

# 汚泥の固化処理に関する研究 (第3報)

——セメント固化強度と水セメント比との関係への pF 水分の適用——

喜田大三 炭田光輝  
久保博

## Studies on Solidification Treatment of Mud (Part 3) —Application of pF Chemical Potential to Relation between Solidified Strength and Water-Cement Ratio—

Daizo Kita Mitsuteru Sumida  
Hiroshi Kubo

### Abstract

In succession to the preceding report, the relationships between solidified strength ( $q_u$ ) and soil-water-cement (s-w-c) ratios were further examined in connection with solidification of mud by cement. (1) As  $q_u$  changes with w/s even though w/c is the same, w/c is not proper as the parameter for  $q_u$  in solidification of mud. However, on application of  $(w/c)'$  to the relation with  $q_u$ ,  $(w/c)'$  has a high correlation with  $q_u$  even though w/s is changed. In this case,  $(w/c)'$  is the ratio between water separated at pF 3 chemical potential and cement. (2) The water separated at pF 3 was not or little existed in the solidified mud whose  $(w/c)'$  was less than about 1.5, but much increased in the solidified mud whose  $(w/c)'$  was more than about 1.5. Solidified mud whose  $(w/c)'$  was large was seen under a scanning electron microscope to have micropores thought to hold the free water.

### 概 要

前報にひきつづいて、汚泥のセメント固化における土(S)、水(W)、セメント(C)の各比と強度( $q_u$ )との関係について、4種の土とセメント、セメント-石膏を供試し、pF水分測定および走査電顕による観察を行なって検討した。その結果、S-W-C比と  $q_u$  との関係ならびに固化土中の水の存在状態に関する有益な新知見が得られた。(1)W/Cが同一でも、W/Sが異なれば  $q_u$  は変化するけれども、110°C乾燥水分で算出する W/C のかわりに土の物理、力学的挙動に大きな影響を及ぼす pF 3 分離水とセメントとの比(W/C)'をパラメーターにとると、(W/C)'はW/Sが異なっても  $q_u$  と高い相関を示した。(2)固化土中の pF 3 分離水は (W/C)' が1.5以下ではほとんどないけれども、(W/C)' が1.5以上になると増大した。そして、走査電顕観察で (W/C)' が小さい固化土ではセメント水和物が土粒子とともに致密に詰まっていたけれども、(W/C)'の大きい固化土では pF 3 分離水を包含すると考えられる微細空隙がみられた。

### 1. まえがき

汚泥のセメント固化処理におけるセメント添加量と強度との関係についての論議はこれまでほとんどなされておらず、両者の関係はその都度室内試験を行なって関係図を作成しているという現状である。しかし、この方法では早急に強度推定する場合、あるいは試験場所が近くにない場合など不都合であり、セメント量と強度との関係に関する何らかの統一的理論の確立が望まれる。

先に、筆者ら<sup>1)</sup>はセメント固化強度( $q_u$ )を土(S)、水(W)、セメント(C)の3成分系として図式化し、さ

らに実験式  $\log q_u = \alpha - \beta \cdot W/S - (\gamma \cdot W/S + \delta) \{W/C - \varepsilon(W/S)^2(W/C)^2\}$  ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  は定数) を提示した。しかし、その後さらに検討を進めた結果、強度を論ずる際の W/C として従来のように110°C乾燥で求める水分でなく、或る pF 値以下の弱結合水に着目して求める水とセメントとの比、これを (W/C)' とすると (W/C)' は同一粘性土において含水比が異なる場合でも  $q_u$  と高い相関を示すという新知見が得られた。また、固化土の pF 水分測定および走査電顕観察によって、種々の W/S, W/C の固化土における水分の存在形態に関する非常に有益な事実が判明したのでまとめて以下に報告する。

## 2. 供試土と試験法

実験に供した粘性土は表一に示すように、前報と同じ標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土(I)および本報で追加した還元粘性土IIである。この還元粘性土IIはIに比べて、さらに有機物、コロイド分に富む海底ヘドロである。なお、供試土をこのように酸化、還元状態の観点からとらえたのは、筆者らが土の酸化、還元状態の土質工学的意義を大きいと考えることによるもので、これに関しては追って報告したい。また、本報で使用する記号 S, W, C,  $q_u$  も前報と同様にそれぞれ土、水、セメントの各重量および一軸圧縮強度を表示する。

供試土	自然含水比	粒 度				コンシステンシー			真比重	乾燥量	有機物含有量	pH	主要粘土鉱物	土質の分類 (土質分類)
		砂	シルト	粘土	粘土	LL	PL	PI						
標準粘土	5%	0%	36.0%	64.0%	61.0%	29.1%	31.9%	2.58	12.9%	0%	5.7	ハロイサイト メタハロイサイト	粘土	CH
酸化粘性土	36	13.0	49.7	37.3	41.8	20.8	21.0	2.66	4.1	1.4	6.8	モンモリロナイト イライト カオリナイト	粘土	CL
還元粘性土 I	183	16.4	63.5	20.1	103.0	42.8	60.2	2.51	9.5	7.5	7.1	クロライト イライト カオリナイト	粘土質シルト	OH
" II	313	15.0	27.5	57.5	176.0	68.3	107.7	2.34	34.6	24.1	8.7	モンモリロナイト カオリナイト フロフェン	粘土	OH

表一 供試土の物理的・化学的性質

本報では、標準粘土、酸化粘性土および還元粘性土 I については、S-W-C 比と  $q_u$  との関係のデータは前報のデータを採用し、未処理土および固化土の pF 水分測定、および固化土の走査型電子顕微鏡による観察を行なった。また、還元粘性土 II については、W/S を 3, 4, 6 に調整し、W/C がそれぞれ 2, 4, 6, 8 になるように固化剤 (セメント : 石膏 = 1 : 0.3) を添加し、 $q_u$  を測定し、他の供試土と同様に pF 水分を測定した。なお、還元粘性土 II は固化剤として、セメント系よりもセメント-石膏系の効果が非常に高い粘性土である。また、この場合、C はセメントと石膏の合計重量とした。以上の実験において、pF 水分の測定は

pF 0~1 では吸引法、pF 2.5~4.2 では遠法分離法で行ない、また走査電顕観察は日本電子 (株) の JM-35 を用いて行なった。

## 3. 結果と考察

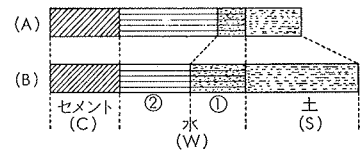
### 3.1. W/C と $q_u$ との関係

標準粘土、酸化粘性土および還元粘性土 I の W/C と  $q_u$  (7, 28日) の関係を図一に示す。図示するように、 $q_u$  は W/S が一定ならば W/C と相関が高いけれども、W/S が異なると同一 W/C でも  $q_u$  は異なる。このことは、前報でも述べている。そこで、この現象が上述のセメント系固化剤だけでなく、セメント-石膏系でもみられるかについて還元粘性土 II で調べた結果、

図一に示すように、セメント-石膏系でも同様の現象が認められた。このようにいずれの供試土および固化剤においても、同一 W/C でも W/S が異なれば、 $q_u$  は変化し、またその程度は供試土によって異なる。

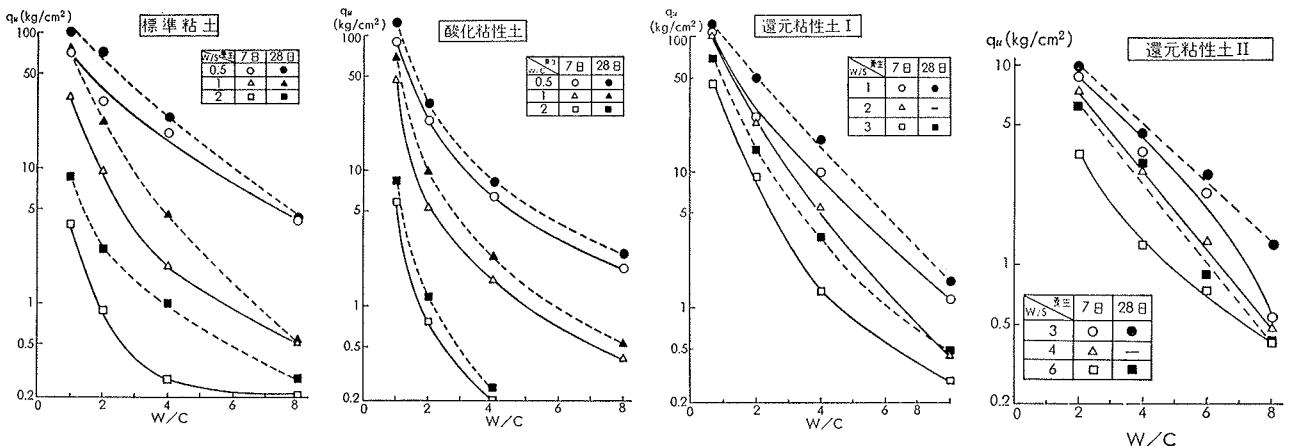
以上の現象が起こる理由について、筆者らは以下のように推察した。

(1) W/C が同一でも、W/S が異なると土中水のうち土に強く吸着される水 (強結合水) と土に強く吸着されない水 (弱結合水) との割合が異なる。この弱結合水とセメントとの比が実質的な W/C として強度に関与する。弱結合水とセメントとの比は、



①: 土に強く吸着される水 (強結合水)  
②: 土に強く吸着されない水 (弱結合水)  
(A), (B) は W/C は同じで、W/S が異なる

W/C が同一でも W/S と W/C が質的に異なることを示す概念図



図一 W/C と  $q_u$  との関係

ともに増大する。その結果、同一 W/C でも W/S とともに強度は減少する。(図-2 参照)

(2) 強結合水と土との比は土の種類によって異なるので、同一 W/S でも弱結合水とセメントとの比は土の種類によって異なる。したがって、同一 W/C で W/S が  $q_u$  に及ぼす影響の程度は土の種類によって異なる。

### 3.2 W/C への pF 水分の適用

前項で述べた強、弱結合水を量的に表示する方法として、土壌物理で古くから用いられた pF 水分の適用を検討した。pF とは、1935年に Schofield<sup>2)</sup>によって提唱され、純水の化学ポテンシャル  $\mu_0$  と土に保持されている水の化学ポテンシャル  $\mu$  との重力場における水頭差(単位 cm) を常用対数表示したものである<sup>3)</sup>。

$$pF = \log_{10}(\mu_0 - \mu) = \log_{10}(\Delta\mu) \dots\dots\dots(1)$$

pF と土中水との諸関係を表-2に示す。

供試土の pF 水分を測定した結果を図-3に示す。図示するように、重力水 (pF 0~1.5)、毛管重力水 (pF 1.5~2.7)、毛管水 (pF 2.7~4.2) および拘束水 (pF 4.2以上) はいずれも還元粘性土 II、I、標準粘土、酸化粘性土の順

相当湿度と水分保持係数	状態	水分形態	相当張力 (kg/cm <sup>2</sup> )	pF	土工上の水分恒数	農業上の水分恒数	測定法
0 ~ 7.0 (105℃乾燥に相当)	化合水	化合水	7.0 × 10 <sup>4</sup>	7	7.0 熱乾 (105℃)		蒸気圧法
50 ~ 6.0	吸湿水	吸湿水	10 <sup>3</sup>	6	5.5 気乾		蒸気圧法
80 ~ 5.5			5.5 × 10 <sup>2</sup>	5			蒸気圧法
93 ~ 5.0	影湿水	影湿水	10 <sup>2</sup>	5			蒸気圧法
98 ~ 4.5			4.5 × 10 <sup>1</sup>	4	4.2 永久しおれ点 3.8 初期しおれ点		蒸気圧法
98 ~ 4.5 (温度%)			4.2 × 10 <sup>1</sup>	4			蒸気圧法
	毛管水	毛管水	1	3	約 3.0 陽明の最適含水比 約 2.7 塑性限界 約 1.5 液性限界	3.0 水分当量 2.7 生長阻害点 2 固相含水率 1.8 域	蒸気圧法 加圧蒸気法 遠心分離法
水分保持係数 (cm)			10 <sup>-1</sup>	3			蒸気圧法
0.019 ~ 2.2	毛管重力水	毛管重力水	10 <sup>-1</sup>	2			蒸気圧法
0.038 ~ 1.9			10 <sup>-1</sup>	2			蒸気圧法
0.075 ~ 1.6			10 <sup>-1</sup>	2			蒸気圧法
0.15 ~ 1.3			10 <sup>-1</sup>	2			蒸気圧法
0.3 ~ 1	重力水	重力水	10 <sup>-2</sup>	1		最大含水率 (飽和)	蒸気圧法 吸水法 土圧法
3 ~ 0			10 <sup>-3</sup>	0			蒸気圧法
			10 <sup>-3</sup>	0			蒸気圧法
			10 <sup>-4</sup>	-1	約 水中沈定 -15 の状態		蒸気圧法

表-2 pFと土中水との諸関係など<sup>3), 4)</sup>

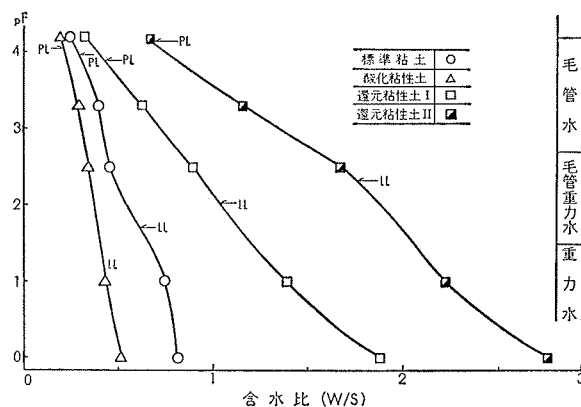


図-3 供試土の pF 水分曲線

に多い。これら各形態の水分量は土粒子の表面化学的特性、粒度特性、含有有機物の質と量、さらに全体の微細構造などを反映していると考えられる。

土の pF 水分曲線から明らかなように、或る pF において土が保持できる水量 (強結合水) は土の種類によって固有のもので、W/Sがその水量以上に増大すると、それに伴ってその pFで土が保持できない水 (弱結合水) が増大する。いま、この強、弱結合水の境界の pF として、pF 3を適用した。すなわち、pF 3で脱水した場合に分離しない「pF 3 非分離水」を強結合水、分離する「pF 3 分離水」を弱結合水とした。ここで、pF 値として3を適用したのは、pF 3の水分状態が土の最適含水比および塑性限界とほぼ一致し、また pF 3 分離水は普通の液状水と同様の性質を有する<sup>3)</sup>のに対して、pF 3 非分離水は水分子と土粒子との相互反応によって強く結合し液状水とは異なると報告されている<sup>3)</sup>ことによる。

そこで、前項の推論にもとづいて、pF 3分離水 (弱結合水) とセメントとの比、これを (W/C)' と表示して(2)式によって算出した。

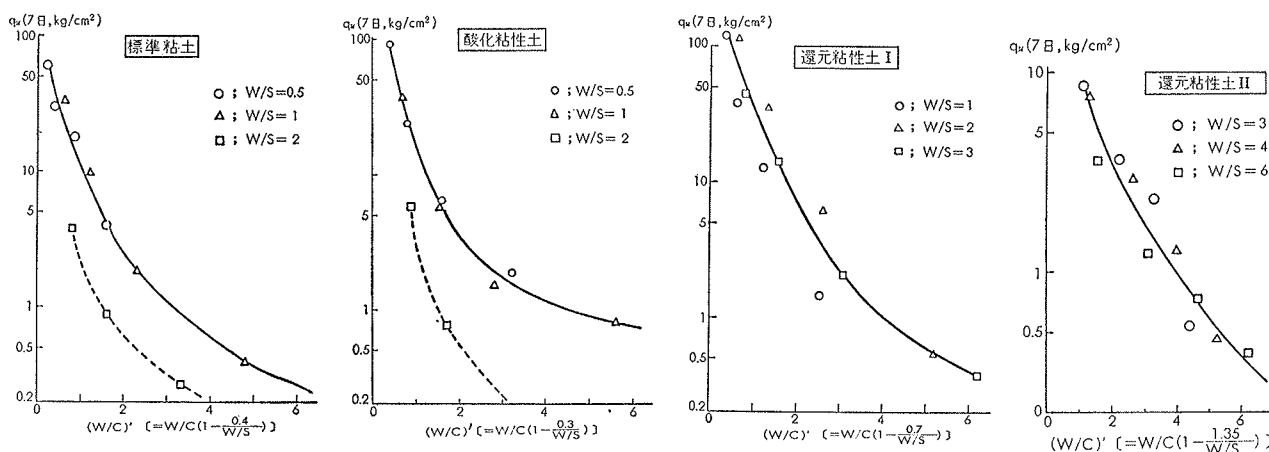


図-4 (W/C)' と  $q_u$  との関係

$$(W/C)' = \frac{W - a \cdot S}{C} = W/C \left( 1 - \frac{a}{W/S} \right) \dots \dots \dots (2)$$

W/C, W/S : 土-水-セメントの各比

a : 図-3における各供試土の pF 3 含水比  
 (標準粘土=0.41, 酸化粘性土=0.30,  
 還元粘性土 I =0.70, 還元粘性土 II =  
 1.35)

このようにして算出した各供試土の (W/C)' と qu (7 日) との関係を図-4に示す。

図示するように、標準粘土および酸化粘性土 I の W/S=0.5, 1.0 いずれの場合、また還元粘性土 I および II のそれぞれ W/S=1~3, 3~6 のいずれの場合にも qu はほぼ同一曲線上にプロットされた。図-1に示したように W/C をパラメータとした場合には W/S とともに別々に分れていた強度曲線が、このように、(W/C)' をパラメータとすることによって一本の強度曲線で示されるようになった。すなわち、(W/C)' ~ qu 曲線では W/S の因子を消去することができた。

これらの結果は3.1.の筆者らの推論が妥当であったことを示唆している。すなわち、粘土・シルトのような微細粒子に富む粘性土は石や砂利とは異なり、荷電粒子を含有し高い表面活性をもつので、多量の水分を吸着保持できる。したがって、強結合水をほとんどもたない砂や砂利を使用したモルルやコタンクリートの W/C においては、水分の結合状態を考慮する必要はない。しかし、汚泥などのような粘性土では、土に強く吸着されない水(弱結合水)のみを抜出して求めた (W/C)' が実質的な W/C として qu に関与する。そして、その際の強、弱結合水の境界としては、粘性土の物理・力学的挙動に大きく影響し、また水分の性状が著しく変わるといわれる pF 3<sup>3)</sup> が適用した。このように、汚泥のセメント固化強度には、従来のように110℃乾燥水分とセメントとの比として求めた W/C は適用できない。なお、図-4において、標準粘土および酸化粘性土の W/S=2 の (W/C)' ~ qu 曲線は下方にずれた。このことは、W/S=2 がこれらの土では図-

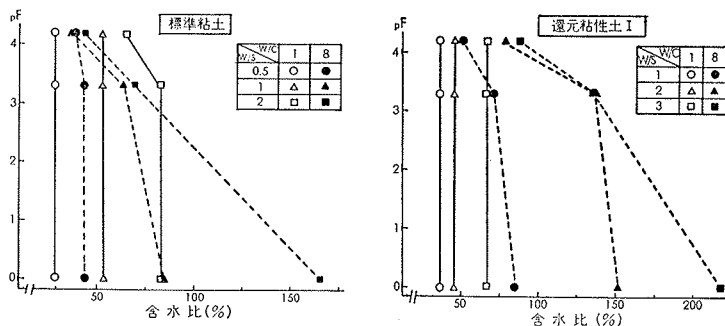


図-5 固化土の pF 水分曲線

一3に示す pF 0 含水比の 2.5~4 倍にも相当するために、過剰の水分が固化土中の土粒子と水和セメント粒子間の結合力および微細構造に大きく影響を及ぼして強度を低下させたためと考えられる。そして、この程度の W/S, すなわち pF 0 含水比の 2.5~4 倍くらいが (W/C)' ~ qu 関係の適用上限であると思われる。しかし、実際の施工では、このように多量の弱結合水を含む場合には沈降分離によって W/S を容易に低下でき、W/S を低下させてから固化するので、この程度の適用範囲があれば十分である。

以上、(W/C) ~ qu 曲線は従来の W/C ~ qu 曲線に比べて W/S の影響が少ない。すなわち、W/S が各粘性土の pF 0 含水比からその 2.5~4 倍程度まで変動しても、(W/C)' ~ qu 曲線は一本の曲線となる。したがって、汚泥などの粘性土のセメント固化に (W/C)' ~ qu 関係図を用いることは、粘性土の含水比が変化する場合の所定強度に必要な固化剤添加量の決定あるいは固化強度の推定などにおいて極めて有益であると考えられる。

### 3.3. 固化土の pF 水分特性

セメントの水和理論によれば、セメントが水和に必要な水量は W/C として 0.4 である<sup>3)</sup>。しかるに、高含水粘性土のセメント固化においては、図-4に示したように (W/C)' が 0.4~6.2 という水分過剰の状態でも固化が行なわれる。そこで、(W/C)' と qu との関係をさらに調べるために、この過剰水分の存在状態を pF 水分によって測定した。

固化土の pF 水分を測定した結果を標準粘土および還元粘性土 I を例に挙げて、図-5に示す。図示するように、各 pF 分離水はいずれの供試土でも W/S および W/C とともに増大した。そこで、図-5から求めた固化土中の pF 3 分離水量と (W/C)' との関係調べた結果を図-6に示す。

図示するように、固化土の pF 3 分離水は (W/C)' が 1.5 以下の場合、ほとんどないけれども、

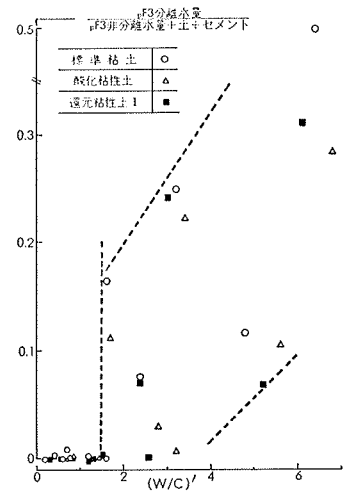
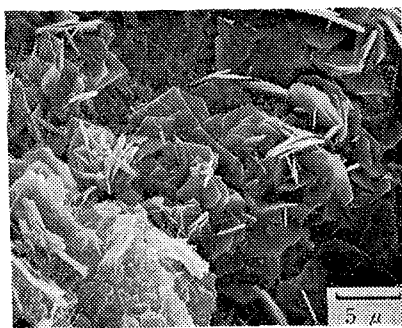
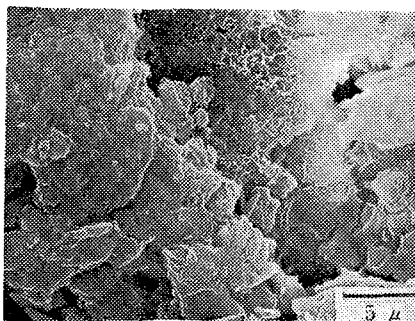


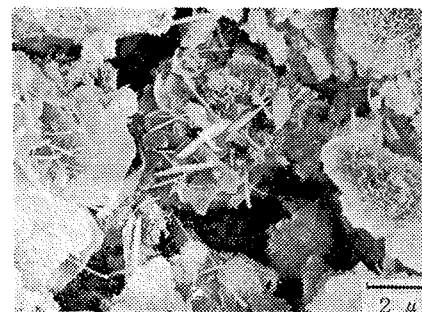
図-6 (W/C)' と固化土の pF 3 分離水量との関係



写真一1 標準粘土・固化土の走査電顕写真[W/S=0.5, W/C=1, C/S=0.5, (W/C)'=0.2]

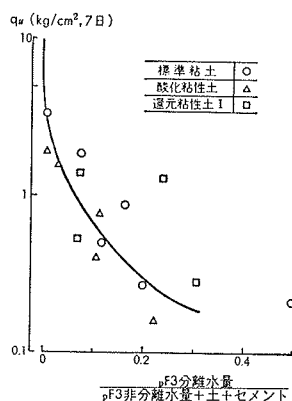


写真一2 標準粘土・固化土の走査電顕写真[W/S=2, W/C=1, C/S=2, (W/C)'=0.8]



写真一3 標準粘土・固化土の走査電顕写真[W/S=2, W/C=8, C/S=0.25, (W/C)'=6.4]

(W/C)' が 1.5 以上になると増大する。このことは、(W/C)' が 1.5 以上になると固化土中に弱結合水を包含して固化し、弱結合水を含まない (W/C)'=1.5 以下の場合とは異なる微細構造をもって強度を発現することを示唆している。そして、図一4において、(W/C)' ~qu 曲線の傾きが (W/C)'=1.5~2 付近で変



図一7 固化土の pF 3 分離水量と qu との関係

化していることと関連があると推察される。また、固化土の pF 3 分離水量と qu との関係は図一7に示すように、かなりの相関が認められた。喜田ら<sup>6)</sup>が行なったベントナイト泥しょうのセメント固化試験でも、固化土の pF 2.7 分離水と qu との間に相関がある。このことから、pF 3 分離水のような弱結合水が存在する固化土では、その量が強度に大きく影響することがわかる。

### 3.4. 走査電顕による固化土の微細構造観察

(W/C)' はこれまで述べたように固化土の微細構造にも大きく影響して、qu と高い相関をもつと考えられる。そこで、(W/C)' と qu との関係において、(W/C)' が固化土の微細構造に及ぼす影響を調べるため、固化土の走査電顕写真を撮影した。

写真一1は W/S=0.5・W/C=1・(W/C)'=0.2、写真一2は W/S=2・W/C=1・(W/C)'=0.8 また、写真一3は W/S=2・W/C=8・(W/C)'=0.25 のいずれも標準粘土の固化土である。これらの写真に示されるように、(W/C)'=0.2では、土粒子表面を覆ったセメント水和物が非常によく結晶化し、しかもそれら

が密に詰まっており、大きな強度を発現したことがうかがえる(写真一1)。(W/C)'=0.8では、セメント水和物が密に詰まっており、空隙はないけれども、その結晶度は(W/C)'=0.2に比べて不良で、そのために強度も少し低下したと思われる(写真一2)。(W/C)'=6.4では、空隙が増大し、団粒間をエトリンジェイトと思われる針状結晶が連結しており、またこれら空隙には前述の pF 3 分離水などを包含すると思われる、強度もかなり低いことがうかがえる(写真一3)。

## 4. まとめ

セメントを用いて汚泥を固化する際の土(S)、水(W)、セメント(C)の各比と強度(qu)との関係について、pF水分測定および走査電顕観察によって検討した結果、以下のような極めて有益な知見が得られた。

- (1) W/Cが同じでもW/Sが異なればquは変化するので、W/Sのみではquを決定しない。しかし、土の物理・力学的挙動に大きく影響するpF3分離水(弱結合水)とセメントとの比を(W/C)'とすると、(W/C)'はW/Sが異なってもquと高い相関を示す。
- (2) 固化土中のpF3分離水は(W/C)'が1.5以下ではないけれども、1.5以上になると増大する。また、走査電顕によって(W/C)'=6.4の固化土でpF3分離水を包含すると思われる微細空隙がみられた。

## 参考文献

- 1) 喜田, 久保: 大林組技研所報 No.12 (1976) p. 88
- 2) Schofield, R. K.: Soil Sci., 2 (1935) pp. 37~48
- 3) 岩田, 伊藤: 土壌物理, 養賢堂(1969) pp. 46~77
- 4) 寺沢: 土壌の物理性 No. 11, pp. 69~82
- 5) W. Czernin: セメント・コンクリート化学(徳根訳), 技報堂(1969) p. 65
- 6) 喜田, 川地, 斎藤: 第28回土木学会年次学術講演概要集5 (1973) p. 161