

## 九州産火山灰類の利用に関する基礎的研究

正員 工学博士 篠原 謹 爾\*

## FUNDAMENTAL STUDIES OF UTILIZATION OF POZZOLANIC MATERIALS IN KYUSHU

(JSCE Aug. 1952)

Dr. Eng., Kinji Shinohara, C.E. Member

**Synopsis** The object of this research is to clarify engineering properties of pozzolanic materials found in northern Kyushu in making use as pozzolan mortars or cement admixtures, and this report gives a summary of the results obtained. In this paper the author describes, first, some properties of pozzolans, and then points out practically suitable conditions for using pozzolans as mixtures of slaked lime or as cement admixtures from various experimental results.

**要旨** 本研究は、九州地方に産出するいわゆる、火山灰をセメントと同じ目的またはセメントの混和剤として利用する場合に必要な工学的性質を明らかにしたものである。すなわち、まず火山灰の性質を調べ、次に、火山灰を消石灰と混用する場合、実用上好適な諸条件、セメントと混和する場合使用上考慮すべき点を指摘した。

## 1. 序論

我国でいわゆる火山灰とかセメント代用土といわれているものは、英米でポゾラン (Pozzolan) と称しているものの一種である。ポゾランには、普通、次のような定義が与えられている。「それ自身では固まる性質をもたないが、常温で水を加えて消石灰と化合させると、安定な不溶解性の化合物をつくつて固まるような組成成分を含む物質」である。

ポゾランは天然のものと人工的のものとに大別される。天然のものは、大部分、火山灰によつてできたものであるが、珪藻土のような水成岩質のものも含まれる。人工的のものは、粘土、頁岩またはある種の珪酸質岩石を熱処理してえられるもので、鈦滓もこの一つである。火山灰及びセメント代用土は天然ポゾランである。

ポゾラン利用の歴史は外国においても我国においても極めて古いが、近年、セメントの使用が盛んとなるにつれて混合セメントの混和剤としての利用以外にはあまり研究されていなかった。しかるに、昭和16年頃からのセメントの生産不足と需要の激増により、再び天

然ポゾランの研究利用が取上げられ、旧内務省土木試験所及び東大浜田教授を中心とする組織的な研究班により広範囲の調査及び実験研究が行われ、その成果には目覚ましいものがあり実地にもかなり利用された。

筆者は戦時中「土壌安定工法」についての研究の手伝いを行い、この時はじめて火山灰類に手をつけ、以来、戦後もセメント不足時代に、火山灰類の活用の必要を感じ、文部省科学研究費の援助により、主として北九州地方に産する火山灰について、利用に際して基礎となる工学的性質の研究を行つてきた。その成果のあるものは各種の雑誌等々に報告したが、セメント事情も好転し火山灰類をいわゆる代用セメントと考えて利用する時期は過ぎ去り、ポゾランのもつ独特の性質を生かした利用を必要とする時代となつたのを機会に、ひとまずこの研究を打切ることにした。本報告は昭和20年以來行つてきた研究の総合的報告で、未発表のものも含めてまとめたものである。実験にあつては、九州大学土木工学実験室丸山、吉田、国清氏等の援助をうけた。以上の方々に深謝すると共に、研究費の援助をうけた文部省にお礼申上げる。

## 2. 火山灰類の性質

九州には昔から有名な天然ポゾランを産出しているが、筆者が取扱つたものは主として次の4種で断片的にはその他数種のものについて調べた。

- |    |       |                        |
|----|-------|------------------------|
| 1) | 篠原謹爾: | 「代用セメントの話」土木技術,        |
|    |       | 昭23.6~11月              |
|    | 同     | : 「代用セメントについて」セメント     |
|    |       | 技術年報, 昭.23             |
|    | 同     | : 「ポゾラナ煉瓦」土木技術, 昭24.8月 |

\* 九州大学教授, 応用力学研究所

唐津火山灰 佐賀県東松浦郡呼子町附近産(製品)  
 壱岐火山灰 長崎県壱岐郡石田村産(製品)  
 筑紫火山灰 福岡県筑紫郡筑紫村原田附近産(製品)  
 天川粘土 長崎市内産(原土)

火山灰類を利用する上において、その品質の優劣は主として火山灰と消石灰とでつくられるモルタルの強度によつて判定されている。強度による品質の判定にはかなりの日数を必要とするので、化学成分とかポゾラン活性による判定法も考えられているが、未だはつきりしていない。筆者は実験に使用した火山灰類について一応化学成分を調べたが、天然物は工場製品と異なり、同じ採取場所のものでも化学成分は若干異なるから、ここでは化学成分についてはふれないことにする。火山灰類自身の工学的性質としては比重、単位重量、粒度及び土性学的性質を調べた。

(1) 比重及び単位重量 実験に使用した火山灰類の比重は、セメントの場合と同様にル・シャテリー氏比重瓶を用い測定し次の値をえた。

唐津2.63 壱岐2.46 筑紫2.67 天川2.34

古賀(長崎県北高来郡古賀村産)2.51 鹿屋シラス(鹿児島県鹿屋市附近産)2.31

これらの値は普通の土の比重2.6~2.7に比べやや小さい。単位重量は、詰め方により異なるから、軽く詰めた場合、十分かたく詰めた場合について調べた。結果は次のようであつた。また、これから計算される空隙率を括弧内に附記する。

軽詰め：唐津0.82(68) 壱岐0.85(65)

筑紫0.85(78) 天川0.80(66)

古賀1.16(54) 鹿屋0.84(64)

かた詰め：唐津1.23(53) 壱岐1.20(62)

筑紫1.27(53) 天川1.20(49)

古賀1.57(38) 鹿屋1.19(48)

(単位重量は  $t/m^3$ , 空隙率は%)

以上の実験結果からみると火山灰類の空隙率は砂やセメントに比べてかなり大きく、また、現場で容積配合を行う場合には火山灰類の乾燥の程度によつて異なるが単位重量  $0.9 t/m^3$  位と考えればよいと思われる。

(2) 粒度及び土性学的性質 調査した火山灰類についてタイラーの標準篩を用いて篩分試験を行つた結果を示すと図-1 のようである。これからわかるように、土性学的にいえば砂の部類にはいる。

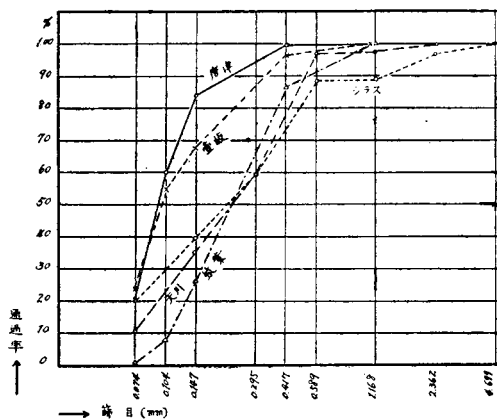
土の場合と同様に水に対する性質を表わす尺度である液性限界、塑性限界を調べた結果は次のようである

液性限界：唐津54.1 壱岐57.3 筑紫48.4

塑性限界：唐津35.4 壱岐40.1 筑紫25.9

塑性数：唐津18.7 壱岐17.2 筑紫22.5

図-1 火山灰類の粒度曲線



### 3. 消石灰との混合物の性質

火山灰類は従来主として消石灰との混合物として利用されている。セメントの場合にならつて、ポゾランに消石灰を適量混合したものをポゾランセメント、これに水を加えねり混ぜ、固まつたものをポゾランモルタルと称することにする。砂を入れた場合も入れない場合も同じ名称で呼ぶことにする。ポゾランモルタルを実地に利用する場合にその工学的性質に及ぼす影響として次の諸点について調べた。

- 施工に適する水量及び水量と強度との関係
- ポゾランの粒度と強度との関係
- 消石灰の量及び品質の強度に及ぼす影響
- 砂の量と強度との関係

強度試験体には特に説明しない限り、軟練モルタル標準試験による型枠を用いた。製作法及び試験法もこれに準じた。以下簡単のために消石灰を単に石灰と称することにする。

(1) 使用水量とモルタルの軟かさとの関係 ポゾランモルタルまたはコンクリートを現場打としましたは製品として使用する場合適当な軟かさということが問題となる。加える水量により軟かさが異なるのは勿論であるが、そのちがいはポゾランの種類や石灰の量によつて異なる。現場で用いるのに適する軟かさの規準として実験室の方法に次の2つを用いた。

(a) 一定の軟かさを与えるに必要な水量で表わす方法。すなわち、セメント試験の場合と同様に標準軟度を与えるに必要な水量で表わす。

(b) 一定の水量を用いた場合のモルタルのフロー値で表わす方法。

2) 詰め方の詳細は、九州大学応用力学研究所報第1号に発表の予定。

実験の結果によると標準軟度に要する水量（以下標準水量と称する）はボゾランの量が増すにつれ減少する。水量の減少状態はボゾランによつて異なる。その原因の一つはボゾランの粒度のちがいにともづくのではないかと考えられる。標準水量を用いてつくられたモルタルのフロー値は石灰の量によりまたボゾランの種類によつて異なる。従つて標準水量が与える軟かさと、フロー値によつて与えられる軟かさとは異なることが知られる。実際に利用される軟かさの標準としては、硬練りの場合は標準水量を、軟練りの場合にはフロー値を規準とするのがよいように思われる。使用水量、石灰の量、砂の量を種々かえた場合のフロー値については実験の結果、水量を増せば一般にフローは増加し、石灰の量を増せば減少、また、砂の量をませば減少し、これは粒度の細かい砂程著しいことなどが知られた。

〔2〕 最大密度に要する水量 土などの最大密度は含水量によつて異なるのは勿論、締固めの方法によつても異なる。ボゾランに対する実験では  $7.5 \times 15 \text{ cm}$  の円筒型枠を用い、 $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  程度の加圧による締固めを行った。老岐火山灰についての実験結果によると最大密度を与える水量は火山灰だけの場合 32%、火山灰：石灰 = 7:3 の場合 30%、火山灰：石灰：砂 = 7:3:10 の場合 25% であつた。施工に際しては最大密度に対する水量より幾分少ない水量の方が好適である。

〔3〕 使用水量と強度 老岐火山灰及び天川粘土を用い、ボゾラン石灰比 7:3 の砂を入れないモルタルについて、使用水量 30, 35, 40, 50, 65% 材令 4 週における強度及び老岐火山灰を用い、ボゾラン石灰配合比 7:3、ボゾランセメント砂比 1:0, 1:1, 1:2 について、使用水量 30, 40, 50, 60, 70%、材令 4 週における強度試験を行った結果次のような結論をえた。

単位重量がほぼ最大となるような水量を使用した場合モルタルの強度は最大となる。この水量はボゾランの種類により、砂の量によつて異なるが、ボゾランセメントの重量に対し 30~40% である。締固めを十分に行う場合には 20~25% 位のとき最大強度がえられる。

〔4〕 ボゾランの粒度と強度 ボゾランを 0.6 mm 篩でふるつた通過分（荒篩い）と 4900 孔篩通過分（細粉）とについて、ボゾラン石灰配合比 7:3、砂を入れない、水量 40% のモルタルの強度を老岐、天川、唐津、古賀火山灰について調べた。この結果によれば、荒篩いの方が単位重量は常に大きい、強度の差はわずかで、いずれが大となるかはボゾランの種類によつて一定していないことが知られる。これから、ボゾランを生産

地付近で利用する場合には 0.6 mm 程度の篩で通過するものを用いればよいと思われる。

〔5〕 石灰の使用量と強度 ボゾランに加える石灰の適量については昔から、ボゾラン 7 分に石灰 3 分といわれている。筆者はこれを確かめると共に今少し詳しく調べるため老岐火山灰についてボゾランと石灰の配合比 1.5:1, 2:1, 2.5:1, 3:1, 4:1、ボゾランセメント砂比 1:0, 1:1, 1:2、水量を配合 1:0 のとき 40%、1:1 のとき 50%、1:2 のとき 65% としたモルタル及び老岐火山灰と天川粘土について、砂を入れない、上記のボゾラン石灰比、水量のモルタルについて 4 週強度を調べた。その結果によると、砂を入れないモルタルでは、1.5:1~2.5:1 のとき最大であり、配合 1:1 及び 1:2 の砂入りモルタルでは 1.5:1 のときが最大であつた。これから、石灰の適量はボゾランによつて多少異なるが 7:3 またはそれより少し石灰の多い位がよいといえる。すなわち、6:4 と 7:3 の中間位が適量で砂を入れれば石灰量をふやした方がよい。

〔6〕 石灰の品質の影響 ボゾランに加えて有効な石灰は水酸化カルシウムであり市販の消石灰は必ずしも完全に水酸化カルシウムからなるとはいえない。筆者は  $\text{Ca(OH)}_2$  の量 88, 42, 40, 28.5% の 4 種の消石灰を用い老岐火山灰について、ボゾラン石灰比 7:3 水量 40% の砂を加えないモルタルの 4 週強度を調べた結果品位のよいものが強度も大きいことが知られた。しかし、市販品で二等灰（CaO 含有量 50%）以上ならば実用上、使用して差支えないと考えられる。

〔7〕 砂の量と強度 ボゾランの使用に際し砂を混入した方がよいかどうかは簡単に判断しにくい。セメントの場合とちがつてボゾラン自身の中に、砂と思われるような粒の粗いまた不活性の部分が含まれているからである。筆者は老岐火山灰を用い、ボゾラン石灰比 7:3, 3 種の砂、ボゾランセメント砂比、1:0, 1:0.5, 1:1, 1:1.5, 1:2、水量 25% 及び 65% の場合のモルタルの 4 週強度を調べた。砂は九味浦砂、相馬砂、九州大学構内砂で、粒度からいえば九味浦砂が最も細粒、相馬砂は最も粗粒であるがいずれもほぼ齊粒である。大学砂はこの中間の粒度を有し粒径は一様でない。その結果によると水量 25% のときは砂量をますにつれ強度は小となつており、強度の減少は粗砂程著しい。水量 65% のときは砂量の変化に対し著しい差はない。

次に天川粘土及び老岐火山灰について大学砂を用い、水量 40% で上記と同様な実験を行った。その結果では、天川粘土は砂量に関係せず、強度がほとんど等しく、老岐では前述のように砂の量をますにつれ強度は著しく減じている。

これからみると、ボゾランに砂を混用することの可否はボゾランによつてその影響は著しく異なる。しかし、使用水量が多い場合には砂の量は強度にたいした影響を与えない。

4. セメントとの混合物の性質

セメントと火山灰類との混用には、セメントに少量の火山灰を加える場合と、火山灰類にセメントを少量加える場合とがある。前者はセメントの節約やコンクリートの性質をよくするための使用である。後者はボゾランセメントだけでは強度に不安がある場合にセメントを増強剤として使用するものである。

〔1〕凝結時間の変化 筆者は3種の火山灰についてセメント火山灰比1:0~1:5の範囲において、火山灰混和による凝結時間の変化を調べた。その結果によると、火山灰の混和量がセメントの2.5倍位までは火山灰の量が増すにつれ始発終結共におそくなる。しかし火山灰の量がセメントの3倍以上となれば始発は火山灰を入れない場合とほぼ等しくなる。これは火山灰の量が著しく多いため凝結現象をはじめていないにもかかわらず、粒子の沈澱圧縮等のため、あたかも始発をおこしたかのようにみえるためと考えられる。この場合でも終結は著しくおそくなっている。早強セメントに対し、火山灰をセメントの0.5倍位まで加えた場合の実験によると、この範囲では始発を幾分おくらせるが、終結を著しくおくらせることはないようである。従つてセメントの混和剤として普通に使用される範囲では凝結に著しい影響を与えることはないといえる。

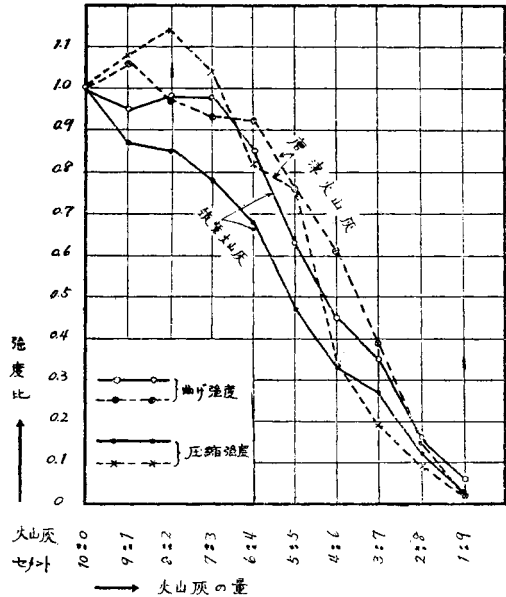
〔2〕火山灰の量とモルタルの軟かさ 唐津及び筑紫火山灰をセメントの0.11~9倍まで加えたときの標準水量を調べてみると、火山灰の量がセメントと等量またはそれ以上になると水量が急激に増加する。また、軟練モルタルに混和した場合のフロー値の変化をしらべてみると、混和量がセメントと等量以上になると約50~40%減少する。3種の火山灰を用い、使用水量を50, 65, 100%にかえた1:2モルタルについての試験結果によると、セメントと火山灰の比1:1までは使用水量の多少にほとんど無関係で、最大30%位減少する程度である。これらの実験から、火山灰の量を増してゆけばつくられるモルタルの軟かさは次第に減少するが、混和量が30%位までならばフロー値の減少はせいぜい20%位といえる。

〔3〕火山灰の量と強度

(1)セメントに火山灰を混和する場合：セメント火山灰配合比10:0~7:3の1:3硬練モルタル及び1:2軟練モルタルの材令1週及び13週の強度を調べてみた結果によると、火山灰混和の影響は火山灰によつて異なる

が材令の若いときには混和量の増加につれて強度の減少は著しいが、材令が大きくなれば減少度は小さくなっている。しかし実用的にセメントに混和しても差支えない火山灰の量はセメントの25%までのようである。また、火山灰の混和によるモルタルの強度減少は圧縮強度の方が曲げ強度に対するものより著しい(図-2)。以上の結論は3種の火山灰について、モルタルの使用水量を80~100%までかえた実験に対しても変らなかつた。

図-2 火山灰の量による軟練モルタルの強度変化 (材令13週)



(2) 火山灰類にセメントを混和する場合：セメント火山灰配合比3:7, 2:8, 1:9のような、火山灰に少量のセメントを加えて使用する場合の硬練及び軟練モルタルについて、火山灰とセメントだけの場合と火山灰に適量の石灰を加えたものにセメントを混和する場合

表-1 火山灰にセメントを少量加えた場合の強度

配合 火山灰 : 石灰 : セメント	軟練モルタル強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				硬練モルタル圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	唐		津		唐	津
	曲げ強度	圧縮強度	曲げ強度	圧縮強度		
70 : 0 : 30	16.8	54	13.5	58	208	175
49 : 21 : 30	26.6	78	27.1	82	211	220
80 : 0 : 20	6.4	23	8.2	26	100	80
56 : 24 : 20	23.3	67	17.0	56	134	109
90 : 0 : 10	—	4	—	5	15	13
63 : 27 : 10	17.3	50	11.8	37	52	51
70 : 30 : 0	8.0	25	5.5	19	3	5

との比較試験を行つた。その結果は表-1のようで、いずれの場合でも火山灰に少量のセメントを加えて使用する場合には必ず適量の石灰を加えたポゾランセメントとしてこれにセメントを加えた方が著しく有利であることが知られる。

### 5. 総括

本研究はこの外に、火山灰類の利用に関するものも含まれるのであるが、本報告では省略し、以上の研究から、火山灰類を利用する場合の基本事項を総括すれば次のようである。

火山灰を消石灰と混合して利用する場合の最も好適な条件は次のようである。

使用水量は煉瓦やブロック等のように硬練り状態で締固めを十分行う場合には、最大密度を与えるものより幾分少ない水量を用い、現場打ちとして利用する場合にはポゾランセメントの重量に対し30~40%位が適当である。火山灰類の粒度は0.6mm 篩の通過分程度として使用すればよい。火山灰と石灰の配合比は6:4と7:3の中間位、砂を入れる場合にはその量に応じて石灰量を増す。ポゾランモルタルに砂を混用した方がよいかどうかは火山灰によつて異なる。使用水量が

なり多く軟練り程度となればある程度まで砂を入れても強度には影響しない。ポゾランモルタルは製作後1ヶ月位は乾燥状態でもよいが、それ以後はなるべく湿潤状態におかないと長期強度が低下する。

セメントに火山灰を加える場合はセメント量の25%位までが、凝結、軟かさ、強度からみて限度である。火山灰を加えたための強度の変化は火山灰の種類によつて異なる。火山灰に少量のセメントを加えて使用する場合には、火山灰に適量の石灰を加えたポゾランセメントの形としてこれにセメントを加えた方が有利である。

一般に火山灰類の利用に際しては、火山灰によつて以上の基本的な性質が若干変動することに注意しなければならない。また、火山灰と石灰の混合モルタルは空気中では風化しやすく、長期強度が低下するおそれがあるから、なるべく湿潤状態にあるところ、例えば地下の部分などに利用すべきである。

附記 本報告は紙数の制限もあり詳細な実験結果を載せることができなかつたが、それらについては、九州大学応用力学研究所所報第1号に発表の予定であるから御参照願いたい。(昭.27.4.30)

UDC 532.582.7:624.034.72

## 静水中における砂粒子の沈澱に関する一実験考察

准員 徳 平 淳\*

### AN EXPERIMENTAL STUDY ON SEDIMENTATION OF SAND GRAINS IN QUIESCENT WATER.

(JSCE Aug. 1952)

Atushi Tokuhira, C. E. Assoc. Member.

**Synopsis** This paper contains a part of study on the sedimentation of sand grains which are dropped simultaneously in quiescent water. The qualitative relationship between the amount of sand grains and settling time was ascertained by our experimental results.

**要旨** 多数粒子の静水中における、沈澱量と沈降時間との関係を実験し、現象の定性的な面に若干の考察をおこなつた結果の報告の一部であり、沈澱池内の沈澱解析に対する基礎実験の一つである。

### 1. 緒論

沈澱性浮遊物質の沈降解析に対する実験研究は今迄

\* 東京大学講師，工学部土木教室

種々なされてきている。例えば H. Rouse<sup>1)</sup>, W.E. Dobbins<sup>2)</sup> 等の人々は、実験的に静水中にあらかじめ沈澱性物質をおき、それに任意の乱れを与えて、その垂直濃度分布を求めている。

著者は完全に静止しているとみなせる水中に砂粒子群を静かに沈降させたならば、いかなる現象が表われるかを実験的に求めようとして、次に示すような実験