

構造用超軽量コンクリートの開発（その1）

—強度推定手法の構築—

Development of Super Lightweight Concrete for Structures

— Theory for Estimating Concrete Strength —

桜 本 文 敏
依 田 和 久

要 約

普通骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は概ね水セメント比と空気量によって定まっている。しかし、マトリックスより弱い軽量骨材を用いた場合には、骨材の混入によって強度低下を引き起こすため、その強度推定には水セメント比や空気量の他に軽量骨材の影響を定量的に組み込まなくてはならない。超軽量コンクリートの適切な調合設計を行う上で、その強度推定は必要不可欠なものである。

本研究は、①空気混入によるペーストの強度低下傾向と②軽量骨材の混入によるマトリックスの強度低下傾向を実験的にそれぞれ独立に求め、③それらを統合した強度推定手法を構築し、さらに広範な実験結果との対応を行い、その妥当性を検証したものである。

目 次

- I. はじめに
- II. 研究の概要
- III. 空気混入による圧縮強度の低下傾向
- IV. 軽量骨材の混入による圧縮強度の低下傾向
- V. 強度推定手法の構築
- VI. 強度推定手法の妥当性の検証
- VII. 結 論
- VIII. おわりに

I. はじめに

近年のコンクリート構造物の高層化に伴い、コンクリートは高強度化とともに軽量化が求められている。たとえばプレキャストカーテンウォールの軽量化は、構造物の重量低減につながり構造設計上有利になるばかりではなく、鉄骨量の低減など躯体のコストダウンや部材の大型化による施工性の向上など、さまざまな点でメリットがある。また、阪神・淡路大震災を契機に建築物の耐震補強が盛んに行われており、その耐震補強用耐力壁に軽量プレキャスト部材を用いる研究が行われている。その部材が軽量であればあるほど、搬送やハンドリングなどに有利となり、大がかりな機械装置や仮設が必要となることで施工性が向上する。

以上のようなことを背景に、1996年度から構造部材としても使用できる超軽量コンクリートの開発を進めてきたが、その中で、軽量コンクリートの強度推定手法を開発したので¹⁾²⁾、その成果について報告する。

II. 研究の概要

普通骨材を用いたコンクリート（普通コンクリート）の圧縮強度（以下、単に強度と記述する）は、概ね水セメント比と空気量

によって定まっている。しかし、マトリックスより弱い軽量骨材を用いた場合には、骨材の混入によって強度低下を引き起こすため、その強度推定には水セメント比や空気量の他に骨材の影響を定量的に組み込まなくてはならない。軽量コンクリートの適切な調合設計を行う上で、その強度推定は必要不可欠なものである。

本研究では以下の手順で強度推定手法を構築した。

- ①空気混入によるペーストの強度低下傾向の把握
- ②軽量骨材の混入によるマトリックスの強度低下傾向の把握
- ③それらを統合した強度推定手法の構築
- ④実験結果との対応による妥当性の検証

①では、モルタルに段階的に空気を混入し、空気量の増大に伴うペースト強度の低下傾向について実験的に明らかにしている。

②では、軽量骨材を用い、それらがマトリックス中に混入されたときの強度低下性状を実験的に明らかとしている。

③では、①②で示した実験結果を取り込み、軽量コンクリートの圧縮強度の推定手法を構築している。

④では、広範な調合条件における実験を行ない、各種の軽量コンクリートの圧縮強度を求め、③で示した推定値との比較を試み、本手法の妥当性を検証している。

III. 空気混入による圧縮強度の低下傾向

1. 目 的

本章は、ペーストマトリックスの軽量化実験に関するものであり、空気混入による強度低下傾向の定量的把握を行うことを目的としている。ペーストマトリックスの性状はセメントペーストで評価するのが妥当であるが、所定の空気量が混入できない可能性や強度試験の容易さ・正確さに懸念があったので、陸砂を用いた

キーワード：軽量コンクリート、軽量骨材、強度推定、マトリックス強度、空気量、骨材混入量、骨材強度

モルタルで評価することとした。その際、気泡はモルタルのペースト中に存在し強度に影響を与えるので、強度と空気量の関係を述べるに当たり、すべてペースト中の空気量（以下ペースト空気量と称す）及びペーストの比重により実験の計画・解析・考察を行った。

2. 実験計画

(1) 実験要因と水準

実験要因と水準を Table 1 に示す。実験要因は、①水セメント比 W/C (3 水準)、②ペースト空気量 (4 水準)、③空気混入用の混和剤の種類 (4 水準)、④空気の混入方法 (2 水準) の 4 種類である。ここで、空気の混入方法には、ミックスフォームとプレフォームがある。ミックスフォームは混和剤を液のままミキサーに投入し練り混ぜながら空気泡を作る方法であり、プレフォームは起泡剤を用いた時に一般に用いられる方法で、予め気泡機で作製した泡をモルタルに投入して練り混ぜる方法である。プレフォームは起泡剤を使用し W/C が 40% の場合のみ実験を行った。

(2) 使用材料

空気混入用混和剤の種類を Table 2 に示す。AE 剤としてアルキルアリルスルホン酸化合物系と天然樹脂酸塩系の 2 種類を、起泡剤として動物性蛋白質系と高級アルコール・硫酸エステル化合物系の 2 種類を選定した。その他の使用材料を Table 3 に示す。

(3) 調合

空気量 0 % とする基本調合を Table 4 に示す。細骨材の量は、W/C 50% でモルタルの分離が著しくないように定め、W/C 40%、30% とともにそれと同量とした。また、練り上がり時のフロー値が概ね 200mm となるように適宜高性能 AE 減水剤を添加した。

(4) 練混ぜ

練混ぜ量は空気を含まないモルタル分のみで 3 リットルとし、ホバート型モルタルミキサーで行った。ミックスフォームの練混ぜ手順は、セメントペースト 30 秒間、細骨材を投入し 60 秒間、容器内面及び羽根のかき落としをした後 120 秒間、計 210 秒間練り混ぜた。プレフォームの練混ぜ手順は、容器内のかき落としまでは同手順で、かき落とし後 60 秒間、起泡機で作製した空気泡を投入後 60 秒間、再度ミキサーを停止し空気泡をかき落としした後 60 秒間、計 270 秒間練り混ぜた。

(5) 供試体の成形・養生

圧縮強度試験用の供試体は $\phi 5 \times 10$ cm とし、軽量モールドで成形した。また養生は、硬化後のマトリックスの空気量を質量法で算出できるよう、水分の吸収や蒸発を防ぐため、20℃ 封緘養生とした。

(6) 試験項目

試験項目を一覧にして Table 5 に示す。フレッシュ性状として、フロー値・単位容積質量・空気量・練上がり温度を、また、硬化後の性状として、圧縮強度・単位容積質量・空気量を測定した。圧縮強度試験は材齢 7 日と 28 日で行い、また、空気量はフレッシュ時、硬化時とも質量法で算出した。

3. 実験結果とその考察

Fig. 1 に起泡剤 A を用いた時の、ペースト空気量と圧縮強度の関係を示す。その他の混和剤でもほぼ同様の傾向を示したが、ペースト空気量 0 ~ 45% の範囲では、W/C にかかわらず、ペースト

ト空気量の増加に伴い強度は直線的に低下した。また、空気量が同じであれば W/C が小さいほど強度は大きい、空気量の増加に伴いその差は小さくなった。また、気泡混入方法によって強度及び低下傾向に違いはなかった。

Fig. 2 に、ペースト空気量 0 % の時の圧縮強度を 100 % とした強度残存率と空気量の関係を示す。空気量 0 % の時の強度は、最小二乗法により外挿して求めた。図は W/C 40 % 時のものであるが、その他の W/C でも同様であった。低下傾向は、混和剤による違いはなく良く一致しており、どの W/C でも、ペースト中の空気量 1 % の増加に対し強度は平均約 1.8 % の低下であった。すなわち、空気が混入されたペーストの強度は (1) 式で表すことができる。

Table 1 Experimental Parameters and Level

要因	水準			
	1	2	3	4
水セメント比 (%)	30	40	50	—
ペースト空気量 (%)	0	15	30	45
混和剤種類	AE剤A	AE剤B	起泡剤A	起泡剤B
空気混入方法	ミックスフォーム	プレフォーム*1	—	—

*1) 起泡剤使用で W/C 40% のみとする

Table 2 List of Air Entraining Agent

材料	記号	主成分
AE剤A	A	アルキルアリルスルホン酸化合物
AE剤B	V	天然樹脂塩酸
起泡剤A	P	動物性蛋白質
起泡剤B	F	高級アルコール・硫酸エステル系化合物

Table 3 Constitutive Materials

材料	種類	メーカー・産地	比重
セメント	普通ポルトランド	N社製	比重: 3.15
細骨材	陸砂	上野原・香取郡産	表乾比重: 2.62
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	N社製	比重: 1.13
消泡剤	グリコール誘導体	N社製	比重: 1
水	水道水	—	比重: 1

Table 4 Mix Proportions of Mortar

W/C (%)	水	セメント	細骨材	混和剤*1
50	283	564	1404	適宜
		179	538	
40	258	644	1404	適宜
		204	538	
30	225	748	1404	適宜
		238	538	

上段: kg/m³、下段: g/m³

*1) 高性能AE減水剤、消泡剤

Table 5 Testing Items and Methods

	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ	フロー値	JIS R 5201	
	単位容積質量	JIS A 1116	容量1ℓの容器による
	空気量	同上	質量法
	練上がり温度	—	デジタル温度計による
硬化	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 7、28日
	単位容積質量	—	重量および寸法の計測による
	空気量	同上	質量法

$$F_{ap} = (1 - \beta \cdot A_p) F_p \quad \dots \dots \dots (1)$$

F_{ap} : 空気が混入されたペーストの強度 (N/mm²)

F_p : 空気無混入のペーストの強度 (N/mm²)

A_p : ペースト空気量 (%)

β : 実験定数 ($\beta = 0.018$, $0 < A_p \leq 45$)

4. まとめ

本実験結果より、以下のことが明らかとなった。

- ①ペースト強度はペースト空気量の増大に伴いほぼ直線的に低下し、その低下傾向は、水セメント比・混和剤の種類・空気混入方法の違いに関わらずペースト空気量で一元的に評価でき、ペースト空気量 1%につき約 1.8% の強度低下をする。

IV. 軽量骨材の混入による圧縮強度の低下傾向

1. 目的

本章では軽量化のためのもう一つの手法である軽量骨材に関する実験結果について報告する。本実験は、ペーストマトリックス中に軽量細骨材を、もしくはモルタルマトリックス中に軽量粗骨材を段階的に混入し、その際のマトリックス強度に対する強度低下傾向から骨材混入の影響を明らかにすることを目的としている。さらに、その結果をもとに軽量骨材が混入された時のモルタルまたはコンクリートの強度低下傾向の定量的評価を試みた。

2. 実験計画

(1) 実験要因と水準

実験要因と水準の組合せを Table 6 に示す。要因は、骨材種類 (10 水準 (内軽量骨材は 8 水準))、②骨材混入量 (5 水準)、③マトリックス強度 (4 水準) の 3 種類である。マトリックス強度は概ね 15, 30, 45, 60N/mm² を目標とし、試験材齢を 1 日 (24 時間)、3 日 (72 時間)、7 日、42 日と変えることで得た。

(2) 使用材料

使用骨材の物理的性質を Table 7 に示す。軽量骨材は絶乾比重 1.0 以下を目安として、先に行った 17 種類の軽量骨材の物性を明らかにした実験結果³⁾から、有望な骨材として 8 種類を選定した。その他の材料を Table 8 に示す。

(3) 調合

モルタルは、水セメント比 40% のペーストに微粉または細骨材を所定量混入した調合とした。コンクリートは、水セメント比 40% の陸砂モルタル ($s/c=1.73$) に粗骨材を所定量混入した調合とした。過度なブリーディングによる強度への悪影響を避けるため、増粘剤を適宜使用した。なお、軽量骨材は納品状態 (気乾状態) から 24 時間吸水させた後、表乾状態にして使用した。

(4) 練混ぜ

モルタルはホバート型モルタルミキサにより、コンクリートは水平 2 軸型強制撈拌ミキサにより練り混ぜた。練混ぜ時間はそれぞれ 210 秒、150 秒とした。

(5) 供試体の成形・養生

供試体は、モルタルは $\phi 5 \times 10$ cm、コンクリートは $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体とした。それぞれ JIS A 1132 に準じて供試体を作製後、20℃ 封緘養生を行った。

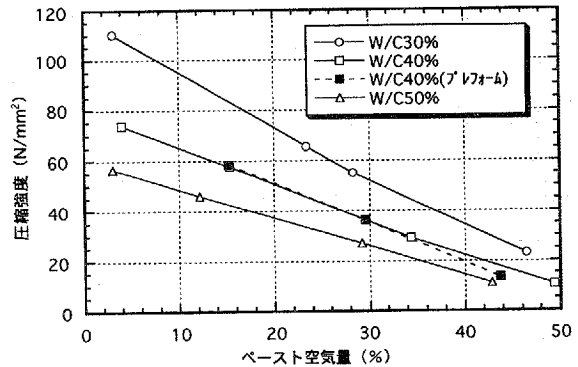


Fig.1 Relationship between Air Content of Cement Paste and Compressive Strength (Foaming Agent A)

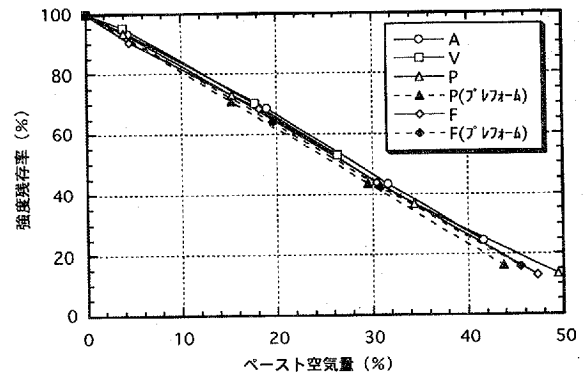


Fig.2 Relationship between Air Content of Cement Paste and Strength Reduction Factor

Table 6 Experimental Parameters and Level

試験	分類	記号	骨材混入量 (ml/m ³)			
	微粉	MC	0.135	0.270	0.405	—
モルタル	細骨材	NL	0.135	0.270	0.405	0.540
		GLS	0.135	0.270	0.405	0.540
		SBS	0.135	0.270	0.405	0.540
		RS	0.135	0.270	0.405	0.540
		LC	0.135	0.270	0.405	—
コンクリート	粗骨材	NE	0.135	0.270	0.405	—
		SBL	0.135	0.270	0.405	—
		SM	0.135	0.270	0.405	—
		CG	0.135	0.270	0.405	—
		—	0.135	0.270	0.405	—

Table 7 Mechanical Properties of Aggregates

種類	記号	粒径範囲	絶乾比重	表乾比重*1	吸水率*1
微粉	MC	0.045~0.3	0.670	0.670	0.50
細骨材	NL	0.6~5.0	0.684	0.765	11.8
	GLS	0.3~5.0	0.677	0.732	8.12
	SBS	2.5~5.0	1.01	1.14	12.4
	RS	~5.0	2.51	2.58	2.92
	LC	5~15	0.749	1.03	37.4
粗骨材	NE	5~15	0.751	0.762	1.46
	SBL	5~15	0.841	1.00	19.3
	SM	5~15	1.02	1.24	21.0
	CG	5~20	2.64	2.65	0.659

*1) 納入状態から24時間吸水させた後表乾状態としたときの値

Table 8 Constitutive Materials

材料	種類	メーカー・産地	備考
セメント	普通ポルトランド	N社製	比重: 3.16
細骨材(RS)	陸砂	上野原・香取郡産	粗目8: 細目2 混合
粗骨材(CG)	硬質砂岩碎石	奥多摩産	5号7: 6号3 混合
増粘剤	セルローズ系	S社製	比重: 1.28
消泡剤	グリコール誘導体	N社製	比重: 1 (希釈液)
高性能減水剤	メラミン系	N社製	比重: 1.13
水	水道水	—	比重: 1

Table 9 Testing Items and Methods

	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ	フロー値	JIS R 5201	モルタルのみ
	スランプ	JIS A 1101	コンクリートのみ
	単位容積質量	JIS A 1116	重量方法
	空気量	同上	同上
	練り上がり温度	—	デジタル温度計による
硬化後	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 1, 3, 7, 42日
	単位容積質量	—	重量および寸法の計測による

(6) 試験項目

試験項目を一覧にして Table 9 に示す。フレッシュ性状として、フロー値（モルタルのみ）・スランプ（コンクリートのみ）・単位容積質量・空気量・練り上がり温度を、また、硬化後の性状として、圧縮強度・単位容積質量を測定した。

3. 実験結果とその考察

(1) 骨材混入量の影響

Fig.3 に骨材混入量と圧縮強度の関係の一例を示す。これによると、骨材混入量の増加に伴い強度は低下していくのが分かる。その程度は材齢が大きくなるほど、すなわちマトリックス強度が大きくなるほど著しい。この関係を骨材間の比較ができるよう材齢別に示したのが Fig.4 である。これによると、骨材種類により強度低下性状はかなり異なっていることが分かる。

(2) マトリックス強度との関係

Fig.5 にマトリックス強度とコンクリート強度の関係を示す。これによると、軽量骨材を用いたコンクリートの強度はマトリックス強度の増加に伴い次第に低下していくことが分かる。このことは、軽量骨材の強さがマトリックスの強さよりも小さく、マトリックス強度の増加に伴い両者の乖離が大きくなっていくことを示唆している。

4. 強度低下傾向の定量的評価

本実験より、軽量骨材を用いたモルタルまたはコンクリートの強度はマトリックス強度と骨材混入量に左右されることが明らかとなった。そこで、その関係を定量的に評価することを試みた。ここでは、軽量骨材を用いたモルタルまたはコンクリートの強度は、マトリックス強度が大きくなるに従い次第に低下するとの観点から、(2) 式または (3) 式による回帰式を採用した。(2)

(3) 式における定数 α は、マトリックス強度からの強度低下の割合を表したいわゆる強度低下係数と表現することができる。

$$F_m = F_{pm} - \alpha \cdot F_{pm}^{1.5} \quad (2)$$

$$F_c = F_{mm} - \alpha \cdot F_{mm}^{1.5} \quad (3)$$

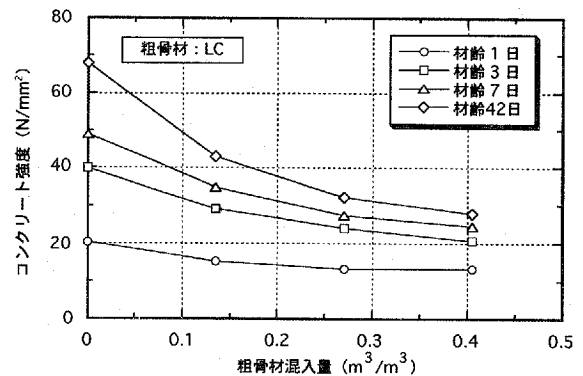


Fig.3 Relationship between Aggregate Content and Compressive Strength

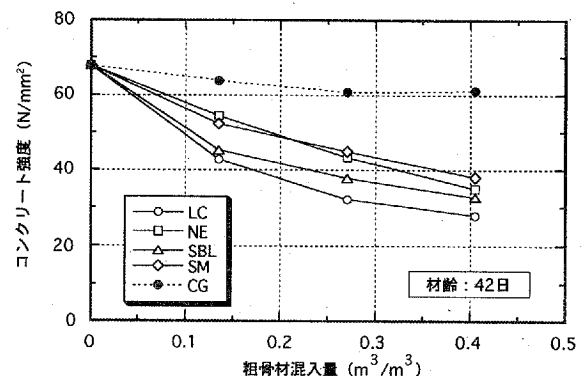


Fig.4 Relationship between Aggregate Content and Compressive Strength

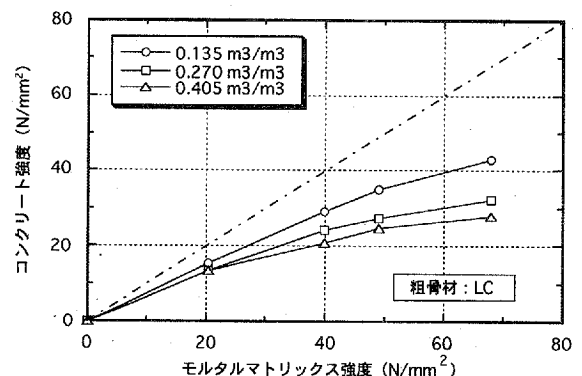


Fig.5 Relationship between Matrix Strength and Concrete Strength

F_m : モルタル強度 (N/mm²)

F_c : コンクリート強度 (N/mm²)

F_{pm} : ペーストマトリックス強度 (N/mm²)

F_{mm} : モルタルマトリックス強度 (N/mm²)

α : 実験定数

回帰の結果例を、Fig.6, 7 に示す。図中の点線が回帰した線であるが、概ねよい対応を示している。

強度低下係数 α は当然骨材混入量によって異なってくる。そこで α 値を骨材混入量との関係で示したのが Fig.8, 9 である。普通骨材を除き、骨材混入量の増加に伴い α 値は大きくなっている、すなわち強度が低下していくことが分かる。

ここで、任意の骨材混入量における α 値を算出できるよう、 α 値を骨材混入量で直線回帰した。図中の点線がその回帰結果である。すなわち α 値は（4）式で求めることができる。

$$\alpha = a + b \cdot V_a \quad \dots \dots \dots (4)$$

V_a : 骨材混入量 (m^3/m^3)

a, b : 実験定数

実験定数 a, b の値を一覧にして Table 10 に示す。式（4）及び Table 10 より求めた α 値を（2）式または（3）式に代入することにより、モルタルまたはコンクリートの強度を求めることができる。

なお、これらの検討は軽量細骨材または軽量粗骨材をそれぞれ別々に用いた場合についてであるが、両者を同時に用いた場合は、（2）式によって求めたモルタル強度をマトリックス強度として（3）式に代入すればよい。

5. まとめ

本実験の結果から以下のことが明らかとなった。

- ① 軽量骨材を用いた場合、骨材混入量の増加に伴い強度は低下し、その程度はマトリックス強度が大きいくほど著しい。
- ② モルタル及びコンクリートの強度低下傾向は骨材の種類に大きな影響を受ける。
- ③ 軽量骨材を用いたモルタルまたはコンクリートの強度はマトリックス強度の増加に伴い次第に低下していく。
- ④ 軽量骨材を用いたモルタルまたはコンクリートの強度は、骨材種類・骨材混入量・マトリックス強度をパラメータとした式によって表現できる。

Table 10 Experimental Fitting Parameters

分類	記号	a	b
細骨材	MC	-0.0089	0.0701
	NL	0.0057	0.116
	GLS	0.0129	0.0997
	SBS	0.0148	0.0532
	RS	-0.0115	-0.00672
粗骨材	LC	0.0316	0.105
	NE	0.0041	0.140
	SBL	0.0263	0.0871
	SM	0.0060	0.117
	CG	0.0068	0.0223

V. 強度推定手法の構築

1. 目的

Ⅲ章、Ⅳ章の実験結果より、コンクリート強度は空気が混入した場合は当然であるが、軽量骨材が混入してもマトリックス強度から低下することが明らかとなった。すなわち、軽量コンクリートの強度は水セメント比や空気の混入量だけでなく、骨材に関する影響も加味しなければならないことになる。本章は、Ⅲ章・Ⅳ章の結果を基に軽量コンクリートの強度推定手法を構築することを目的としている。

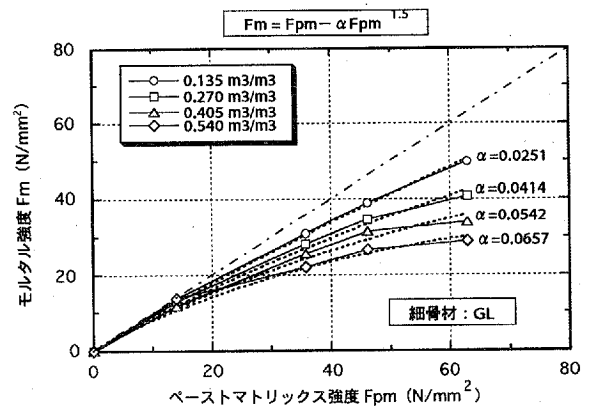


Fig.6 Regressive Formula of Mortar Strength

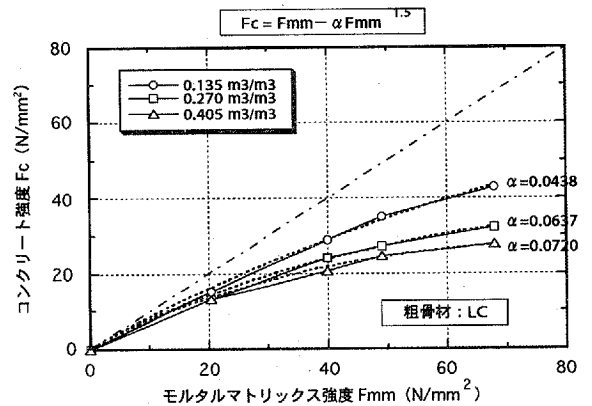


Fig.7 Regressive Formula of Concrete Strength

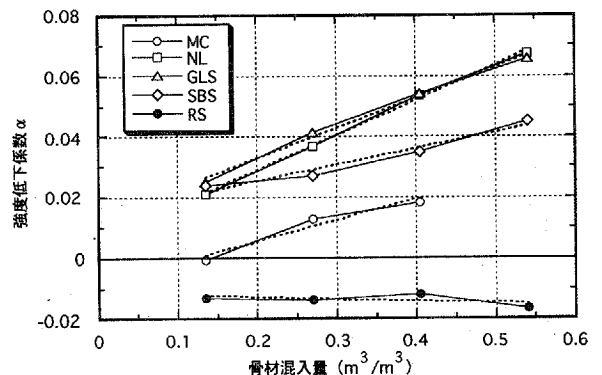


Fig.8 Relationship between Fine Aggregate Content and Reduction Coefficient

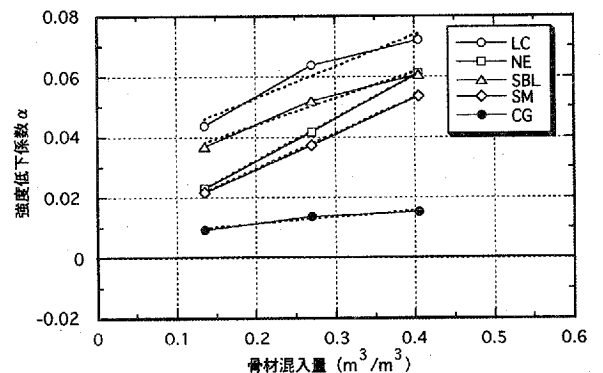


Fig.9 Relationship between Course Aggregate Content and Reduction Coefficient

2. 強度推定手法

(1) 概要

ここでは、セメントペーストに、空気・軽量微粉・軽量細骨材・軽量粗骨材が混入された軽量コンクリートに関して考察を行う。ここで、軽量微粉を入れているのは、軽量細骨材の中には微粉粒が含まれていないものが多く、それを補うためである。

強度推定手法のフローを Fig.10 に示す。計画調合を定めた後、まず空気量を 0%としたときのペーストの強度 F_p を求め、以下、空気の混入・微粉の混入・細骨材の混入・粗骨材の混入の各影響を順次計算していき、最終的にコンクリートの強度 F_c を求めるものである。

(2) 推定手順

(a) 計画調合の決定

まず、軽量コンクリートの計画調合を定める。強度推定に必要な項目は、水結合材比、空気量、軽量骨材の種類及び軽量骨材の混入量の4項目である。

(b) ペースト強度 F_p の推定

ここでいうペーストとは空気が全く混入されていない状態のことである。ペースト強度 F_p は、試し練りもしくは水結合材比と強度の関係式から求めればよい。

(c) エアペースト強度 F_{ap} の推定

エアペースト強度 F_{ap} は、ペーストに弱点となる空気が混入されることによってペースト強度 F_p から低下する。その関係はⅢ章で示した (1) 式で表すことができる。

$$F_{ap} = (1 - \beta \cdot A_p) F_p \quad \dots \dots \dots (1)$$

(再掲)

すなわち、エアペーストの強度は、ペーストの強度と空気の混入量によって定まってくる。実験定数 β の値は、使用する起泡剤や AE 剤の種類もしくは水セメント比によらず、ペースト空気量が 0~45% の範囲で約 0.018 であることがⅢ章の実験で明らかとなっている。ここで、ペースト空気量 A_p はエアペースト中の空気の混入量（空気を含んだ全ペースト中における空気の割合）であり、コンクリート中の空気混入量ではないことに注意する必要がある。

(d) 微粉モルタル強度 F_f の推定

微粉モルタル強度 F_f は、エアペーストに弱点となる軽量微粉が混入されることによってエアペースト強度 F_{ap} から低下し、その関係は (5) 式で表すことができる。

$$F_f = F_{ap} - \alpha F_{ap}^{1.5} = (1 - \alpha \sqrt{F_{ap}}) F_{ap} \quad \dots \dots \dots (5)$$

α : 実験定数 ($\alpha = a + b \cdot V_f$)

V_f : 微粉モルタル中の軽量微粉の混入量 (m^3/m^3)

a, b : 軽量骨材の種類によって定まる実験定数

すなわち、微粉モルタルの強度は、エアペーストの強度と軽量微粉の種類・混入量によって定まってくる。ここで、 V_f は微粉モルタル中の軽量微粉の混入量であり、コンクリート中に占める微粉量ではない。

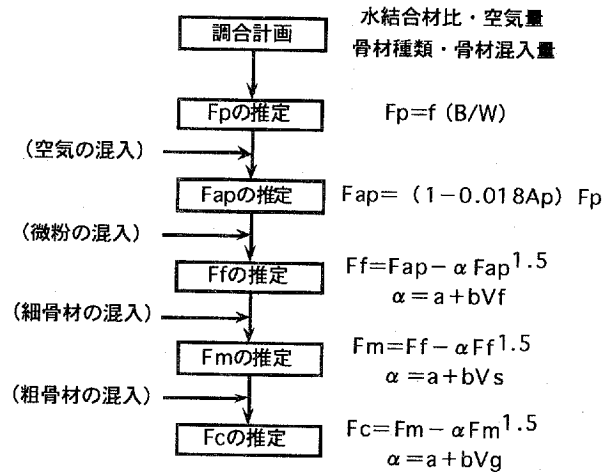


Fig.10 Flow of Theory for Estimating Concrete Strength

(e) モルタル強度 F_m の推定

モルタル強度 F_m は、d 項と同様に微粉モルタル強度 F_f から低下し、その関係は (6) 式で表すことができる。

$$F_m = F_f - \alpha F_f^{1.5} = (1 - \alpha \sqrt{F_f}) F_f \quad \dots \dots \dots (6)$$

α : 実験定数 ($\alpha = a + b \cdot V_s$)

V_s : モルタル中の軽量細骨材の混入量 (m^3/m^3)

(f) コンクリート強度 F_c の推定

コンクリート強度 F_c は、同様にモルタル強度 F_m から低下し、その関係は (7) 式で表すことができる。

$$F_c = F_m - \alpha F_m^{1.5} = (1 - \alpha \sqrt{F_m}) F_m \quad \dots \dots \dots (7)$$

α : 実験定数 ($\alpha = a + b \cdot V_g$)

V_g : コンクリート中の軽量粗骨材の混入量 (m^3/m^3)

以上より、ペースト強度が与えられれば、そこに空気・軽量微粉・軽量細骨材・軽量粗骨材が混入された軽量コンクリートの強度を求めることができる。

VI. 強度推定手法の妥当性の検証

1. 目的

本章は、軽量骨材の種類と空気量をパラメータとした広範な調合条件における実験を行い、各種の軽量コンクリートの圧縮強度を求め、Ⅴ章で示した強度推定手法による推定値との比較を試み、その妥当性を検証することを目的としている。

2. 実験計画

(1) 実験要因と水準

骨材は、Ⅳ章の結果から軽量で強度低下の小さい骨材を選定した。選定した軽量微粉、細・粗骨材は計 5 種類であり、実験はそれらを組み合わせて行った。骨材の組合せを Table 11 に示す。この内、RS シリーズはマトリックス強度を求めるための陸砂モルタルである。

水結合材比は 40, 30, 25% の 3 水準、ペースト空気量は 0,

20, 30, 40%の4水準とした。その組合せを Table 12 に示す。

(2) 使用材料

骨材の物理的性質を Table 13 に示す。これ以外の材料として、普通ポルトランドセメント、粉末シリカフューム、起泡剤（硫酸エステル系）、消泡剤（グリコール誘導体）、高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。

(3) 調合

空気を 0%とする基本調合を Table 14 に示す。この基本調合に所定の空気を外割で混入させた。また RS シリーズは細骨材量を 538 l/m³ と一定とした。なお、軽量骨材は表乾状態にして使用した。

(4) 練混ぜ

モルタルはホバート型モルタルミキサにより、コンクリートは水平 2 軸型強制撈拌ミキサにより練り混ぜた。練混ぜ時間はそれぞれ 210 秒、90 秒とした。

(5) 供試体の成形・養生

供試体は、モルタルは $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 、コンクリートは $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とした。それぞれ JIS A 1132 に準じて供試体を作製後、20℃封緘養生を行った。

(6) 試験項目

試験項目を一覧にして Table 15 に示す。フレッシュ性状として、フロー値（モルタルのみ）・スランプ及びスランプフロー（コンクリートのみ）・単位容積質量・空気量・練上がり温度を、また、硬化後の性状として、圧縮強度・単位容積質量を測定した。

3. 実験結果

コンクリート（モルタル）の比重と圧縮強度の関係を、すべての実験シリーズをまとめて Fig.11 に示す。この図から以下のことが分かる。

①GN シリーズは、比重 1.02 で 20N/mm²、比重 1.12 で 30N/mm²の強度を示し、最も軽量で高強度を得た。

②MC シリーズは、GN シリーズより若干強度は低かったが、比重 1.4 で 60N/mm²の高強度を示した。

なお、同一比重の場合、水結合材比が小さい方が若干強度が大きくなる傾向があった。

4. 実験結果との適合性

(1) ペースト強度の推定

本実験ではペースト強度を陸砂モルタル強度から推定した。これはモルタル強度の方が安定した値が得られるからである。ペースト強度の推定手順は以下のとおりである。

①陸砂モルタル強度 F （実験値）から空気量 0%に相当するモルタル強度 F_m を推定する。（ $F_m = F/(1-0.018A_p)$ ）

②空気量 0%モルタル強度 F_m から空気量 0%ペースト強度 F_p を推定する。（ $F_m = F_p - \alpha F_p^{1.5}$, $\alpha = a+b \cdot V_s$, a, b の値は Table 10 の陸砂の項（RS）を使用）

以上の計算によって得られたペースト強度は、W/B 40, 30, 25%のそれぞれに対して 63.8, 83.7, 95.6N/mm²であった。

(2) 実験結果との適合性

(1) で求めたペースト強度と各定数を (1) 式, (5) ~ (7) 式に代入してコンクリート強度を推定した。その際、ペースト空気量は強度試験用供試体の単位容積質量から質量法で求め

Table 11 Combination of Aggregate Type

	シリーズ名	微粉	細骨材	粗骨材
モルタル	MCシリーズ	MC	—	—
コンクリート	GSシリーズ	MC	GLS	SM
	GNシリーズ	MC	GLS	NLL
	SSシリーズ	MC	SBS	SM
モルタル	RSシリーズ	—	RS	—

Table 12 Combination of Experimental Parameters

水結合材比(%)	40			30			25		
ペースト空気量(%)	0	20	40	20	30	40	20	30	40
MCシリーズ	—	○	○	○	○	○	○	—	○
GSシリーズ	○	○	—	—	—	—	○	○	○
GNシリーズ	○	○	—	—	—	—	○	—	○
SSシリーズ	—	—	—	—	—	—	○	—	○

注) RSシリーズは、各水結合材比において空気量0%とした。

Table 13 Mechanical Properties of Aggregates

種類	記号	粒径範囲	絶対比重	表乾比重*1	吸水率*1
微粉	MC	0.045~0.3	0.680	0.681	0.17
	GLS	0.3~5.0	0.682	0.720	5.58
	SBS	2.5~5.0	0.961	1.12	16.6
細骨材	RS	~5.0	2.51	2.58	2.92
	NLL	5~15	0.751	0.781	4.01
	SM	5~15	0.898	0.991	10.3

*1) 納入状態から24時間吸水させ、表乾状態としたときの値

Table 14 Mix Proportions of Mortar and Concrete

シリーズ	W/B	水	セメント	シリカフューム	微粉	細骨材	粗骨材
MC	40%	279	221	0	500	—	—
	30%	268	282	0	450	—	—
	25%	258	294	47	400	—	—
GS	40%	170	135	0	150	195	350
GN	30%	170	179	0	140	182	326
SS	25%	170	194	31	130	169	306

(容積調合、単位: l/m³)

Table 15 Testing Items and Methods

	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ	フロー値	JIS R 5201	モルタルのみ
	スランプ	JIS A 1101	コンクリートのみ
	スランプフロー	JASS 5T-503	コンクリートのみ
	単位容積質量	JIS A 1116	
	空気量	同上	質量方法
	練上がり温度	—	デジタル温度計による
硬化	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 7, 28, 91日
	単位容積質量	—	質量および寸法の計測による

Table 16 Air Content of Cement Paste (単位: %)

水結合材比(%)	40			30			25		
設定空気量(%)	0	20	40	20	30	40	20	30	40
MCシリーズ	—	13.6	39.1	19.7	26.1	40.0	18.1	—	37.9
GSシリーズ	2.0	25.1	—	—	—	—	19.4	27.9	37.4
GNシリーズ	1.4	29.0	—	—	—	—	24.0	—	35.9
SSシリーズ	—	—	—	—	—	—	23.2	—	33.0

注) 強度試験用供試体の単位容積質量から質量法で求めた値、材齢91日

た値 (Table 16 参照) を用いた。実験結果と解析結果の対応を Fig.12 に示す。いずれの実験シリーズにおいても極めてよい対応を示していることが分かる。本実験は 5 種類の軽量骨材を使用し、水結合材比 3 水準、ペースト空気量 4 水準という広範な条件で実施したものであり、そのような条件で高い適合性が得られたことから、提示した強度推定手法の妥当性が検証されたと言える。

(3) 強度低下に及ぼす各要因の分析

(2) で求めた各マトリックスが発現していると考えられる強度 (F_p , F_{ap} , F_f , F_m , F_c) を Fig.13 に示す。これによると、空気の混入が強度低下に大きく寄与していることが分かる。また、ペーストやエアペーストの時点で強度に大きな違いがあっても、空気・微粉・細骨材・粗骨材と混入されていくに従い、次第にその差は小さくなっていき、最終的なコンクリート強度としては大きな差はなくなってしまうのが分かる。

5. まとめ

本実験の結果から以下のことが明らかとなった。

- ① 軽量骨材と空気泡を混入させたコンクリートにおいて比重 1.12 で 30N/mm^2 、モルタルにおいて比重 1.4 で 60N/mm^2 の軽量高強度性を得た。
- ② 提示した強度推定手法による推定値は実験値と極めてよい対応を示し、本強度推定手法の妥当性が検証された。

VII. 結 論

本研究により得られた成果を以下に示す。

- ① ペースト強度はペースト空気量の増大に伴いほぼ直線的に低下し、その低下傾向は、水セメント比・混和剤の種類・空気混入方法の違いに関わらずペースト空気量で一元的に評価でき、ペースト空気量 1% につき約 1.8% 強度が低下する。
- ② 軽量骨材の混入に伴い強度は低下し、その程度は、骨材混入量が多いほど、また、マトリックス強度が大きいほど大きいことを明らかとした。また、骨材が混入された状態の強度は、骨材種類・骨材混入量・マトリックス強度をパラメータとした式で評価できることを示した。
- ③ ①及び②の成果を基に、軽量コンクリートの強度推定手法を構築し、広範な調合条件での実験結果との比較を試み、本強度推定手法の妥当性を検証した。

VIII. おわりに

本手法は、事前に軽量骨材の強度低下傾向 (α 値) を求めておけば、どのような調合のコンクリートでもその強度を推定することが可能であり、極めて汎用性が高い。これは軽量コンクリートの調合設計上不可欠なものである。また、現在、比重が 1.0 以下の軽量細・粗骨材は 15 種類以上あり、これらを組み合わせて用いた上にさらに水セメント比や空気量などの調合的条件をパラメータとして網羅的に実験を行うことは (最適な調合を得ることは)、事実上不可能に近い。しかし、そのような場合でも本手法を用いれば、実験を行わずに解析的に圧縮強度を得ることができるので確認実験のみで済むなど、その有用性は極めて高い。

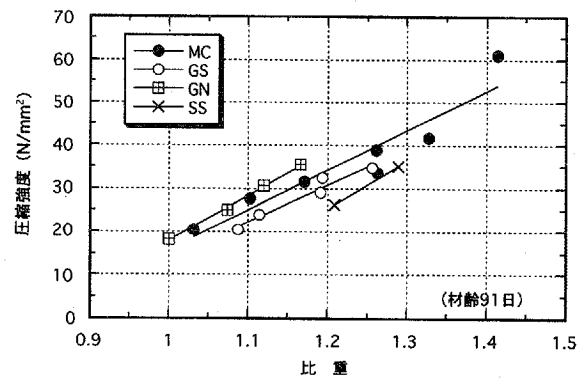


Fig.11 Relationship between Specific Gravity and Compressive Strength

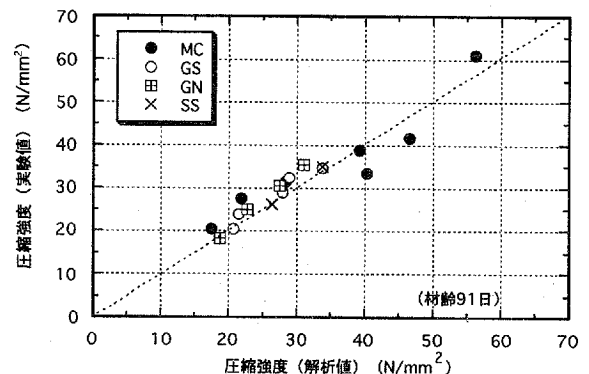


Fig.12 Comparison between Experimental and Analysis Results

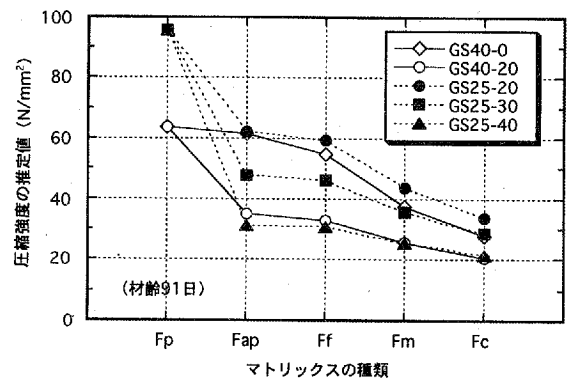


Fig.13 Contribution of Constitutive Materials to Strength Reduction

参考文献

- 1) 桜本, 依田, 池田; 超軽量高強度コンクリートの開発 (その 1) ~ (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997.9, pp.327~332.
- 2) 桜本, 依田; 超軽量高強度コンクリートの開発 (その 4) ~ (その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998.9, pp.761~764.
- 3) 依田, 桜本, 池田; 軽量骨材の性質がコンクリート強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997, pp.493~498.