

# 汚泥の固化処理に関する研究 (第2報)\*

—固化強度と土—水—セメント比との関係に関する—考察—

喜 田 大 三  
久 保 博

## Studies on Solidification Treatment of Mud (Part 2) —A Consideration of the Relation between Solidified Strength and Soil-Water-Cement Ratios—

Daizo Kita  
Hiroshi Kubo

### Abstract

In solidification of mud by cement, the amount of cement needed to obtain the planned strength is examined in the relation between strength and amount of cement per unit amount of wet or dry soil, or between strength and water-cement ratio. However, these relations are not enough to understand the relation between strengths and soil-water-cement (S-W-C) ratios. In order to consider this relation, an experiment was carried out using three types of soil. i) By the use of triangle coordinates in order to show S-W-C ratios, equal strength lines were indicated and the relation between both were made obvious. ii) The relationship expression of  $\log q_u = \alpha - \beta \cdot W/S - (\gamma \cdot W/S + \delta) \{W/C - \varepsilon(W/S)^2(W/C)^2\}$  was obtained with the constants  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  and  $\varepsilon$  influenced by grain-sizes, LL and PL of the soil. iii) A relationship expression of  $q_u(7 \text{ days})/q_u(14 \text{ days}), q_u(28 \text{ days})/q_u(14 \text{ days}) = \kappa + \lambda \cdot W/S + (\mu + \nu \cdot W/S) |W/C - x|$  ( $\kappa, \lambda, \mu, \nu$ : constant) was obtained.

### 概 要

汚泥のセメント固化において、所定強度を出すのに要するセメント量を決定する際に湿潤土、乾土あたりのセメント量あるいは水セメント比のみでは強度との関係を統一的に調べることはできない。そこで、3種の土すなわち標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土を用いて、土(S)—水(W)—セメント(C)比と一軸圧縮強度 $q_u$ との関係を図および数式によって検討した。i) 強度とS—W—C比との関係を三角座標によって表示すると、等強度線によって両者の関係および土の種類による影響が明瞭になり有益である。ii) 強度とS—W—C比との関係式、 $\log q_u = \alpha - \beta \cdot W/S - (\gamma \cdot W/S + \delta) \{W/C - \varepsilon(W/S)^2(W/C)^2\}$ を得ることができた。ここで、定数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ は土の種類によって決まる定数で土の粒度、液塑性限界と相関が認められた。iii) 養生日数にともなる強度比もS—W—C比と関連が強いことが明らかになり、両者の関係式、 $q_u(7 \text{ 日})/q_u(14 \text{ 日}), q_u(28 \text{ 日})/q_u(14 \text{ 日}) = \kappa + \lambda \cdot W/S + (\mu + \nu \cdot W/S) |W/C - x|$  ( $\kappa, \lambda, \mu, \nu$ は定数)を得ることができた。

### 1. まえがき

汚泥のセメント固化処理において、所定の強度を得るために必要なセメント量を求めることは設計上欠くことのできない仕事である。汚泥の固化強度はいうまでもなくセメント量のほかにセメントと汚泥との混合状態<sup>1)</sup>、養生条件などによっても影響される。しかし、第1段階としては、まず室内試験で完全に混合して所定強度に必要なセメント量の決定を行う。その際に、固化強度はセメント量すなわち湿潤土あるいは乾土あたりのセメント量との関係においてとらえられている。

注) \* 公害汚泥の固化処理に関する研究 (第1報) に続く。

さらに、汚泥は一般に含水比が高いので水セメント比をパラメーターとして強度が検討されている<sup>3), 4)</sup>。しかし、所定の強度に要するセメント量を決定するための統一的方法は確立していない。

そこで、著者らは水セメント比だけでなく土(S)—水(W)—セメント(C)の各比をパラメーターとして、強度を図式化および数式化することを意図した。そして、S—W—C比を三角座標で表示し有益な結果を得ることができ、さらに有機質を主体とする汚泥以外では土の基本的性質をも配慮してS—W—C比と強度との関係を数式化することができた。また、養生日数にともなる強度比もS—W—C比をパラメーターにして数式化

することができた。以上の結果をここに報告する。

## 2. 供試土

セメントによる固化強度には土の種類も大きく影響するので、物理化学的性質の異なる3種の土を用いて試験した。各供試土の名称はそれぞれの土の土質化学的意味を表現するため、標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土とした。それらの土の説明および物理化学的性質は表-1に示すとおりである。なお、標準粘土は有機物がなくてもかかわらず強熱減量が非常に大きいのは粘土鉱物の構造 OHの離脱にもとづいている。

No.	名称	説明	自然含水比	粒度特性	コンシステンシー	真比重	強熱減量	有機物含有率	pH	粘土鉱物
			%	%	LL PL PI		%	%		
1	標準粘土	市販粘土	36	36.0 64.0	29.1 31.9	2.583	12.9	0	5.70	ハロイサイト メタハロイサイト
2	酸化粘性土	荒木田土	36	13.0 49.7 37.3	41.8 20.8 21.0	2.655	4.1	1.4	6.75	モンモリロナイト イライノイト カオリナイト
3	還元粘性土	都賀川へドロ	183	16.4 63.5 20.1	84.4 42.8 41.6	2.511	9.5	7.5	7.12	クローライト イライノイト カオリナイト

表-1 供試土の説明と物理化学的性質

## 3. 実験方法

実験方法を説明するまえに、この報告で用いた土、水、セメントの表示記号と各比の相互関係を説明する。

湿潤土を土粒子(ここでは単に土という)と水に分けてそれぞれの重量をS, Wで、またセメントの重量をCで表わした。したがって、W/S, W/Cはそれぞれ土の含水比、水セメント比、またC/S+W, C/Sはそれぞれ湿潤土および乾土あたりのセメント量を意味する。そして、相互につきのような関係がある。

$$C/S = W/S \div W/C$$

$$C/S+W = \frac{C/S}{1+W/S} = \frac{W/C(1+W/S)}{1+W/S}$$

実験方法を以下に述べる。

表-2に示すような各W/Sに調整した供試土それぞれ2kgに同表に示すようなW/Cになるようにセメントを加え、ホバート型ミキサーで低速(120rpm)3分間、高速(300rpm)20分間混合した。この際の混合状態は完全混合に近いので混合条

W/S	W/C	C/S	C/S+W	標準粘土	酸化粘性土	還元粘性土
0.5	1	0.50	0.333	○	○	○
"	2	0.25	0.167	○	○	○
"	4	0.125	0.083	○	○	○
"	8	0.063	0.042	○	○	○
1.0	1	1.00	0.500	○	○	○
"	2	0.50	0.250	○	○	○
"	4	0.25	0.125	○	○	○
"	8	0.125	0.063	○	○	○
2.0	1	2.00	0.667	○	○	○
"	2	1.00	0.333	○	○	○
"	4	0.50	0.167	○	○	○
"	8	0.25	0.083	○	○	○
3.0	1	3.00	0.750			○
"	2	1.50	0.375			○
"	4	0.75	0.188			○
"	8	0.375	0.094			○

表-2 各試料作製の土(S)-水(W)-セメント(C)比

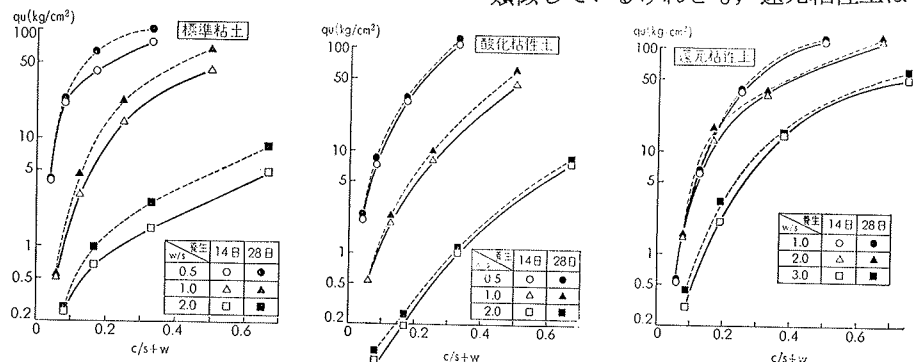


図-1 C/S+W と qu(14, 28日) との関係

件の影響は無視できる。なおセメントとしては普通ポルトランドセメント(秩父セメント)を用いた。試料は塩ビ製モールド(φ50mm, h100mm)に入れて密閉後20°Cで養生した。そして、7, 14, 28日後に一軸圧縮強度をひずみ速度1mm/分で測定した。

## 4. 結果と検討

### 4.1. 実験結果

各土のセメント量(C/S+W)と14, 28日養生の一軸圧縮強度(以下, qu(14日, 28日)で表す)との関係を図-1に示す。図示するように、当然のこととして強度はいずれの供試土でも同一 W/S ではC/S+Wが増すほど、また同一C/S+WではW/Sが小さいほど増大した。しかし、各比が強度に及ぼす影響は土の種類によって異なった。すなわち、還元粘性土のW/S増大による強度低下は標準粘土、酸化粘性土のそれに比べて小さく、また標準粘土と酸化粘性土のW/S1.0, 2.0における同一C/S+Wの強度は類似し、還元粘性土のそれに比べて小さかった。さらに、いずれの試料も当然 qu(28日)はqu(14日)に比べて増大したが、その程度は土の種類によって差があり、酸化粘性土、還元粘性土に比べて標準粘土の方が大きく、この傾向は図示しないけれどもqu(14日)とqu(7日)との関係についても同様であった。

### 4.2. 三角座標による表示

強度とS-W-C比との関係をさらに明らかにするため、三角座標を用いてS-W-C比を表示しqu(14日)を記入した結果、多少のバラツキはあったけれども、図-2に示すような等強度曲線が描かれた。この図によって、両者の関係をいっそう明らかにでき、また土の種類の差異も明瞭となる。すなわち、標準粘土と酸化粘性土は曲線の位置、形状ともに類似しているけれども、還元粘性土はこ

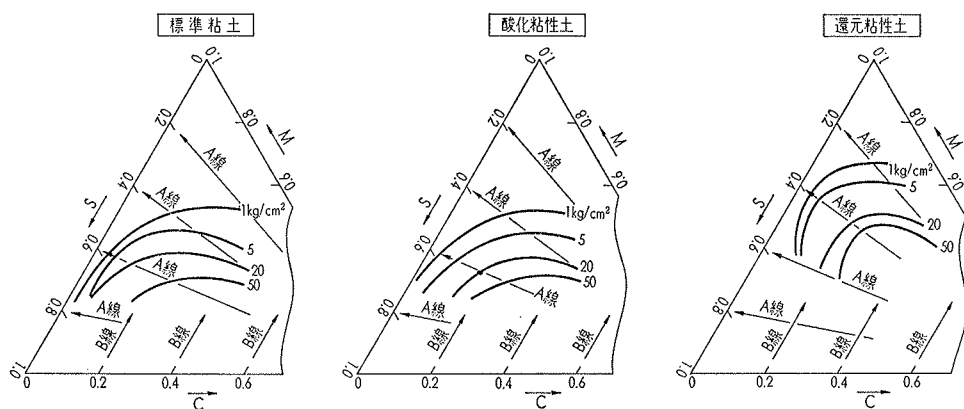


図-2 三角座標で表示したS-W-C比と  $q_u$ (14日)との関係

これに比べて曲線の曲率が大きくしかも上方にずれている。

さらに、この表示法のもう一つの利点は図中に記入したA線すなわち等含水比線とB線すなわち等セメント量線によって、強度をさらに増大させるのに含水比低下とセメント量増加のどちらが効果の大きいかを判別できることである。すなわち、等強度曲線がA線と直交しB線と平行に近いところではセメント量増加の方が、また逆にB線と直交しA線と平行に近いところでは含水比低下の方が効果の大きい。

4.3. 結果の数式化

つぎに、S-W-C比と強度との関係を数式で表わすことを検討した。コンクリートの強度には1919年にAbramsが発表した  $F=A/B^x$  [ $F$ =強度,  $x$ =水セメント比,  $A, B$  は定数]で表わされる水セメント比説がよく用いられる<sup>2)</sup>。この式はつぎのように書きかえられる。

$$\log q_u = A' - B' \cdot W/C \quad \dots\dots(1)$$

そこで、(1)式がセメント固化土にも適用できるかどうか検討した。その結果、図-3に示すようにW/Cと  $\log q_u$  (14日)との関係は標準粘土のW/S 0.5の場合の

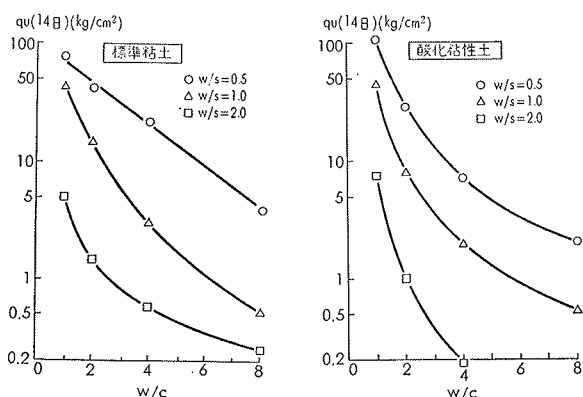


図-3 W/Cと  $q_u$  (14日)との関係

ように直線になることもあったが、大部分曲線になり、またいずれの供試土もW/Sとともに曲率が増大した。また、これとは別に、角田ら<sup>3)</sup>の川崎産シルトおよび東京都公害研究所<sup>4)</sup>の生汚泥のセメント固化試験の結果を同様の関係図で整理した結果、ほぼ直線になった。このように横軸にW/Cをとると直線になる場合

と曲線になる場合とがあり、W/Cのみをパラメータとした(1)式では強度との関係を表わすことはできなかった。

そこで、(1)式を基本にしてW/CだけでなくW/Sも考慮した結果、つぎのような関係式を得ることができた。

$$\log q_u = a - b \{W/C - \epsilon (W/S)^2 (W/C)^2\} \dots\dots(2)$$

ここで  $\epsilon$  は土の種類によって決まる定数であり、標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土でそれぞれ0.015, 0.020, 0.005であった。また、 $a, b$  もデータを回帰分析して求められる定数で、一例として標準粘土について求めた各W/Sにおける関係式を以下に示す。

$$W/S=0.5; \log q_u(14日) = 2.040 - 0.185 \{W/C - 0.015(W/S)^2(W/C)^2\}$$

$$W/S=1.0; \log q_u(14日) = 1.814 - 0.3115 \{W/C - 0.015(W/S)^2(W/C)^2\}$$

$$W/S=2.0; \log q_u(14日) = 1.003 - 0.407 \{W/C - 0.015(W/S)^2(W/C)^2\}$$

なお、この関係を図示すると図-4のようになる。

つぎに、(2)式の定数  $a, b$  をW/Sの1次式で表わして次のような関係式を作成した。

$$a = \alpha - \beta \cdot W/S \quad \dots\dots(3)$$

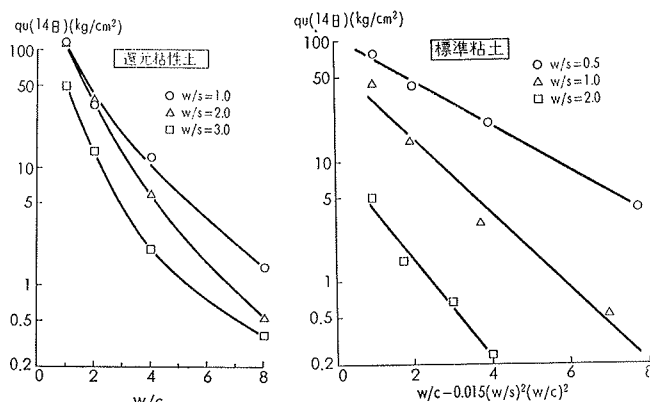


図-4 標準粘土における  $W/C - 0.015(W/S)^2(W/C)^2$  と  $q_u$ (14日)との関係

$$b = \gamma \cdot W/S + \delta \quad \dots\dots\dots(4)$$

(3), (4)を(2)に代入して

$$\log q_u = \alpha - \beta \cdot W/S - (\gamma \cdot W/S + \delta) \{W/C - \varepsilon \cdot (W/S)^2 / (W/C)^2\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

なお、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  は前述の  $\varepsilon$  とともに土の種類などで決まる定数である。(5)式にもとづいて各土の S-W-C 比と  $q_u(14日)$  との関係はつぎのようになった。

標準粘土 :  $\log q_u(14日) = 2.446 - 0.708W/S - (0.141W/S + 0.137) \{W/C - 0.015(W/S)^2 / (W/C)^2\}$  (r=99.2%)

酸化粘性土 :  $\log q_u(14日) = 2.060 - 0.228W/S - (0.472W/S - 0.060) \{W/C - 0.020(W/S)^2 / (W/C)^2\}$  (r=95.9%)

還元粘性土 :  $\log q_u(14日) = 2.417 - 0.094W/S - (0.082W/S + 0.226) \{W/C - 0.005(W/S)^2 / (W/C)^2\}$  (r=95.4%)

なお、ここで r はこの関係式から求めた値と測定値との相関係数であり、いずれの供試土でもかなり高く、とくに標準粘土では高かった。標準粘土の場合の両者の関係を図-5

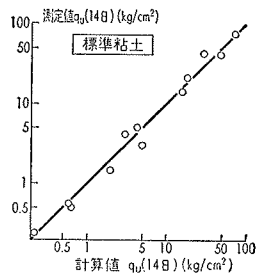


図-5 S-W-C比と  $q_u(14日)$  との関係式から求めた値と測定値との関係 (標準粘土の場合)

さて、(5)式における定数は土の基本的性質とどのよ

うな関係があるかについて以下に検討した。 $\alpha, \beta$  は図-4において、 $\gamma$  軸切片を決定する定数で相互に関連が強いと思われるが、 $\alpha$  は土の諸性質のいずれと関係があるのか明瞭でなかった。 $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  については図-6に示すように土の基本的性質との関連性が認められた。すなわち、 $\beta$  は粒度との関連が強く、粘土分が多いほど、また砂分が少ないほど大きい。また、 $\gamma, \delta, \varepsilon$  は土の液性限界LL、塑性限界PLと関連が強く、図示するように  $\gamma, \varepsilon$  は LL, PL が增大するほど、 $\delta$  は LL, PL が減少するほど小さくなった。これらの定数は実際には、土の粒度やLL, PL だけでなくもっと多数の因子が関与する複雑な定数であろうと思われる。以上のようにして3種の供試土で土の性質の因子をも含めた S-W-C 比と強度との関係式を作成することができた。

一方、養生日数にともなう強度の比を検討した結果を図-7に示す。図示するように、標準粘土の強度増加比は酸化粘性土、還元粘性土に比べて非常に大きかった。しかし、いずれの供試土も強度増加は一般に W/S が大きいほど大きく、また W/C が2あるいは4で最大、8で最小となった。以上のように、養生日数にともなう強度比も S-W-C 比と密接な関係がある。そこで、両者の関係式を以下に検討した。強度比  $q_u(7日)/q_u(14日)$  は標準粘土では W/C 4で最小、酸化粘性土、還元粘性土では一般に W/C 2で最小で、いずれも W/C 8で最大であった。また、 $q_u(28日)/q_u(14日)$  はいずれも W/C 2あるいは4で最大、W/C 8で最小で

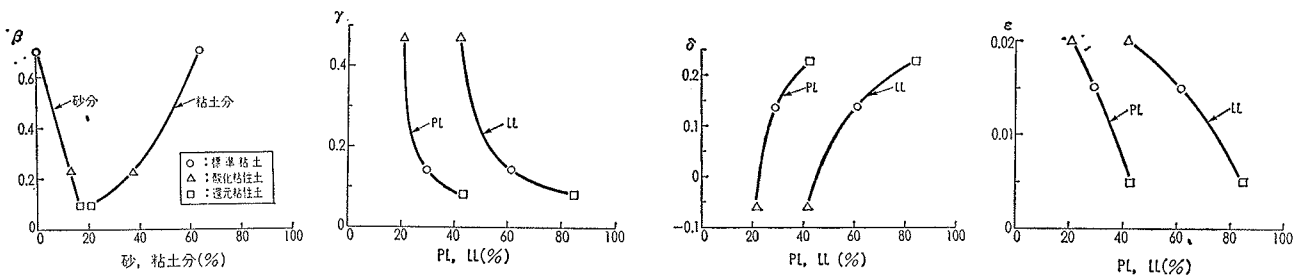


図-6 S-W-C比と  $q_u(14日)$  との関係式における定数  $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  と土の基本的性質との関係

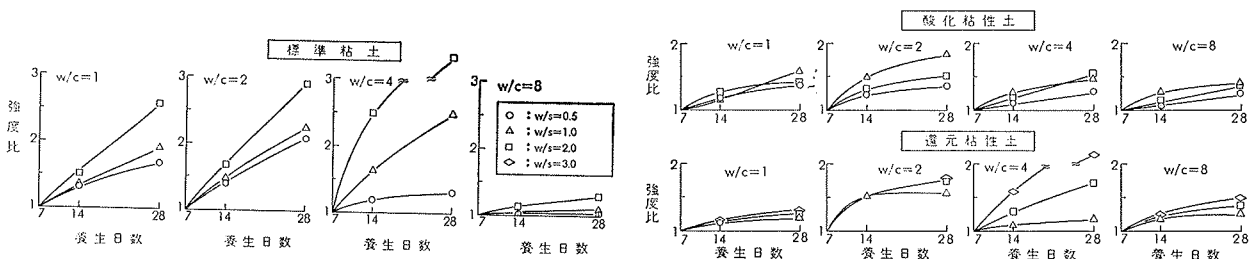


図-7  $q_u(7日)$  に対する  $q_u(14, 28日)$  の比

あったのでつぎのような一般式で表すことができた。

$$q_u(7日)/q_u(14日), q_u(28日)/q_u(14日) = k + l|W/C - x| \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 $x = 2$  または  $4$

ここで、 $k, l$  は  $W/S$  が関係している定数と考え、つぎのような  $S-W-C$  比と強度比との関係式が得られた。

$$k = \kappa + \lambda \cdot W/S \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$l = \mu + \nu \cdot W/S \quad \dots\dots\dots(8)$$

(7), (8) を (6) に代入して

$$q_u(7日)/q_u(14日), q_u(28日)/q_u(14日) = \kappa + \lambda \cdot W/S + (\mu + \nu \cdot W/S) |W/C - x| \quad \dots\dots(9)$$

(9) 式にもとづいて、各土の養生日数にともなう強度比は以下に示す式で表わされた。

標準粘土：

$$q_u(7日)/q_u(14日) = 0.88 - 0.257W/S + (0.007 + 0.056W/S) |W/C - 4| \quad (r=91.2\%)$$

$$q_u(28日)/q_u(14日) = 1.31 + 0.230W/S + (-0.059 - 0.023W/S) |W/C - 2| \quad (r=94.6\%)$$

酸化粘性土：

$$q_u(7日)/q_u(14日) = 0.83 - 0.033W/S + (0.012 + 0.003W/S) |W/C - 2| \quad (r=53.2\%)$$

$$q_u(28日)/q_u(14日) = 1.14 + 0.071W/S + (0.006 - 0.021W/S) |W/C - 4| \quad (r=42.8\%)$$

還元粘性土：

$$q_u(7日)/q_u(14日) = 0.82 - 0.035W/S + (0.017 - 0.003W/S) |W/C - 2| \quad (r=39.1\%)$$

$$q_u(28日)/q_u(14日) = 0.88 + 0.195W/S + (0.035 - 0.045W/S) |W/C - 4| \quad (r=82.1\%)$$

ここで、 $r$  は関係式から求めた値と測定値との相関係数であり、標準粘土は他の供試土に比べて高い相関を示した。しかし、いずれの供試土ともこの場合の相関係数は前述した  $S-W-C$  比と  $q_u(14日)$  との関係の場合に比べてかなり低かった。なお、定数  $\kappa, \lambda, \mu, \nu$  と土の粒度、 $LL, PL$  などとの関連も検討したが、明確ではなかった。

### 5. まとめ

汚泥のセメント固化処理において、所定強度を得るに必要なセメント量を定める際にパラメーターとして通常、乾土あるいは湿潤土あたりのセメント量または水セメント比が用いられるけれども、強度に及ぼす含水比およびセメント量の影響を同時に考慮した系統的方法はない。そこで、標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土を用いて土( $S$ )—水( $W$ )—セメント( $C$ )比を関式化および数式化して一軸圧縮強度  $q_u$  との関係を検討した結果、非常に有益な結果が得られたので以下に要約する。

i)  $S-W-C$  比と強度との関係を調べるために、 $S-W-C$  比を三角座標で表わすと等強度曲線が描かれ、同一図上で両者の関係を非常に明瞭に示すことができ、また強度を増大させるのに含水比低下とセメント量増大のどちらが効果が大きいかをこの図で簡単に判別することができた。

ii) コンクリートで用いられる強度式をセメント固化土に適用して  $\log q_u$  と  $W/C$  との関係を探したが、直線になる場合と曲線になる場合とがあつて数式化できなかった。そこで、含水比  $W/S$  の影響も考慮してつぎのような  $S-W-C$  比と強度との関係式が得られた。

$$\log q_u(14日) = \alpha - \beta \cdot W/S - (\gamma \cdot W/S + \delta) \{W/C - \varepsilon \cdot (W/S)^2 (W/C)^2\}$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$  は土によって決まる定数で、標準粘土はそれぞれ 2.446, 0.708, 0.141, 0.137, 0.015, 酸化粘性土はそれぞれ 2.060, 0.228, 0.472, -0.060, 0.020, 還元粘性土はそれぞれ 2.417, 0.094, 0.082, 0.226, 0.005 であつた。この式による計算値と測定値との相関係数は 3 種の土でそれぞれ 99.2%, 95.9%, 95.4% と高かつた。また、定数  $\beta$  は土の粘土分が多いほど大きく、 $\gamma, \varepsilon$  は土の  $LL, PL$  が小さいほど、また  $\delta$  は、土の  $LL, PL$  が大きいほど大きかつた。

iii) 養生日数にともなう強度比も  $S-W-C$  比が影響し、つぎのような関係式が得られた。

$$q_u(7日)/q_u(14日), q_u(28日)/q_u(14日) = \kappa + \lambda \cdot W/S + (\mu + \nu \cdot W/S) |W/C - x|$$

ここで、 $\kappa, \lambda, \mu, \nu$  は土によって決まる定数で、標準粘土、酸化粘性土、還元粘性土のそれぞれの値は本文に示すとおりであつた。なお、この場合の計算値と測定値との相関係数は(ii)の場合よりかなり低かつた。

以上述べたように、非常に不十分ではあるけれども、 $S-W-C$  比を考慮した図あるいは数式によって強度および養生日数にともなう強度比を論ずることは非常に有益である。また、この際の関係式における定数は土の基本的性質と対応しており、 $S-W-C$  比だけでなく土の種類をも考慮した関係式を作成することができた。今後、これらの関係式について電算機の導入も含めてさらに検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 喜田他：大林組技術研究所報 No.11,152 (1975)
- 2) 六車：コンクリートハンドブック (近藤, 坂編), 朝倉書店, p. 206 (1957)
- 3) 角田他：大成建設技術研究所報 No. 5, 75(1972)
- 4) 汚泥の固形化の研究報告書：都公害研究所(1972)