

気泡混合軽量土の品質管理法に関する研究

豊福俊泰¹・三嶋信雄²・田中久士³

¹正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

²正会員 工博 日本道路公団試験研究所土構造物研究主幹 (〒194-8508 町田市忠生1-4-1)

³麻生フォームクリート(株)福岡支店営業部長 (〒811-2113 福岡県粕屋郡須恵町大字須恵714-1)

近年、気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法を採用する施工事例が、急激に増加している。気泡混合軽量土の配合設計法としては、暫定配合表から使用する原料土(砂質土)ごとに補正計算によって配合を決定する方法が、日常管理試験法としては、早期品質判定のため材齢7日の供試体による方法がとられているのが現状である。使用される原料土が多岐に渡ることから、合理的な品質管理法の確立が急務となっている。そこで、本研究は、気泡混合軽量土の主要な要求性能であるフロー値、湿潤密度および一軸圧縮強さに対して、影響する要因を、多数の試験結果の回帰分析によって解明するとともに、実際の工事の管理データで実用性を検証することにより、気泡混合軽量土の品質管理法を提案したものである。

Key Words : foamed mixture lightweight soil, air mortar, mix proportion, flow value, wet density, unconfined compression strength, quality control, multiple regression analysis

1. 序論

気泡混合軽量土は、原料土(砂質土)とセメント、水および気泡を混合し軽量化したもの、または、セメント、水および気泡を混合し軽量化したものであり¹⁾、一般の盛土材に比べ軽量性、流動性、硬化後の自立性などの特色を有するものである。

周知のように、従来から高速道路の建設工事では、地山との空隙を充填するために、トンネル覆工の裏込め注入材および深礎ぐいの裏込めグラウトとして、エアモルタル・エアミルクが使用されていた。これらの建設技術に対応して、日本道路公団試験研究所では、昭和41、52、55年度にエアモルタルに関する試験研究を行うとともに規定値の検討を行った^{2), 3), 4), 5), 6)}。

一方、アメリカでは、軽量性に着目して、1985年にボストンのワールドトレードセンターの建設において、荷重軽減が必要な床部の置き換え材に78,000yd³のエアモルタル(low-density cellular concrete)が使用され⁷⁾、また、Whitestone Expresswayでは、橋梁のアプローチ部の軽量盛土としてエアモルタルが使用されるなど、土工材としての新工法が開発されてきた。

わが国では、これらを参考に1986年、東北自動車道八戸線一戸地区における地すべり対策工として盛土荷重軽減のために使用されたのが最初であり、近年、気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法を採用する施工事例が、

急激に増加している。

そこで、日本道路公団試験研究所では、平成3年度から平成7年度に気泡混合軽量土に関する試験研究を行った⁸⁾。これらの試験研究の成果から、気泡混合軽量土の設計・施工に関する指針類がまとめられている¹⁾。また、軽量盛土材に関する山内らの研究⁹⁾が報告された。

しかし、これらの配合設計法としては、暫定配合表から使用する原料土(砂質土)ごとに補正計算によって配合を決定する方法が、日常管理試験法としては、材齢7日の供試体による方法がとられているにすぎず、原料土として使用される材料は多岐に渡ることから、合理的な品質管理法の確立が急務となっている。

そこで、本研究は、気泡混合軽量土の主要な要求性能であるフロー値、湿潤密度および一軸圧縮強さに対して、影響する要因を、今までの試験結果を回帰分析することによって解明^{10), 11)}するとともに、各種の使用材料に対して、実際の工事の管理データで実用性を検証することにより、配合設計法を検討し、気泡混合軽量土の品質管理法を提案したものである¹²⁾。

2. 気泡混合軽量土に関する試験の概要

(1) 試験の概要

気泡混合軽量土に関する試験は、表-1に示すように、

表-1 試験条件

試験の区分	水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C	起泡剤の種類	セメントの種類 注1)	砂の種類 注2)	要求性能			配合 (kg/m³)				供試体		配合数 (配合)
						フロー値 F (mm)	湿潤密度 N (g/cm³)	一軸圧縮強さ(材齢28日) fc28 (N/mm²)	セメント C	水 W	砂 S	空気量 A (%)	材齢 (日)	寸法 注3)	
試験Ⅰ	51~186	0.1, 2.5	9	6(N)	9(各)	160~200	0.58~1.49	0.3, 0.5, 1.0	150~390	148~291	0~950	30~73	28	φ5, φ10, □4	81
試験Ⅱ	50~157	0.1, 2.5	9	6(N)	9(各)	160~200	0.58~1.45	0.3, 0.5, 1.0	150~390	144~295	0~950	30~74	7, 28	φ10	81
試験Ⅲ	61~166	0.1, 2.5	1	2(N, B)	1(K)	180	0.61~1.44	0.3, 0.5, 1.0	150~390	186~287	0~950	27~66	3~1095	φ5	18
試験Ⅳ	60~190	0.1, 2.3, 4.5	1	1(B)	1(T)	140~200	0.43~1.45	0.1~3.0	134~485	148~322	0~994	30~70	7, 28	φ5, φ10	96
試験Ⅴ	75~208	0.1, 2.3, 4.5	1	1(B)	1(T)	160, 180, 200	0.45~1.10	0.3, 0.5, 0.8, 1.0	100~340	163~301	0~753	45~70	28	φ10	72
試験Ⅵ	85~180	0.1, 2.3, 4.5	1	1(B)	1(T)	180	0.45~1.14	0.3, 0.5, 0.8, 1.0	116~328	209~279	0~745	40~70	28	φ10	24

注1) () 内のB: 高炉セメントB種, N: 普通ポルトランドセメント 注2) () 内の各: 各地産の山砂および海砂, K: 君津産山砂, T: 豊砂
注3) φ5: φ5×10cm, φ10: φ10×20cm, □4: 4×4×16cm

表-2 要因とした項目および各要因の単回帰分析結果 (試験Ⅳ, 試験Ⅴ, 試験Ⅵ, 供試体寸法φ10×20cm) (N=192)

区 分	項 目	記号	単 位	データの範囲	項目間の単相関係数(r)											注)	
					C	W	S	A	S/C	W/C	Cv/Y	F	N	fc28			
配 合	単位セメント量	C	kg/m³	100~480	0.350	-0.645	0.334	-0.773	-0.802	0.915	-0.096	-0.413	0.231				
	単位水量	W	kg/m³	149~350	0.350	-0.069	-0.389	-0.111	0.191	0.386	0.732	0.175	0.271				
	単位砂量	S	kg/m³	0~970	-0.645	-0.069	-0.880	0.935	0.613	-0.292	-0.139	0.952	0.505				
	空気量	A	%	30.0~71.5	0.334	-0.389	-0.880	-0.768	-0.548	-0.032	-0.123	-0.971	-0.676				
	砂セメント比	S/C	-	0~5	-0.773	-0.111	0.935	-0.768	-	0.791	-0.506	-0.053	0.837	0.272			
	水セメント比	W/C	%	60.0~207.5	-0.802	0.191	0.613	-0.548	0.791	-	-0.712	0.476	0.514	-0.127			
要求性能	セメント空飽比	Cv/Y	-	0.042~0.186	0.915	0.386	-0.292	-0.032	-0.506	-0.712	-	-0.203	-0.028	0.573			
	フロー値	F	mm	121~254	-0.096	0.732	-0.139	-0.123	-0.053	0.476	-0.203	-	-0.062	-0.275			
	湿潤密度	N	g/cm³	0.435~1.421	-0.413	0.175	0.952	-0.971	0.837	0.514	-0.028	-	-0.062	-			
	一軸圧縮強さ(材齢28日)	fc28	N/mm²	0.10~3.23	0.231	0.271	0.505	-0.676	0.272	-0.127	0.573	-0.275	-	0.682			

注) 下線部は|R|=0.60以上, 太線部は|R|=0.95以上で高度の相関があるもの

気泡混合軽量土の主要な要求性能として、施工性（流動性）をフロー値で、軽量性を湿潤密度で、強度を材齢28日の一軸圧縮強さでそれぞれ求めるものとした。試験方法は、フロー値および湿潤密度は JHS A 313-1992⁹⁾により、一軸圧縮試験は JIS A 1216 に準じて行うものとし 20±3℃の恒温室で養生した。これらの要求性能から、配合条件として水セメント比 W/C, 砂セメント比 S/C, 空気量 A を変化させ、供試体条件としては供試体寸法、材齢を変化させて試験を実施した。

試験Ⅰおよび試験Ⅱでは、使用材料のセメント、砂、起泡剤の種類を変えて、供試体寸法が一軸圧縮強さに及ぼす影響を、また、試験Ⅲでは、材齢が一軸圧縮強さに及ぼす影響を調べた。起泡剤は、合成界面活性剤系またはたん白質系起泡剤で、プレフォーム式(事前発泡方式)のものを使用するものとした。

試験Ⅳ, 試験Ⅴおよび試験Ⅵでは、セメント、砂、起泡剤の種類を一定（高炉セメントB種, 豊浦砂, 合成界面活性剤系起泡剤）とし、フロー値、湿潤密度、一軸圧縮強さの関係を調べた。

(2) 気泡混合軽量土の配合

気泡混合軽量土の配合は、次式から求められる。

$$C/C_M + S/S_M + W_1 + W_2/K_M + W_3 + 10A = 1000 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (2)$$

$$W_2 = 10A K_M / K / (H-1) \quad (3)$$

$$W_3 = W_2 (K-1) / K_M \quad (4)$$

ここに、C_M:セメントの密度 (g/cm³)

S_M:砂の密度 (g/cm³)

W₁:混練水量 (kg/m³, 水の密度は 1.00g/cm³ とする)

W₂:起泡剤量 (kg/m³)

W₃:希釈水量 (kg/m³)

K_M:起泡剤の密度 (g/cm³, 起泡剤の種類で 1.00~1.18 g/cm³)

H:発泡倍率 (標準倍率 20~25 倍)

K:希釈倍率 (標準倍率 10~25 倍)

また、湿潤密度Nは、次式から求められる。

$$N = (C + S + W) / 1000 \quad (5)$$

(3) 解析方法

一軸圧縮強さなど各要因の関係は、単回帰分析または重回帰分析によってデータ解析し、次の関係を求めた。

$$y = a + bX \quad (6)$$

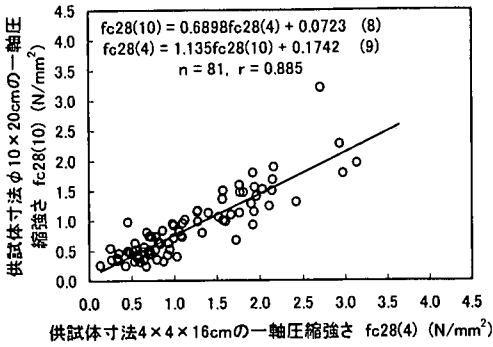
$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \quad (7)$$

ここで、a, b:定数 (r:単相関係数)

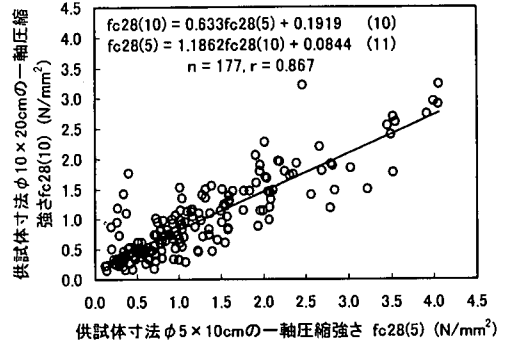
b₀, b₁, b₂, ..., b_p:定数 (R:重回帰係数)

重回帰分析は、変数増減法 (分散比 F=2.0 で判定) で解析した。

解析データは、表-2 (試験Ⅳ, 試験Ⅴ, 試験Ⅵ) に示

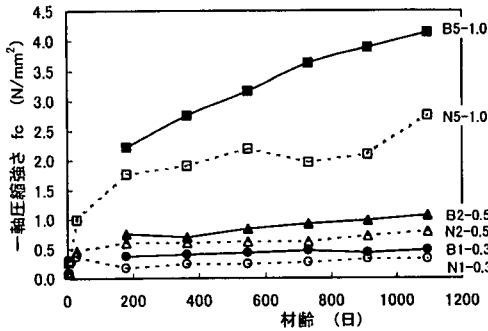


(a) 供試体寸法4×4×16cmとφ10×20cm (試験I)

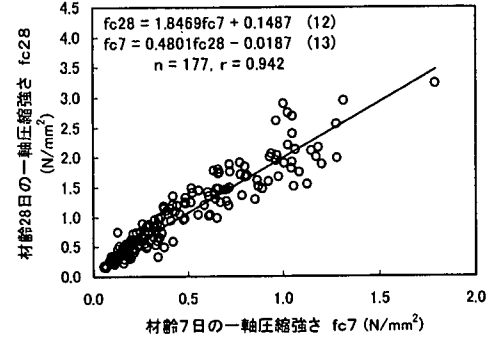


(b) 供試体寸法φ5×10cmとφ10×20cm (試験I, 試験IV)

図-1 一軸圧縮強さと供試体の種類



(a) 材齢と一軸圧縮強さ (試験III, 湿空養生, 供試体寸法φ5×10cm, S/C = 1, 2, 5, fc = 0.3, 0.5, 1.0N/mm²)



(b) 材齢7日と材齢28日との一軸圧縮強さ (試験II, 試験IV, 供試体寸法φ10×20cm)

図-2 材齢と一軸圧縮強さとの関係

すとおりである。

3. 試験結果

(1) 供試体の寸法

エアモルタルの一軸圧縮強さ試験は、従来からセメントの強さ試験に準じて4×4×16cmの角柱供試体によって行われてきたが⁶⁾、土の一軸圧縮試験方法および一般のコンクリートの圧縮強度試験方法では、供試体の形状を円柱としている。そこで、一軸圧縮強さの関係を、φ10×20cmの円柱供試体と4×4×16cmの角柱供試体、φ5×10cmの円柱供試体との間で、それぞれ求めると、図-1(a), (b)に示すとおりである。φ10×20cmの円柱供試体による試験値は、4×4×16cmの角柱供試体の試験値と比較して、強度が高いほど直線的に低くなる傾向が認められ、全平均では後者の88%となっている。さらに、φ5×10cmの円柱供試体の試験値と比較すると、同様に、強度が高いほど直線的に低くなる傾向が認められる。

これらのことから、気泡混合軽量土の品質管理は、所

要の一軸圧縮強さに対し安全側となるφ10×20cmの円柱供試体の試験値によることとした¹⁾。

(2) セメントの種類と材齢

気泡混合軽量土に用いるセメントとしては、高炉セメントB種および普通ポルトランドセメントの2種類を比較した。一軸圧縮強さと材齢(3年)との関係は、代表例として砂セメント比(1, 2, 5)と目標強度(0.3, 0.5, 1.0N/mm²)との3種類の組み合わせの場合について、図-2(a)に示す。試験結果から、普通ポルトランドセメントの場合、材齢6ヶ月以降強度の増加が少ないのに対し、高炉セメントB種の場合、1年以降も強度の増加が認められる。このように、高炉セメントB種は、初期強度は小さいが長期強度が大きいこと、経済性等を考慮すると、気泡混合軽量土の安定材として最適であると判断される。なお、一般のコンクリートと同様に、強度を十分に発現させひび割れ等を防ぐため、適切な養生を行うこと(特に、材齢初期)が重要である。

また、材齢28日の一軸圧縮強さは、材齢7日と比べほぼ2倍の値となっている(図-2(b)参照)。このことか

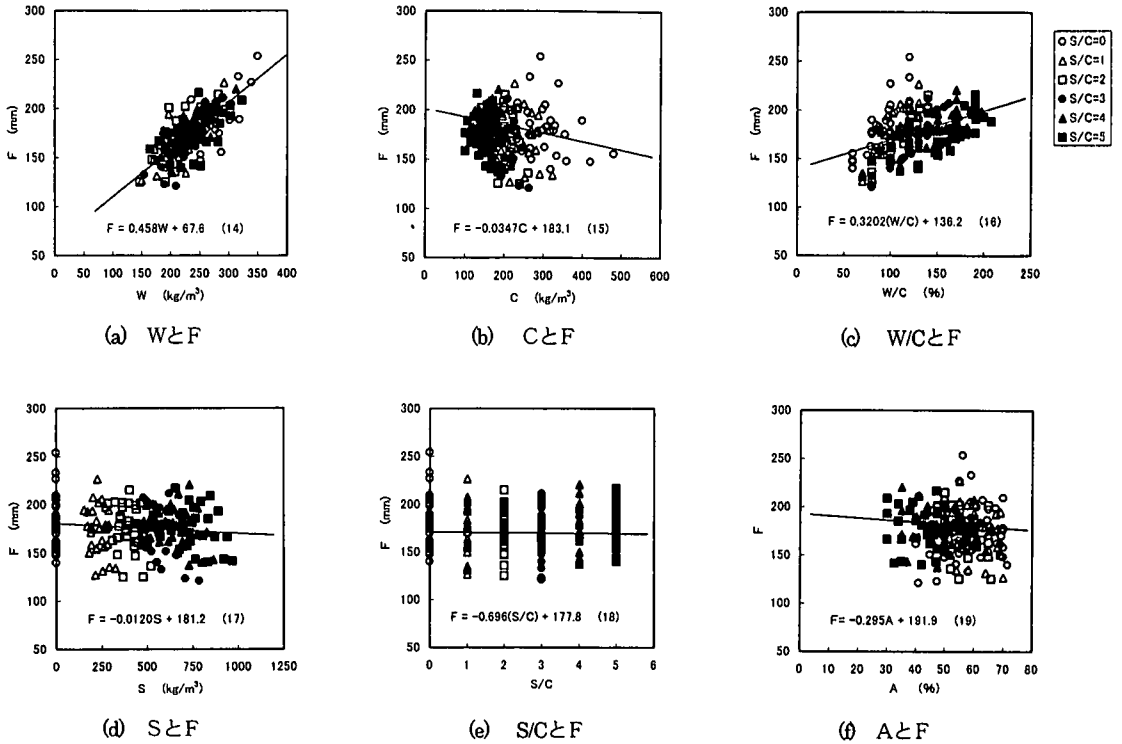


図-3 各種要因とフロー値との関係 (試験IV, 試験V, 試験VI)

表-3 重回帰分析結果 (試験IV, 試験V, 試験VI)

(n = 192)

区分	推定式	式	R	e _s
F	$F = 114.2 + 0.6143W - 0.2999C - 0.0525S$ (26.4) (35.9) (-23.3) (-18.2)	(20)	0.939	7.8
W	$W = -141.9 + 1.4206F + 0.4645C + 0.0793S$ (-14.4) (35.9) (25.1) (17.8)	(21)	0.945	11.8
N	$N = 0.009 + 0.000990S + 0.000948C + 0.001032W$ (1.6) (250.4) (53.9) (44.1)	(30)	0.999	0.011
	$N = 0.032 + 0.1484(S/C) + 5.4175(C_v/V)$ (1.1) (43.6) (20.9)	(31)	0.954	0.069

注) 下段の () 内は t 値 R : 重相関係数 e_s : 残差 e の標準偏差(n-1)

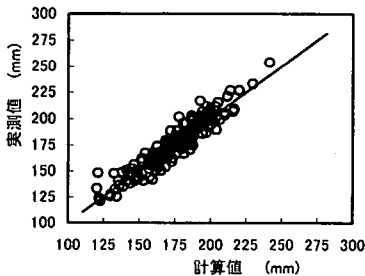


図-4 式(20)のフロー値の計算値と実測値との関係

ら、所定の強度が得られていることを早期品質判定するために、材齢7日における一軸圧縮強さが、材齢28日の一軸圧縮強さの1/2以上であることを確認することによって品質管理を行う方法が採用されている¹⁾。

(3) フロー値と配合との関係

以上のことから、供試体寸法をφ10×20cmの円柱供試体とし、使用材料をセメントに高炉セメントB種、砂に豊浦砂および起泡剤に界面活性剤系起泡剤で一定とした試験IV, 試験V, 試験VIの試験結果から、気泡混合軽量土の品質に関連する配合要因の項目をデータとし、その範囲および項目間の単相関係数を求めると、表-2に示したとおりである。

要求性能であるフロー値は、表-2および図-3に示すように、配合条件のうち単位水量Wとの相関が最も強く、次に水セメント比W/Cとの相関が認められる。

また、表-3の式(20) (図-4参照) は、フロー値と配合要因である単位水量、単位セメント量、単位砂量との関係を重回帰分析によって求めた結果である。これらのこ

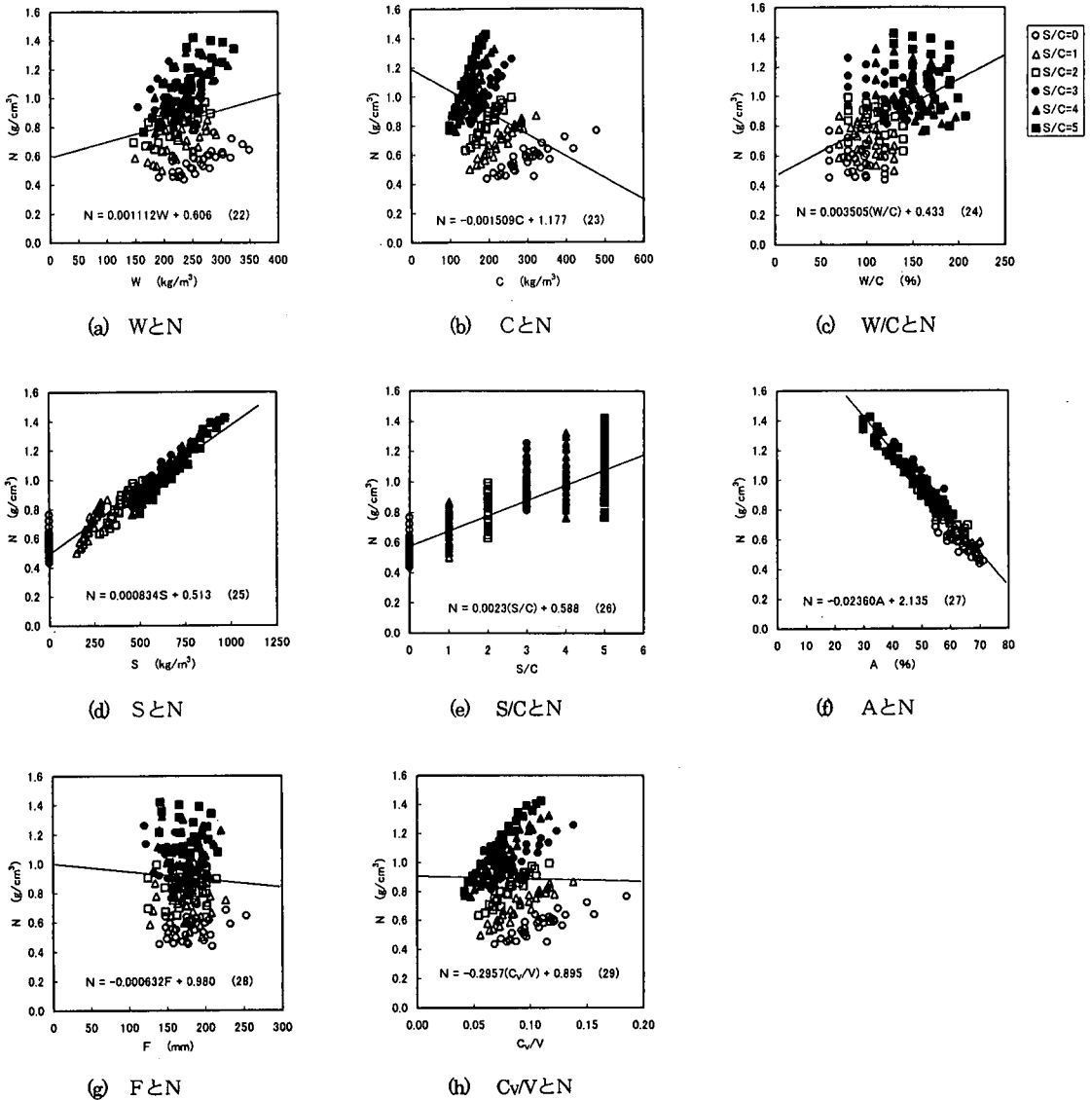


図-5 各種要因と湿潤密度との関係(試験IV, 試験V, 試験VD)

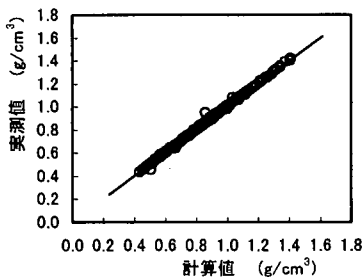


図-6 式(30)の湿潤密度の計算値と実測値との関係

とから、フロー値は、砂セメント比に拘わらず、流動体である水の量の影響が最も大きく、この量が多いほど大きくなり、逆に、固体であるセメントおよび砂の量が多

いほど小さくなることが判明した。

この関係から、単位水量は式(21)で表される。

(4) 湿潤密度と配合との関係

式(1)および式(5)の関係から、湿潤密度は、単位セメント量、単位砂量および単位水量と、あるいはこれらの容積を単位容積から減じた量である空気量と、関係があることが想定される。これに対し単回帰分析結果からは、表-2および図-5に示すように、湿潤密度は、配合条件のうち空気量Aとの相関が最も強く、次に単位砂量、砂セメント比、水セメント比、単位セメント量との相関が認められる。

また、式(30) (表-3および図-6参照) は、湿潤密度と

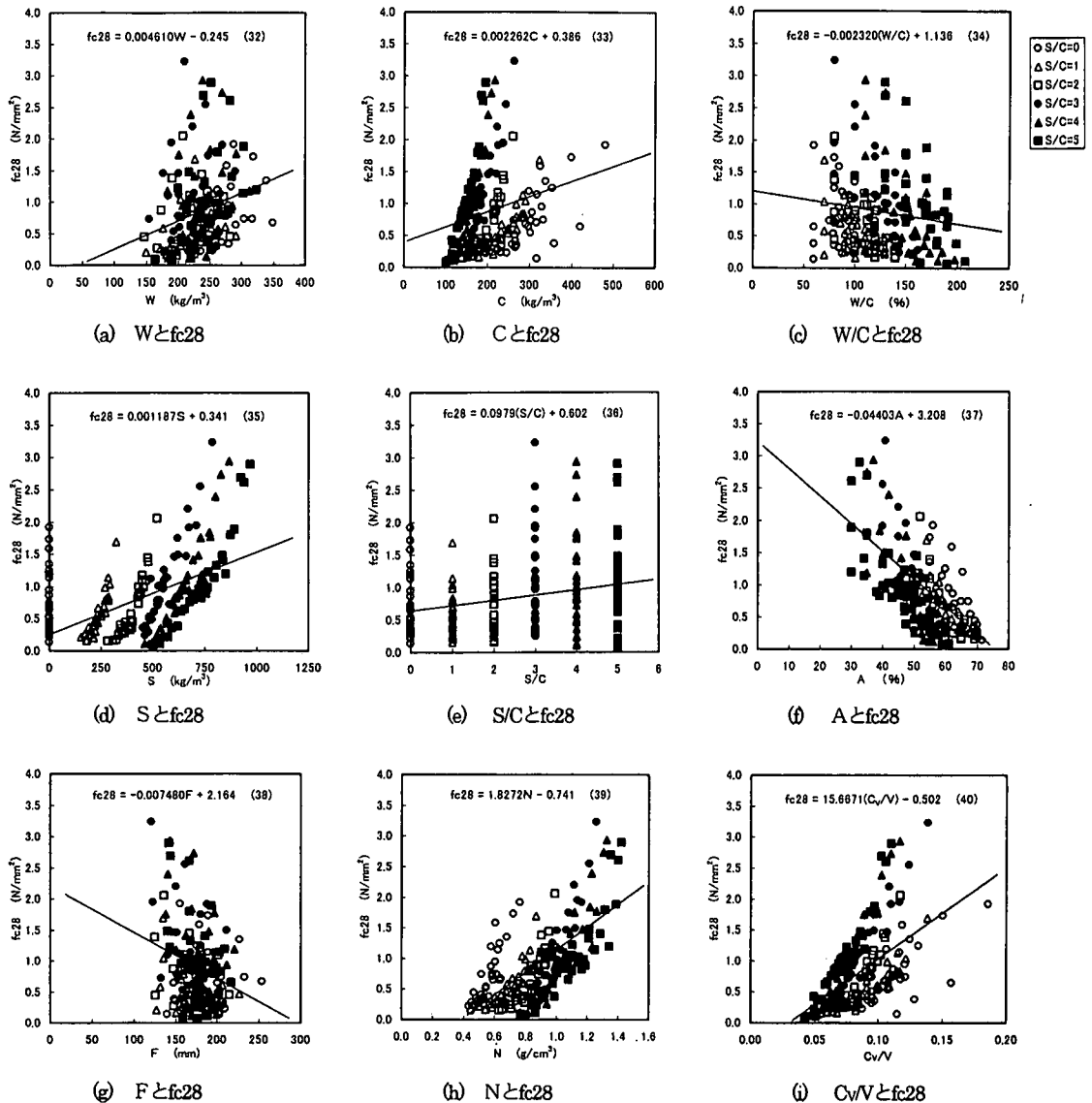


図-7 各種要因と一軸圧縮強さとの関係 (試験IV, 試験V, 試験VI)

配合要因である単位砂量, 単位セメント量, 単位水量との関係を重回帰分析によって求めた結果である。ほぼ式(5)の関係と合っているが, 相関が最も強いのは単位砂量で, 次に単位セメント量, 単位水量の順となっており, データの変域 (範囲, 表-2参照) の大きさと適合している。

これらのことから, 湿潤密度は, 無重量である空気量の影響が最も大きく, この量が多いほど小さく (軽量) になり, 逆に, 重量がある砂, セメントおよび水の量が多いほど大きく (重量) なる関係があることが, 検証された。さらに, 湿潤密度と砂セメント比, セメント空隙比との関係を求めると, 式(31)に示すとおりであり, 両者との相関が認められる。

(5) 一軸圧縮強さと配合との関係

一軸圧縮強さは, 表-2および図-7に示すように, 配合条件のうち湿潤密度との相関が最も強く, 次に空気量, セメント空隙比, 単位砂量, フロー値, 砂セメント比, 単位水量, 単位セメント量との相関が認められる。

重回帰分析の結果, 一軸圧縮強さと配合要因である空気量, 単位セメント量, 単位水量, 砂セメント比との関係は, 式(41) (表-4参照) に示すとおりである。一般のコンクリートの場合, 圧縮強度は, 単位セメント量との相関が極めて大きく, 次に単位水量, 骨材の品質との相関が認められるが, この場合, 単位セメント量が $200 \sim 550 kg/m^3$, 空気量が $1 \sim 7\%$ 程度である^{10), 11)}。一方, 気泡

表-4 重回帰分析結果 (試験IV, 試験V, 試験VI)

(n = 192)

区分	推定式	式	R	es
fc28	$fc28 = 7.007 \cdot 0.0899A + 0.005218C \cdot 0.008513W \cdot 0.1554(S/C)$ (11.0) (-15.3) (7.9) (-10.2) (-3.8)	(41)	0.896	0.273
	$fc28 = -1.223 + 3.4231N + 0.002809C \cdot 0.005404F \cdot 0.2104(S/C)$ (-5.5) (17.1) (4.3) (-6.4) (-5.4)	(42)	0.912	0.252
	$fc28 = -0.630 + 4.0166N \cdot 0.3575(S/C) \cdot 0.006364F$ (-3.5) (26.2) (-17.4) (-7.5)	(43)	0.903	0.265
	$fc28 = -1.784 + 4.0548N \cdot 0.3573(S/C)$ (-16.3) (23.3) (-15.3)	(44)	0.872	0.301
	$fc28 = -2.085 + 26.1434(C_v/V) + 0.2720(S/C)$ (-16.3) (22.8) (18.1)	(45)	0.868	0.306
C	$C = 215.8 \cdot 39.02(S/C) + 37.28fc28 + 62.16N$ (14.0) (-12.3) (5.6) (2.0)	(46)	0.901	22.2

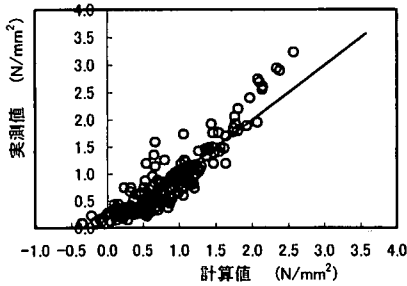


図-8 式(43)の一軸圧縮強さの計算値と実測値との関係

混合軽量土の場合、単位セメント量が100~500kg/m³程度と一般のコンクリートの変域と同程度であるのに対し、空気量が25~75%程度と、値、変域ともが大きい点が特徴である。したがって、一軸圧縮強さに対しては、空気量との相関が最も強く、次に単位水量、単位セメント量、砂セメント比との相関が認められる。

さらに、空気量を湿潤密度と、単位水量をフロー値と置き換えて圧縮強度との相関を求めた結果は、式(42) (表-4参照) に示すように、相関性が向上している。また、品質管理項目は、管理が容易でかつできるだけ少ない方が効率的であることから、一軸圧縮強さの変数を3項目以内とした場合、相関性が強い配合要因である湿潤密度、砂セメント比、フロー値、セメント空隙比との関係を求めると、式(43) (表-4および図-8参照)、式(44)および式(45)に示すとおりである。一軸圧縮強さは、一般のコンクリートの場合、1変数ではセメント空隙比との相関が最も強いが^{10), 11)}、気泡混合軽量土の場合は、式(44)、式(45)および式(31)の関係から、セメント空隙比よりもむしろ湿潤密度との相関性の方が高いことが、検証された。

すなわち、一軸圧縮強さは、湿潤密度が大きいほど(空気量が少ないほど)大きくなり、砂セメント比、フロー値を合わせて管理することによって、一軸圧縮強さを管理することが可能となることが判明した。

これらのことから、単位セメント量は、砂セメント比、一軸圧縮強さ、湿潤密度と、式(46)で示す相関が認めら

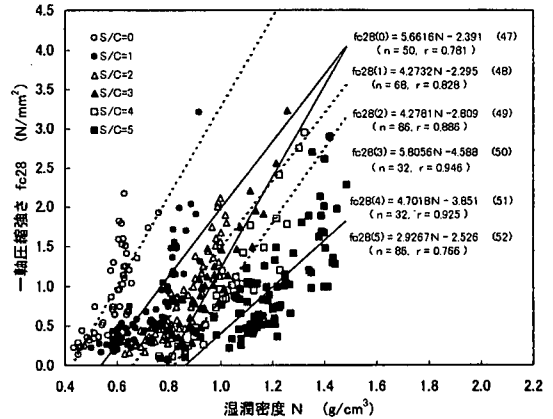


図-9 湿潤密度と一軸圧縮強さとの関係

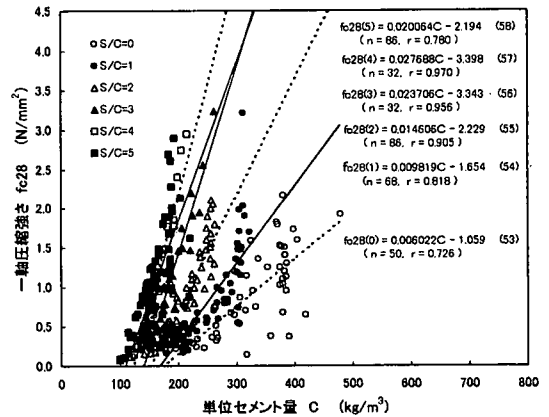


図-10 単位セメント量と一軸圧縮強さとの関係

れる。

(6) 各種のセメント、起泡剤、砂を使用した場合の関係
実際の工事では、各種のセメント、起泡剤、砂が使用されることから、以上の試験IV, 試験V, 試験VIのデータに試験I, 試験IIのデータを加えた354配合(供試体寸法φ10×20cm)について、一軸圧縮強さと湿潤密度、

表-5 重回帰分析結果 (試験Ⅰ, 試験Ⅱ, 試験Ⅳ, 試験Ⅴ, 試験Ⅵ)

(n = 354)

区分	推定式	式	R	es
C	$C = 190.0 \cdot 44.66(S/C) + 32.51fc_{28} + 119.43N$ (16.7) (-15.9) (6.8) (5.1)	(59)	0.890	31.3
W	$W = \cdot 14.3 + 0.8652F + 0.2737C + 0.0670S$ (-1.0) (13.0) (9.8) (9.7)	(60)	0.664	26.9
fc ₂₈	$fc_{28} = \cdot 1.126 + 3.2116N + 0.003245C \cdot 0.2452(S/C) \cdot 0.005142F$ (-6.4) (17.3) (6.5) (-6.6) (-7.0)	(61)	0.854	0.310
	$fc_{28} = \cdot 0.585 + 4.0222N \cdot 0.4361(S/C) \cdot 0.005655F$ (-3.6) (27.8) (-22.0) (-6.9)	(62)	0.835	0.328
	$fc_{28} = \cdot 1.540 + 3.9322N \cdot 0.4322(S/C)$ (-16.0) (25.6) (-20.5)	(63)	0.810	0.350

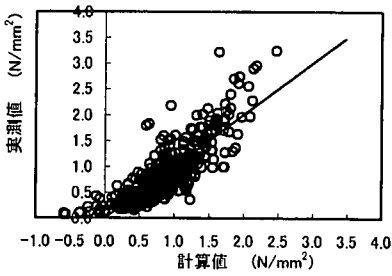
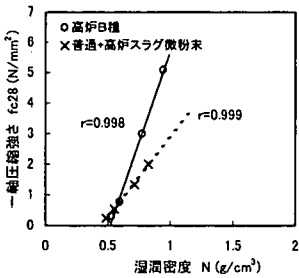


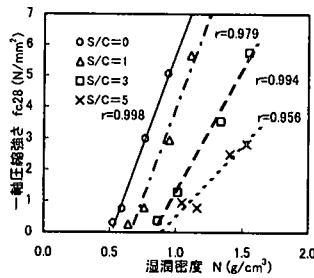
図-11 式(62)の一軸圧縮強さの計算値と実測値との関係

表-6 試験条件

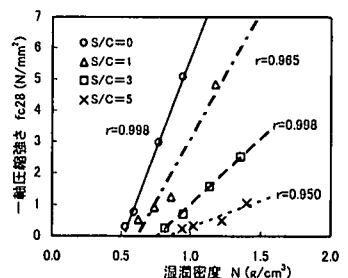
区分	エアミルク	エアモルタル
流動性 (フロー値)	180±20mm	
湿潤密度	0.5~1.8g/cm³	
一軸圧縮強さ(28日)	0.5, 1.0, 2.0, 4.0N/mm²	
供試体寸法	φ10×20cm	
砂セメント比	0	1, 3, 5
原料土の種類	-	海砂, しらす
安定材	セメント	高炉B種 普通 (15%)
	混和材	高炉スラグ微粉末 (85%)



(a) エアミルク



(b) 海砂



(c) しらす

図-12 湿潤密度と一軸圧縮強さとの関係 (データ数n=4)

単位セメント量との関係を求め、図-9、図-10に示す。さらに、重回帰分析結果を表-5および図-11に示す。これらの関係は、使用材料を一定とした場合に比べると、当然ながらばらつきがやや大きくなる傾向が認められるが、普遍性があることが示されている。また、砂セメント比が大きいくほど、原料土(砂質土)の品質の影響が現われ、一軸圧縮強さの増加が小さくなる傾向が認められる。なお、湿潤密度が一軸圧縮強さと相関性が強いことは、地盤改良用セメントミルクの試験でも確認されている¹³⁾。

(7) 高炉スラグ微粉末およびしらすを使用した場合の関係¹²⁾

使用材料として、高炉スラグ微粉末、しらすの有効利用が考えられる。試験条件は、表-6に示すように、一軸圧縮強さ0.5, 1.0, 2.0, 4.0N/mm²(目標値)、湿潤密

度0.5~1.8g/cm³(目標値±0.05g/cm³)、フロー値180±20mmとなるように配合を定めた。安定材として高炉セメントB種(密度3.05g/cm³)および普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末(結合材、比重2.89)、原料土(砂質土)として北九州市産海砂(土粒子の密度2.62)および鹿児島産しらす(土粒子の密度2.22)、起泡剤としてたん白質系起泡剤(比重1.16)を用いた。

気泡混合軽量土の一軸圧縮強さは、湿潤密度との相関が認められる(図-12参照)。湿潤密度が同一の場合、一軸圧縮強さが海砂>しらす>結合材となっており、強度差が認められる。原料土の比率が大きくなる(砂セメント比が大きいく)ほど、湿潤密度の増加に対する一軸圧縮強さの増加割合が減少する傾向が認められ、しらすの場合には、この傾向が著しい。結合材の場合にも、同様に一軸圧縮強さの増加割合が減少する傾向が認められる。このように、一軸圧縮強さと湿潤密度との関係は、安定

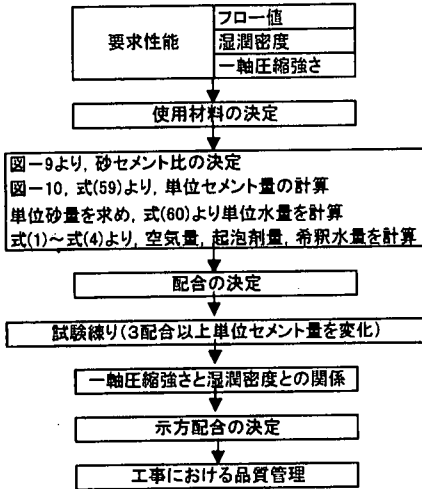


図-13 気泡混合軽量土の配合設計法

材および原料土の品質が低下すると、この影響が大きくなる。

4. 気泡混合軽量土の品質管理法

(1) 配合設計法の提案

以上のことから、気泡混合軽量土の配合設計法として、図-13が提案される。要求性能である湿潤密度と一軸圧縮強さを満足するように、図-9を用いて所要の砂セメント比 S/C を定め、次に、図-10 および式(59)から概略の単位セメント量 C_1 を求める。この単位セメント量 C_1 と砂セメント比 S/C とから単位砂量 S_1 を計算し、これらの値と要求性能であるフロー値とから式(60)によって単位水量 W_1 を求める。これらの、 C_1 、 S_1 、 W_1 とから単位量に対する空気量 A_1 を計算し、起泡剤量を求める。

試験練りは、上記の配合によってフロー値が適合するように調整し、この配合を中心に単位セメント量を増加または減少させた配合を計算し、3配合以上の一軸圧縮強さ試験を行う。これらの試験結果から湿潤密度との関係を求め、要求性能に適合する示方配合を決定する。

(2) 品質管理法の提案

気泡混合軽量土の品質管理は、表-7に示すように、早期品質判定のため、混合時の性能（フロー値、湿潤密度、空気量）と材齢7日の一軸圧縮強さを、試験項目としているのが現状である¹⁾。

本研究で提案する気泡混合軽量土の品質管理法では、同様に、湿潤密度およびフロー値を試験することにより、これらの管理とともに迅速に一軸圧縮強さを推定するこ

表-7 現状の気泡混合軽量土の品質管理¹⁾

試験項目		規格値	頻度
混合時	フロー値	180±20mm	2回/日
	湿潤密度	±0.1	2回/日
	空気量	±5%	2回/日
硬化後	一軸圧縮強さ (材齢7日, 供試体φ10×20cm)	材齢28日の一軸圧縮強さの1/2程度が得られていること	1回/日 (供試体数5本)

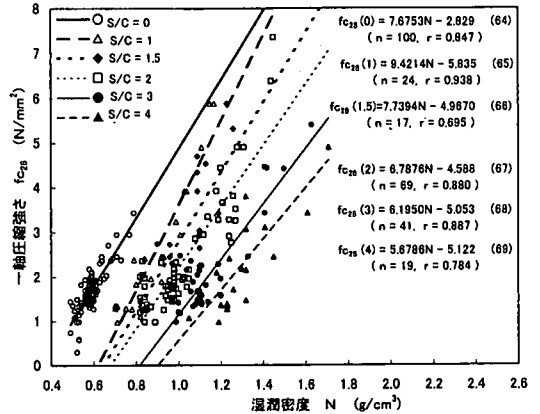


図-14 実際の工事における一軸圧縮強さと湿潤密度、砂セメント比との関係（供試体寸法4×4×16cm）

とが可能となる。一軸圧縮強さの推定値を求める場合は、試験練りで求めた一軸圧縮強さと湿潤密度との関係式（または、式(62)、式(63))を用いて計算する。

5. 実際の工事における気泡混合軽量土の品質管理の実施例

(1) 実際の工事における気泡混合軽量土の一軸圧縮強さと湿潤密度、砂セメント比との関係

一軸圧縮強さと湿潤密度との関係を、関東・九州地区の実際の軽量盛土工事（平成6年度～平成8年度の51工事）で打設された気泡混合軽量土の品質管理試験結果で見ると、図-14に示すとおりである。図中では、関東・九州地区の原料土を使用した270配合を砂セメント比（0, 1, 1.5, 2, 3, 4）で区分して関係を求めたものであり、一軸圧縮強さと湿潤密度には相関性が認められ、普遍性があるといえる。

(2) 実際の工事における気泡混合軽量土の品質管理の実施例

以上の試験結果および工事結果から、本品質管理法の実用性を確認するため、表-8に示すように、平成10年3月～平成11年3月に九州地区で施工された21工事にお

表-8 実際の工事における気泡混合軽量土の品質管理

区分	工事名	要求性能				使用材料・配合			期間	データ数	品質管理結果				
		フロー値 F (mm)	湿潤密度 N (g/cm ³)	空気量 A (%)	一軸圧縮強さ (材齢28日) fc28 (N/mm ²)	セメントの種類	砂セメント比 S/C	水セメント比 W/C (%)			フロー値 F (mm)	湿潤密度 N (g/cm ³)	空気量 A (%)	一軸圧縮強さ (材齢7日) fc7, fc28 (N/mm ²)	fcとNとの単相関係数 r
ケースI	A	180±20	0.53±0.10	67±5	0.5以上	B	0	77.3	H10. 7/18~10/7	37	180~200	0.50~0.60	62.5~70.0	0.38~0.90	0.888
	B	180±20	0.53±0.10	67±5	0.5以上	B	0	77.3	H10. 3/25~10/30	66	170~200	0.48~0.60	65.0~71.0	0.31~0.72	0.662
	C	180±20	0.53±0.10	67±5	0.5以上	B	0	77.3	H10. 3/19~5/1	26	185~200	0.49~0.55	65.0~70.0	0.30~0.42	0.123
	D	180±20	0.89±0.10	64±5	1.0以上	N	2	95.7	H10. 12/1~12/24	15	175~200	0.81~0.92	62.5~67.5	0.60~0.74	0.892
ケースII	E	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	B	0	66.6	H10. 11/13~12/6	16	170~180	0.55~0.59	65.0~66.0	1.36~1.68	0.968
	F	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 4/15~5/9	16	170~200	0.54~0.61	62.5~67.5	1.46~1.68	0.925
	G	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 11/25~1/31	30	180~200	0.57~0.61	66.0~67.5	1.70~2.03	0.816
	H	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 5/2~5/25	18	170~200	0.54~0.60	65.0~67.5	1.43~1.71	0.616
	I	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 4/14~6/4	22	180~190	0.56~0.59	62.5~66.0	1.48~1.72	0.883
	J	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 6/18~7/16	19	175~200	0.56~0.61	66.0~67.5	1.38~1.72	0.064
	K	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 4/9~5/27	29	170~190	0.56~0.61	65.0~70.0	1.48~1.78	0.885
	L	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 4/3~5/27	34	170~200	0.55~0.59	62.5~67.5	1.39~1.73	0.431
	M	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 3/4~3/28	15	170~200	0.55~0.59	65.0~70.0	1.46~1.61	0.485
	N	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 3/30~4/30	20	175~200	0.55~0.59	65.0~67.5	1.41~1.65	-0.021
	O	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 3/16~4/12	22	170~190	0.55~0.60	65.0~67.5	1.47~1.77	0.799
	P	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 3/19~4/14	13	170~200	0.56~0.61	62.5~67.5	1.74~1.84	0.166
	Q	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 12/18~1/21	20	180~190	0.54~0.61	65.0~66.0	1.80~2.07	0.348
	R	180±20	0.58±0.05	66±5	1.0以上	N	0	66.6	H10. 12/4~2/8	50	170~200	0.53~0.62	64.0~70.0	1.29~1.82	0.893
	S	180±20	0.82±0.05	58±6	1.5以上	N	1.5	79.6	H10. 9/21~10/28	31	175~180	0.81~0.87	67.5~60.0	1.68~2.43	0.684
	T	200±20	0.98±0.05	50±5	1.0以上	N	2	90.9	H10. 9/26~10/30	18	180~220	0.94~1.00	47.5~52.5	2.71~3.53	0.783
	U	180±20	1.09±0.05	45±5	1.0以上	N	3	108.1	H11. 1/27~3/7	21	170~180	1.05~1.12	42.5~47.5	2.69~3.61	0.414

注) ケースI: 供試体寸法φ10×20cm, 一軸圧縮強さの試験材齢7日 ケースII: 供試体寸法4×4×16cm, 一軸圧縮強さの試験材齢28日

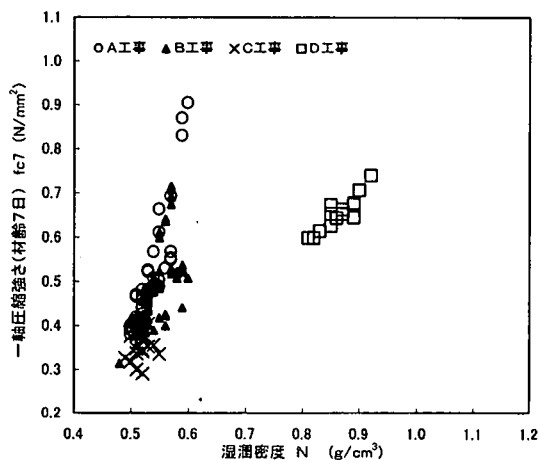


図-15 ケースIの一軸圧縮強さの品質管理結果

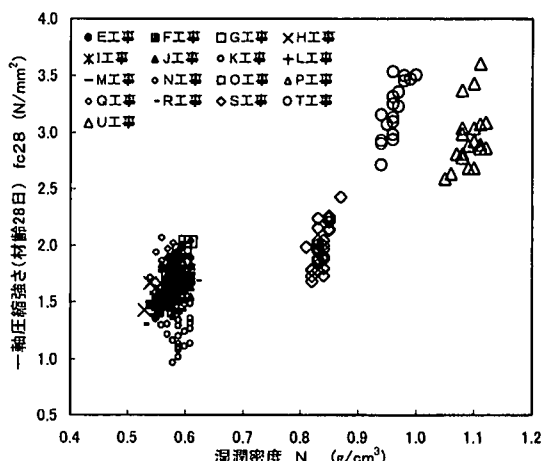
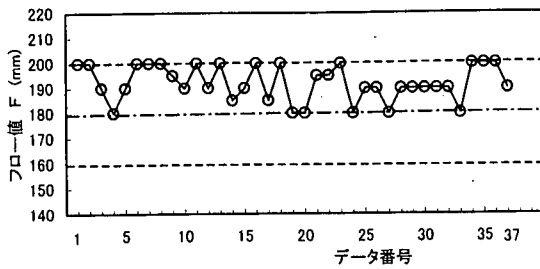


図-16 ケースIIの一軸圧縮強さの品質管理結果

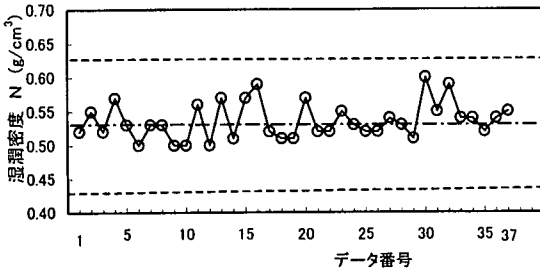
いて、気泡混合軽量土の品質管理試験を実施した。ケースIは、文献1)の指針に基づいて施工された高速道路の建設工事の場合(一軸圧縮強さが、φ10×20cmの供試体で、材齢7日において材齢28日の1/2程度が得られていること)であり、ケースIIは国道、県道工事の場合である。同表には、品質管理結果のフロー値、湿潤密度、空気量、一軸圧縮強さ、一軸圧縮強さと湿潤密度との単相関係数を示したが、図-15および図-16は、これらの全工事における一軸圧縮強さと湿潤密度の品質管理結果であ

る。単相関係数は-0.021~0.968となっており、全体的には相関性が高いことが示されているが、配合の変動が小さい場合には変域が狭いためむしろ相関が小さくなる傾向が認められ、この場合、一軸圧縮強さの変動も小さく、規格値を十分満足している。

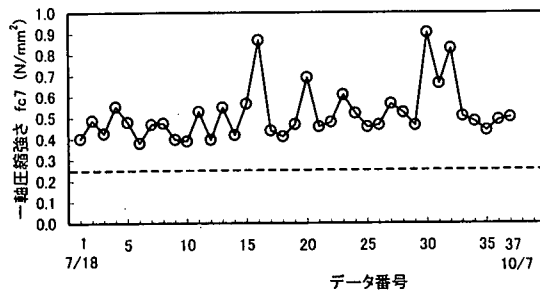
実際の工事における気泡混合軽量土の品質変動要因としては、打設箇所が狭い場合、連続打込みができないため材料の投入量に変動が生じやすいこと、砂量が多い場合、材料・配合の変動が生じやすいこと、ポンプの圧送



(a) フロー値



(b) 湿潤密度



(c) 一軸圧縮強さ(材齢7日)

図-17 A工事における品質管理

距離が長い場合、品質の変動が生じやすいことなどがある。

図-17は、A工事における品質管理(フロー値 180 ± 20 mm, 湿潤密度 0.53 ± 0.10 g/cm³, 材齢28日の一軸圧縮強さ 0.5 N/mm²以上)を代表例に、フロー値, 湿潤密度, 一軸圧縮強さの変動を時系列に示したものである。この工事では、盛土の出来形(仕上げ面)が水平仕上げであることから、フロー値の目標値を 190 mmと高めに、かつ、砂セメントが0であることから、許容差を ± 10 mmと低めに設定しているため、要求性能のフロー値 180 ± 20 mmに対してデータの分布が全体的に高めとなっているが、計画通りに良好な品質管理が行われている。また、湿潤密度の変動は、一軸圧縮強さ(材齢7日)の変動と適合していることがわかる。さらに、これらの品質管理結果から、一軸圧縮強さ f_{c7} を湿潤密度 N , フロー値 F を変数として重回帰分析すると、つぎのとおり両者との相関性が認められる(下段の()内は t 値)。

$$f_{c7} = -1.4185 + 4.18190N - 0.0015855F \quad (70)$$

$$\begin{matrix} (-4.3) & (11.4) & (-1.2) \end{matrix}$$

$$(n=37, R=0.892)$$

このように、いずれの工事の場合も、湿潤密度およびフロー値が許容値を満足するように配合されていれば、これらの変動によって一軸圧縮強さの変動が生じても規格値以上の強度が得られることが確認された。

6. 結論

本研究で、気泡混合軽量土の要求性能であるフロー値, 湿潤密度, 一軸圧縮強さと材料, 配合条件との関係を解析した結果, 得られた結論をまとめると、次のとおりである。

- (1) フロー値は、砂セメント比に拘わらず単位水量との相関が強く、水量が多いほど大きくなる。
- (2) 湿潤密度は、空気量が多いほど小さくなる高度の相関があり、単位砂量, 砂セメント比, 単位セメント量が多いほど大きくなる。
- (3) 一軸圧縮強さは、湿潤密度との相関が最も強く、次に空気量, セメント空隙比, 単位砂量, フロー値, 砂セメント比との相関がある。
- (4) 一般に、気泡混合軽量土の設計は材齢 28 日における一軸圧縮強さで行うものの、早期に強度を確認する必要性から、材齢 7 日の試験値により管理する手法が採用されているが¹⁾、提案する配合設計法によると、要求性能である一軸圧縮強さおよび湿潤密度の管理を、迅速に行うことが可能となる。
- (5) 実際の工事において気泡混合軽量土の品質管理を実施した結果、フロー値および湿潤密度の管理を行うことによって、一軸圧縮強さの管理が可能となることが実証された。

参考文献

- 1) 日本道路公団：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針, 1996年9月。
- 2) 安藤照明：トンネル裏込め用気泡モルタルの試験(第一報), 日本道路公団試験所, 試験所報告昭和41年度, pp. 74-81, 1968年2月。
- 3) 宮崎都三雄, 村木宏行：トンネル裏込め用気泡モルタルに関する試験, 日本道路公団試験所, 試験所報告(昭和55年度), pp. 52-81, 1981年11月。
- 4) 日本道路公団：土木工事共通仕様書, 1977年4月。
- 5) 日本道路公団：施工管理試験要領, 1978年4月。
- 6) 日本道路公団：KODAN 305-1981 エアモルタル及びエアミルクの試験方法(案), 日本道路公団試験方法, 1981年, JHS A 313-1992 エアモルタル及びエアミルクの試験方法, 日本道路公団試験方法, 1992年
- 7) Taking a load off an aging pier, Engineering News

- Record, pp.72-73, 1985年5月16日.
- 8) 三嶋信雄, 星野克之, 別井智之: 気泡混合軽量土の材料特性, 日本道路公団試験研究所, 日本道路公団試験所報告, Vol.32, pp.1-9, 1995年11月.
- 9) 山内豊聡, 浜田英治: 軽量盛土材としての気泡セメントの力学特性と降伏規準に関する一考察, 土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp.283-290, 1989年6月.
- 10) 豊福俊泰: データ解析によるコンクリートの圧縮強度の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, 第420号/V-13, pp.125-134, 1990年8月.
- 11) 豊福俊泰: データ解析によるコンクリートの品質管理システムに関する研究, 土木学会論文集, 第426号/V-14, pp.55-64, 1991年2月.
- 12) 田中久士, 豊福俊泰, 奥園誠之: 気泡混合軽量土の配合設計法, 日本道路協会, 第22回日本道路会議一般論文集(B), pp.78-79, 1997年11月
- 13) 丸山 繁, 松木重夫, 田尻雅則: 地盤改良用気泡セメントミルクの研究, 日本道路協会, 第22回日本道路会議一般論文集(B), pp.80-81, 1997年11月
- (1999. 9. 6受付)

STUDIES ON QUALITY CONTROL OF FOAMED MIXTURE LIGHTWEIGHT SOIL

Toshiyasu TOYOFUKU, Nobuo MISIMA and Hisashi TANAKA

Recently, there is a sharp increase in the number of construction cases adopting a lightweight banking method using foamed mixture lightweight soil. Because there is a great variety of material soil used at present, the establishment of a streamlined quality control method is urgently needed.

This paper attempts to clarify the factors that affect the major performance requirements of the foamed mixture lightweight soil – flow value, wet density, and unconfined compression strength, for which recurrence analysis of numerous test results were performed. Also, a quality control method of foamed mixture lightweight soil is proposed, its practicability verified using control data obtained in actual works.