実施する際に、留意しておくべき重要な要素である。

8) また、山内<sup>(44)</sup>(1977, 他)は、地山シラス斜面の脆性崩壊を論じ、乱さないシラスの引張り強さに注目し、塑性シラスをのぞく準弾性的なシラスについては修正グリフィスあるいはクーロン・ナビアの破壊理論が適用しうるとしている。すなわち、モール・クーロンの破壊理論は当てはまらないとするものである。

#### ○ 施工上の性質

1) シラスの軽石や土粒子は比重が軽いため、流水や湛水において、漂砂状もしくは軽石が浮遊する状態となるため、管路や側溝の流入入口を閉塞しやすく、また、農作物などに影響を与えやすい。

2) シラスは圧縮あるいは静的な荷重に対しては通常の土に比較して強いので、構造物の支持力に関しては問題が少ない。

3) トラフィカビリティは良好であり、ブルドーザーやスクレブドーザーなどが有効に使用でき、短いサイクルタイムが期待できる。また、転圧した盛土でもくりかえしの輪荷重によるディフレクションが生じにくいので、路体や路床の材料としてもシラスは適合性が良い。施工上は水に対する処置の問題が最大の留意点であり、表面を客土、土羽土およびモルタルなどで覆うことにより侵食等を防ぐことができる。

4) 河村ら<sup>(49)(50)</sup>(1971)によると、シラスの切土斜面は法勾配が緩いほど侵食はせまく、かつ深かったという。

5) シラスは無機質の火山ガラスを主とするため栄養分に乏しく、また保水性が不良であり、さらに硬い地盤であるため、斜面では植生がつきにくい。施肥にしても耐久性に乏しく、植生がつきにくく、植生の管理上にも問題がある。

6) 鹿児島市周辺のシラスからなる自然斜面では連続累加降雨量が200~250mm以上に達し、この間に時間雨量50~60mm以上を伴うと、その後数時間以内にシラス斜面では崩壊が発生し<sup>(51)</sup>(春山ら1969)、また連続累加降雨量300mmをこえると崩壊が続発するという<sup>(52)</sup>(春山ら1969)。

#### 4-2 統計的にみたシラスの深度毎のN値

いわゆるシラスについては、地質学的に地質時代、成因、噴出源および堆積環境等により、その土質工学的性質が異なることはすでに述べたとおりである。さらに、同一地層においても、同一位置で深さ方向にみると、強さや物理的性質などが異なることが予想される。事実、土質工学分野では“風化シラス”を“ふつうシラス”と区分

することが最近では行なわれている。しかるに、筆者らは、既存の調査資料を用いて、N値および物理的性質の深さ方向の分布(変化)の一般的傾向を統計的に表わすことを試みたが、一応の傾向を得たので、ここに発表する次第である。

N値および物理的性質の深さ方向の分布を統計的に処理するうえで、既存資料を採用するに当たっては、資料数を念頭において便宜上つぎの条件を前提として扱った。

1) 地質学的に分層および層序が明確であること。成因や噴出源などから、今回は、狭義にシラスという場合の代表的地層とみてよい始良カルデラの火砕流堆積物のうちの入戸軽石流、大隅軽石流、坂元軽石流およびこれらの相当層の非熔結部および低熔結部を“シラス”の対象として採用し、始良カルデラの降下軽石、阿多カルデラの火砕流堆積物、新期の火山碎屑物等は資料から除外した。

しかし、参考とするため、広義にシラスと呼ばれている地層のうち、土質工学の分野で“成層シラス”および“沖積シラス”と分類されているもの、さらには人為的な“盛土”についても統計的処理を行なった。“成層シラス”については、台地もしくは丘陵地に分布するものを対象にし、えびの市から吉松町にかけてのいわゆる加久藤盆地周辺に分布する下浦層<sup>(53)</sup>(始良火砕流堆積物の二次堆積物を主とするという、柴田秀賢(1969)他)を主体とするもの、都城市から小林市にかけての二次堆積物、志布志湾周辺の二次堆積物、加治木周辺の二次堆積物、垂水周辺の二次堆積物および鹿児島市周辺の二次堆積物を対象にして採用した。また“沖積シラス”は地形的に沖積低平地に分布する最新の二次堆積層に相当するものとした。

2) “シラス”は地域、カルデラからの距離、高度等によって生来の組成、風化の程度等が異なるものと考えられるので、便宜上、採用するボーリング孔口の標高により、標高100m以下(最低は標高19m)、標高101~200mおよび標高201m以上(最高298m)の3種に区分して取り扱うこととした。また、“成層シラス”についても同様に標高により3区分し、鹿児島市周辺のものには深度が浅いので一括した。

3) 調査資料は、ボーリング孔を利用して深度1m毎に、JIS A1219の「土の標準貫入試験方法」に基づいて測定したN値を採用した。

上記のような前提のもとに採用した調査資料(ボーリング1地点を1資料とする)の数(サンプル数)はボーリングの深さが地点毎に異なり深度が深いものは少なく、つぎのとおりである。

“シラス”	{	標高 100m 以下 : 15(深部)~18(浅部)
		標高 101~200m : 16(深部)~36(浅部)
		標高 201m 以上 : 6(深部)~9(浅部)
“成層シラス”	{	標高 100m 以下 : 10(深部)~23(浅部)
		標高 101~200m : 7(深部)~24(浅部)
		標高 201m 以上 : 18(深部)~41(浅部)
		鹿児島市周辺 : 4(深部)~8(浅部)
“冲積シラス”	—————	: 18(深部)~72(浅部)
“盛土, 埋土”	—————	: 14(深部)~31(浅部)

なお、深部とはボーリング深度がおおよそ25m以上、浅部とは深度がおおよそ25m以下である。

これらの“シラス”についての資料を用いて、各深度毎にN値の平均値、中央値およびモード（バラツキがありモードが不鮮明な場合は併せて60%以上のサンプル数が含まれる範囲）を求めた。その結果は標高100m以下のN値分布図を図-3、標高101~200mにおけるものを図-4、標高201m以上におけるものを図-5にそれぞれ

示す。また、“シラス”における深さ方向の全体的なN値の分布とその変化をみるため、標高に関係なく統合して統計的に求めたのが、図-6である。

図-3によると、標高100m以下に分布する“シラス”でのN値は、深度22m付近までは資料数が比較的多いこともあって平均値や中央値が近似した値を示し、N値は深度とともに漸次増大している。この図からN値の深度方向における増加傾向はおおよそ4つの区間に区分されようである。すなわち、深度1~12m付近の間の直線的にN値が37程度まで急増する区間、深度12~22のN値37から45以上に漸増する区間、深度22~45m区間の増加が微少の区間および深度45m以深のほとんどがN値50以上を示す区間である。なお、N値が50以上を示すのは、場所によっては深度10m付近から稀に現われ、15m付近から比較的多くなりはじめ、深度22mでは中央値は50以上となっている。また、場所によっては深度22m付近から45mの間でN値32~44の範囲に集中しているものがある。

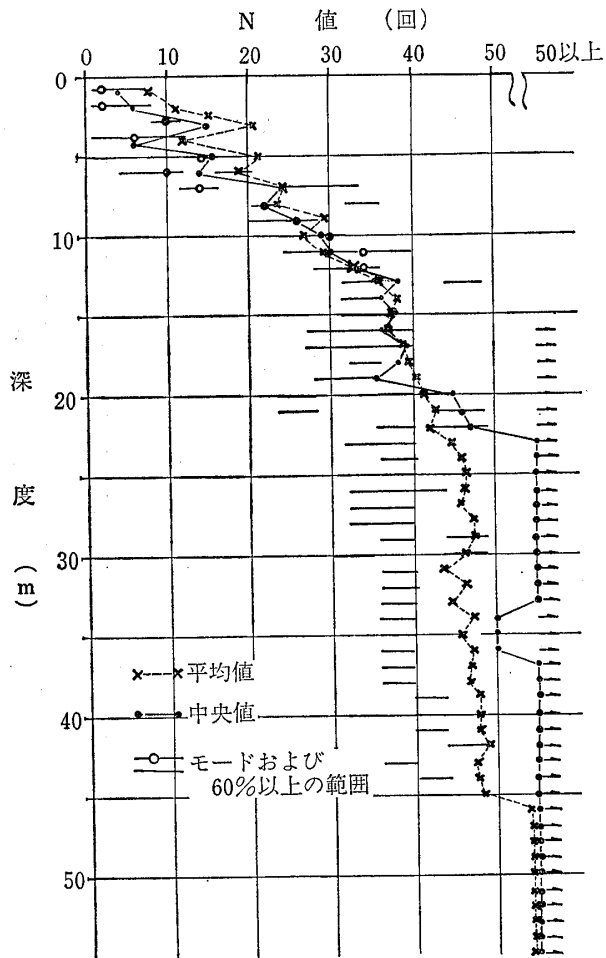


図-3 “シラス”のN値の分布(標高100m以下)  
Fig. 3 N-value of “Shirasu” (below 100 m in height)

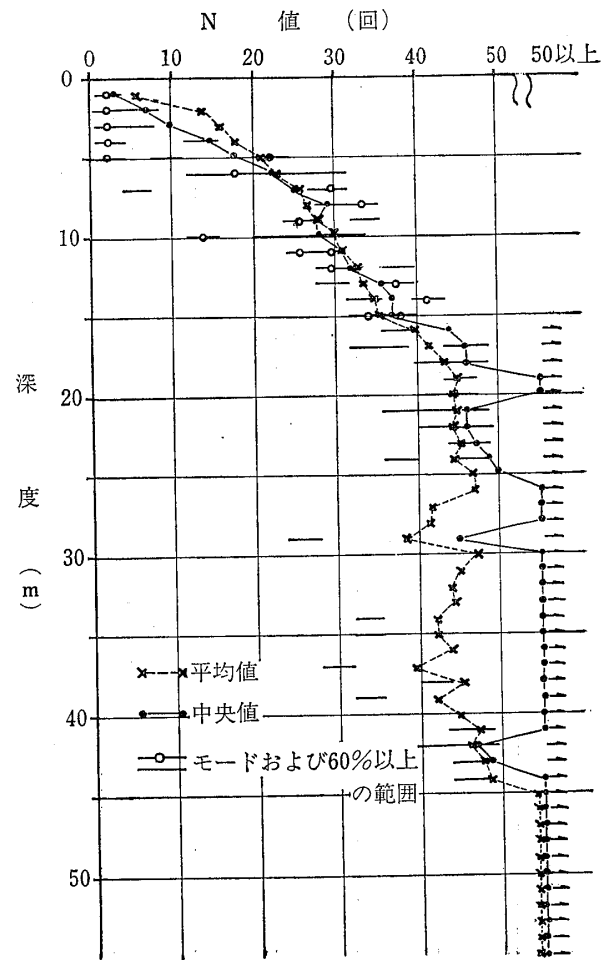


図-4 “シラス”のN値の分布(標高101~200m)  
Fig. 4 N-value of “Shirasu” (101-200 m in height)

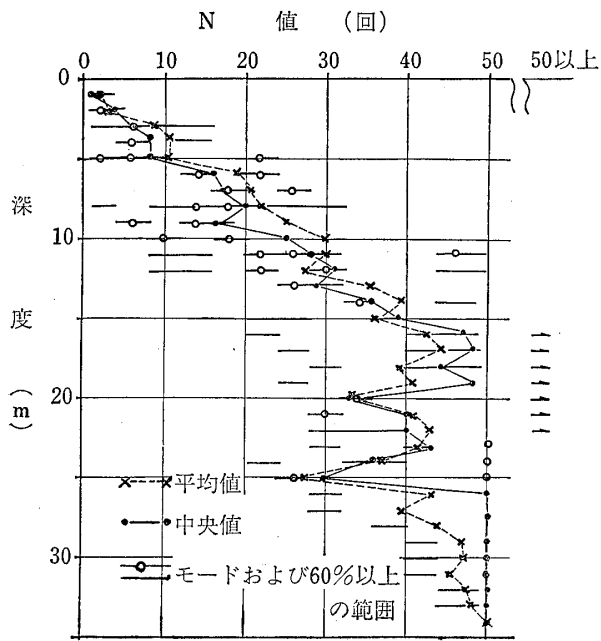


図-5 “シラス” のN値の分布 (標高201m以上)  
Fig. 5 N-value of “Shirasu” (over 201m in height)

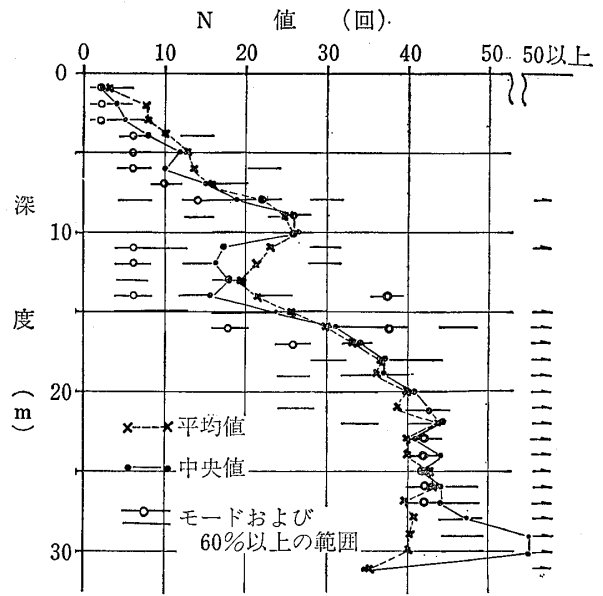


図-7 “成層シラス” のN値の分布 (標高100m以下)  
Fig. 7 N-value of “laminated Shirasu” (below 100 m in height)

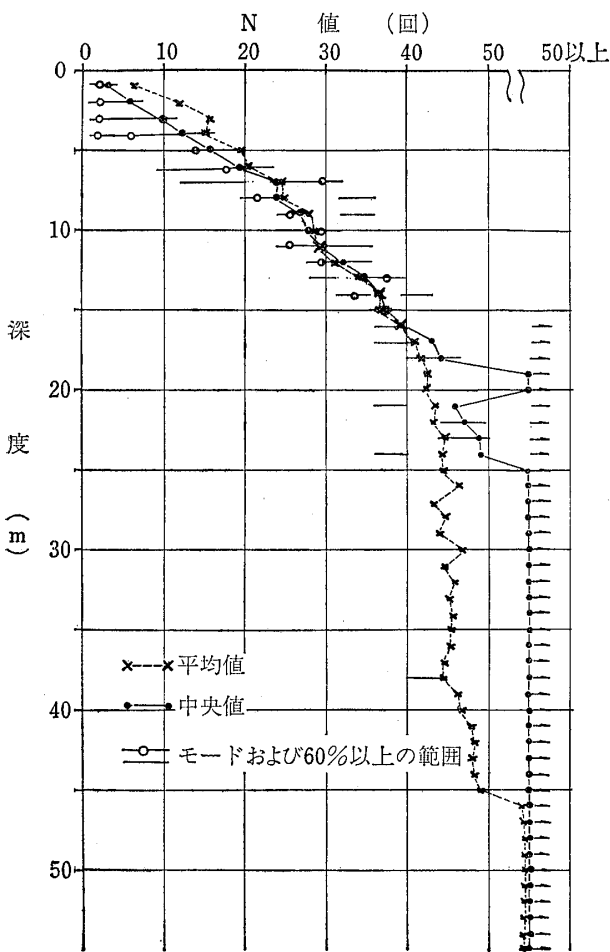


図-6 “シラス” のN値の分布  
Fig. 6 N-value of “Shirasu”

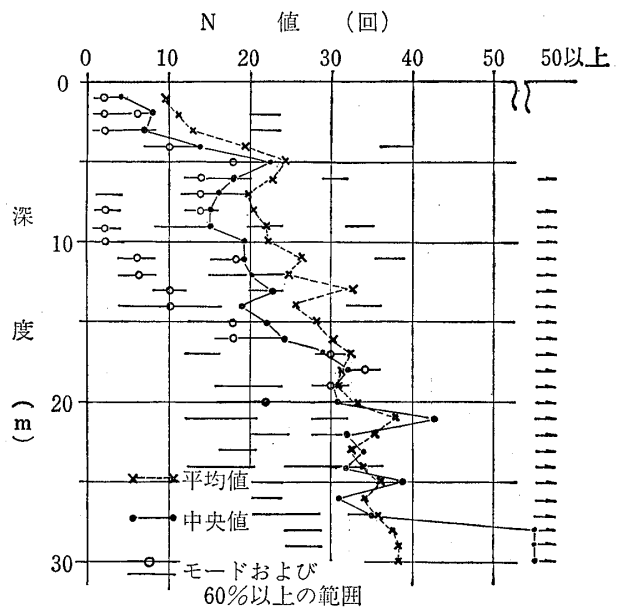


図-8 “成層シラス” のN値の分布 (標高101~200m)  
Fig. 8 N-value of “laminated Shirasu” (101-200 m in height)

図一4の標高101~200mに分布する“シラス”をみると、N値の深度方向の変化は、その傾向と値において標高100m以下の“シラス”の場合とほぼ近似しており大差がない。

図一5の標高201m以上に分布する“シラス”のN値をみると、サンプル数が全体的に少ないので必ずしも明確ではないが、この図によると、深度1~16m付近の区間までN値が直線的な急増傾向を示し、標高100m以下の“シラス”の場合に比べると、この区間が4m程度深くなり、かつ深度毎のN値も2~5程度小さくなっている。このことは標高の高い位置に分布する“シラス”の方が低い位置の場合に比べて表層でのいわゆる風化変質がより深く進み相対密度も小さくなっているということの意味するものとも考えられる。深度20m以深についてはサンプル数が少ないのでバラツキが大きく傾向を知るに至らない。

図一6の標高に関係なく“シラス”のN値を統括した図をみると、図一3および図一4に現われている傾向とほとんど差異が認められず、深度的なN値の増加は、大局的には曲線的な変化を示し、深度1~12m付近の区間の急増区間、深度12~22m付近の区間の漸増区間、深度22~45mの区間の微増区間、および深度45m以深のN値50以上の区間の4区間に区分されようである。このN値の深度方向の変化が風化作用によるものとするれば、風化は地表付近でもっとも著しく進行しており、曲線的な変化で深度が深くなるほど漸減していることになり、深度20~22m付近までがとくに変質が顕著となっているとみなされ、これ以深では深度45m付近まで何等かの風化作用の影響を受けているとみてよからう。しかし、“シラス”が火砕流堆積物であることから、成因的に、噴流および堆積時の温度変化、ガスの放出、熔結作用、堆積後の応力(加重)および侵食作用等に伴う応力解放などを考慮すると、表層部におけるN値の変化をすべて風化変質作用によるものとするには問題が残ろう。深度45m以深になるとほとんどN値が50以上になることや45m以浅においても深度10m付近でN値50以上を有する場合があります、深度24m以深では中央値がすべてN値50以上となっていること、動的なくり返し荷重に弱い性質を有すること、などの点から判断すると、軽石を含むとしても“シラス”は本質的に“非常に密な”相対密度を有する砂質土であるといえよう。

参考までに、“シラス”の場合と同様にして求めた“成層シラス”の場合を、図一7(標高100m以下、おもに垂水市周辺、宮崎県高岡町周辺の二次堆積物)、図一8(標高101~200m、おもに都城市周辺の二次堆積物)、図一9

(標高201m以上、小林市周辺、えびの市周辺、吉松市周辺および栗野町周辺などの下浦層を含む二次堆積物)および図一10(鹿児島市周辺、標高100m以下)に示す。これらの図によると、“成層シラス”の場合は、“シラス”に比較してかなりN値の深度方向分布(変化)の傾向が異なることがうかがえる。そのおもな相違点もしくは特徴は次のとおりである。

(1) 全般的に“成層シラス”におけるN値の深度方向の増加が緩慢であり、かつ高位置の“成層シラス”ほどその傾向が強い傾向にあること。とくにえびの市を中心とする加久藤盆地周辺の“成層シラス”は深度10m付近まではN値が急増しているが、10m以深40~45m付近までは大局的に増加せず、平均値、中央値とも25~30程度で変化がみられない。

(2) “成層シラス”は“シラス”の侵食生成物が二次的に堆積した層であるので、一部では“シラス”に類似した層相を示すこともあるが、多くは粒度の異なる種々の層が成層しており、この状況を裏づけるかのようになり、深度1m毎に測定した深度毎のN値の変化が凸凹に富んでおり、緩密の差がみられる。しかし、前述の加久藤盆地周辺の“シラス”ではこの傾向が明瞭ではない。またN値50以上を示す深度もとくに一定傾向がなく、深度5m付近から以深では厚さが薄くても局部的に大きい値を示し、深い位置でもN値の低い区間を伴う。なお、加久藤盆地周辺の“シラス”が他と異なる傾向を示すのは、比較的粒の揃った細粒子の成層からなっており、層相変化がさほど顕著でないことに起因するものとも考えられる。

また、沖積低平地に堆積している“沖積シラス”における同様の結果を図一11に示す。“沖積シラス”では“シラス”や“成層シラス”の場合よりもN値の分布は変化に乏しく増加傾向が著しくない。場所によりその厚さが異なるため一般的な深度方向のN値の分布をこの図から評価することには問題があるが、平均値や中央値からみると、深度5m以浅のN値10以下の区間(N値<4の“非常に緩い”状態を示すものも多い)、深度5mから20m付近のN値10~14の区間および深度25m以深のN値15~30の区間とに区分されようであり、深度40m以深では層相変化に対応して、またサンプル数が少なくなることもあり、凹凸に富み、“成層シラス”に類似した曲線形状を示している。

図一12には“シラス”源の土を材料に用いて人為的に造成された“盛土”や埋土について、同様にまとめたものであるが、深度1~2m区間では平均値等がN値>10の“中位の”相対密度を示し、深度3m以深ではN値6~8の“緩い”相対密度を示している。表層部が大きく、下

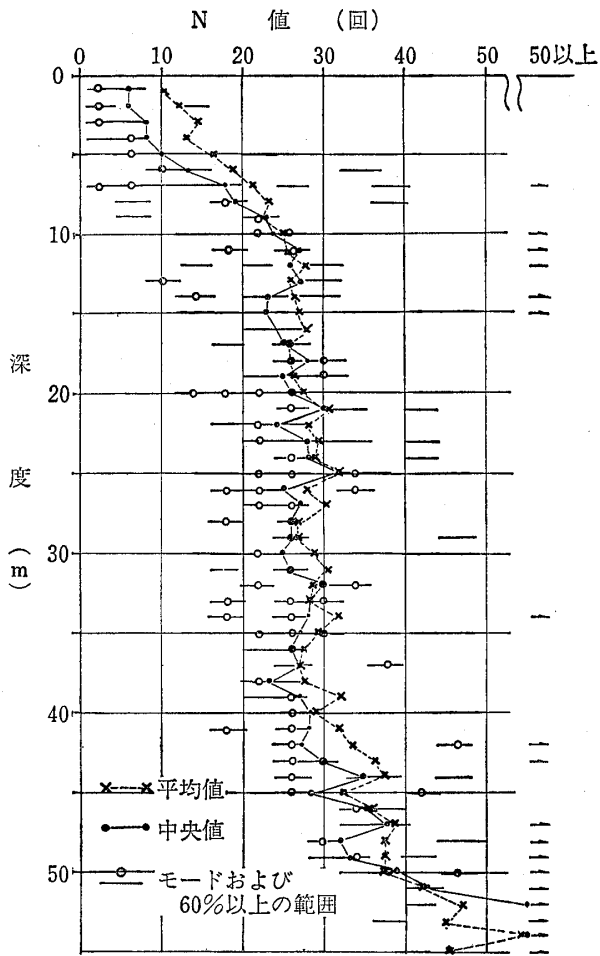


図-9 “成層シラス”のN値の分布 (標高201m以上)  
Fig. 9 N-value of “laminated Shirasu” (over 201 m in height)

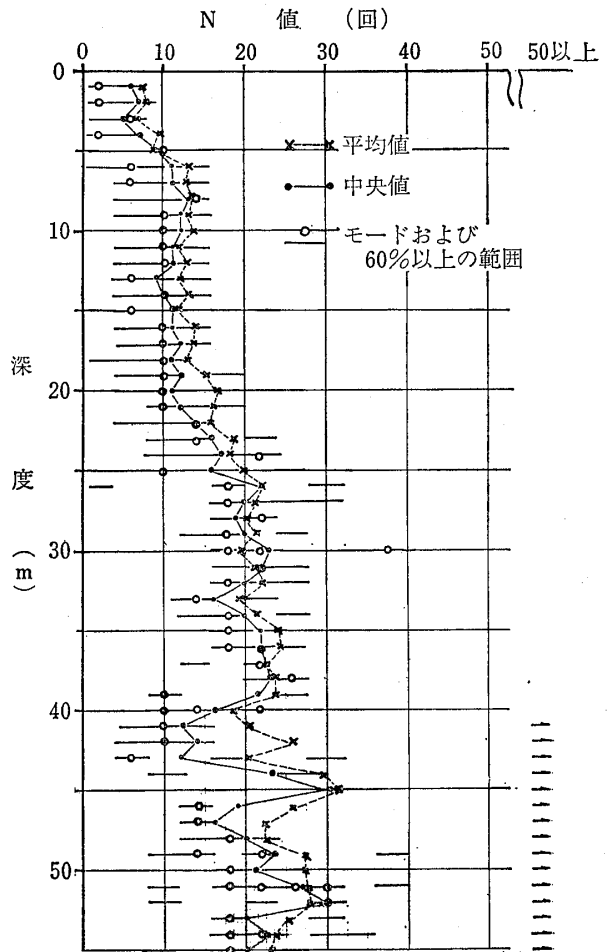


図-11 “沖積シラス”のN値の分布  
Fig. 11 N-value of “alluvial Shirasu”

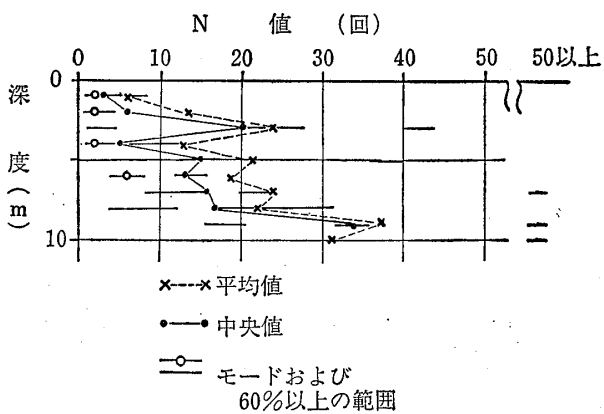


図-10 鹿児島市辺における“成層シラス”のN値の分布  
Fig. 10 N-value of “laminated Shirasu” around Kagoshima city

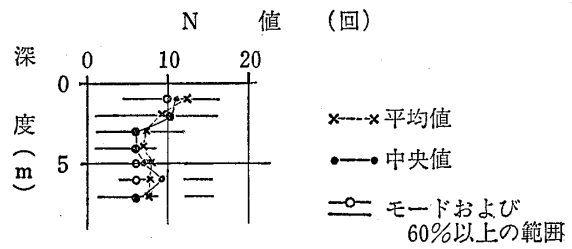


図-12 盛土のN値の分布  
Fig. 12 N-value of embankment using “Shirasu”

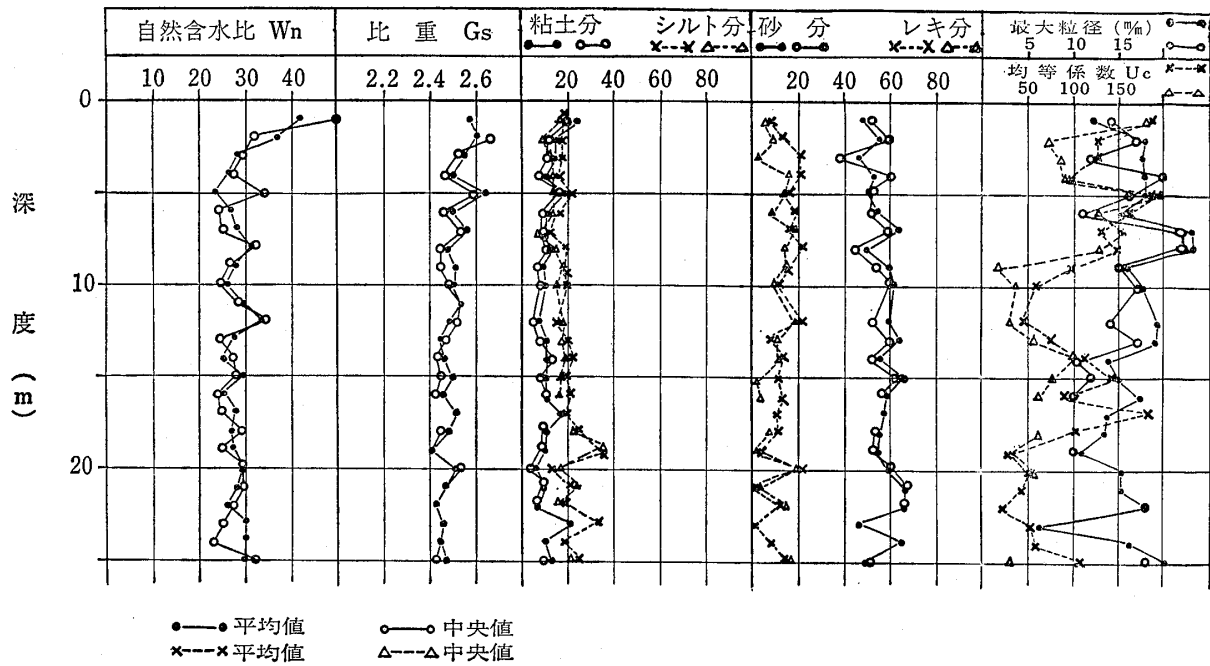


図-13 “シラス”の物理的性質と深度  
 Fig. 13 Physical properties of “Shirasu”

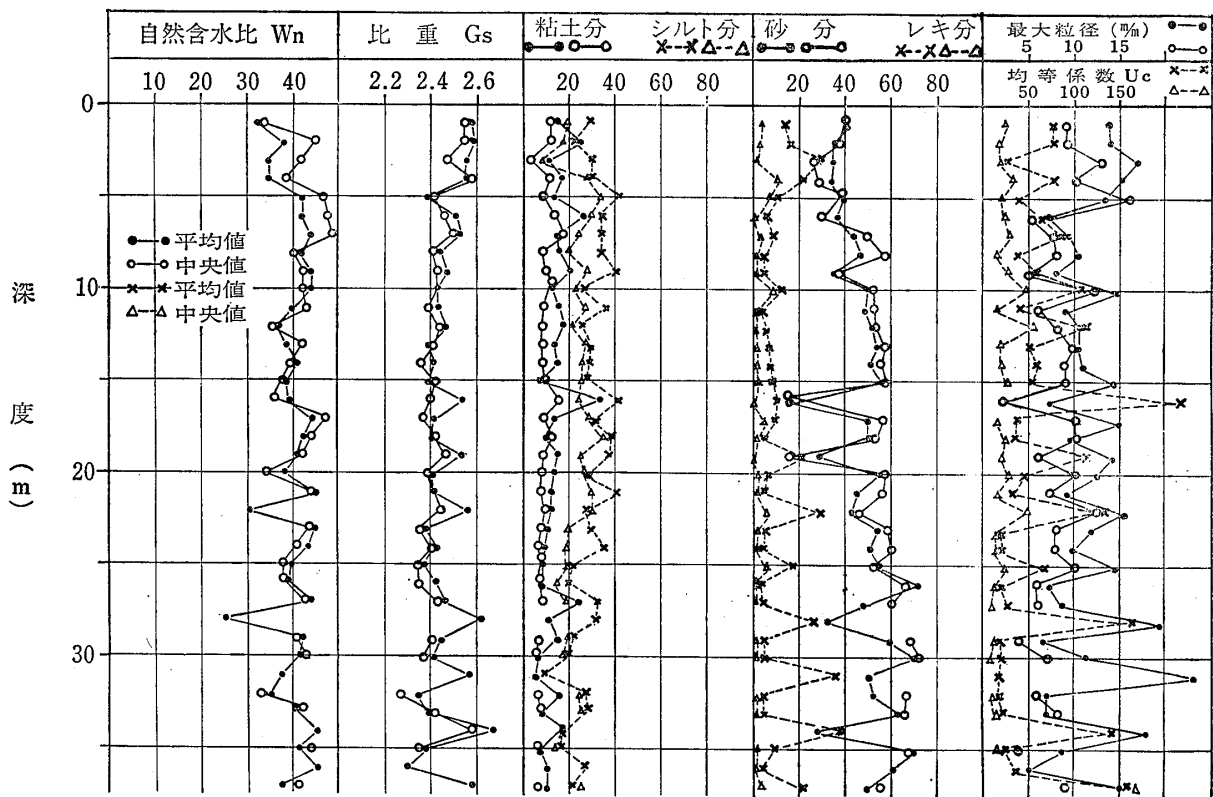


図-14 “成層シラス”の物理的性質と深度  
 Fig. 14 Physical properties of “laminated Shirasu”

方で小さい。その増加がない傾向は、“沖積シラス”の場合とも若干異なるが、どちらも深度3m付近で最低値が得られていることは注目すべきことである。これらは、含水量、締固め状況、地下水位および材質などの条件が表層では異なることなどによるものと推察される。

#### 4-3 シラスの深度毎の物理的性質

N値の場合と同様の方法で“シラス”の物理的性質を深度毎に取りまとめ、一般的傾向を知ることを試みた。ここでいう物理的性質とは、自然含水比、比重および粒度組成を指し、試験方法は土質工学会の「シラスの粒度および物理試験のための試料調整方法」「シラスの粒度試験方法」および「シラス粒子の比重試験方法」に準じて行なった資料を用い、平均値、中央値を求めた。

サンプル数は、深度によって異なるが、“シラス”が5(深部)~14(浅部)、“成層シラス”が5(深部)~18(浅部)“沖積シラス”が16(深部)~29(浅部)、“盛土”が12(深部)~13(浅部)である。

“シラス”における深度毎の統計的処理結果は図-13に示す。また参考として求めた“成層シラス”、“沖積シラス”および“盛土”の結果はそれぞれ図-14、図-15および図-16に示す。

“シラス”における図-13の深度毎の物理的性質をみると、おおよそ次のような傾向がみられる。

(1) 自然含水比( $W_n$ )は深度1mで40%以上を示し、深度3~5m付近の30%以下まで漸減し、それ以深ではおおよそ24~29%の範囲内にある。

(2) シラス粒子の比重( $G_s$ )は深度1~2mで2.6前後の値を示すが、深度3~4mまで漸減し、以深では2.40~2.55(2.43~2.50が多い)の範囲を示す。比重の深さ方向の変化はサンプル数が少ないこともあって若干凹凸に富んでいるが、大局的に深度22m程度の区間までは比重がわずかながら深さと共に小さくなっている傾向がうかがえ、N値における傾向との関係を示唆するものかも知れず、“風化シラス”の性質を考える際に今後さらに明確にしてゆく必要がある。

(3) “シラス”の粒度組成をみると、深度毎のバラツキはあるが、多くの深度では、砂分が50~63%、シルト分が15~20%、粘土分が5~15%の範囲で含まれ、礫分は5~20%の範囲内で深度により変化している。最大粒径は100~220mmの範囲内でバラツキが大きい。粒度組成の結果で注目すべき点は、平均的にみて、深度7m付近まで深度が浅いほど粘土分の含有率がやや多くなる傾向を示し、シルト分の含有量との差がなくなっていることである。これは風化変質等による細粒子化や二次的粘土鉱物の生物の生成と関連することを意味するかも知れ

ない。含水比が表層で大きいこととの関係をも裏づけるものと推察される。

“シラス”の場合と図-14、図-15および図-16の二次堆積物の物理的性質の傾向を比較するとおおよそ次のとおりである。

(1) 自然含水比( $W_n$ )は、“成層シラス”や“沖積シラス”で深度を問わず35~45%の範囲内にあることが多く、“シラス”よりも10~25%程度大きい。“成層シラス”と“沖積シラス”とでは大差がない。“盛土”の場合深度1m付近では20%程度で“シラス”よりも小さい値を示すが、深度2~3mでは40%内外であり“沖積シラス”などと差がない。

(2) 土粒子の比重( $G_s$ )は、シラス、と“成層シラス”や“沖積シラス”とでは大局的に平均値や中央値における深さ方向の変化および値に差異が認められない。

(3) 粒度試験結果では、“成層シラス”と“沖積シラス”とでは大局的に近似した傾向を示し、粘土分をのぞく他の粗粒子の含有量の変化が深さ方向で“シラス”よりも凹凸に富んでいる。“シラス”と“成層シラス”や“沖積シラス”と比較して、とくに傾向が異なる点は、“シラス”よりも礫分の含有量が全体的に少なく、かつ礫の最大粒径も小さいことであり、さらに、均等係数( $U_c$ )が“シラス”よりも深さ方向のバラツキが少なく、値もかなり小さくなっていることである(“シラス”の $U_c$ 20~140, “成層シラス”の $U_c$ 15~50, “沖積シラス”の $U_c$ 10~20)。“盛土”の場合深さ4mまでの結果では、“シラス”よりも粘土分や礫分が少なく、均等係数( $U_c$ =10前後)も小さい。

#### 4-4 N値とLLT結果との関係

最近土木構造物や建築物の基礎地盤の調査として、ボーリング孔を利用した孔内横方向載荷試験が広く行なわれているが、いわゆる“沖積シラス”の場合とくに重要な調査手段の一つとなっている。したがって、ここでは沖積低平地の“沖積シラス”を対象にした横方向載荷試験の結果を用いて、N値との関係をとりとまとめた。なお、試験結果は、OYO製の低圧用LLT装置を用いたものに便宜上限定した。

図-17は静止土圧とN値との関係をプロットしたものである。ここでいう静止土圧とは載荷の初期過程で孔壁が再圧縮され地盤反力が急激に増大しはじめる変曲点に対応した時の圧力を意味する。この図によると、“沖積シラス”高飽和度の地盤においては孔壁が崩れやすいこともあり、静止土圧でのバラツキがみられるが、おおよそN値との相関がみられる。

図-18および図-19は、同様に降伏圧とN値および破



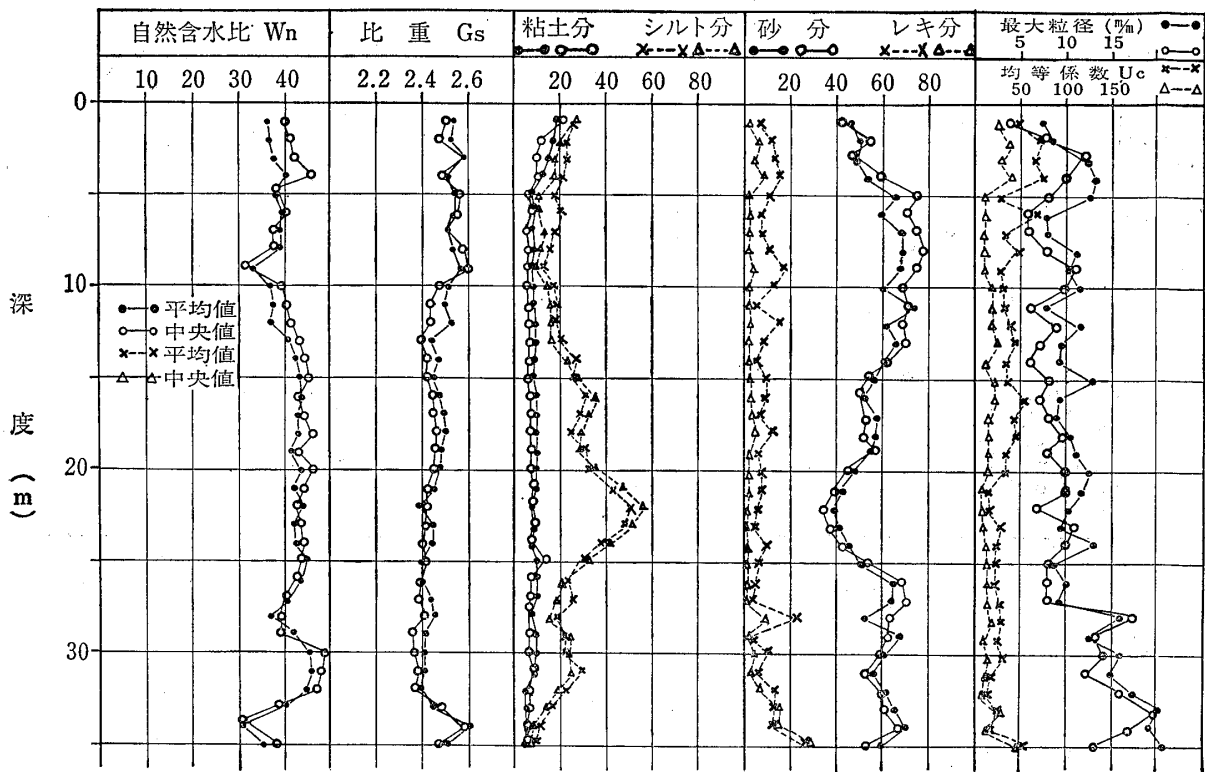


図-15 “沖積シラス”の物理的性質と深度

Fig. 15 Physical properties of "alluvial Shirasu"

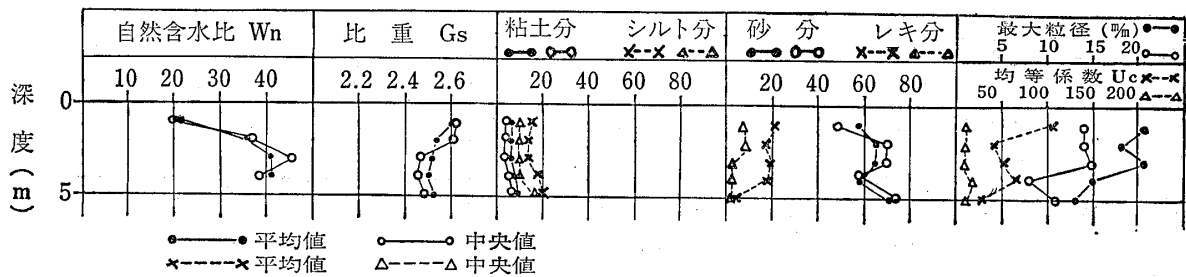


図-16 盛土の物理的性質と深度

Fig. 16 Physical properties of embankment using "Shipasu"

壊圧とN値との関係を示すが、一応の相関関係はみられるもののバラツキが大きい。

また、地盤の横方向K値とN値との関係を図-20、地盤の弾性係数E値とN値との関係を図-21にそれぞれ示す。これらにおいてもN値とK値およびE値との間に相関関係は一応認められるもののバラツキが大きい。

したがって、これまでの“沖積シラス”を対象にした試験データのみではバラツキがみられるため、諸測定値とN値との関係式を求めるまでには至らなかったが、今後、さらにデータが増えると、より明確にしうるものと考えられる。なお、シラス地盤では、標準貫入試験のような動的な衝撃や、くり返し荷重により、破壊され強度が低

下しやすい性質を有するため、今後は、標準貫入試験と孔内横方向載荷試験とは、同一地層の場合深度が重ならない位置で実施し、孔内横方向載荷試験を実施する区間では、極力孔壁の地盤条件を乱さない方法で掘進することが重要である。

## 5 阿蘇火砕流堆積物の性質

阿蘇火砕流堆積物の分布および層序等についてはすでに述べたが、従来熊本県植木地方に分布する阿蘇カルデラの3回目および4回目の火砕流堆積物の粘土分に富む風化生成物については、俗称“灰土”と呼ぶその工学的な性質に関する研究や文献は少なくない。しかし、熔結部

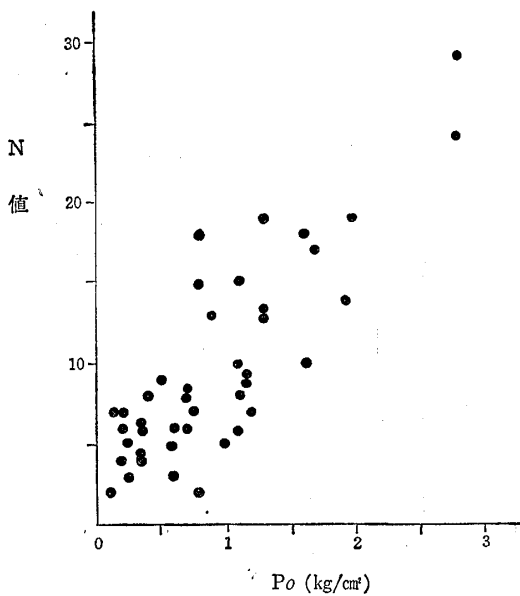


図-17 静止土圧 ( $P_o$ ) とN値の関係  
Fig. 17 Relation between earth pressure at rest ( $P_o$ ) and N-value

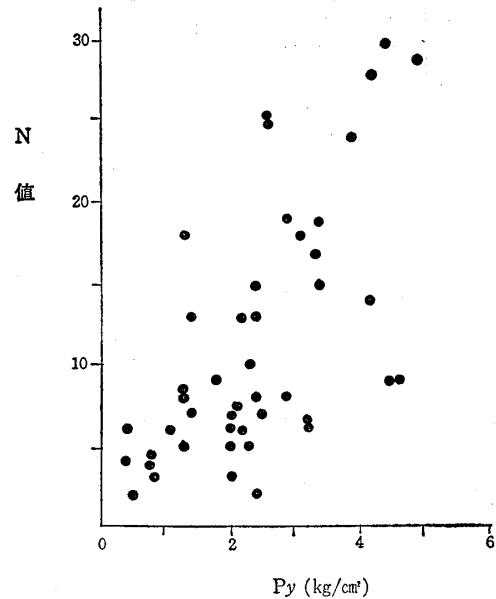


図-18 降伏圧 ( $P_y$ ) とN値の関係  
Fig. 18 Relation between yielding stress ( $P_y$ ) and N-value

や低熔結部の火砕流については地質学的な研究がおもで、工学的分野での研究や文献は少ないように見受けられる。したがって、ここでは、“灰土”と“灰土”以外の火砕流堆積物とに区分して、それぞれ工学的性質を述べることにする。

#### 5-1 “灰土”の一般的性質

“灰土”に関して従来知られている一般的な工学的性質を要約すると次のとおりである。

1) 俗称“灰土”は、地域性の強い阿蘇火山源の火砕流堆積物の風化生成物を主とする土工上の不良土であり、特殊土として取り扱われている。松本幡郎などによると、粘土鉱物により、アロフエンタイプ、アロフエン・モンモリロナイトタイプ、加水ハロイサイト・カオリンタイプおよび加水ハロイサイト・ハロイサイトタイプの4種に区分されるという。

2) 化学組成的には、 $\text{SiO}_2$  30~40%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  25~35%、 $\text{CaO}$  0.5~2.8%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.4~3.0%、 $\text{FeO}$  0.07~0.41%、 $\text{Na}_2\text{O}$  0.1~1.0%、 $\text{MgO}$  0.06~0.68%であり、 $\text{H}_2\text{O}^+$  14~20%、 $\text{H}_2\text{O}^-$  5~20%といわれている(松本)。pHは5.0~6.7の範囲にあり弱酸性を示す。

3) “灰土”は、粘土分20~38%、シルト分28~65%、砂分18~42%、レキ分10%以下という範囲の粒度組成からなり、粘土もしくは粘土質ロームに属する。

比重( $G_s$ )が2.55~2.75、単位体積重量( $\gamma_t$ )は1.39~1.80  $\text{g/cm}^3$ 、間隙比( $e$ )は1.40~2.25、自然含水比( $W_n$ )は40~75%、液性限界( $W_L$ )は40~65%、塑性限界( $W_P$ )は25~45%の範囲で、 $W_n \geq W_L$ の関係にあり、統

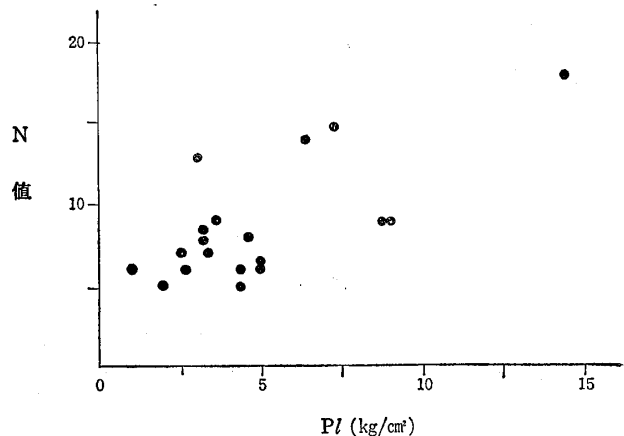


図-19 破壊圧 ( $P_i$ ) とN値の関係  
Fig. 19 Relation between failure stress ( $P_i$ ) and N-value

一土質分類ではMLもしくはMHに相当する。飽和度( $S_r$ )は70~90%である。

4) “灰土”は鋭敏比が2~30を示し、10以上のことが多いため、いわゆる関東ロームや阿蘇山周辺の赤ボクなどに比較して鋭敏比が大きく土工上の“特殊土”であるという評価を受けているゆえんである。一軸圧縮強さ( $q_u$ )は、乱さない試料で0.3~1.2  $\text{kg/cm}^2$ 、練返し後で0.1~0.5  $\text{kg/cm}^2$ である。しかし、練返し後放置しておくとも強度はシキソトロピー効果によってある程度回復することが知られている。

三軸試験結果では、非圧密非排水試験で、 $C_{uu}=0.1\sim0.7 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi_{uu}=10^\circ$ 内外、圧密非排水試験で、 $C_u=0.1\sim0.4 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi_u=14^\circ\sim43^\circ$ という幅広い範囲を示

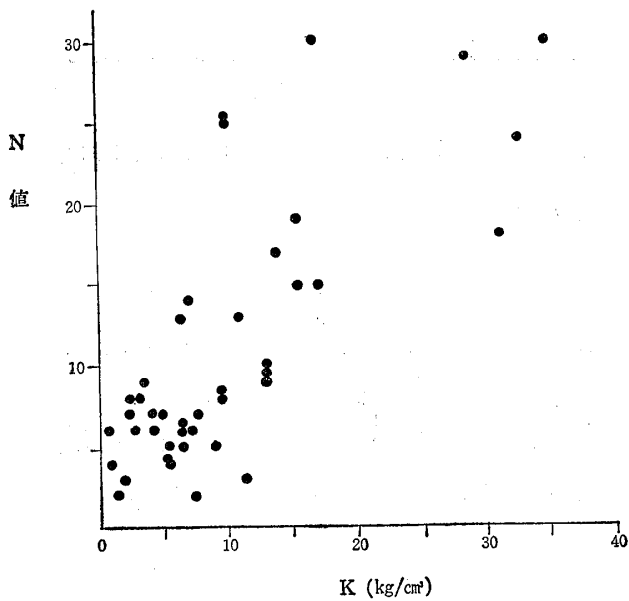


図-20 K値とN値の関係  
Fig. 20 Relation between K-value and N-value

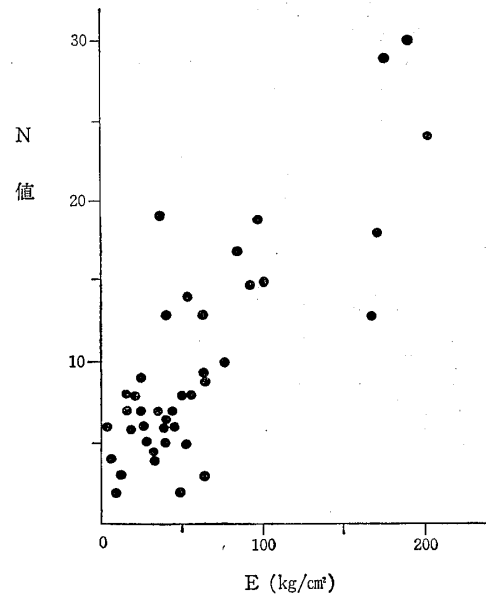


図-21 E値とN値の関係  
Fig. 21 Relation between E-value and N-value

し、“灰土”の圧縮強さにも種々あることを示している。

突固め試験による最適含水比は35~48%，最大乾燥密度は0.90~1.30g/cm<sup>3</sup>，最小間隙比は1.15~1.50mの範囲にあり，現場CBR結果では1.7~3.3%で小さい値を示し，練返し土では0.1~0.6%である。土工上は含水比調整がポイントとなるほか，練返しによる強度低下がきわめて顕著なことを裏づけている。

5) 以上のように，“灰土”は自然含水比≥液性限界であること，練返しにより一軸圧縮強さやCBRが極度に低下するという特質を有しているため，施工上取り扱いが難しい土といえることができる。したがって施工に際しては，シキソトロピー効果を期待すること，含水比の低下を行なうこと，および生石灰による化学的安定処理を行なうことなどを考慮した工法が用いられ成果があげられている。

### 5-2 阿蘇火砕流堆積物の物理的性質

灰土をのぞく阿蘇火砕流堆積物を，高熔結部，低熔結部および非熔結部に分類し，既往の諸試験データを取りまとめる。

#### 5-2-1 高熔結部

火砕流堆積物の高熔結部については，清水ボーリングによるコア採取が容易であることから，円柱状（通常長さ10cm，直径5cm）の試料を用いた種々の岩石試験が実施されている。それらの試験結果は図-22に示す。図-22には併せて阿蘇火砕流低熔結部の結果および参考として始良火砕流の高熔結部での結果をも示した。

図-22の一軸表示図によると，阿蘇火砕流堆積物高熔結部の岩石試験結果にみられる傾向はおおよそ次のとおりである。

1) 密度は1.45~2.40g/cm<sup>3</sup>の範囲に多く集中し，始良火砕流高熔結部とはほぼ一致し，通常の岩石より密度が小さいのを特徴とする。

2) 有効間隙率( $\phi$ )は，1~60%の幅広い範囲を示すが，多くは10~30%の範囲にある。また，吸水率( $W_f$ )が1~15%の範囲にあり，1~5%程度のものが比較的多い。このように有効間隙率および吸水率が通常の岩石よりもかなり大きいのが火砕流高熔結部の一つの特徴でもある。

3) 一軸圧縮強さ( $q_u$ )は18~1,000kg/cm<sup>2</sup>の範囲にあり，多くは250~550kg/cm<sup>2</sup>を示し，コンクリート強度に近似した強度を示す。なお始良火砕流高熔結部とは大差がないように見受けられる。

4) 超音波伝播速度測定によるP波速度値( $V_P$ )は，1.2~4.0km/sの範囲にあり，とくに1.8~4.0km/sの範囲に多い。低熔結部ではサンプル数が少ないが0.55~1.2km/sの範囲にあり高熔結部にかなり劣っている。また，S波速度値( $V_S$ )は0.7~2.4km/sの範囲にある。

5) 弾性波速度から求めた動弾性係数( $E_D$ )は，70,000~340,000kg/cm<sup>2</sup>範囲内にあり，始良火砕流高熔結部でもこの範囲に含まれる。静弾性係数( $E_S$ )は，18,000~77,000kg/cm<sup>2</sup>の範囲を示し，始良高熔結部の12,000~40,000kg/cm<sup>2</sup>の集中する範囲と類似している。

上記の結果を用いて，図-23に密度と吸水率，図-24

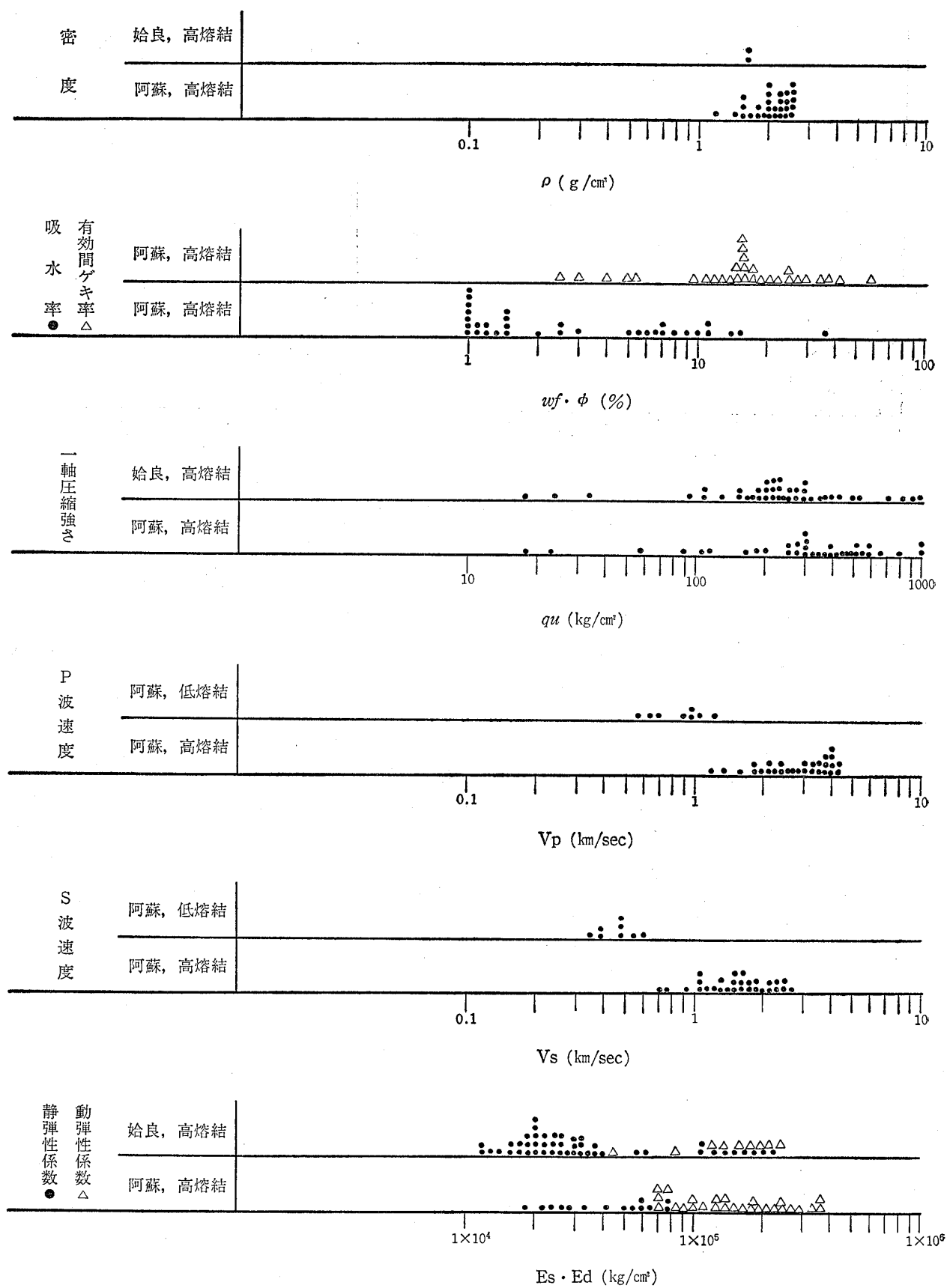


図-22 火砕流の岩石試験結果  
 Fig. 22 Physical properties of pyroclastic flow

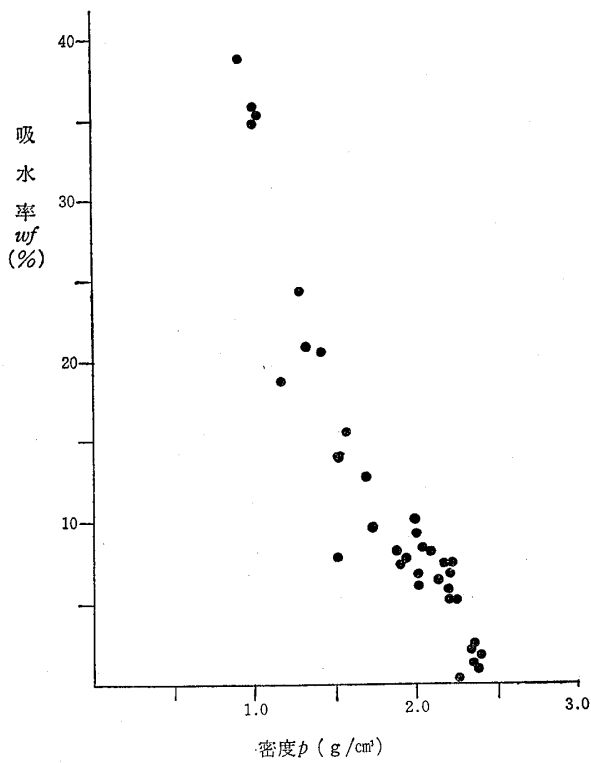


図-23 密度と吸水率の関係  
Fig. 23 Relation between bulk density and absorption ratio

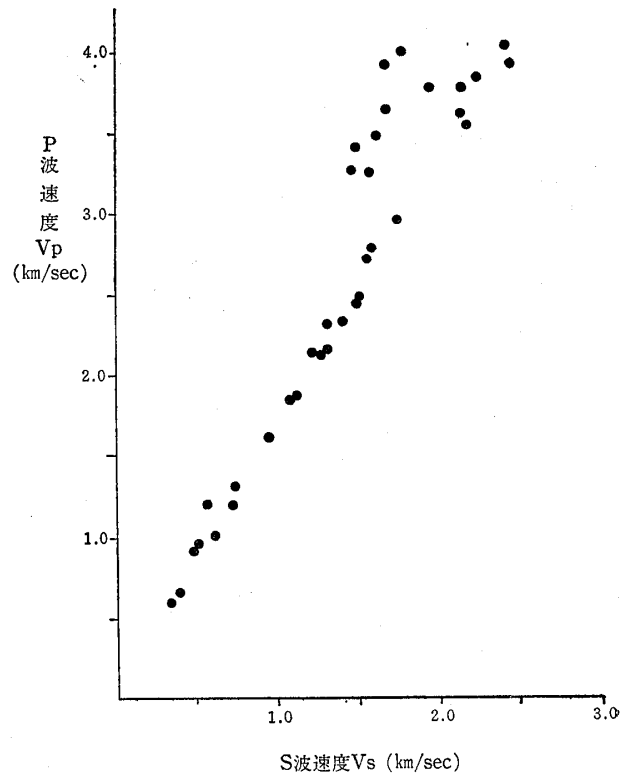


図-25 S波速度とP波速度の関係  
Fig. 25 Relation between S-wave velocity and P-wave velocity

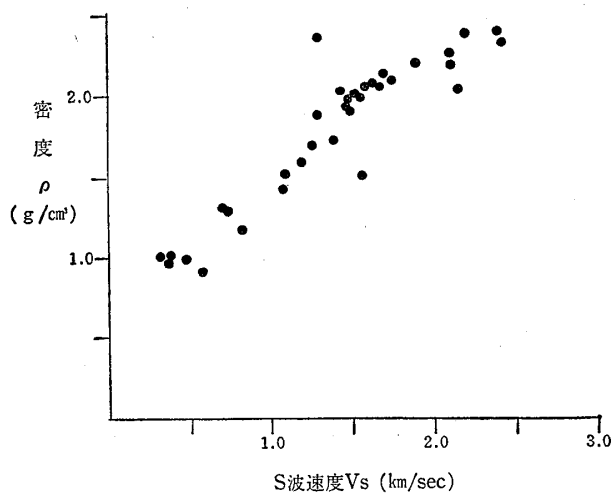


図-24 S波速度と密度の関係  
Fig. 24 Relation between S-wave velocity and bulk density

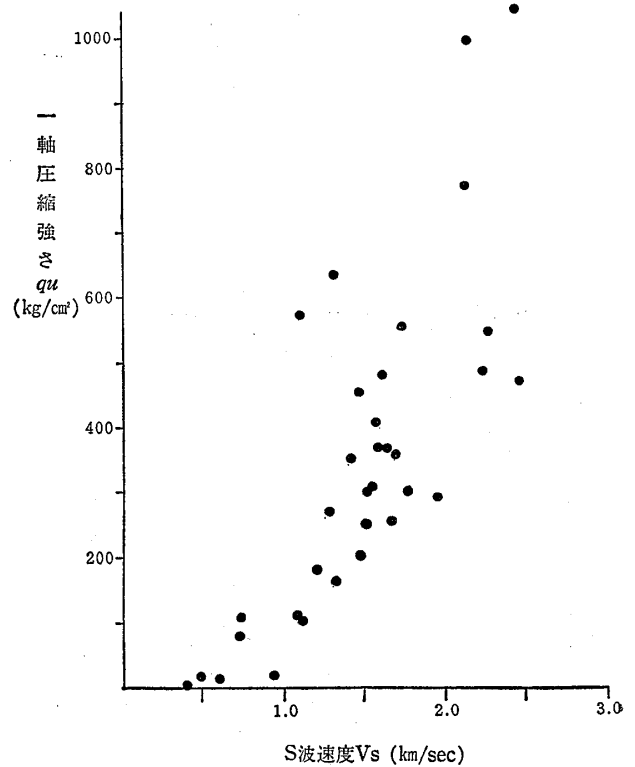


図-26 S波速度と一軸圧縮強さの関係  
Fig. 26 Relation between S-wave velocity and unconfined compressive strength

にS波速度と密度，図-25にS波速度とP波速度，図-26にS波速度と一軸圧縮強さおよび図-27に動弾性係数と一軸圧縮強さの関係をそれぞれ参考までに付す。

5-2-2 低熔結部および非熔結部

阿蘇火砕流堆積物の低熔結部および非熔結部の物理試験結果についてまとめる。

1) 低熔結部および非熔結部の粒度試験結果を図-28および図-29に示す。これによると，低熔結部と非熔結部とは粒度組成が異なり，非熔結部の方が粘土分やシルト分に富み，低熔結部では砂分や礫分に富んでいる。しかし両者は漸移的である。これらの図によると，非熔結部の曲線範囲内に“灰土”の曲線が包含され，灰土が風化の如何を問わず，粒度組成上は非熔結部の一部に類似して

いることは当然としても，低熔結部の粒度組成が鹿児島市周辺の“シラス”と類似していることは注目に値する。

2) 非熔結部の物理試験の結果では，自然含水比( $W_n$ )は15~70% (多くは35~65%)，液性限界( $W_L$ )は35~63%，塑性限界( $W_P$ )が22~40%の範囲内にあり，全体的には“灰土”よりも若干小さい側に範囲が寄っているも，“灰土”の多くはこの範囲内に含まれており，非熔結部の大部分が“灰土”類似の性質を有することが明らかである。また自然含水比( $W_n$ )が15~45%程度を示すものは低熔結部と類似の性質を有し，“シラス”に類似しているとみなしてよからう。

3) 非熔結部の比重，単位体積重量および間隙比は“灰土”と大差がない。

4) ボーリング孔内で実施した低圧LLTによる横方向載荷試験の資料を図-30に示す。この図によっても非熔結部と低熔結部とは，傾向としては明瞭な差異が認められるが漸移的である。

5) 上記のような傾向からみると，阿蘇火砕流堆積物については，低熔結部を鹿児島市周辺の“シラス”類似層，非熔結部を熊本県植木地方の“灰土”類似層として扱うことは土質工学および土木施工のうえでさして混乱はないように見受けられる。しかし，資料が必ずしも多くないので今後さらに資料を増して検討したい。

6 火砕流の透水性について

ここではおもに阿蘇火砕流堆積物のボーリング孔を利用して実施した現場透水試験(単一孔)の結果についてまとめる。

前述したように，阿蘇火砕流堆積物は，高熔結部，低熔結部および非熔結部とに区分できるが，このうち，非熔結部については水が粒子間を流動することになりダルシーの理論が適応されるも，高熔結部については，柱状節理，板状節理および亀裂などの割目を通じて水は流動する機構をとり，ダルシーの理論を直接当てはめること

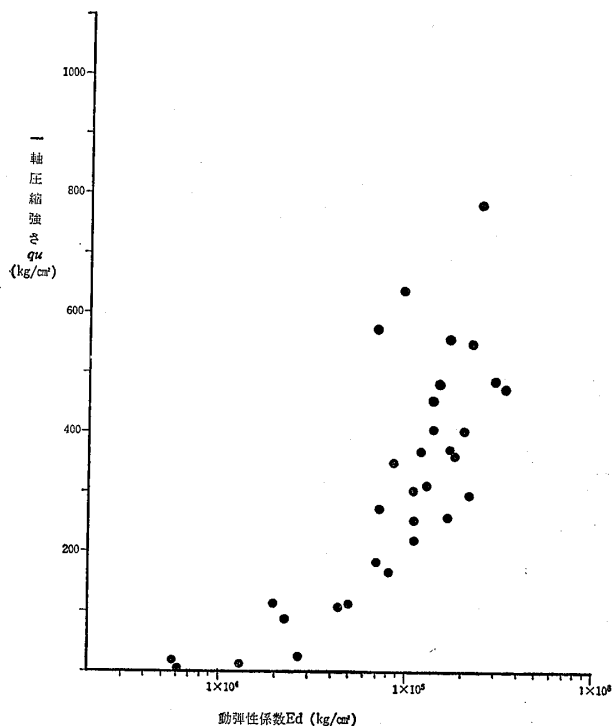


図-27 動弾性係数と一軸圧縮強さの関係  
Fig. 27 Relation between dynamic elastic modulus and unconfined compressive strength

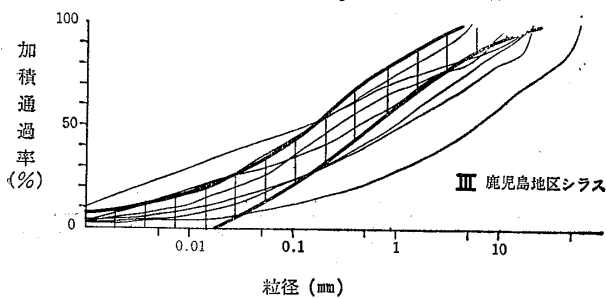


図-28 低熔結部の粒度加積曲線 (阿蘇火砕流)  
Fig. 28 Grain size accumulation curve of the low grade tuff (Aso volcano)

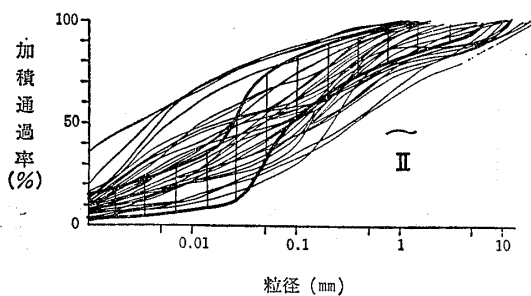


図-29 非熔結部の粒度加積曲線 (阿蘇火砕流)  
Fig. 29 Grain size accumulation curve of the non-welded tuff (Aso volcano)

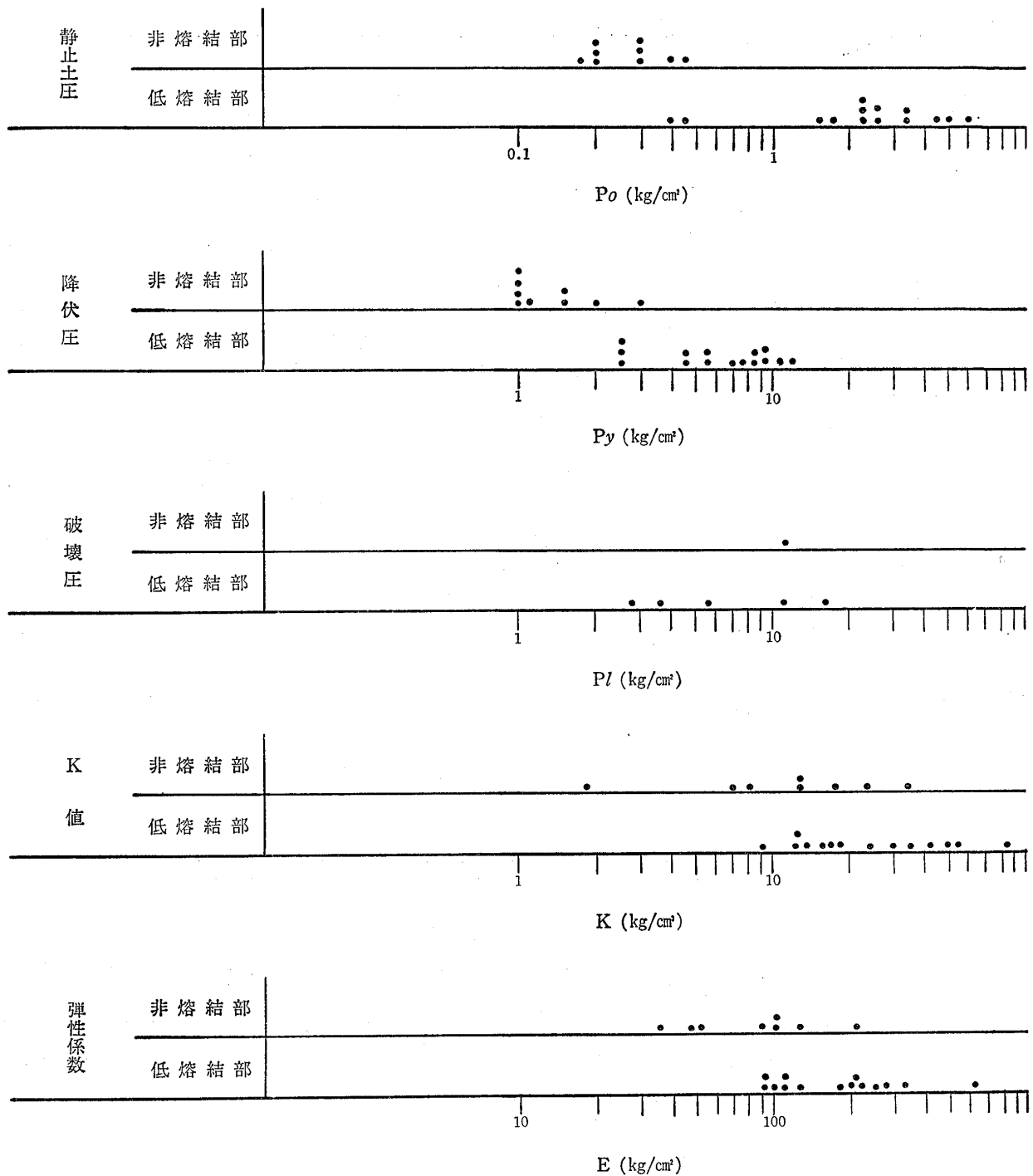


図-30 阿蘇火砕流堆積物の LLT 試験結果

Fig. 30 Results of LLT test for Aso volcano pyroclastic flow

は困難である。また低熔結部ではこの両者の性質を兼ね備えているが、相対的には非熔結の場合に準じてよいであろう。

したがって、現場透水試験の方法および透水係数の算出式は岩相に応じて適切なものを採用しなければならない。しかるに既存の試験資料では高熔結部を対象にした

圧入水頭方式のいわゆるルジオンテストが実施されたものが多く、上位の低熔結部や非熔結部についても同様の透水試験（パッカーは JFT 用を使用）が行なわれている。ここでは高熔結部については全水頭  $10\text{kg/cm}^2$  時のルジオン値と透水係数を採用し、低熔結部や非熔結部についてもこの条件に合わすことにし、定水位法や水位回

復法が行なわれているものについては別途整理することにした。なお、透水係数( $k$ )の算定式は試験方法毎に変えたが、その式は、岡本・福富・金光(1977)<sup>(54)</sup>に詳述してあるので参照されたい。

当社が実施した透水試験資料をまとめて一軸表示にして図-31に示す。この図によると、熔結部ではルジオン値が1~40の範囲に広がっており、多くは13~65に集中している。また、透水係数 $k$ も $10^{-6}$ ~ $10^{-3}$  cm/s オーダーにわたっており、 $10^{-4}$  cm/s オーダーのものが多し。高熔結部の場合、前述したように、開口気味の柱状節理が発達しており、ボーリング位置(透水区間)と遭遇する割目の量とその性状により透水性は異なるので、得られたルジオン値や透水係数は大きく異なることになる。そのことは後述するボーリング孔の掘進方向の違いによる透水性の多少でも実証されることである。

低熔結部ではルジオン値が5~95、透水係数 $k$ が $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$  cm/s オーダーの範囲にあり、高熔結部の場合と類似の傾向を示す。また非熔結部ルジオンテストの結果ではルジオン値1~40、透水係数 $k$ は $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$  cm/s のオーダーでかなり範囲がせばまっている。非熔結部における水位回復法や、定水位法による透水係数 $k$ は、 $10^{-6}$ ~ $10^{-5}$  cm/s オーダーの結果が多い。これがルジオンテ

ストの結果より小さい透水係数となっているのは試験時の注水圧がルジオンテストでは水位回復法などに較べ10倍以上大きいこと、試験位置が異なること、試験方法や透水係数算定式が異なることなど、いくつかの要因があり一概には比較しがたい。

図-31には、注入加圧過程で、P-Q曲線上における変曲点、すなわち限界圧が確認される資料をも付してある。限界圧は、高熔結部で6.8~13.0 kg/cm<sup>2</sup> (最大加圧12.0~15.0 kg/cm<sup>2</sup>)、低熔結部で2.5~7.0 kg/cm<sup>2</sup>、非熔結部で0.5~9.0 kg/cm<sup>2</sup> (多くは3.0~6.0 kg/cm<sup>2</sup>) の範囲内で発生している。これら限界圧を伴うP-Q曲線は、図-32(高熔結部)、図-33(低熔結部)および図-34(非熔結部)に示す。限界圧は割目の接触圧や割目の充填物質、土粒子の強さが水圧と平衡状態をなすものであるので、この圧力をうわまわると割目面が圧縮されて変形し、割目が広がったり、あるいは物質が破壊することになり、その強さは割目両側の岩石の強さや、物質の内容とその土構造によって異なる。したがって限界圧は動水圧を与える際の一種のパイピング現象の発生を示唆することになる。

図-35は高熔結部における垂直ボーリング孔と斜めボーリング孔でのルジオン試験結果の比較図である。試験

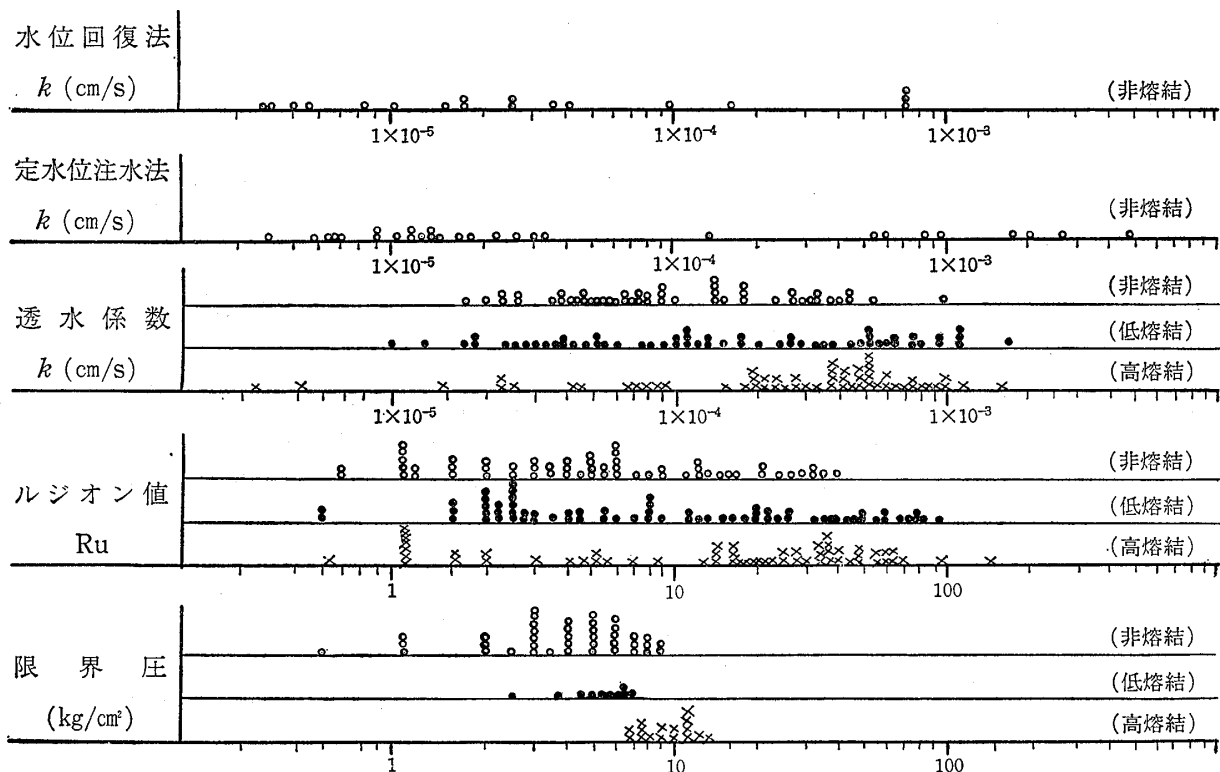


図-31 阿蘇火砕流堆積物の透水試験結果

Fig. 31 Results of permeability test for Aso volcano pyroclastic flow



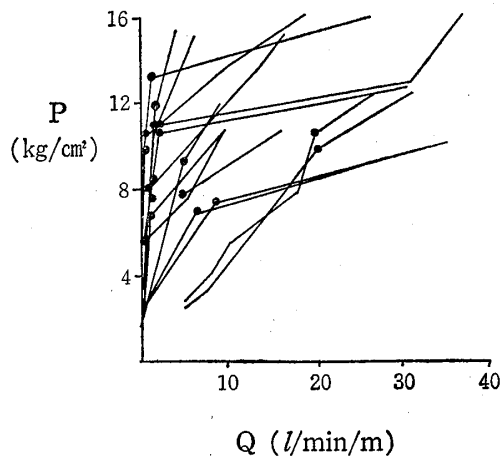


図-32 高熔結部の限界圧  
Fig. 32 Critical pressure in permeability test for the high welded tuff

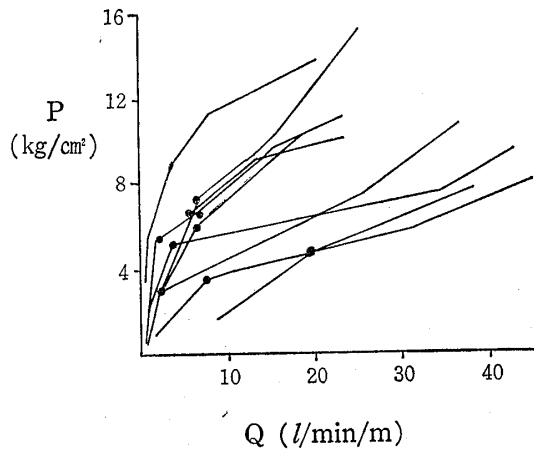


図-33 低熔結部の限界圧  
Fig. 33 Critical pressure in permeability test for low welded tuff

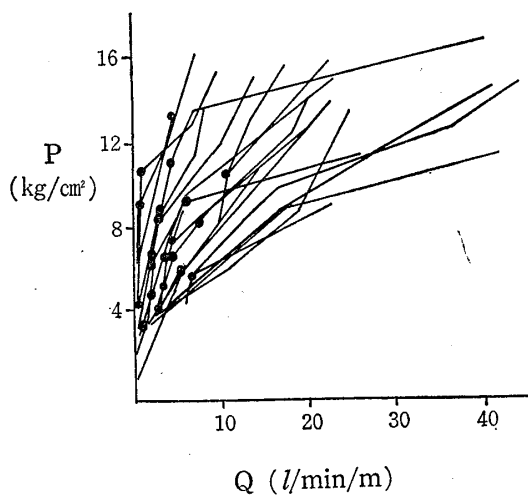


図-34 非熔結部の限界圧  
Fig. 34 Critical pressure in permeability test for non-welded tuff

地点の火砕流高熔結部には1~4m間隔ではほぼ垂直に近い傾斜の柱状節理が発達しているため、垂直ボーリングではこの縦目をきる確率が少ないと考えられたため、60°傾斜のボーリングを近接させて掘進し、透水性を比較した一例である。なお透水区間はいずれも5m間隔である。ボーリング地点が若干ずれているためその間の岩盤状況や割目の性状などが必ずしも同条件下にあるとはいえないが、図-35では斜めボーリング孔のルジオン値が垂直ボーリング孔より大きくなっている区間が多い。したがって、火砕流高熔結の場合はとくに熔結時に発生した節理等の方向、間隔等を勘案して試験孔の方向を選定することが重要である。

図-36は、ボーリング掘進方法を清水掘と無水掘とし、それぞれ各種現場透水試験を実施して透水係数を比較した例(岡本ら<sup>(54)</sup>1977)である。これは火山性の各々粒度組成が異なる凝灰岩(N値20~50以上)を対象に行なったものであるが、結果的には清水掘孔での透水係数 $k$ が、無水掘孔の場合より0.5~1cm/sオーダー大きい

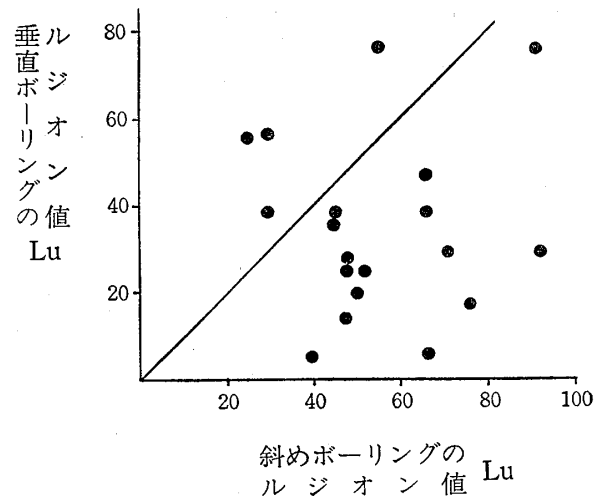
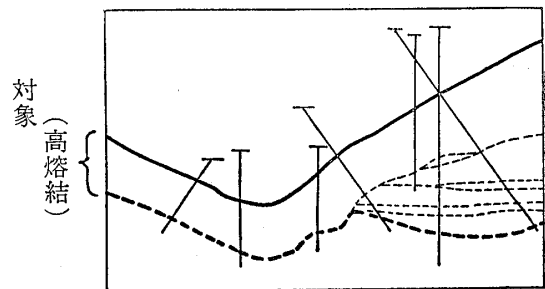


図-35 ボーリング孔の方向とルジオン値(阿蘇火砕流)  
Fig. 35 Lugion value related to the direction of borehole (Aso volcano pyroclastic flow)

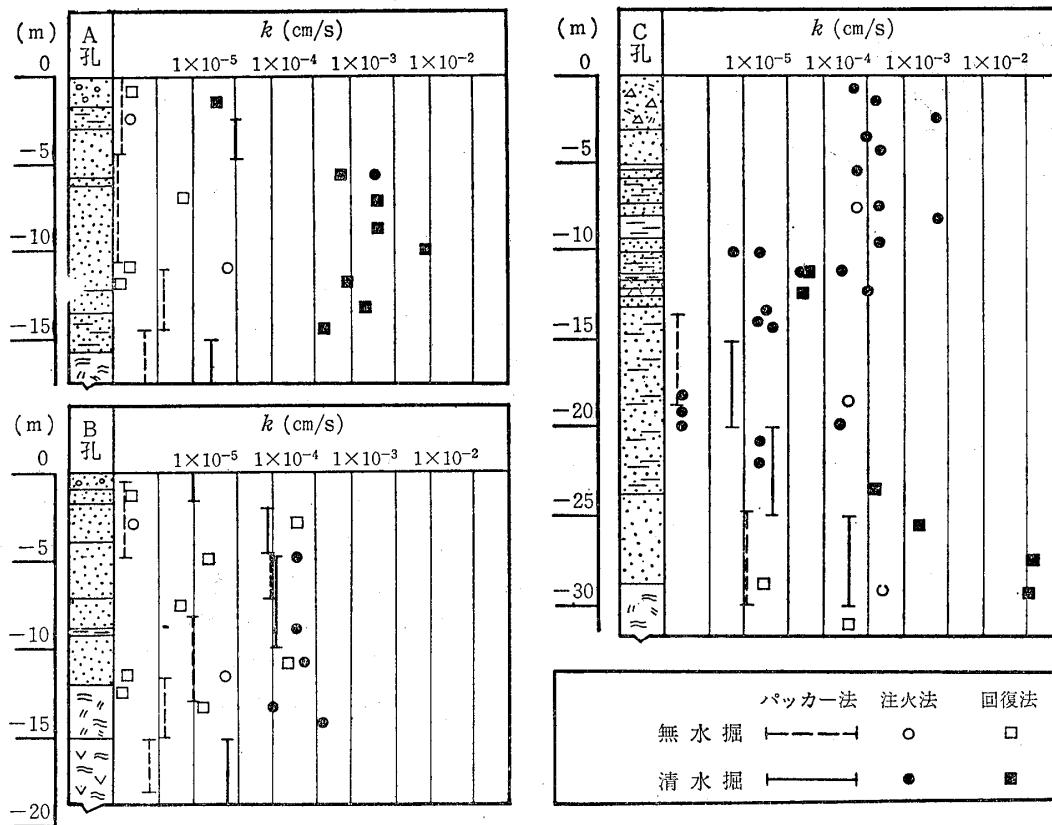


図-36 清水掘孔と無水掘孔の透水係数の比較 (岡本, 福富, 金光; 1977)  
 Fig 36 Comparison of coefficient of permeability in the borehole drilled using fresh circulating water and in the borehole drilled not using circulating water

値となっており、火砕流の低熔結部や非熔結部における透水性把握を目的としたボーリングは清水掘によるべきことを裏づけているといえよう。このことは透水性に限らず、地下水位測定、採水孔およびグラウト孔などの水関連の調査や工事においても適応されるべき事項である。

7 火砕流地帯における土木地質的問題点

火砕流分布域では分布、地質構成、強度的性質、透水性および地下水状況などの点で土木地質的に種々の難しい問題点を有している。

ここでは、ダム地点を選定したり、候補地に関する地質調査等において留意すべき問題について実例をもとに述べる。

図-2の火砕流分布図をみると、阿蘇火砕流堆積物や始良火砕流堆積物の分布域には既設のダムが他の岩石区に比べて少ないのがわかる。また、現在検討中のダム計画地点は少なくないが火砕流地帯ではほとんどが具体的な施工に及んでいないのが実情である。そのおもな理由は地質条件に難しい問題が存在するからであるとみて過言ではない。したがって、ここではダム地点における土

木地質的な問題点を要約して述べる。

火砕流堆積物が分布するダム地点は、地質構成上種々のケースがあり、それぞれ問題点異なるし、問題点の重要度も異なる。

図-37は、問題が比較的少ない基盤がかなり深部にあり、その上位に未固結な砂礫層、高熔結の火砕流（上下は厚さ1m程度の低熔結部を伴い割目がないため不透水層を形成し、下位の砂礫層は被圧水帯水層となっている）、火山性の碎屑物が各種細互層する低固結の堆積岩、非熔結の火砕流が順次重なっている。この地点での主要な問題点は、支持層とすべき堆積岩が強度的に不安がありダムタイプが決め難いこと、右岸地山の地下水位が長区間低いためダムアップにより非熔結部軽石流における急激な動水勾配をつけることは漏水、パイピング発生の誘因となるため、堆積岩の上面より高いダムは難しい。また、堆積岩の軽石質細粒子の一部および細クラックでパイピングの懸念があること、被圧水があること、湛水域内の漏水防止および非熔結部斜面の安定性などに検討を要する。さらにまた、流域の崩壊土の堆砂が多いことなどが問題である。しかし、規模次第ではダムの構築は充分可能と判断される。

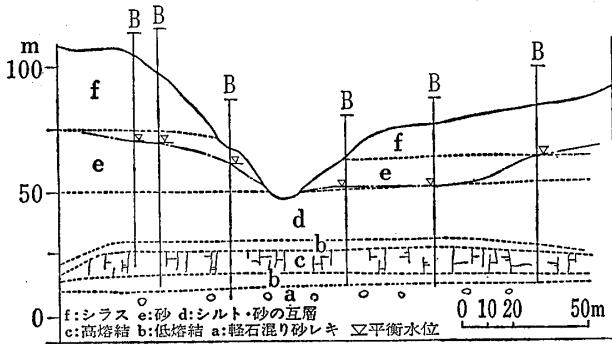


図-37 Aダムサイトの地質断面  
Fig. 37 Geological section of A dam-site

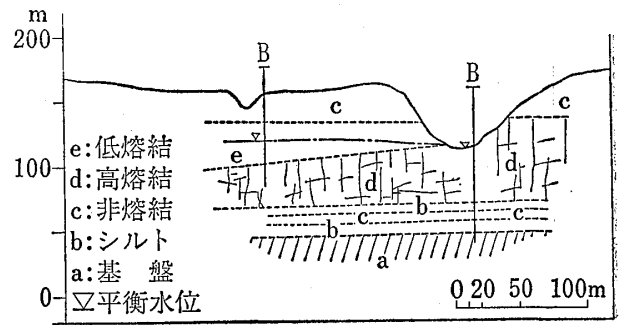


図-38 Bダムサイトの地質断面  
Fig. 38 Geological section of B dam-site

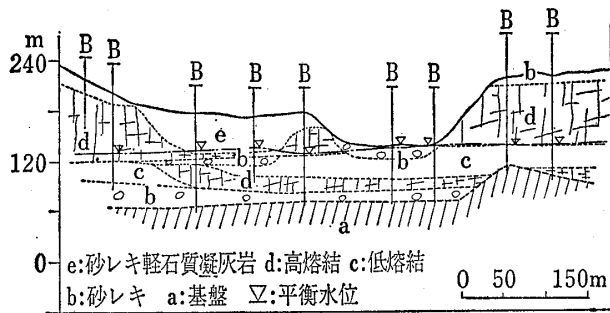


図-39 Cダムサイトの地質断面  
Fig. 39 Geological section of C dam-site

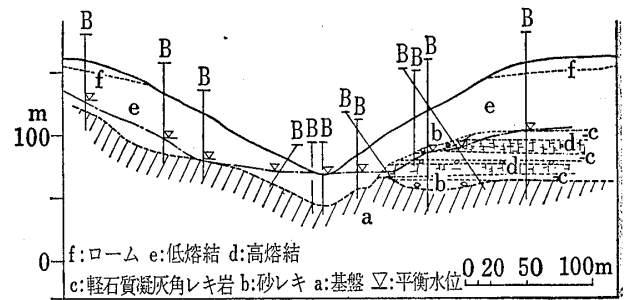


図-40 Dダムサイトの地質断面 (岡本; 1973)  
Fig. 40 Geological section of D dam-site

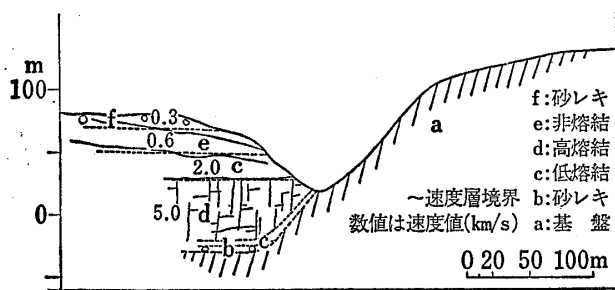


図-41 Eダムサイトの地質断面  
Fig. 41 Geological section of E dam-site

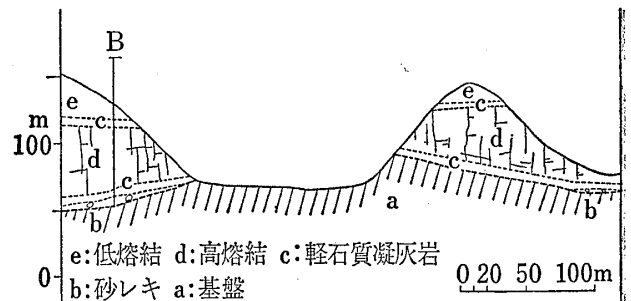


図-42 Fダムサイトの地質断面  
Fig. 42 Geological section of F dam-site

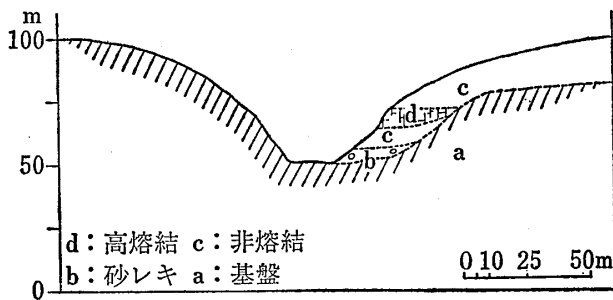


図-43 Gダムサイトの地質断面  
Fig. 43 Geological section of G dam-site

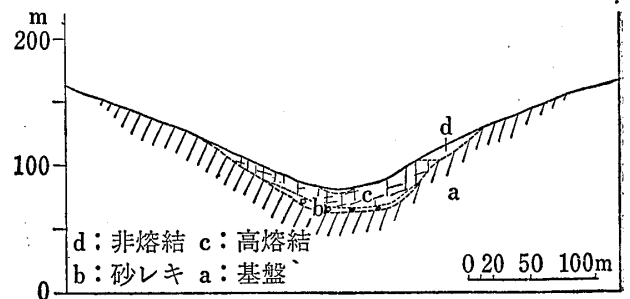


図-44 Hダムサイトの地質断面  
Fig. 44 Geological section of H dam-site

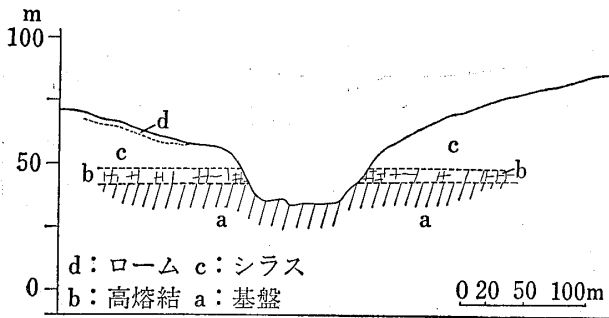


図-45 Iダムサイトの地質断面  
Fig. 45 Geological section of I dam-site

図-38は、基盤の堆積岩が深い位置にあり、これが不透水層をなすがその分布形状は不明である。この上位に柱状節理の発達した高熔結の火砕流が厚く重畳し、その上部は低熔結および非熔結の火砕流となっている。この地点での問題点は、左岸側の低熔結部の強度が不安であること、地下水位が両岸とも低下しており貯水後の動水勾配発生に伴う安定性への影響の漏水対策工法の検討、支持層である高熔結部の割目沿いの透水性が大きく縦目に対する止水工が大がかりとなること、湛水域内での漏水懸念などである。

図-39は、結晶片岩類が比較的深い位置にあり、その上位に幅広い旧河床部の砂礫層(凝灰質堆積岩を伴う)があり、その上位は高熔結の火砕流と低熔結の火砕流が交互に3~4層重なり合い、各層の間には礫層を含む低固結の堆積岩が挟在している。この地点での問題点は、地山の地下水位が現河川の水位に近くて低いこと、左岸側の非熔結部が厚く強度対策と止水対策が困難であること、各火砕流間に挟在する砂礫層や堆積岩の透水性とその止水工法を入念に検討する必要があること、3~4回の噴火活動の噴出物が複雑に重なり合っており、それぞれの強度特性や透水性が異なるため、支持層の判断がつけ難く、地質構成を細部にわたり把握する必要があること、支持層としては問題がない高熔結部火砕流に開口気味の割目があること、左岸非熔結部における湛水後のパイピング発生の懸念などである。

図-40は、基盤の中生層が比較的浅く左岸ではその上面が現地形なりに高まっている。右岸ではその基盤上に火山性の軽石層や粒度の異なる種々の凝灰岩から成る薄互層が堆積しており、さらにその上を一様に高熔結および低熔結の火砕流が覆っている。地下水位は基盤岩およびその上の互層を難透水層としてその上面付近にあり、一応現地形なりに高まっているが、右岸側でやや低い。この地点での問題点は、右岸の堆積岩の強度と透水性が

単層毎に異なること、その対策工法の検討、パイピングの有無検討、右岸尾根部の漏水対策、高熔結部の開口した縦方向の柱状節理の止水対策などである。

図-41は、基盤は中生層からなり、右岸側ではこの基盤からなっており比較的問題は少ない(尾根部の風化変質部がやや厚い)が、左岸側で基盤が深く落ち込み、その上面に旧河床の砂礫層が薄く発達し、その上位は火砕流堆積層が覆っている。この地点における問題点はすべて左岸側にあり、旧河床の砂礫層の分布域と性状(透水性、止水工法)を明確にすること、左岸側の地山の地下水水位を正確に把握し、動水勾配の程度、隣の水系への漏水の有無を検討すること、低熔結部の支持層としての強度の把握をすることにより可能なダム高を地形・地質的に検討すること、湛水域での漏水懸念の検討、堆砂の実態把握、高熔結部の透水性把握などが必要である。

図-42は、河床部付近のレベルには基盤岩の古生層が分布し、その上位には旧河床の砂礫もしくは低固結の碎屑岩が堆積し、さらにその上位を高熔結度の火砕流が厚く覆っている例である。この地点では基盤岩および高熔結度の火砕流は、支持層としてとくに大きな問題はない。問題点としては、基盤岩上に堆積する旧砂礫層や低周結堆積岩層の正確な分布と性状を明らかにすること、両斜面における地山の地下水水位を明確にすること、高熔結部の割目に沿うゆるみの範囲と透水性を明らかにすること、湛水域を含めて近接流域への漏水の有無を明確にすることなどである。

図-43は、基盤岩の古第三紀層が両側山体を構成しているが、右岸側の斜面にかなりの厚さで旧河床砂礫層や火砕流がへばりついて残っている例である。この地点では、右岸部の火砕流を掘削して古第三紀層に直接ダムを取付けるか、高熔結部を伴うことからこの高熔結火砕流部を残しこれを支持層とするダムタイプとするかが最大の問題点である。したがって、旧河床砂礫層および火砕流全般について強度の実態、透水性、斜面の安定性および岩盤処理工法などに関して詳細を把握する必要がある。

図-44は、左右両岸側に基盤岩の中生層が分布するが、河床付近には高熔結度の火砕流が比較的薄く堆積し、基盤岩と火砕流との間には旧河床の砂礫層が薄く挟在する例である。

したがって、この地点では火砕流を掘削除去して支持層を基盤岩に置くか、火砕流を支持層として火砕流および旧河床砂礫層を注入工法等により止水するか、あるいは連続した止水壁を局部的に設けるか(カットオフ)を検討することが最大の課題である。したがって、旧河床砂礫層および火砕流の分布状態を正確に把握し、その強度

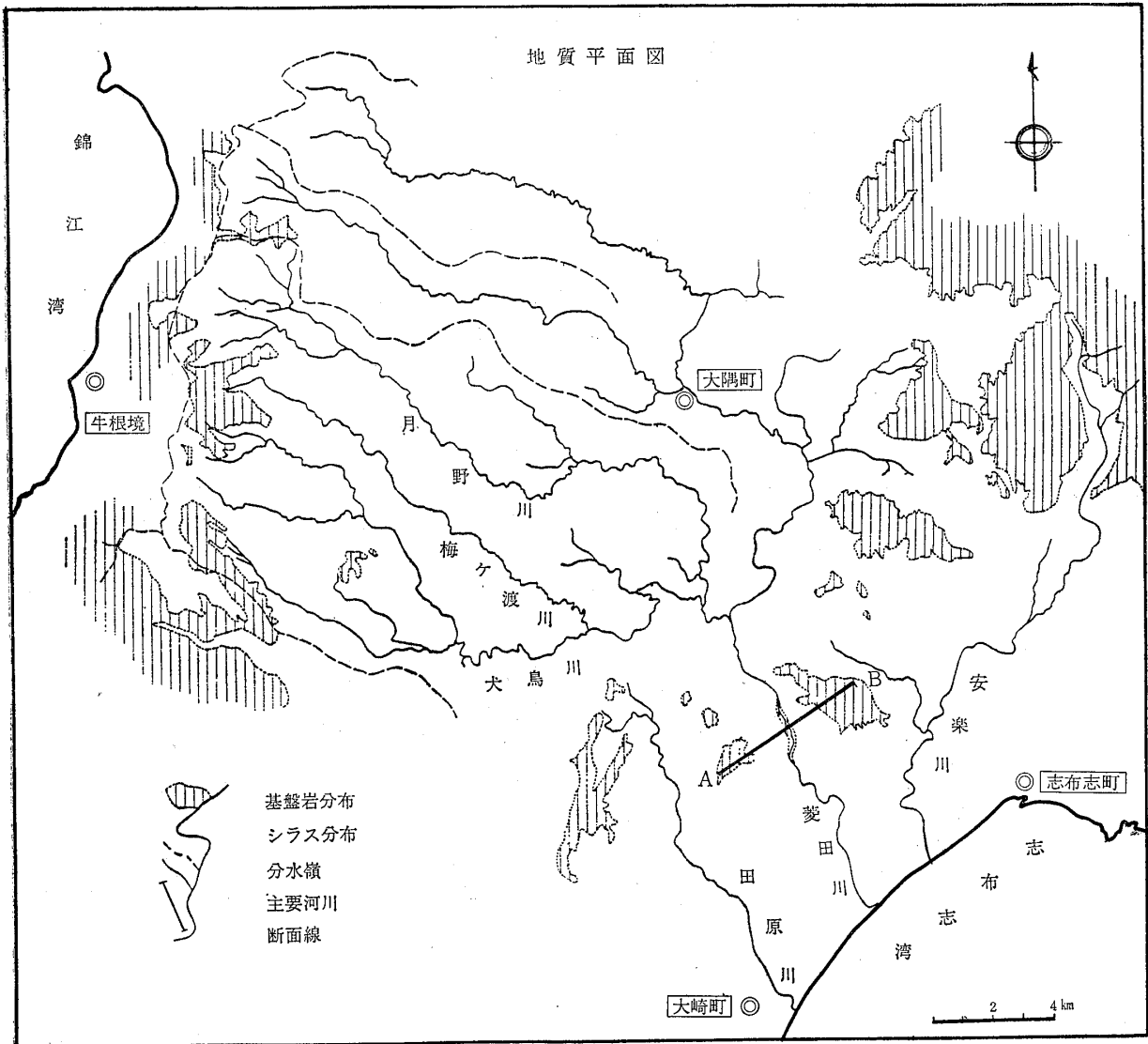
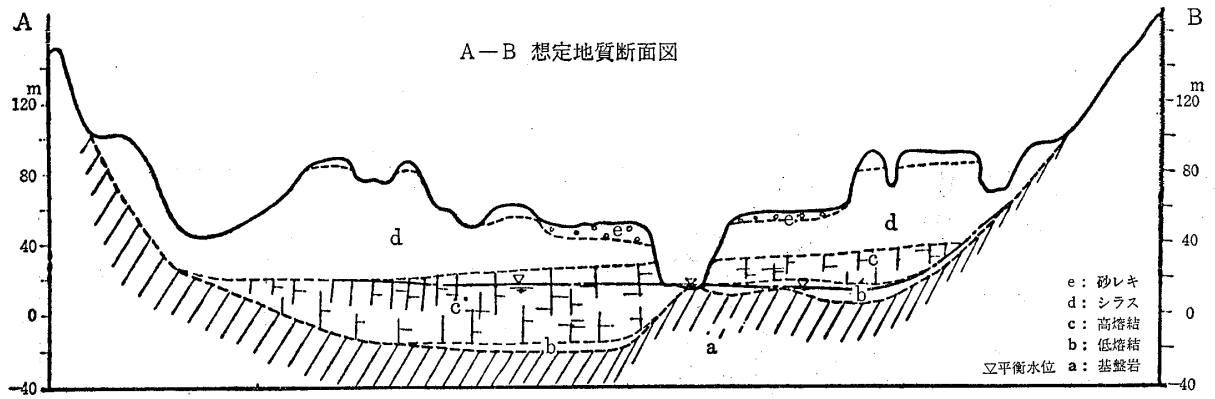
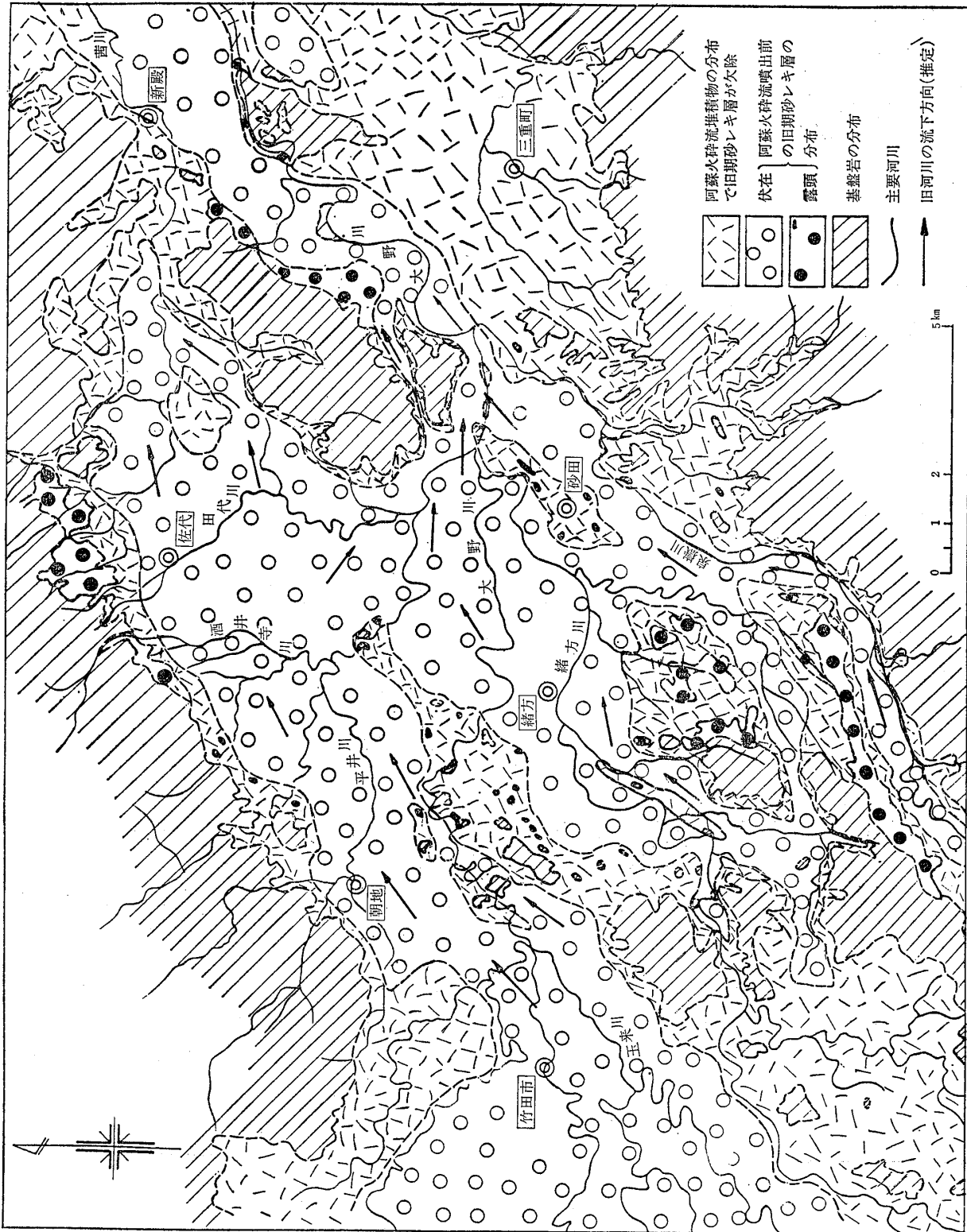
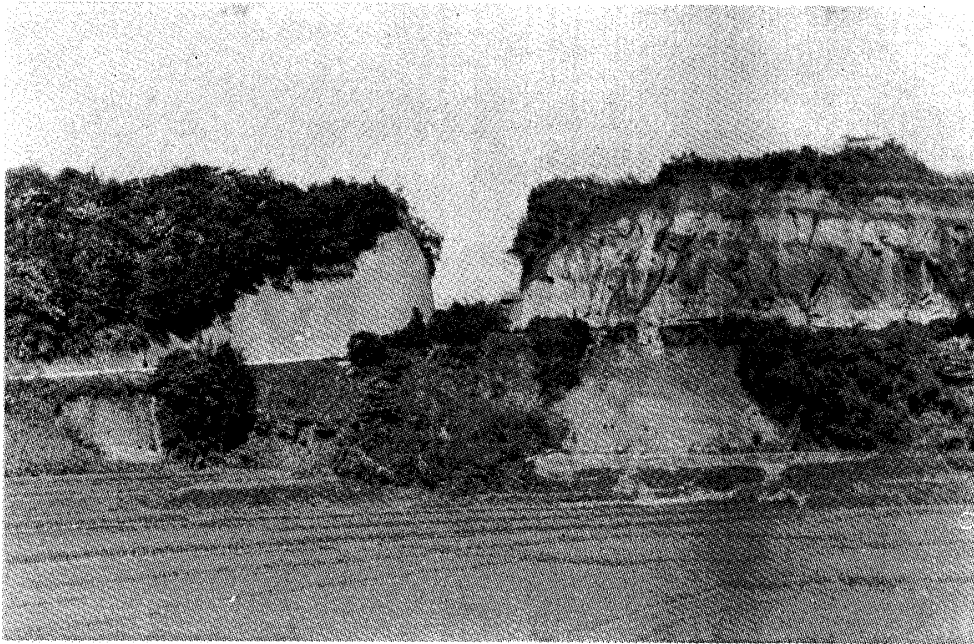


図-46 始良火砕流地帯における例  
 Fig. 46 An example in Aira volcano pyroclastic flow area

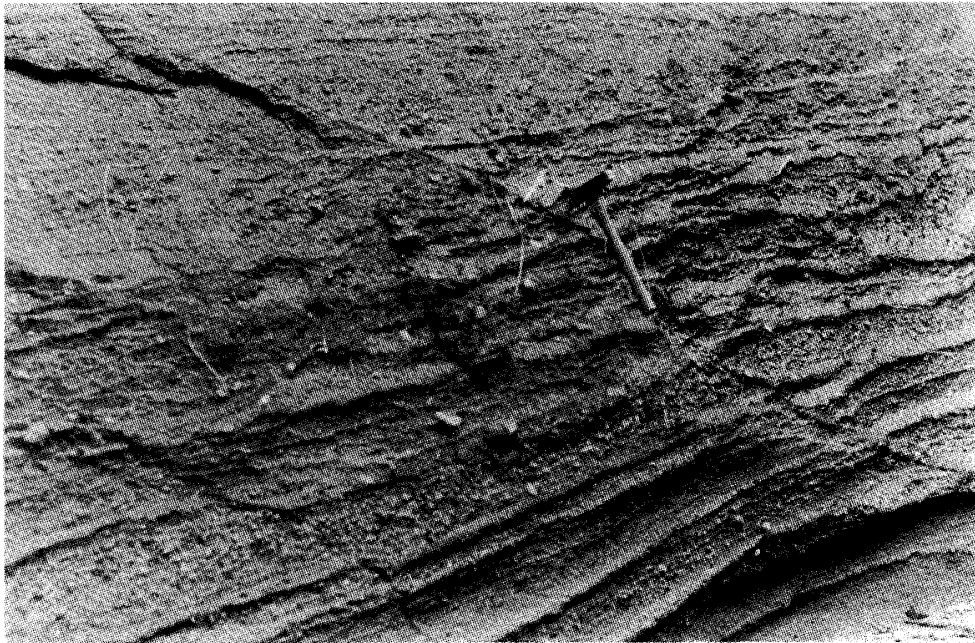


図一47 阿蘇火砕流地帯における例  
Fig. 47 An example in Aso volcanic pyroclastic flow area



写真一 鹿児島市伊敷町付近に見られる始良火砕流中の高熔結～非熔結の“シラス”

Photo 1 “Shirasu” heighly welded and non-welded tuff observed at Ijiki-machi, Kagoshima city.



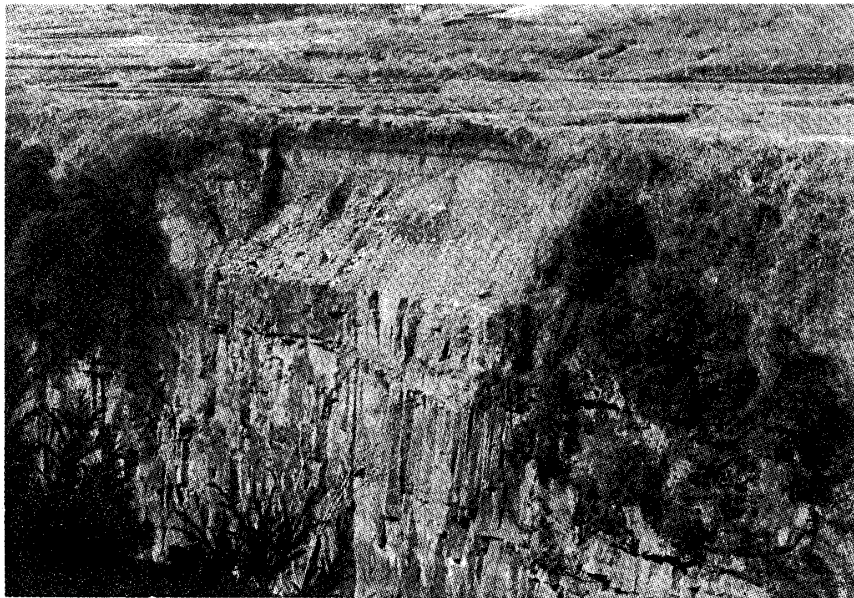
写真二 鹿児島市川上町付近に見られる“二次シラス”

Photo 2 “Secondary Shirasu” at Kawakami-machi, Kagoshima city.



写真一 3 万之瀬川上流付近に見られる始良火砕流中のガリ浸食

Photo 3 Errosion type of Aira volcano pyroclastic flow observed at upper part of the Bannose River



写真一 4 奥岳川上流付近の阿蘇火砕流と上層の段丘砂レキ層

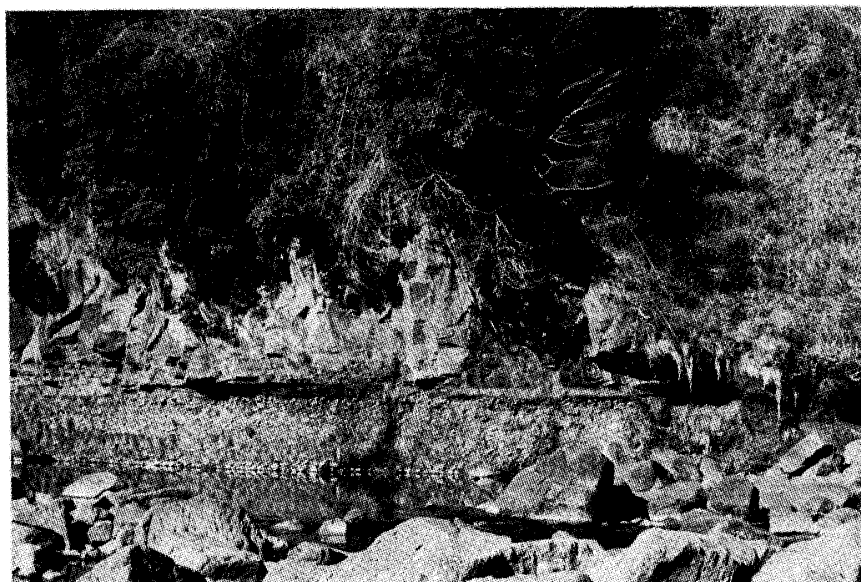
Photo 4 Aso volcano pyroclastic flow and overlaid terrace deposit at upper part of the Okudake River





写真一5 大野川上流域付近の阿蘇火砕流の非熔結部

Photo 5 Non-welded part in Aso volcano pyroclastic flow at upper part of the Oono River.



写真一6 大野川水系牧口付近の阿蘇火砕流と下層の砂レキ層

Photo 6 Terrace deposit and overlaid Aso volcano pyroclastic flow near Makiguchi, the Oono River.



と透水性を入念に調査すると同時に、グラウト等による岩盤処理の適応性を確認することが重要と考えられる。

図—45は、新第三紀層の低固結岩層を基盤とし、その上位に薄い高熔結の火砕流と厚い非熔結の火砕流が重なっている例である。この地点における問題点は、基盤岩が軟質で、かつかなりの透水性を有すると推定されるため、その強度特性、透水性およびパイピングの懸念を検討すること、基盤岩と火砕流の境界を山体芯部にいたるまで正確にすること、両斜面における地下水位を明確にし、動水勾配発生や漏水の有無を検討すること、火砕流のどの位置まで貯水しうるかを検討すること、非熔結部の斜面の安定性を検討すること、湛水域内斜面（非熔結部）について漏水対策のための表面遮水工法の必要性を検討することなどである。

火砕流地帯におけるダムの問題点については、すでに筆者ら<sup>(56)</sup>（1971）が述べたとおりであるが、上記の例でみるように、火砕流分布域におけるダム地点の問題点もしくは留意点は、

- 1) 火砕流の分布状況、とくに基盤岩との層位関係を明確にすることによって火砕流噴出前の地形を詳細に把握する必要があること。
- 2) 基盤岩と火砕流との間には、未固結な砂礫層が挟在することも多いが、その分布、性状、透水性および強度特性を明確にすること。
- 3) 噴出時期の異なる火砕流が複数枚重なっている場合はその間に火山碎屑物やその他堆積層が挟在することがあるため、地質層序、分布、性状、強度特性、透水性、パイピング可能性および処理対策等について入念に調査検討すること。
- 4) 火砕流を高熔結部、低熔結部および非熔結部などに分類し、各層の分布、割目の状況（目の方向、間隔、充填物、開口もしくは緩みなど）、強度特性、透水性および貯水に伴うパイピング（とくに低熔結部および非熔結部において）などについて把握すること。
- 5) 最も重要な点は、貯水位との関係で地山の地下水位（静水位）の分布を解明することであり、清水掘等により正確な地下水位を把握する必要がある。また、不透水層や難透水層が存在する場合、地層毎に水頭が異なることがあるので、各地層毎に水位を把握することが肝要である。しばしば平衡水位と混同することがあり、また被圧水の水頭が高い場合には、きめ細かい調査が必要である。さらに透水試験を実施する際には、土粒子間流動の形態をとるものか地層面か割目を通じて水が流動する形態をとるものかにより試験方法を適正に選択する必要がある。また、圧入水頭方式の透水試験を行なう場合には

加圧過程で限界圧が得られるように加圧段階を考慮することが肝要である。

6) 貯水域内を含めて広範囲にわたって左右山体の地質構成ならびに地山の地下水位を把握し、隣接流域などへの漏水の有無を検討すること（必要に応じ表面遮水の可能性を含む）。

7) 湛水域内斜面の安定性を検討すること。

8) 火砕流は崩壊や侵食をうけやすく生産土量が多いため堆砂量の程度を検討すること。

9) 周辺の水源や井戸との関連を明らかにすることなどである。

なお、火砕流地帯においては、図—46および図—47に示すように、広範囲にかつ厚く火砕流堆積物が基盤岩類を覆っているが、地表における基盤岩の分布や旧河床砂礫層の分布状況から旧河川の位置、流路ほど火砕流堆積以前の旧地形の大要を推察することは、湛水域内での漏水の懸念の解明やより安定的なダム位置の選定に役立つであろう。また将来地下水涵養を目的とする地下ダムを検討する場合にも有効であると考えられる。

## 8 あとがき

九州地方に分布する数多くの火山噴出物のうち、本文では始良火砕流堆積物と阿蘇火砕流堆積物の一部を対象にして、その工学的性質とダム地点における問題点を取りまとめた。

いわゆるシラスについては既存のボーリング資料と土質試験結果を用いて、深度毎にN値、自然含水比、比重および粒度組成を統計的に求めた。その平均値およびモードの深さ方向の分布から“シラス”地帯における風化の厚さと物理的性質、地域や“シラス”の種類による性質の相異点などがおおよそ明らかになった。

阿蘇火砕流堆積物については各種岩石試験結果やボーリング孔を利用したLLT測定結果などから、高熔結部、低熔結部および非熔結部についてのある程度の物理的性質を明らかにした。

また、ボーリング孔を利用した現場透水試験データから、おもに阿蘇火砕流堆積物の透水係数を岩種毎にまとめその傾向を明らかにし、併せて注入加圧が岩種によって異なること、透水係数が垂直ボーリング孔か斜めボーリング孔かで異なることやボーリング掘進が清水掘か無水掘かで異なることなどについて明らかにした。

火砕流地帯においてダムを計画する場合、地質構成が複雑で、強度的にみても透水性の点からみても今後入念に調査検討して解明すべき多くの問題点があることを実例をあげて指摘した。

最後に、今後さらに資料数を増して、“シラス”や阿蘇火砕流堆積物の性質を実用的な立場から解明するとともに、他の火山噴出物についても同様の研究を進め、地域社会の発展のために寄与したいと考える。

### 参 考 文 献

- (1) 千藤忠昌(1965)：阿蘇火山地質見学案内 日本地質教育学会発行
- (2) 熊本県高等学校地学教育研究会(1970)：熊本県地質巡検ガイドブックⅥ阿蘇地方
- (3) 太田良平(1964)：シラス研究序説 地球科学第72号
- (4) 波多江信広(1967)：鹿児島県の地質—特にシラスについて 九州地質調査業協会講演集
- (5) KOTO, BUNJIRO (1916)：The great eruption of Sakura-jima in 1914, Jour. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, Vol. 38. No. 3
- (6) 山口謙次(1938)：鹿児島湾の周辺地域における軽石類の岩石学的研究 地質学雑誌 45巻 542号
- (7) MATSUMOTO, T. (1943)：The Four Gigantic Caldera Volcanoes of Kyushu. Jap. Jour. Geol. Geogr. Vol. 19, Special number.
- (8) TANEDA, S. • MIYACHI, S. • NISHIHARA, M. (1957)：Geological and petrological studies of the “Shirasu” in South Kyushu, Japan, Part 3, The “Shirasu” in the Tsuruda-Hiwaki-Korimoto area, north of Kagoshima City, Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ. Series D, Vol. 6, No. 2
- (9) 沢村孝之助(1964)：5万分の1地質図幅「垂水」及び説明書 地質調査所
- (10) 湊・勝井(1957)：鹿児島県奄水・磯附近の地質 地質学雑誌 63巻 740号
- (11) 荒牧・宇井(1966)：阿多火砕流と阿多カルデラ 地質学雑誌 72巻 7号
- (12) 種子田・入佐 (1966)：南大隅地方の始良・阿多両pyroclastics について 九州大学理学部島原火山温泉研究所研究報告 第2号
- (13) 大木・早坂(1970)：鹿児島市北部地域における第四系の層序 鹿児島大学理学部紀要 第3号
- (14) 小林・岩松・露木(1977)：始良カルデラ壁の火山地質と山くずれ災害 鹿児島大学理学部紀要 第10号
- (15) 土質工学会編(1969)：土質試験法
- (16) 山内豊聡ら (1974)：シラスの液化化とその対策工法 自然災害特別研究研究成果 No. A, 49-1
- (17) 土質工学会編(1972)：土質調査法
- (18) 猿山, 初倉, 菅原(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回土質工学研究発表会
- (19) 土質工学会編(1974)：日本の特殊土
- (20) 山内豊聡(1977)：シラス斜面崩壊について 九州地質調査業協会講演集
- (21) 春山元寿(1971)：物理的性質を考慮したシラスの分類について 土木学会第26回年次学術講演会講演概要集
- (22) 難波・春山(1975)：簡便な原位置試験法によるシラスの判別分類法 土と基礎 Vol. 23 No. 2
- (23) 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 16巻 2号
- (24) 鹿児島県シラス対策研究会(1975)：シラス地帯における土木設計施工指針
- (25) 土質工学会編(1974)：日本の特殊土
- (26) 伊木常誠(1901)：阿蘇火山地質調査報文 地震予報
- (27) MATUMOTO, H. (1963)：Petrological Study on Rocks from Aso Volcano, Kumamoto Jour. Ser. B, sec 1 Vol. 5
- (28) 小野晃司(1965)：阿蘇カルデラ東部の地質, 地質学雑誌 71巻 842号
- (29) 小野・曾屋 (1968)：阿蘇カルデラの火砕流の層序(演旨) 地質学雑誌 74巻 2号
- (30) 渡辺・小野(1969)：阿蘇カルデラ西側 大峰付近の地質 地質学雑誌 75巻 7号
- (31) 斎藤林次(1978)：熊本市およびその周辺の地下地質 熊本大学教養部紀要 自然科学編 第13号
- (32) 有明海研究グループ(1965)：有明・不知火海域の第四系—とくに有明軟弱粘土について—地団研専報 第11号
- (33) 日刊工業新聞社(1971)：施工技術, 日本の特殊土—その基本的性質から設計・施工まで—Vol. 4, No. 6 特別増大号
- (34) 九州地方建設局(1972)：阿蘇火山灰土文献集
- (35) 郷原保真(1965)：始良火山の活動期 地球科学 76
- (36) 荒牧重雄(1965)：始良カルデラ入戸火砕流の<sup>14</sup>C時代 地球科学 80
- (37) 一色直記ら(1965)：放射性炭素<sup>14</sup>Cによる年代測定 地質ニュース No. 133, 26
- (38) 横山勝三：始良カルデラ入戸火砕流の<sup>14</sup>C年代 地球科学 25巻 1号
- (39) 荒牧・宇井(1965)：阿多火砕流の<sup>14</sup>C時代 地球科学 80
- (40) 種子田・宮城(1971)：加久藤火砕流(上部層)の<sup>14</sup>C年代 地質学雑誌 77巻 6号
- (41) 大庭 昇(1973)：シラスの微細構造と物理化学的特性 日刊工業新聞社 施工技術 Vol. 6, No. 5

- (42) 春山元寿(1972)：シラスの土質試験結果の応用による設計の考え方に関する研究 鹿児島県林務部治山課
- (43) 春山・山内(1966)：シラスのような砂質土のインターロッキングについて 土質工学会第1回土質工学研究発表会講演集
- (44) 山内豊聡(1977)：シラスの斜面崩壊について 九州地質調査業務協会講演集
- (45) 三谷・安達(1969)：シラスの特性と洗掘抵抗試験 コントラクション Vol. 17, No. 1
- (46) 藤本 広(1975)：シラスの侵食とパイピング現象の問題 土と基礎 Vol. 23, No. 2
- (47) 山内豊聡(1969)：沖積シラスの流動化について 昭和44年度土木学会西部研究発表会論文集
- (48) 山内ら(1974)：シラスの液状化とその対策工法 自然災害特別研究研究成果
- (49) 河村忠孝(1971)：九州南部におけるシラスの盛土結果について 日本道路公団
- (50) 山内・持永・河村(1972)：シラス地帯における九州縦貫自動車道の設計施工 土木学会誌 Vol. 57-6
- (51) 春山・下川(1969)：防災を中心としたシラスの問題点 土木学会誌 Vol. 54, No. 11
- (52) 春山・下川・永井(1969)：昭和51年6月豪雨によるがけ崩れと降雨量の関係 第13回自然科学総合シンポジウム
- (53) 柴田秀賢(1969)：霧島火山形成史 地質学雑誌 75巻 10号
- (54) 岡本・福富・金光(1977)：低固結地盤における孔内透水試験の検討 第12回土質工学研究発表会講演集
- (55) 岡本隆一(1973)：最近のダム地質 土木技術資料 15-7
- (56) 村山・井上・石黒・福富(1971)：火山砕屑岩分布地域におけるダム構築上の問題点 地学関係5学会連合学術大会講演集

