

自硬性安定液に関する研究（その1）

——硬化体の圧縮強度，弾性係数，透水係数について——

喜田大三 川地 武
斎藤裕司

Studies on Self-Hardening Slurry (Part 1)

——Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Coefficient
of Permeability of Hardened Slurry——

Daizo Kita Takeshi Kawachi
Hiroshi Saito

Abstract

This study was made with the objective of understanding the fundamental nature of hardened slurry in order to broaden its scope of utilization. Considering contamination of soil during excavation, many kinds of slurry were made, and their compressive strengths, moduli of elasticity and coefficients of permeability were investigated. The results were as follows:

(1) Compressive strengths approximately reached their ultimate levels at 12-week age and ranged between 16 and 40 kg/cm² depending on the combination.

(2) Moduli of elasticity were relative to compressive strengths, and were 500 to 17,300 kg/cm², being higher the higher the compressive strength.

(3) Coefficients of permeability were under 10⁻⁵ cm/sec at 2 weeks and under 10⁻⁸ cm/sec at 4 weeks, indicating that hardened slurry possessed adequate water cut-off capability. And, coefficients of permeability were relative to compressive strengths, being lower the higher the compressive strength.

概 要

自硬性安定液を広範囲に利用するために，硬化体の基本性状の把握を目的として，各種配合の硬化体の圧縮強度，弾性係数，および透水係数を測定し，以下のことが判明した。

(1) 圧縮強度は12週材齢でほぼ最終強度に達し，配合によって16~40 kg/cm²を示す。

(2) 弾性係数は圧縮強度と対応関係にあり，圧縮強度が大きいほど大きく，500~17,300 kg/cm²を示す。

(3) 透水係数は2週材齢時で10⁻⁵ cm/sec以下，4週材齢時で10⁻⁸ cm/sec以下を示し，硬化体は十分な止水性能を有する。

また，透水係数は圧縮強度と対応関係にあり，圧縮強度が大きなものほど小さくなる。

1. まえがき

自硬性安定液はベントナイト泥水にあらかじめセメント系の硬化剤を混練したものであり，硬化前はベントナイト泥水と同様に掘削孔壁の安定機能を示し，静置するとそのまま硬化する性質を有している。

この硬化体は硬化剤の種類や配合量を変えることによって，2~40 kg/cm²の圧縮強度を発現するばかりでなく，すぐれた遮水性能を示すので硬化体そのものによる

止水壁，山留壁，その他広範囲の利用が可能である。そのためには作成直後からの流動性状，および硬化体の諸性状を十分に把握する必要がある。

従来からベントナイトとセメントを組合わせた材料はグラウト，トンネルの裏込め，埋め込み杭および仮設の柱列山留壁工法（例えばONS工法）の安定液などに使用されてきた。しかし，いずれの場合も補助的な材料のため，その硬化体の諸性状（圧縮強度，弾性係数，透水係数，曲げ強度，せん断強度，付着強度）は十分に解明

されていない。ここでは広範囲の使用を想定し、掘削時の土の混入をも考慮した各種配合の自硬性安定液の硬化体の諸性状、特に圧縮強度と弾性係数、ならびに透水係数との関係を明らかにした。

なお、圧縮強度とその他の諸性状（曲げ強度、せん断強度、付着強度）の関係は別に報告する。

2. 実験概要

自硬性安定液の硬化体の諸性状は表-1に示すような種々の因子によって影響されると推定される。ここでは自硬性安定液の硬化体の基本性状を把握することを目的とし、最も使用頻度の多い材料を用い、掘削時の土の混入をも考慮して、各種配合の自硬性安定液を作成し、その硬化体の諸性状（圧縮強度、弾性係数、透水係数）を調査した。

材 料	硬化剤の種類 ベントナイトの種類 添加剤（遅延剤、硬化促進剤、その他） 混練水
配 合	硬化剤量、ベントナイト量、添加剤量
土の混入	土の種類（土の物理的・化学的性質） 土の混入量
養生条件	養生方法（水中、その他） 養生温度
混練方法	混練装置、混練順序

表-1 自硬性安定液硬化体の諸性状に
関与する各種因子

3. 供試試料

3.1. 材 料

ベントナイト； 群馬県産250メッシュ
硬 化 剤； 特殊セラメント
混 入 土； シルト（東京地区の沖積層）
 中砂（東京地区の沖積層）
 標準砂（豊浦産）

3.2. 配 合

供試体の配合を測定内容とともに、表-2に示す。表示したように、基本配合はベントナイト量が50, 60, 75 kg/m³の3種類で、硬化剤量が120, 160, 200, 240, 280 kg/m³の5種類を組合わせたものである。また、一部の基本配合に、シルト、または砂を10および20%（安定液に対する重量比）外割で混入した。

4. 実験法

4.1. 供試体の作成

家庭用ミキサーを使用して、図-1に示す手順に従って、所定配合の自硬性安定液を作成した。この自硬性安定液をアクリル製の特製モールドにつめ、そのまま20°Cの標準水中養生を行なった。

配 合				測定内容	
ベントナイト量 (kg/水1m ³)	硬化剤量 (kg/水1m ³)	土の混入(%) 砂 シルト		○	□
50	120	/	/	○	□
	160			○	□
	200			○	□
	240			○	□
60	160	/	/	○	
	200			○	
	240			○	
	280			○	
75	160	/	/	○	△
	200			○	△
	240			○	△
	280			○	△
50	200	10	10	○	□
			20	○	□
		10	20	○	□
			20	○	□
75	200	10	10	○	△
			20	○	△
		20	10	○	△
			20	○	△

○：圧縮強度、△：弾性係数、□：透水係数

表-2 供試体の配合と測定内容

なお、圧縮強度の測定にはφ5×10cmの円柱形供試体、弾性定数の測定にはφ7.5×15cmの円柱形供試体、透水係数の測定にはφ5×5cmの中空円筒形供試体(内径0.9cm)をそれぞれ使用した。

4.2. 測定法

(1) 圧縮強度、弾性係数

圧縮強度は万能試験機を使用して、コンクリートの圧縮強度測定法に準じて測定した。また、弾性係数の測定にあたっては対角線位置となる供試体の両側でのひずみをダイヤルゲージ（精度1/1,000mm）で測定した。

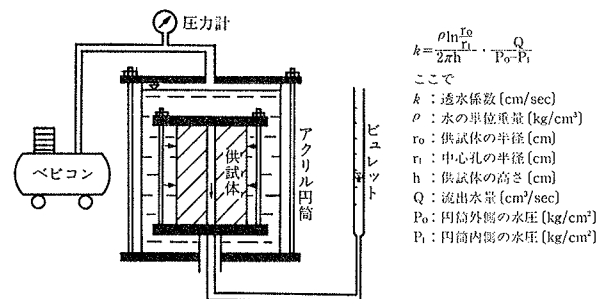
(2) 透水係数

自硬性安定液硬化体の透水係数は10⁻⁵~10⁻¹⁰cm/sec

家庭用ミキサー

- ←水道水
- ←ベントナイト(5分間混合)
- ←硬化剤(2分間混合)
- ←掘作混入土(2分間混合)

図-1 自硬性安定液の
作成手順



$$k = \frac{\rho \ln \frac{r_0}{r_1}}{2\pi h} \cdot \frac{Q}{P_0 - P_1}$$

ここで

- k：透水係数 (cm/sec)
- ρ：水の単位重量 (kg/cm³)
- r₀：供試体の半径 (cm)
- r₁：中心孔の半径 (cm)
- h：供試体の高さ (cm)
- Q：流出水量 (cm³/sec)
- P₀：円筒外側の水圧 (kg/cm²)
- P₁：円筒内部の水圧 (kg/cm²)

図-2 透水試験装置

以下と非常に小さいので、図-2に示すコンクリートの透水試験法(中空円筒による外圧法¹⁾)に準じて流出水量を測定し、図中に併記した式から透水係数を算出した。加圧水圧は供試体の状態によって0.5~2.0 kg/cm²とした。

5. 実験結果と検討

5.1. 圧縮強度

掘削土が混入しない各供試体について、各材齢時に測定した圧縮強度を表-3に示す。

NO.	配合 (水1m ³ に対するkg)		圧縮強度(kg/cm ²)							
	硬化剤	ベントナイト	F ₃	F ₇	F ₁₄	F ₂₈	F ₄₂	F ₅₆	F ₈₄	
1	160	50	0.62	1.32	2.67	5.80	10.5	13.1	16.0	
2	"	60	0.74	1.53	3.20	6.48	11.2	15.6	18.0	
3	"	75	0.87	1.82	3.73	7.63	12.0	16.9	19.0	
4	200	50	0.88	1.96	4.29	8.73	17.1	21.0	23.5	
5	"	60	1.04	2.39	4.92	9.86	18.4	23.5	26.5	
6	"	75	1.31	2.94	5.50	11.7	19.6	25.1	28.4	
7	240	50	1.21	3.07	6.17	12.9	22.0	27.0	29.8	
8	"	60	1.52	3.40	6.80	13.9	23.4	30.7	33.3	
9	"	75	1.93	3.80	7.50	15.0	24.7	32.6	36.0	
10	280	60	2.20	4.15	8.90	18.5	27.1	35.6	37.0	
11	"	75	2.57	4.79	9.40	20.5	29.1	38.4	40.0	

表-3 自硬性安定液の圧縮強度

(1) 圧縮強度の経時変化

各種配合の圧縮強度の経時変化は類似の傾向を示したので、硬化剤量が160 kg/m³, 240 kg/m³の測定結果を両対数グラフとして図-3に例示する。

図示したように、20°Cの標準水中養生の条件下での強度は3日~6週材齢まではほぼ直線的に増大し、その後、12週材齢まではゆるやかに増大して最終強度に達する。このように、特殊セラメントを使用した自硬性安定液の強度発現は普通セメントのように4週材齢で最終強度に達するのではなく、さらに長期材齢まで強度が発現する

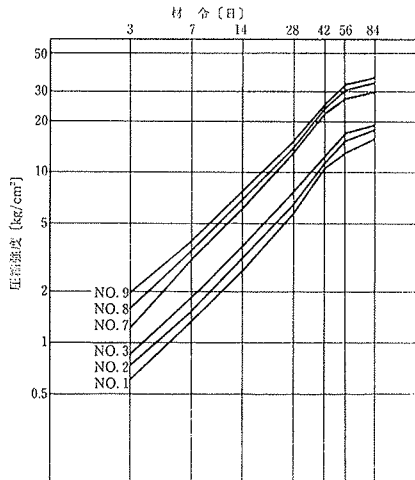


図-3 圧縮強度の経時変化

大きな特徴を有している。

なお、結果は明示しないが、使用する硬化剤の種類によって強度の発現性状はかなり異なり、この点については別に報告する。

(2) 配合が圧縮強度に及ぼす影響

表-3に示したように、同一材齢時の圧縮強度は富配合なものほど大きい。そこで、圧縮強度と配合との関係を調査した。

図-4は1, 4および12週材齢時の強度と硬化剤水比(c/w比)の関係を示したものである。図示したように、c/w比の増大いかえれば硬化剤量の増大に伴って各材齢時の強度は増大し、実験に供したc/w比の範囲(0.16~0.28)でベントナイト量ごとに直線関係がみとめられた。上記の関係はコンクリートの強度とセメント水比の関係と類似している。

ここで、注目すべきことは強度とc/w比の関係直線がベントナイト量によって異なり、ベントナイト量が多い配合ほど同一材齢時の強度が大きいことである。このことはベントナイト量も強度に寄与していることを示している。図-5に4週材齢時の結果を例示するように、強度はベントナイト量にほぼ比例して増大している。

上述のように、硬化剤量およびベントナイト量のいずれもが強度に寄与していることが判明した。すなわち、自硬性安定液の強度発現はベントナイト粒子による基本骨格の形成と、硬化剤水和物による骨格間隙の充填ならびに骨格間の結合によっているものと思われる。したがって、基本骨格を形成するベントナイト量が多いほど、また骨格間を充填する硬化剤量が多いほど硬化体はち密となり強度は増大するのである。ベントナイト粒子による基本骨格の形成は、硬化剤から溶出する陽イオン(主としてCa²⁺)による凝集作用によっておこる。

なお、強度が発現するのに必要な最少硬化剤量は図-

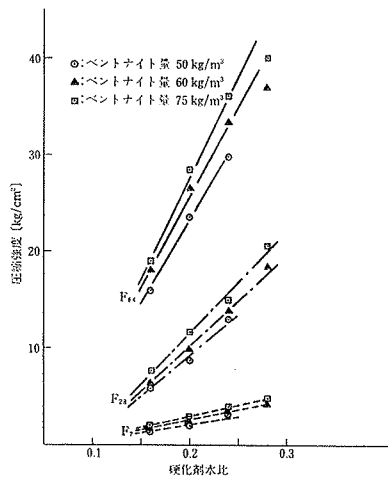


図-4 圧縮強度と硬化剤水比の関係

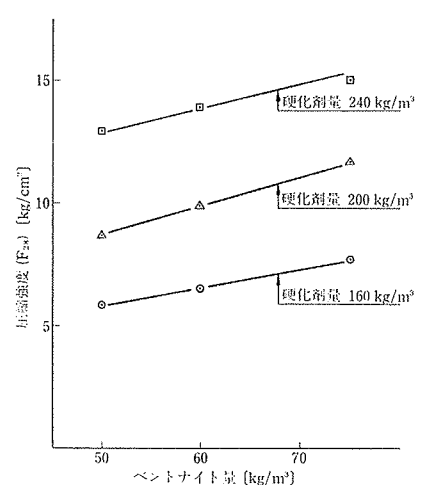


図-5 圧縮強度とベントナイト量の関係

4に示した各直線が c/w 比で 0.07~0.08 付近に集束する傾向を示すことから、70~80 kg/m³ と推定される。

(3) 圧縮強度に及ぼす混入土の影響

硬化剤量が 200 kg/m³、ベントナイト量が 75 kg/m³ の基本調合に、シルト、中砂または標準砂を外割りで10~20%混入した各供試体の圧縮強度の変化を図-6に例示する。図は各材齢時における掘削土が未混入の供試体の強度を1.0とした強度比で示している。

図示したように、強度に及ぼす混入土の影響はその種類によって異なり、砂(標準砂を含む)ではそれを20%まで混入しても、各材齢時の強度は未混入のその±10%の範囲で増減し、砂の混入による影響はごくわずかであると判定される。

つぎに、シルトの影響程度は混入量によって異なり、混入量が10%の強度は未混入のそれとほとんど同じであるが、それが20%の強度は1、2週材齢時で約50%、4、8週材齢時で約15%それぞれ未混入の強度より低下する。このように、シルトでは混入量が多くなると強度が低下することが判明した。しかし、

グラフ式の掘削機を使用して施工する場合にはシルトの混入程度は10%以下と予想されるので、実用上問題はないと判断される。

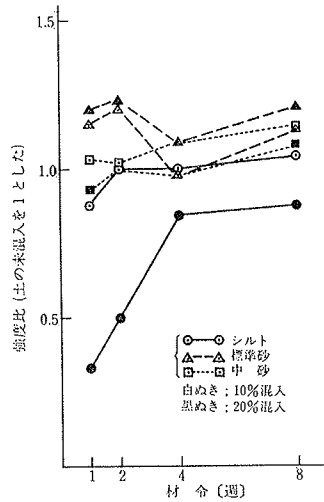


図-6 圧縮強度に及ぼす混入土の影響

5.2. 弾性係数

各供試体について測定した各材齢時の応力度-ひずみ

度曲線の傾向は類似していたので、その代表例として、4週材齢時の結果を図-7には掘削土未混入、図-8には掘削土混入の場合をそれぞれ示す。

図示したように、各々の応力度~ひずみ度曲線は弾性範囲も塑性範囲もない連続した曲線を示し、コンクリートのそれに類似している。そこで、弾性係数はコンクリートの場合と同様に最大応力度の1/2の点における割線弾性係数として求めることにした。各供試体について算出した弾性係数(E_s)を圧縮強度(F)とともに表-4に示す。

(1) 掘削土が混入しない場合

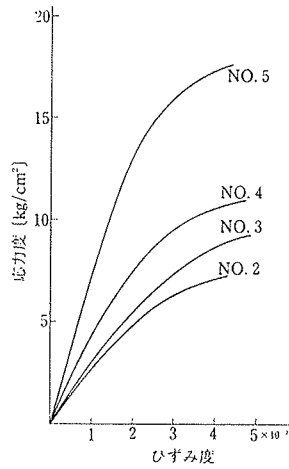


図-7 応力度-ひずみ度曲線 (掘削土が混入しない場合)

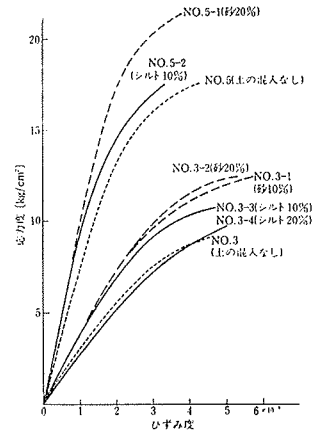


図-8 応力度-ひずみ度曲線 (掘削土が混入した場合)

NO.	配合[水1m ³ に対するkg]				圧縮強度[kg/cm ²]				弾性係数[kg/cm ²]			
	硬化剤	ベント	標準砂	シルト	2週	4週	8週	12週	2週	4週	8週	12週
1	160	50			2.95	—	11.4	12.1	540	—	3,450	4,210
2	200	50			4.15	7.30	14.4	17.8	1,160	2,770	4,000	5,970
3	200	75			5.90	9.20	19.2	20.8	1,540	2,900	7,310	7,300
4	240	75			6.75	10.8	25.8	—	2,230	4,400	8,190	—
5	280	75			10.1	17.7	27.6	32.2	3,460	7,160	9,780	10,800
3-1	200	75	130	—	—	10.8	19.5	21.5	—	3,010	8,210	7,740
3-2	"	"	260	—	—	11.0	20.3	21.6	—	3,130	8,170	10,200
3-3	"	"	—	130	—	11.5	20.0	—	—	3,630	8,190	—
3-4	"	"	—	260	—	10.0	18.4	29.4	—	2,650	7,300	11,000
5-1	280	75	274	—	—	20.3	29.4	38.6	—	9,420	11,110	17,300
5-2	"	"	—	137	—	17.5	28.5	32.0	—	8,920	12,620	11,600

表-4 弾性係数と圧縮強度

表-4に示したように、E_sはFの大きなものほど、大きく、測定結果の範囲内で500~10,800 kg/cm²の値を示した。

コンクリートでは、E_sはFと対応関係にあることが判明しており、その実験式も提案されている。そこで、

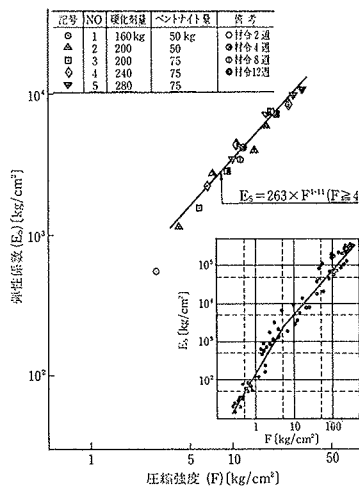


図-9 弾性係数と圧縮強度の関係 (掘削土が混入しない場合)

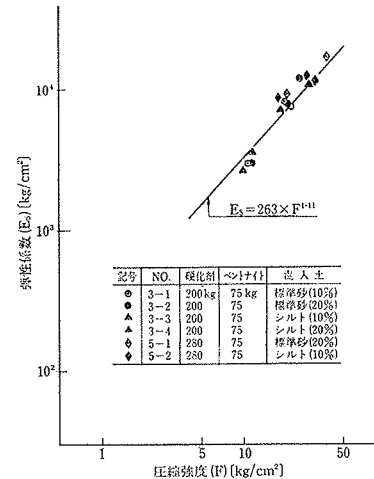


図-10 弾性係数と圧縮強度の関係 (掘削土が混入した場合)

本実験結果についても両者の関係を調査してみた。図-9に E_s と F との関係を両対数グラフ上に示す。図示したように、両者の間には材齢および配合には無関係に、 F の増大に伴って E_s は直線的に増大し、下記の実験式が成立した。

$$E_s = 263 \times F^{1.11} (F \geq 4 \text{ kg/cm}^2)$$

上記の関係は図-9に併記したように、ごく初期材齢のコンクリートについて実施した実験結果²⁾と類似している。

なお、結果は明示しないが、他の硬化剤を使用した場合も上式が成立することが判明している。

(2) 掘削土が混入した場合

図-10に E_s と F との関係を示す。図示したように、両者の関係は掘削土が未混入の場合と同様に、 F の増大に伴って E_s は直線的に増大する傾向が認められる。その際、混入土の種類および混入量による差は認められない。そして、同図中に併記したように、各測定値は掘削土が混入しない場合の関係直線の近傍にバラツキている。このことは表-4に示したように、掘削土の混入によって F は未混入に比べてやや増減するもののそれに付随して E_s は増減することを示し、両者の間にも前掲の関係式が成立することを示している。

5.3. 透水係数

各供試体の2週および4週材齢時における透水係数と圧縮強度を表-5に示す。いずれの配合においても、2週材齢時の透水係数は不透水性のシルト層などに相当する 10^{-5} cm/sec 以下を示し、4週材齢時のそれは 10^{-8} cm/sec 以下と非常に小さい値を示した。したがって、ここで使用した配合は比較的貧配合にもかかわらず、自硬性安定液硬化体は十分な止水性能を有していると判定される。

さて、表示したように、透水係数に及ぼす硬化剤量の影響は顕著で、同一材齢、同一ベントナイト量で比較すると、硬化剤量が 40 kg/m^3 増えるごとに、透水係数は

約2オーダーづつ小さくなる。一方、ベントナイト量はそれが多い配合ほど透水係数はやや小さくなる傾向が認められるが、透水係数に顕著な影響は与えない。

つぎに、掘削土の混入による影響は混入土の種類によって異なる。硬化剤量が 200 kg/m^3 の結果を例示したように、標準砂では、混入量が20%までは未混入とほとんど変わらない。シルトでは混入量が10%で1オーダー、20%で2オーダー未混入に比べて大きくなった。この理由は、後述のように、透水係数は圧縮強度と関連し、シルトの混入によって圧縮強度がやや低下したためと判定される。

また、表-6に示したように、透水係数は材齢とともに小さくなっている。材齢とともに圧縮強度は増大するので、上記の事象は透水係数が圧縮強度と関係することを示唆している。そこで図-11に両者の関係を示す。図示したように、ややバラツキが認められるものの、透水係数は圧縮強度の増大に伴って急激に小さくなり、両者の間にはよい対応関係があると判定される。これは材齢とともに硬化剤の水和反応が進み硬化体の組織がより一層ち密となるためと推察される。

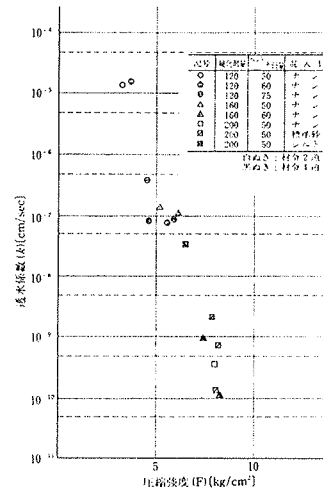


図-11 透水係数と圧縮強度の関係

6. まとめ

自硬性安定液の広範囲な利用を意図し、ここでは硬化体の諸性状の把握、特に圧縮強度と弾性係数ならびに透水係数との関係を明らかにすることを目的として、一連の室内実験を行なった。硬化体の諸性状は各種の因子によって影響されると推定されるが、ここでは最も使用頻度の多い材料を使用して、掘削時の土の混入をも考慮した各種配合の自硬性安定液を作成し、20℃の標準水中養生を行なって圧縮強度、弾性係数および透水係数を測定し、以下のことが判明した。

(1) 圧縮強度は6週材齢まではほぼ直線的に増大し、

NO.	配 合				透水係数 (cm/sec)		圧縮強度 (kg/cm²)	
	硬化剤量 (kg/m³)	ベントナイト (kg/m³)	標準砂 (%)	シルト (%)	2週	4週	2週	4週
1	120	50	/	/	1.26×10^{-5}	7.68×10^{-8}	3.24	4.60
2	120	60	/	/	1.56×10^{-5}	7.07×10^{-8}	3.78	5.56
3	120	75	/	/	4.04×10^{-7}	8.01×10^{-8}	4.51	5.93
4	160	50	/	/	1.63×10^{-7}	8.75×10^{-10}	5.15	7.43
5	160	60	/	/	1.01×10^{-7}	1.03×10^{-10}	6.11	8.34
6	200	50	/	/	3.06×10^{-10}	-	8.02	-
6-1	200	50	10	-	1.40×10^{-10}	/	8.10	/
6-2	"	"	20	-	7.04×10^{-10}	/	8.12	/
6-3	"	"	-	10	1.91×10^{-9}	/	7.83	/
6-4	"	"	-	20	3.50×10^{-8}	/	6.46	/

表-5 透水係数と圧縮強度

その後ゆるやかに増大し続け、12週材齢ではほぼ最終強度に達する。この長期的な強度増加はここで使用した硬化剤の特徴である。

(2) 圧縮強度は配合によって16~40 kg/cm²を示す。また、同一材齢時の圧縮強度は硬化剤水比の増大、いいかえれば硬化剤量の増大に伴って増大し、両者の間にはベントナイト量ごとに直線関係が成立する。

また、同一硬化剤量でも圧縮強度はベントナイト量にほぼ比例して増大する。

(3) 圧縮強度に及ぼす混入土の影響程度は混入土の種類によって異なる。砂を混入した場合は混入量が20%までは未混入の強度の±10%の範囲で増減し、砂の混入による影響はごくわずかである。

一方、シルトの影響程度は混入量によって異なり、混入量が10%では未混入時の強度とほぼ同じであるが、それが20%では15~50%未混入時より低下する。

(4) 弾性係数 (E_s) は圧縮強度 (F) の大きいものほど大きく、500~17300 kg/cm²の値を示す。

また、両者の間には対応関係があり、材齢、配合およ

び混入土とは無関係に次式が成立する。

$$E_s = 263 \times F^{1.11} \quad (F \geq 4 \text{ kg/cm}^2)$$

(5) 2週材齢時の透水係数は不透水性のシルト層に相当する10⁻⁵cm/sec以下を示し、4週材齢では10⁻⁸cm/sec以下を示し、自硬性安定液硬化体は十分な止水性能を有する。

(6) 透水係数に及ぼす硬化剤量の影響は顕著で、硬化剤量が40 kg/m³増大するごとに、透水係数は約2オーダー小さくなる。一方、ベントナイト量が透水係数に及ぼす影響は顕著ではない。また、土の混入によって圧縮強度が変化し、それに伴って透水係数も変化する。

(7) 透水係数と圧縮強度の間には密接な関係が認められ、強度が増大するに伴って透水係数は小さくなる。

参考文献

- 1) 日本材料学会編：建設材料と試験法，日本材料学会
- 2) 野中，奥村：コンクリートの初期性状に関する研究（その3），清水建設研究所報，第29号，（1978. 4）