

13. セメント混合攪拌工法における 混合土の強度と攪拌法

愛媛大学 室 達 朗・*榎 明 潔

1. まえがき

セメント混合攪拌による深層軟弱地盤の改良工法は、置換工法や砂杭による改良工法に比べて、土捨場が不用で、改良面積も小規模ですみ、早期に大きな強度が得られるなどの特色から、既に多数の施工実績を有している。しかし、本工法に関する基礎的研究は遅れており、比較的条件的明確な室内配合試験における強度に関して、コンクリートの水セメント比説のような一般性のある理論は得られておらず、まして、攪拌条件の明確でない実施工における強度の説明は、現状では不可能に近い。

本研究は、セメント混合攪拌工法の基礎研究の端緒として、まず混合攪拌条件を一定にした場合の混合土の強度に影響する因子を、コンクリートで用いられるVoid Theoryの立場から論じ、さらに、模型攪拌装置により攪拌条件を変化させた場合の強度について、攪拌翼が粘土をせん断する機構という観点から考察を加える。

2. 攪拌条件一定の場合の混合土の強度に関する実験¹⁾

(1)実験の装置と条件 固定した減速機付モーター(180r.p.m.)の出力軸の先に取付けたプロペラ状の回転翼(半径6cm)により攪拌容器(φ16×16cm)の中で粘土とポルトランドセメントを混ぜ、混合土をモールド(φ5×10cm)6個に詰め、湿潤養生(20°C,湿度100%)したのち、7日強度 σ_7 、28日強度 σ_{28} を各3個の供試体の一軸圧縮試験で求めた。試料粘土は、

表-1に示すA(高知県日高村で採取した陸成粘土)、B(愛媛県八幡浜港で採取した海成粘土)、C(カオリン)の3種を用いた。また腐植含有量の影響を調べるために、粘土Aの腐植を抽出し、腐植含有量を減らした粘土および抽出した腐植を元の粘土に加えて含有量を増した粘土を調製し使用した。混合は、粘土の含水比(70, 100%), 混合比(粘土の乾燥重量に対するセメントの重量比、10%を中心に1~700%まで11通り)、セメントミルクの水セメント比(1, 0.5)などを組合わせて行った。

(2)一軸圧縮強度に影響する要因 σ_7 と混合比 a_w 、セメント添加率 α (セメント重量/粘土の体積)、水セメント比 w/c [(セメントミルク中の水の重量+粘土の水分の重量)/セメント重量]、喜田等により補正された水セメント比²⁾ $(w-w_c)/c$ (w_c は遠心含水当量)との間には、例えば図-1に示すような相関は認められるが、いずれもばらつきが大きく、これらの指標から σ_7 を推定するのは必ずしも難しい。また混合土の強度に関係する微視的構造についての具体的モデル

粘 土	A	B	C
液性限界 w_L (%)	39.0	62.0	48.5
塑性限界 w_p (%)	26.3	28.2	31.2
遠心含水当量 w_c (%)	32.6	48.8	44.6
pH(H ₂ O)値	7.18	8.40	3.50
強熱減量(%)	6.04	8.99	4.04
有機物含有量(%)	1.54	3.24	0.51
腐植含有量(%)	0.24	0.64	0.05

表-1 試料土の物性

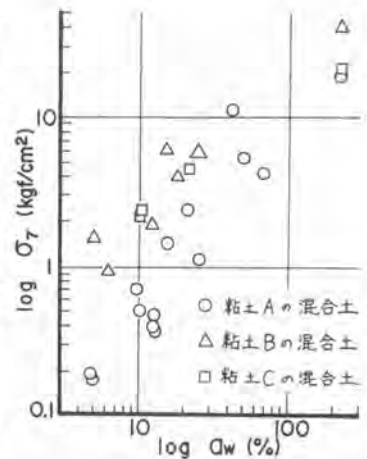


図-1 混合比 a_w と7日強度 σ_7

ルを想定すること困難である。この原因は、これら5の指標が混合土の全ての構成成分を評価していないためである。そこで、混合土を表-2に示すようなセメント硬化体が骨格となり、空気・水・粘土が空隙となる多孔体であると考えれば、各構成成分の強度への影響を一応評価に入れることができる。一般に多孔体の強度の対数は、実積率 Γ （骨格の体積/総体積）の対数と直線関係にあるといわれるが、混合土について同様の整理をした図-2において、この関係は認められる。また、セメントミルクのみの硬化体の強度 σ_c 、 Γ が1に近づいた極端な場合として説明できる。この仮説においては、セメント中の石灰と粘土粒子の両者のポゾラン反応を無視しているが、短期強度が主としてセメントの水和反応によるものと考えられるのは合理的であるし、粘土の種類によっては石灰混合では殆ど硬化しないがセメント混合では硬化が見られることから、反応の主体をセメントの水和に求めることは予自然であると考えられる。本仮説は、表-2中でセメントの硬化に必要な水を $w/c=0.4$ と仮定した点や、混合比がゼロの場合に σ_c が粘土の強度を表わさない点などに改善の余地があるが、実用上は、1,2の簡単な配合試験から十分な精度で任意の配合による混合土の強度を推定し得ると考えられる。

混合前	混合後の状態	重量	体積
空気		0	V_a
セメントミルク	セメント粒子	y	$y/Gc \cdot w$
	セメントと石灰粘土	$0.4y$	$(0.4-0.024)y/w$
	余剰水	$(\theta-0.4)y$	$(\theta-0.4)y/w$
粘土	粘土間けき水	wy/a_w	$wy/a_w \cdot w$
	粘土粒子	y/a_w	$y/a_w \cdot w_s$

セメント硬化体
セメント混合土

表-2 混合土の構成成分

とここで、この仮説によると、粘土の種類によらず $\log \sigma_c \sim \log \Gamma$ 関係は同一になるはずであるが、実際には図-2に見られるように、粘土によって関係が若干異なる。この理由の一つは、人工的に腐植含有量を変えた粘土Aに対する混合試験結果図-3に見られるように、セメント粒子の表面活性を失わせる腐植によるものと考えられる。さらに、粘土の種類によって含まれる腐植の質（セメントの硬化を阻害する程度）が異なるため、必ずしも腐植含有量の多少が強度の大小に直接関係しているのではないかと推定される。また、混合土の σ_7 と σ_{28} の関係を図-4に示す。両者の間には、粘土の種類やその他の条件にかかわらず $\sigma_{28} = 1.506 \sigma_7^{1.148}$ が成立し、コンクリート一般に用いられる推定式は適用できないことが判明した。なお、図-2で、実積率は表-2のようにセメントの水

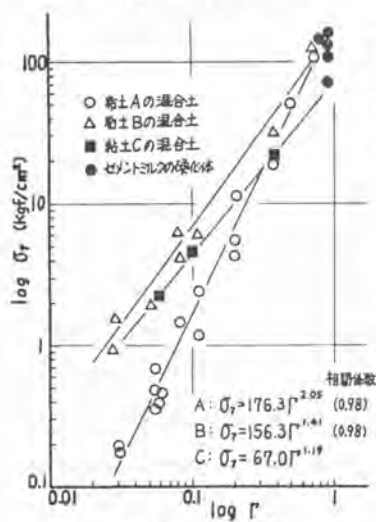


図-2 実積率 Γ と一軸圧縮強度 σ_c



図-3 腐植含有量の差による σ_c の変化

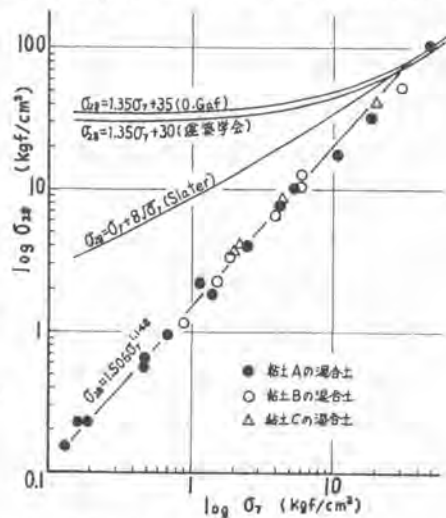


図-4 7日強度 σ_7 と28日強度 σ_{28}

和が終了しているとして求めたが、腐植や材令の影響を考慮することも今後の課題である。さて、セメント硬化体の材令による強度増加の原因は、大別すると、水和物の量的増加と、質的变化によると考えられ、前者は混合土の含水比の低下をともない、後者はともない。図-5は、混合直後の含水比 w_{a0} と28日養生後の含水比 w_{a28} の差と、 $\log \sigma_c$ の関係を示したものであるが、含水比の低下、すなわち水和物の量の増加が強度増加を促していることが明らかである。ところで、表-2から、ある材令での含水比からそのときの実積率を求めると式が導かれるが、高温乾燥による現在の含水比の測定法では、測定中に水和反応が進む可能性があること、また含水比の測定精度が十分でないなどの理由から、その解析は次の機会に行ないたい。

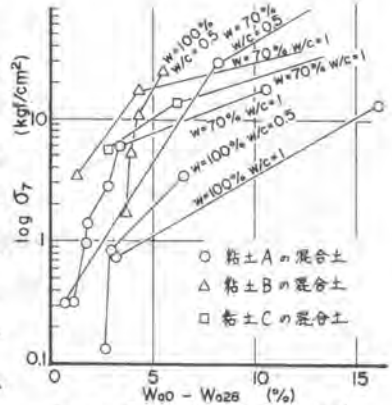


図-5 含水比差と $\log \sigma_c$ の関係

3. 攪拌条件と混合土の強度に関する実験⁴⁾

(1) 実験の装置と条件 実験は、攪拌混合、サンプリング、養生、 σ_c の測定から成る。攪拌混合は図-6に示す装置を用いた。すなわち、モーターAの出力軸端に取付けた翼(半径8.5cm)を容器の底縁まで貫入したのち、回転させながら昇降台を降下させることにより、下部のシリンダーから降下量に応じたセメントミルクが注入管より試料内に注入される。昇降距離は、モールド(φ5×10cm)より長い13cmとした。攪拌条件は、翼の回転数 N (r.p.m.)、昇降速度 v (cm/min)、翼の枚数(標準は軸の両側2枚)、段数(標準は1段)、さらに台の昇降を繰返す回数を、表-3のように変化した。このうち、C、Gはそれぞれ107.4 r.p.m.、70 r.p.m.で、他は全て127 r.p.m.とし、 v を変えている。攪拌終了後、容器内に薄肉の塩化ビニールパイプを挿入することによってサンプリングし、これをモールドに移したのち、2.と同様の養生、一軸圧縮試験を行なった。使用した粘土は表-1の粘土Aを含水比70%に調整したもので、セメントミルクは、重量混合比 $a_w = 21.5\%$ 、 $w/c = 1$ である。

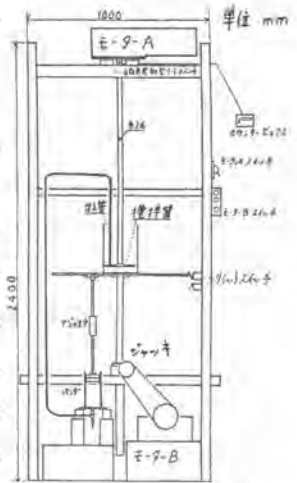


図-6 攪拌注入実験装置

(2) 実験結果と考察 攪拌翼が粘土中を回転するときのせん断面で、セメントミルクと粘土の混合が行なわれると仮定すると、単位体積中のせん断面の面積が大きければ混合が十分に行なわれ、混合土の強度も大きいと考えられる。したがって翼1枚の回転面積の倍を S (せん断は翼の上下面で生じる可能性がある)、被攪拌体積を V として、 S/V を指標に、強度 σ_c との関係を調べてみる。なお、以下の図中において、一攪拌混合で得られた7枚試体の強度の平均値、± σ (分散)の範囲、最大値と最小値の範囲を、それぞれ、記号、実線、破線を示した。

		σ_c (kgf/cm ²)											
		3	9	6	6	7	9	10	20	20	20	28	37
基本タイプ		1段2枚1回	A ₁₂	B ₁₂	C ₁₂	D ₁₂	E ₁₂	F ₁₂	G ₁₂	H ₁₂			
1回攪拌	1段2枚	(1) 9.4 cm	B ₂₂ ^W										
		(2) 7.1 cm	B ₂₂ ^W			E ₂₂ ^W	F ₂₂ ^W						
		(3) 4.7 cm	B ₂₂ ^W										
		(4) 3.1 cm	B ₂₂ ^W			E ₂₂ ^W	F ₂₂ ^W						
		(5) 2.4 cm	B ₂₂ ^W										
		3段2枚(4) 3.1 cm							F ₂₂				
3回	1段2枚		3B ₂					3F ₂					
5回	1段2枚		5B ₂					5F ₂					
7回	1段2枚		7B ₂										

表-3 実験条件一覧表

また、昇降速度 v が7 cm/min以下の実験(表-3中のF, G, H)では、攪拌混合中に試料表面へのセ

メントミルクの浮出しが見られたため、翼の混合比は低下していたと考えられる。

図-7に標準タイプ1段2枚1回攪拌で、昇降速度および回転数によってS/Vを変えた場合の、 σ_7 とS/Vの関係を示す。

前述の理由でF, G, Hのデータを無視すると、この場合にはS/Vの増加にしたがって σ_7 が増加していると考えられる。

また、図-8は、台の昇降の繰返し回数による σ_7 の変化を調べたもので、繰返し回数の増加によるS/Vの増加に対して、 σ_7 の増加が見られる。

一方、翼の段数や枚数によってS/Vを増加させても、

図-9に見られるように、 σ_7 の増加は見られない。

このような結果の得られた理由としては、翼と土の共回りが考えられる。すなわち、一度せん断された面は、土中の弱面として存在するため、つぎにその面の近傍で翼を回転させても、翼の上下面がせん断面とならず、その弱面がせん断されるため、みかけ上のS/Vが増加してき、翼のS/Vは増加しない。また、2枚の近接した翼がある場合には、その間に土を挟んだまま回転する共回りも考えられる。

4. 結論

(1) 混合土の強度と実積率の間には、両対数グラフ上で直線関係が見られる。

(2) 腐植含有量を増すと、強度が低下する。

(3) 混合土の σ_7 と σ_{28} の間には、 $\sigma_{28} = 1.506 \sigma_7^{1.148}$ という関係が使用した3種類の粘土すべてで成立した。

(4) 攪拌混合条件については、台の昇降回数に相当する繰返し回数を増すが、単純な翼での1回攪拌で昇降速度を下げると、翼の回転数を上げることが強度増加に有効で、翼の段数や枚数を増しても効果はなかった。これは、翼と土との共回りによるものと考えられる。

ただし、低い昇降速度の場合には、注入したセメントミルクの浮出しに注意する必要がある。

参考文献

- 1) 室・榎・藤井：セメント混合土の圧縮強度について、土木学会第36回年次学術講演会（投稿中）。
- 2) 馬場・崎他：セメント系硬化剤による累層混合処理工法に関する研究（その9）、第15回土木工学研究発表会講演集、pp.713 ~716。
- 3) 近藤連一：多孔材料、技報堂、1975年、pp.165 ~174。
- 4) 室・榎・中西：累層セメント混合工法における攪拌と強度の関係、土木学会中国支部第33回一般講演会報告、pp.388 ~389, 1981。

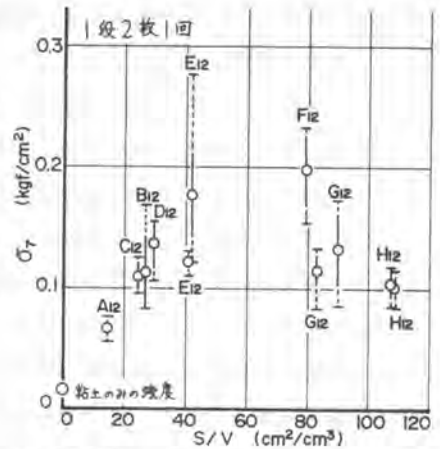


図-7 S/Vと σ_7 の関係(標準タイプ)

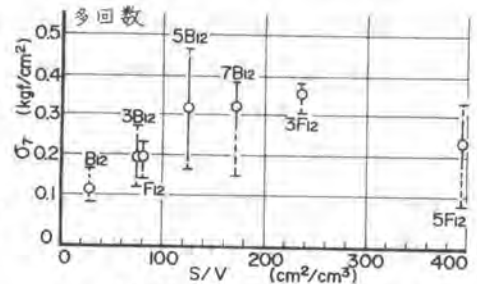


図-8 S/Vと σ_7 の関係(多回数)

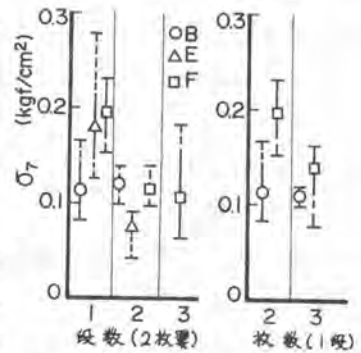


図-9 翼の枚数や段数の影響