

論文 砕砂の圧縮強度およびヤング係数が高強度モルタルの圧縮強度に及ぼす影響の検討

吉田 泰^{*1}・陣内 浩^{*2}・山本 佳城^{*3}・渡邊 悟士^{*4}

要旨：砕砂の圧縮強度およびヤング係数が、高強度モルタルの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。圧縮強度やヤング係数の異なる砕砂を用いたモルタルの圧縮強度試験を実施し、砕砂の圧縮強度がモルタルの圧縮強度に影響することを示した。モルタル中のペーストおよび細骨材に生じる応力を推定することにより、砕砂の圧縮強度およびヤング係数が圧縮強度におよぼす影響を明らかにするとともに、ペーストおよび細骨材の力学的特性からモルタルの圧縮強度を推定した。結果、超高強度になるほど砕砂の圧縮強度がモルタルの圧縮強度におよぼす影響が大きくなることを示した。

キーワード：砕砂、モルタル、圧縮強度、超高強度コンクリート

1. はじめに

100 N/mm²を超える超高強度コンクリートでは、粗骨材の品質がコンクリートの圧縮強度に大きな影響を及ぼすことが報告されている¹⁾²⁾。筆者らは、特に設計基準強度 150N/mm²クラスの超高強度コンクリートでは、同じ砕石工場で製造された砕石を粗骨材として用いても、製造された時期によりコンクリートの圧縮強度に差が生じる場合があることも報告している³⁾。このような背景から筆者らは、超高強度コンクリートの製造に用いる砕石を対象として、粗骨材原石の圧縮強度およびヤング係数で厳選する方法を提案している⁴⁾。

しかしながら、このような 100 N/mm²を超える超高強度コンクリートに用いる細骨材が、圧縮強度におよぼす影響については、真野らの研究⁵⁾により細骨材の種類が高強度モルタルの圧縮強度に与える定性的な影響は明らかにされているものの、細骨材の圧縮強度がモルタルの圧縮強度に与える定量的な影響は検討されていない。そこで本研究では、生産地および生産工場が同じで、製造日の異なる砕砂を用いたモルタルの圧縮強度を比較検討することとした。また、モルタルの圧縮強度試験結果から、モルタル中のペーストおよび砕砂に生じる応力を推定することにより、モルタル内におけるペーストおよび砕砂の応力負担、分配が強度に及ぼす影響について検討することとした。

2. モルタル実験の計画

本実験では、これまでに 100 N/mm²を超える超高強度コンクリートの製造実績があり、骨材そのものも高い圧縮強度を持つことが知られている砕砂を用いた。原石の

圧縮強度およびヤング係数の異なる砕砂を得るために、異なる製造日ごとに採取した砕砂をモルタル用の細骨材として練り混ぜたときのモルタルの圧縮強度を比較検討することとした。砕砂の強度に対してペーストの強度が低い場合と高い場合にモルタルの圧縮強度に砕砂の圧縮強度およびヤング係数が与える影響を検討するために、低い場合を 20℃水中養生（ペーストの目標強度 150N/mm²）高い場合を 90℃温水養生（ペーストの目標強度 240N/mm²）の 2 水準で養生することとした。

2.1 使用材料

(1) 砕砂

使用する砕砂は、実際の超高強度コンクリートの製造に使用されている安山岩系砕砂とした。砕砂を受入れた時の試験成績表に記載された表乾密度および吸水率と砕砂へ加工する前の原石からφ50×100mmのコア供試体を切り出し、圧縮強度試験を実施し確認された結果を表-1に示す。表-1からわかるように表乾密度と吸水

表-1 砕砂の物性値

記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	原石圧縮強度 (N/mm ²)
a	2.56	2.54	179
b	2.56	2.50	170
c	2.55	2.56	195
d	2.55	2.56	169
e	2.56	2.46	176
f	2.56	2.52	170
g	2.56	2.50	121
h	2.56	2.46	133

*1 大成建設（株） 技術センター 建築技術研究所 研究員 修士（工学）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 建築技術研究所 主席研究員 博士（工学）（正会員）

*3 大成建設（株） 技術センター 建築技術研究所 副主任研究員 博士（工学）（正会員）

*4 大成建設（株） 東京支店 課長代理 博士（工学）（正会員）

率はほぼ同じ値であったが、原石の圧縮強度は 121～195N/mm² の広い範囲に分布していた。なお、これらの砕砂はいずれも JIS A 5005:2009「コンクリート用砕砂および砕砂」⁶⁾の規格を満たしていた。

(2) 砕砂以外のモルタル材料

使用材料を表-2 に示す。結合材には、中庸熟ポルトランドセメントに高強度用混和材⁷⁾を質量比 7:3 で混合した高強度用結合材を使用した。化学混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を使用し、空気量調整のためにアルコール系の空気量調整剤を使用した。

2.2 調合計画

モルタルおよびペーストの調合を表-3 に示す。いずれも表-3 に示す水結合材比を 14.0%の超高強度コンクリートの調合から作成した。具体的にはモルタル調合はコンクリート調合から粗骨材部分を除き作成した。ペーストの調合はモルタル調合から細骨材を除いて作成した。なお、モルタルの細骨材量は容積を固定とし、使用する安山岩系砕砂の密度によって重量を調整した。なお、高性能減水剤の添加率はモルタル、ペーストともに『結合材量×2.8%』で一定とした。

2.3 供試体の作製および試験方法

モルタルおよびペーストの練混ぜにはホバート型ミキサーを使用した。練上がり直後のモルタルの 0 打フロー⁸⁾は 265～275mm の範囲で良好な流動性を示し、ペーストと砕砂の分離もなかった。供試体の寸法および形状は φ50×100mm の円柱供試体とした。養生方法は打設から翌日の脱型までを 20℃封かん養生とし、その後 20℃水中養生および 90℃温水養生を施した。モルタルもペーストも圧縮強度試験用の供試体を 5 個ずつ作製した。

圧縮強度試験は JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、材齢 28 日で実施した。

3. モルタル実験の結果

表-4 にモルタルおよびペーストの圧縮強度試験の結果を示す。20℃水中養生の岩石 e およびペーストの変動係数が相対的に大きくなったものの、全体として圧縮強度試験結果には大きなばらつきはなかったものと考えられる。また 20℃水中養生と 90℃温水養生の供試体は、1 度に練り混ぜられたバッチから採取したモルタルおよびペーストから作製しており、共通して変動係数の大きな結果を示した試験結果もなかったことから、供試体の作製によるばらつきもなかったものと考えられる。

図-1 に砕砂の原石（以下、原石と記す）の圧縮強度とその砕砂を用いて 20℃水中養生を行ったモルタルの圧縮強度の関係を示す。図中の破線はペーストの圧縮強度を示している。縦方向の破線は原石の圧縮強度とペーストの圧縮強度を比較するために、横方向の破線はモル

表-2 使用材料

結合材	高強度コンクリート用結合材 (中庸熟ポルトランドセメント+高強度用混和材 +石灰石系膨張材)
細骨材	表-1 に示す安山岩系砕砂
化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 アルコール系空気量調整剤

表-3 コンクリートの調合

	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)			
		水	結合材	細骨材	粗骨材
コンクリート	14.0	150	1071	629	620
モルタル		197	1403	824	-
ペースト		286	2042	-	-

表-4 圧縮強度試験結果一覧

記号	20℃水中養生		90℃温水養生	
	圧縮強度 (N/mm ²)	変動係数 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	変動係数 (%)
a	142	2.65	209	2.60
b	145	1.85	215	3.51
c	141	2.21	201	4.06
d	146	0.78	211	1.59
e	145	5.92	216	3.26
f	142	4.47	212	2.96
g	140	0.78	205	4.32
h	132	3.15	198	3.26
ペースト	151	6.23	239	2.73

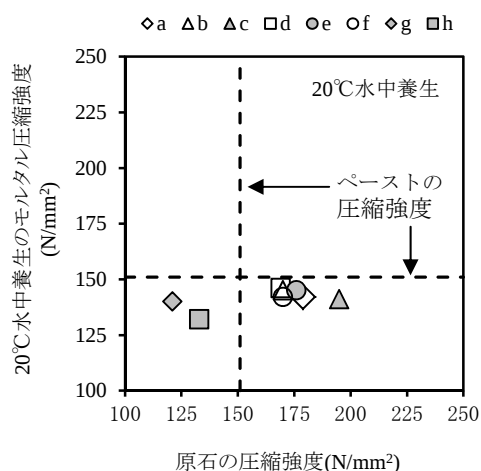


図-1 原石の圧縮強度とモルタルの圧縮強度

タルの圧縮強度とペーストの圧縮強度を比較するため
に示した。横方向の破線で示したペーストの圧縮強度
以上となるモルタルはなかった。図-1 より縦方向の破線
よりも右側、すなわち原石の圧縮強度がペーストの圧縮
強度よりも高い場合は、モルタルの圧縮強度は横方向の
破線で示されたペーストの圧縮強度に比較的近いもの
が多い。一方、縦方向の破線よりも左側、すなわち原石
の圧縮強度がペーストの圧縮強度よりも低くなる場合
は、横方向の破線で示されたペーストの圧縮強度よりも
モルタルの圧縮強度が相対的に低い値である。

図-2 に砕砂の原石（以下、原石と記す）の圧縮強度
とその砕砂を用いて 90℃温水養生を行ったモルタルの
圧縮強度の関係を示す。こちらも横方向の破線で示した
ペーストの圧縮強度以上となるモルタルはなかった。ペ
ーストの圧縮強度が高い図-2 では、原石の圧縮強度が
高くなるにつれモルタルの圧縮強度も高くなる傾向が
ある。これらの結果から考察すると、ペーストの圧縮強
度よりも高い圧縮強度の砕砂を用いることモルタルの
圧縮強度を高くするために重要であると考えられるが、
モルタル中のペーストおよび砕砂に生じる応力の推定
を実施することによって、砕砂の圧縮強度およびヤング
係数がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響をより詳細に
検討することとした。

4. モルタル中に生じる応力の推定によるモルタルの圧縮強度に及ぼす砕砂の影響の検討

4.1 ペーストおよび砕砂に生じる応力の推定方法

本研究では、モルタル中のペーストおよび細骨材に生
じる応力を推定するため、コンクリートをモルタルと粗
骨材料の 2 相材料と定義して各相に生じる応力を指定し
た筆者らの既往の研究⁹⁾を応用することとした。具体的
には、モルタルをペーストと細骨材の 2 相材料と定義し
た場合の各相、すなわちペースト相および細骨材相に生
じる応力およびひずみについて推定した。

既往の研究⁹⁾と同様に、推定する応力はモルタルが破
壊に至る圧縮強度の 95%（以下、95%応力時と略する）
の応力時におけるものとした。ペーストと細骨材の 2 相
からなるモルタルに生じる応力およびひずみは、構成要
素に生じる応力およびひずみの足し合わせであるとい
う仮定に基づいた、式(1)および式(2)を使用した。

$$\sigma_m = V_p \cdot \sigma_p(ave) + V_s \cdot \sigma_s(ave) \quad (1)$$

$$\varepsilon_m = V_p \cdot \varepsilon_p(ave) + V_s \cdot \varepsilon_s(ave) \quad (2)$$

ここに、

σ_m : モルタルの応力
 $\sigma_p(ave)$: モルタル中のペーストの応力の平均値
 $\sigma_s(ave)$: モルタル中の細骨材の応力の平均値
 ε_m : モルタルのひずみ

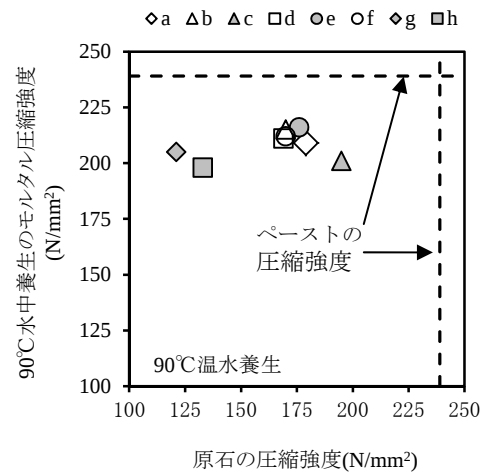


図-2 原石コアの圧縮強度とモルタルの圧縮強度

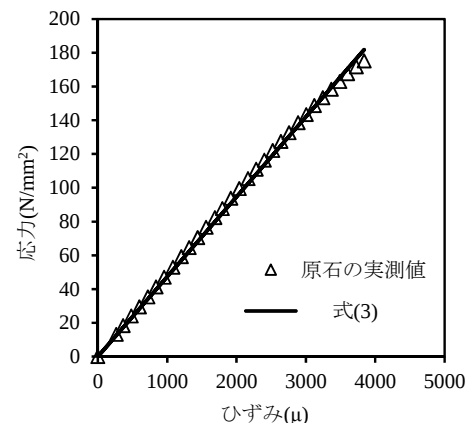


図-3 原石のひずみと応力の関係

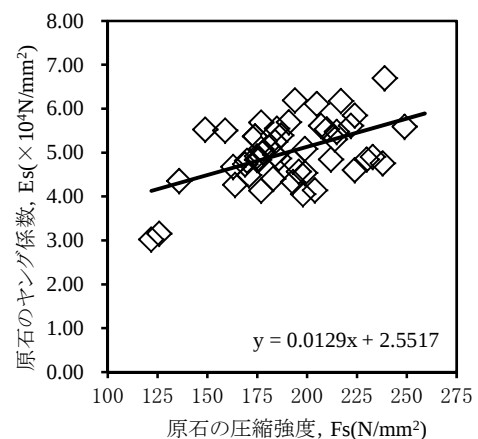


図-4 原石の圧縮強度とヤング係数の関係

$\varepsilon_p(ave)$: モルタル中のペーストのひずみの平均値

$\varepsilon_s(ave)$: モルタル中の細骨材のひずみの平均値

V_p : モルタル中に占めるペーストの容積の比率

V_s : モルタル中に占める細骨材の容積の比率

本推定では細骨材原石の応力 - ひずみ関係は、単純化
して式(3)に示すように直線と仮定した。

$$\sigma_s(ave) = E_s \cdot \varepsilon_s(ave) \quad (3)$$

ここに,

E_s : 細骨材のヤング係数

図-3 に実際に測定された原石のひずみと応力の関係の一例および式(3)で推定したひずみと応力の関係を示す。原石の実測値と式(3)による予測値の差は、いずれも原石の実測値に対して 4%未満と小さかったことから、直線と仮定しても問題がないことと判断した。また、本検討においては、ペースト中の細骨材には原石の圧縮強度以上の応力は生じないものとし、応力一定のままひずみのみが増加するモデルを仮定することとした。

本推定ではペーストの応力 - ひずみ関係は、簡単のため式(4)に示すように直線と仮定した。ペーストのヤング係数 E_p は式(5)に示す Hashin-Hansen の複合理論¹⁰⁾に基づき、モルタルのヤング係数 E_m と細骨材原石のヤング係数 E_s から算出することとした。また、細骨材のヤング係数 E_s は図-4 に示す筆者らが収集した同じ採石場で生産された安山岩のデータから推測した値を使用した。ここではヤング係数のばらつきが多いことや低強度のデータが少ないことも考慮し、単純な直線回帰として推測することとした。

$$\sigma_p(ave) = E_p \cdot \varepsilon_p(ave) \quad (4)$$

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{(1-V_s)E_p + (1+V_s)E_s}{(1+V_s)E_p + (1-V_s)E_s} \quad (5)$$

ここに,

E_p : ペーストのヤング係数

E_m : モルタルのヤング係数

モルタルのヤング係数 E_m は、図-5 に示す筆者らが過去に作製した類似の圧縮強度のモルタルの圧縮強度とヤング係数の実験データから求めた、式(6)に実験で得られた圧縮強度試験結果を代入して算出した。

$$E_m = -5.4 \times 10^{-5} \times F_m^2 + 2.9 \times 10^{-2} \times F_m + 0.90 \quad (6)$$

F_m : モルタルの圧縮強度

本推定では表-3 から計算すると $V_p=0.68$, $V_s=0.32$ であり、実験によって得られたモルタルの圧縮強度から式(5)および式(6)を使用することでモルタルのヤング係数、ペーストのヤング係数は仮定することができる。本研究で使用したペーストのヤング係数の推定値は、 151 N/mm^2 のペーストが $3.50 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度、 239 N/mm^2 のペーストが $4.50 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。ここで、式(1)～式(4)における未知数は $\sigma_p(ave)$, $\sigma_s(ave)$, $\varepsilon_p(ave)$, $\varepsilon_s(ave)$ の 4 個となるため、式(1)～式(4)をもとに 95% 応力時におけるモルタル中のペーストおよび細骨材の応力 ($\sigma_p(ave)$, $\sigma_s(ave)$) およびひずみの平均値 ($\varepsilon_p(ave)$, $\varepsilon_s(ave)$) を推定することが可能である。

4.2 各相に生じる応力の推定結果

推定した 95% 応力時の σ_s/F_s および σ_p/F_p を F_p/F_s で整理した結果を図-6 および図-7 に示す。まず、図-6

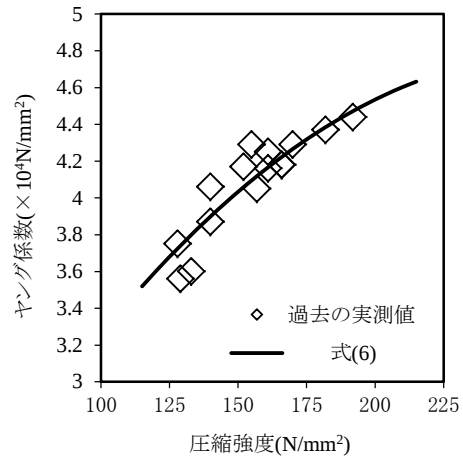


図-5 モルタルの圧縮強度とヤング係数の関係

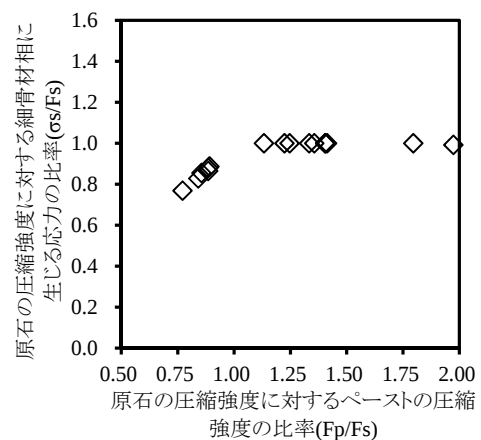


図-6 モルタル 95% 応力時の細骨材の応力状態

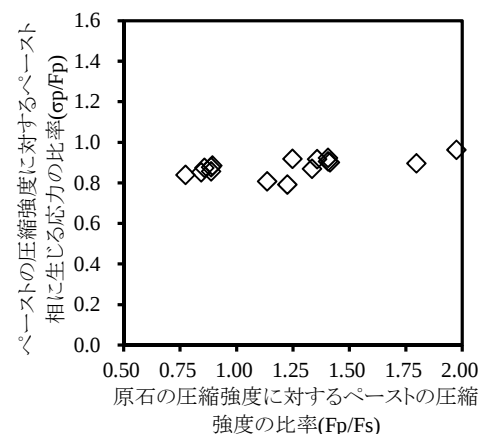


図-7 モルタル 95% 応力時のペーストの応力状態

より σ_s/F_s は、 F_p/F_s が 1.00 よりも小さい範囲においては、 F_p/F_s が 1.00 に近づくにつれて σ_s/F_s も 1.0 に近づく傾向にあった。一方、 F_p/F_s が大きい、すなわちペーストの圧縮強度に対して細骨材原石の強度が低い場合では、 σ_s/F_s の上限値を 1.00 と仮定したが、図-7 のように σ_p/F_p は、1.0 を超えるような値になることはなく、ペーストと細骨材に矛盾なく応力が生じる状態が示された。

F_p/F_s が 1.00 よりも小さい範囲においてはペーストの圧縮強度によってモルタルの圧縮強度が大きく影響を受ける可能性が示された。

4.3 モルタルの圧縮強度の推定値と砕砂の物性の関係

4.2 での検討結果を踏まえ、ある圧縮強度のペーストに対して、さまざまな圧縮強度およびヤング係数の細骨材を用いた場合のモルタルの圧縮強度を推定することとした。検証対象としたペーストの圧縮強度は 120, 150, 180, 240N/mm² の 4 水準とした。使用した骨材の圧縮強度およびヤング係数は図-4 に示した過去に採取されたデータから設定した (全 49 データ)。なお、各相の圧縮強度に対する各相に生じる応力は、図-6 および図-7 に示した前章の推定結果から設定した。具体的には、ペーストの圧縮強度に対するペースト相に生じる応力の比率は応力制限仮定での σ_s/F_s および σ_p/F_p の値と式(1)を使用して予測した。

予測したモルタルの圧縮強度と原石の圧縮強度の関係を図-8～図-11 に示す。各々の図から、使用するペーストの強度が高くなるにつれて細骨材の影響によりモルタルの圧縮強度は低下する傾向にあることが確認できる。また、図-9 は図-1 とほぼ同じ強度のペーストを用いており、図-1 と同様の傾向が得られた。さらに、図-11 は図-2 とほぼ同じ強度のペーストを用いており、こちらも図-2 と同様の傾向が得られた。つまり、原石の強度がペーストの強度を下回る領域では、原石の圧縮強度が低くなるほどモルタルの圧縮強度も低くなる傾向にあることが示された。そして原石の強度がペーストの強度を上回る領域では、ペーストの強度よりは低くなるものの、モルタルの強度はほぼ一定となる傾向が示された。本検討の範囲では、提案する推定方法がモルタルの圧縮強度が決定されるプロセスを良く表現できているといえる。ただし、川上らの研究¹¹⁾によれば、コンクリートの圧縮強度が 100N/mm² を下回る水セメント比 30%以上の領域において、原石の強度がペーストの強度を上回る場合には、モルタルの圧縮強度がペーストの圧縮強度を超える場合もあることから、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。以上の検討結果から、ペーストの強度が細骨材の強度を上回りやすい超高強度になるほどモルタルの圧縮強度に及ぼす細骨材の圧縮強度の影響が大きくなると考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲において以下の事項を明らかとした。

- 1) モルタルの圧縮強度試験により、ペーストの圧縮強度が細骨材の圧縮強度よりも低い場合、細骨材の圧縮強度が低くなるとモルタルの圧縮強度も低くなる傾向が得られた。また、細骨材の圧縮強度がペー

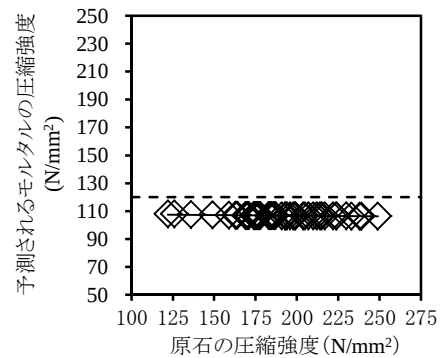


図-8 原石の圧縮強度と予測されるモルタルの圧縮強度の関係 (ペーストの圧縮強度 120N/mm²)

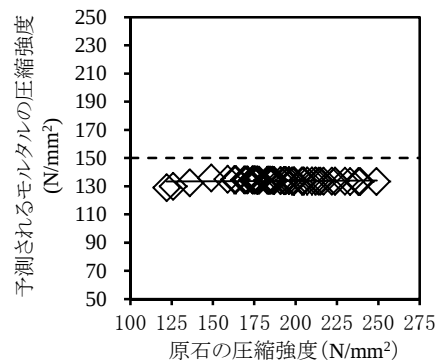


図-9 原石の圧縮強度と予測されるモルタルの圧縮強度の関係 (ペーストの圧縮強度 150N/mm²)

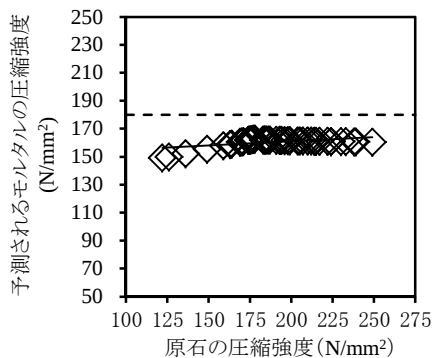


図-10 原石の圧縮強度と予測されるモルタルの圧縮強度の関係 (ペーストの圧縮強度 180N/mm²)

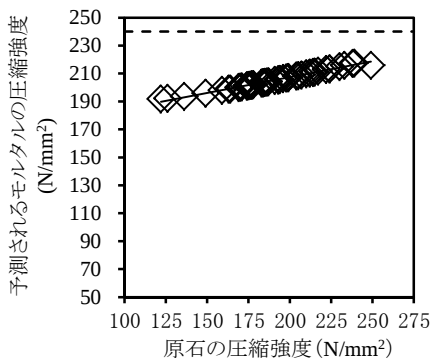


図-11 原石の圧縮強度と予測されるモルタルの圧縮強度の関係 (ペーストの圧縮強度 240N/mm²)

ストの圧縮強度よりも高い場合、モルタルの圧縮強度は細骨材の圧縮強度によらずほぼ一定である傾向が得られた。

- 2) ペーストの圧縮強度および細骨材の圧縮強度とヤング係数からモルタルの圧縮強度を予測することにより、ペーストの圧縮強度が細骨材の圧縮強度を上回りやすい超高強度になるほど、モルタルの圧縮強度に及ぼす細骨材の圧縮強度の影響が大きくなる可能性を示した。また、予測結果と実験結果が概ね同様の傾向となっていることが確認された。

参考文献

- 1) 真野孝次，飛坂基夫，川崎三十四，中川雄二：高強度コンクリート用骨材の選定方法に関する一実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.769-770，1991.9
- 2) 飛坂基夫：高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす骨材の影響，セメント・コンクリート，No.394，pp.30-33，1979.12
- 3) 渡邊悟士，榊田佳寛，陣内浩，黒岩秀介，並木哲：高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響，JCI 栃木地区研究発表会梗概集，pp.105-106，2007.3
- 4) 渡邊悟士，榊田佳寛，陣内浩，黒岩秀介，並木哲：品質管理への反映を考慮した高強度コンクリート用砕石の力学特性の評価，日本建築学会構造系論文集 第 622 号，pp.1-7，2007.12
- 5) 真野孝次，飛坂基夫，笠井芳夫，阿部道彦，高塩美佐子：高強度コンクリート用骨材の品質判定規準に関する研究（その 2：モルタルの圧縮強度による細骨材の品質判定），日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.649-650，1990.10
- 6) JIS A 5005:2009「コンクリート用砕石および砕砂」
- 7) 寺内利恵子，渡邊悟士，黒岩秀介，陣内浩，山本佳城，並木哲：設計基準強度 200N/mm² の超高強度コンクリートの実用化に関する研究（その 2 実製造設備による供試体レベルでの検討），日本建築学会学術講演梗概集 A，pp.893-894，2009.8
- 8) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」，付 18. JASS5 M-701:2005 高強度コンクリート用セメントの品質基準，2009.2
- 9) 渡邊悟士，榊田佳寛，陣内浩，黒岩秀介，並木哲：圧縮応力下における高強度コンクリート中のモルタルと粗骨材の応力・ひずみに関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 616 号，pp.25-32，2007.6
- 10) Zvi Hashin：The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials，Journal of Applied Mechanics，Vol.29，No.1，pp.143-150，1962.3
- 11) 川上英男：複合理論によるコンクリートの弾性係数評価，日本建築学会北陸支部研究報告集（47），pp.12-15，2004.7