

微粒分の多い石灰石粗骨材を用いたコンクリートに関する基礎実験

吉本勝哉^{*1} 吉武勇^{*2} 津田久嗣^{*3} 井上正一^{*4}

*1 前田建設工業株式会社 土木事業本部(〒101-0064 東京都千代田区猿楽町 2-8-8)
(元 山口大学 大学院理工学研究科 博士前期課程)

*2 山口大学 大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

*3 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部(〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町 3 番地)

*4 鳥取大学 大学院工学研究科(〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101)

要旨：本研究の主な目的は、微粒分を多く含む石灰石粗骨材を用いたコンクリートの基礎的性状を調べることである。この論文では、石灰石粗骨材が最大 30 %までの微粒分を含有していることを想定して、その分の微粒分を石灰石微粉末で代用したコンクリートの断熱温度上昇量や熱膨張係数に加え、初期材齢から長期材齢までの圧縮強度・割裂引張強度性状を報告する。簡易断熱温度上昇試験の結果より、微粉末量による終局断熱温度上昇量への影響がないことを実験的に確認した。また、石灰石微粉末量の違いによる熱膨張係数の変化はほとんどみられないが、一般的なコンクリートより顕著に小さい結果となった。さらに、初期材齢における割裂引張強度は圧縮強度に比べ、石灰石微粉末による強度発現の割合が大きいことが明らかにされた。

キーワード：石灰石微粉末、断熱温度上昇量、熱膨張係数、初期強度

1. はじめに

近年、良質な天然骨材は減少し、中国地方では環境保全のため、その採取規制が行われており、コンクリート骨材の確保が以前にも増して厳しくなっている¹⁾。そのため、碎石あるいは代替骨材の確保が重要課題になっており、今後は品質が多少劣る骨材であっても使用しなければならない状況が増加するものと思われる。このような状況において、石灰石は、埋蔵量が多くかつ品質が比較的安定しており、石灰石骨材はアルカリ骨材反応の問題がなく²⁾、コンクリートに用いた場合には乾燥収縮が小さい^{3,4)}といった長所を有することから、注目を集めている。そのためコンクリートの出荷量の減少に伴うコンクリート用骨材の総需要が減少している中で、骨材に占める石灰石の使用量の割合は増加傾向にある²⁾。

一方、石灰石は磨砕に弱く粉体化しやすい⁵⁾。その結果、コンクリート用粗骨材として入荷の際には、JIS A 5005⁶⁾で規定される微粒分量の上限値 5.0 %を上回ることもあり、10 %を超過した結果も報告されている。このような場合には含有微粒分を調整するために多量の水を用いて洗浄除去しているのが実状である。しかし、石灰石微粉末は硬化コンクリートにおいて、エーライトの初期水和反応の促進⁷⁾、物理的充填作用⁸⁾等による初期強度の増進⁹⁾、凝結時間の短縮¹⁰⁾、乾燥収縮の低減¹¹⁾といった特長を有していることも事実である。優れた品質のコンクリートの実現には、このような石灰石微粉末の特性を積極的に活用していくべきものと思われる。

このような観点から、上限値を超えた含有微粒分を洗浄除去することなく有効活用するため、微粒分を多く含む石灰石粗骨材を用いるコンクリートを主な研究対象とする。なお、実験においては粗骨材に含まれる微粒分を石灰石微粉末で代用するため、以下では微粉末として統一表記する。本研究では、この微粉末量を最大 30 %まで含む石灰石粗骨材を用いたコンクリートの断熱温度上昇量、熱膨張係数、強度発現性状を調べた。本論文は、これらの基礎的実験に基づく石灰石コンクリートの性状を報告するものである。

2. 石灰石微粉末を多量に含むモルタルおよびコンクリートの初期性状

2.1 実験目的

石灰石微粉末量がコンクリートの初期性状(フレッシュ性状・発熱特性)に与える影響を評価するために、石灰石微粉末を多量に含むモルタルおよびコンクリートのスランプ、空気量、断熱温度上昇量を調べた。なお、本研究では材齢 7 日における(推定)断熱温度上昇量を、便宜上、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} として評価を行った。

2.2 使用材料

本実験では、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³、ブレン値 3230cm²/g)、石灰石微粉末(密度 2.70g/cm³、ブレン値 4500cm²/g)を用いた。また、モルタルには、コンクリート用高炉スラグ細骨材 S1(密度 2.75g/cm³、吸水率 0.29 %)、硬質砂岩砕砂 S2(密度

Table 1 Mixture proportions of mortar

I. D.	W/C	Unit weight (kg/m ³)					
		W	C	Lp	S1	S2	S3
Type-0	60.9 %	274	450	0	452	527	526
Type-1				100	422	492	492
Type-2				200	392	458	457
Type-3				300	363	423	423

2.61g/cm³、吸水率 2.56 %)、石灰石砕砂 S3(密度 2.62g/cm³、吸水率 2.53 %)を混合した細骨材を用いた。また、コンクリートに用いた細骨材および粗骨材は、それぞれ海砂(密度 2.60g/cm³、吸水率 0.74 %)、石灰石 2005(密度 2.65g/cm³、吸水率 0.58 %)である。混和剤には、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤を使用した。

2.3 配合条件

(1) モルタル

本実験に採用したモルタルの配合を Table 1 に示す。単位水量、単位セメント量を一定とし、石灰石微粉末を細骨材質量に対して 0、100、200、300kg/m³(以下、Type-0、Type-1、Type-2、Type-3 と表記)と内割置換を行った。これは、標準的なコンクリートの粗骨材量 1000kg/m³(概算値)に対して、それぞれ 0、10、20、30 %に相当するものである。

(2) コンクリート

Table 2 のコンクリート配合に示すように、石灰石粗骨材に対して微粉末量を質量比で 1 %、5 %、10 %、15 %、20 %、30 %としたコンクリートを作製した。本配合では、石灰石微粉末量の影響を明確にするため、石灰石と石灰石微粉末以外の単位量を一定としている。すなわち、微粒分を模擬するため粗骨材量内に微粉末量 1 ~ 30 %を包含した配合である。本実験で使用した石灰石はコンクリート打設前日に水洗し、微粉末を取り除いたものであり、この状態の石灰石の微粉末量を 0 %としている。そして、実際には粗骨材量の一部として計量される微粒分を模擬するため、所定量の微粉末を添加して、他のコンクリート材料と混練を行った。なお、Table 2 に示す配合記号のうち、Lp は石灰石微粉末を表しており、Lp に続く数字は、微粉末量(%)を示している。

2.4 モルタル・コンクリートの作製

本実験では、強制二軸練りミキサ(最大容量 50 ℓ)を用いて練混ぜを行い、モルタルおよびコンクリートを作製した。スランブ試験は JIS A 1116、空気量試験は JIS A 1128 に準拠して行った。各強度試験および熱膨張係数試験に用いる円柱供試体は、打設後直ちに 20 °C の環境下に静置し、脱枠を行った材齢 1 日後から試験に供するまで標準養生を行った。

2.5 断熱温度上昇試験

本研究では、モルタルおよびコンクリートの断熱温度上昇量を求めるにあたり、既往の研究¹²⁾で提案されて

Table 2 Mixture proportions of concrete

I. D.	W/C	Unit weight (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Lp	Ad
Lp-1	50 %	185	370	798	908	9	3.7
Lp-5					871	46	
Lp-10					825	92	
Lp-15					779	138	
Lp-20					733	183	
Lp-30					642	275	

いる簡易断熱温度上昇試験(以下、簡易試験)を実施した。簡易試験では、Fig.1 に示すように、発泡スチロールで作製した 400×400×400mm 角状の断熱型枠の中心に、200×200×200mm 角状のコンクリートを打設する。そして熱電対(T-type)を用いてコンクリート供試体の中心温度(コンクリート温度 T_C)の経時変化を測定するとともに、Fig.2 に示すように、この断熱型枠の放熱特性に応じた(推定)温度損失量 T_l をコンクリート温度 T_C

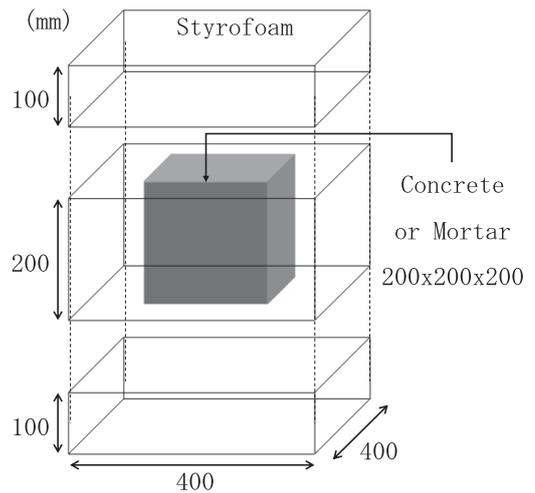


Fig. 1 Concrete specimen and Styrofoam form

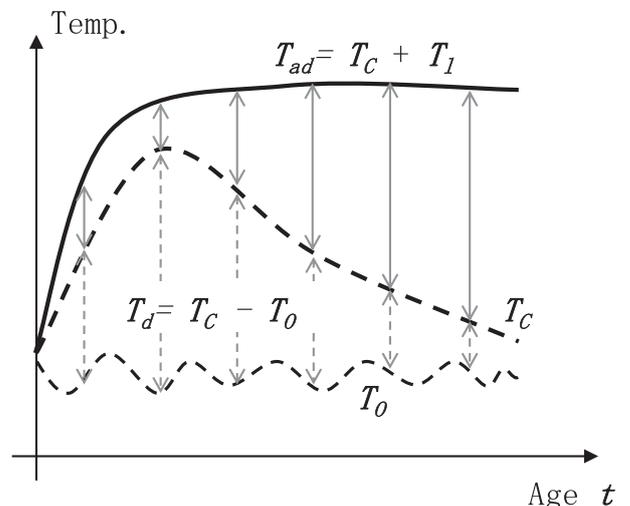


Fig. 2 Estimation of adiabatic temperature rise

に随時加算することで、断熱温度 T_{ad} を推定するものである。ここで、温度損失量 T_l は、予め求めた断熱型枠の温度降下勾配式(温度差との1次関数)に、コンクリートと基準温度間の温度差を代入することで求められる。この簡易試験による断熱温度上昇量の推定に用いる基礎式を式[1]に示す。

$$T_{ad}(t) = T_C(t) + \sum_0^t (\alpha \cdot \overline{T_d}(t) \cdot \Delta t) \quad [1]$$

ここで、 T_C :コンクリート温度、 T_0 :基準温度(本実験では 20 ± 2 °C)、 T_d :コンクリートと基準温度間の温度差、 T_{ad} :断熱温度、 t :時間(材齢)、 α :断熱型枠の放熱特性を示す係数(実験値)を表し、上添字一は(計測)時間間隔 Δt 間の平均を意味する。

本実験では、以下のような手順で断熱型枠の放熱特性を示す温度降下勾配式を求めた。

- 1) 簡易試験に用いた供試体(材齢 7 日以降)を断熱型枠から取り出し、60 °Cに温度制御された恒温機内に 24 時間以上静置
- 2) 内部まで 60 °Cに均等に加温された供試体を再び断熱型枠内に設置
- 3) 同断熱型枠を 20 °Cの恒温室内に静置し、供試体内の温度と基準となる恒温室内の温度を 10 分毎に計測
- 4) 単位時間あたりの温度低下量(°C/min)と温度差の関係を整理し、その1次回帰により温度降下勾配式を決定

2.6 実験結果

(1) スランプ・空気量

スランプおよび空気量の測定結果を Fig.3 に示す。図中の棒グラフの上の数字は各配合のスランプ値および空気量を示す。なお、Lp-1 の空気量は試験器故障のため測定できなかった。Fig.3 の結果より、微粉末量が 10 % (Lp-10)まではスランプ値の変化はほとんどないが、微粉末量が 15 %、20 %、30 %と増加するにつれスランプおよび空気量は減少した。特に微粉末量が 30%になると、顕著にスランプおよび空気量が減少した。ただし、ここに示す結果は、石灰石微粉末量のみを実験パラメータとするため AE 減水剤量を一定にしたものであり、実用に際しては AE 減水剤量や種類の選定によって、空気量やスランプをある程度調整することも可能であろう。

(2) 断熱温度上昇量

モルタルおよびコンクリートの断熱温度上昇試験結果をそれぞれ Fig.4、Fig.5 に示す。なお、これらの図中の凡例に示す括弧内の数字は各配合の終局断熱温度上昇量を表す。Fig.4、Fig.5 に示すように、モルタルおよびコンクリートの終局断熱温度上昇量は、石灰石微粉末量によらず、ほぼ同程度であった。しかし、材齢 1 日における断熱温度上昇量に着目すると、石灰石微

粉末量の増加に伴い断熱温度上昇量が高くなっており、Type-0 と Type-3(モルタル)の温度差は約 9 °C、Lp-5 と Lp-30(コンクリート)の温度差は約 4 °Cである。これは、石灰石微粉末の特徴である、エーライトの初期水と反応の促進効果に起因するものと考えられる⁷⁾。これらのことより、石灰石微粉末量の増加は、初期の断熱温度上昇量を若干高くするが、終局断熱温度上昇量にはほとんど影響を及ぼさないといえる。すなわち、本実験で設定した微粉末量の範囲においては、断熱温度上昇量は単位セメント量のみ強く依存すると結論づけられる。

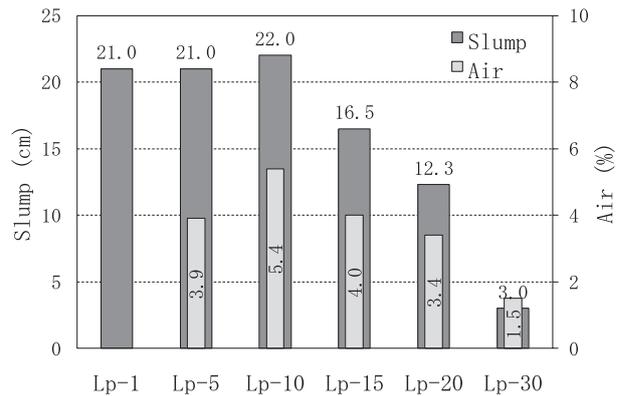


Fig. 3 Fresh properties (slump and air)

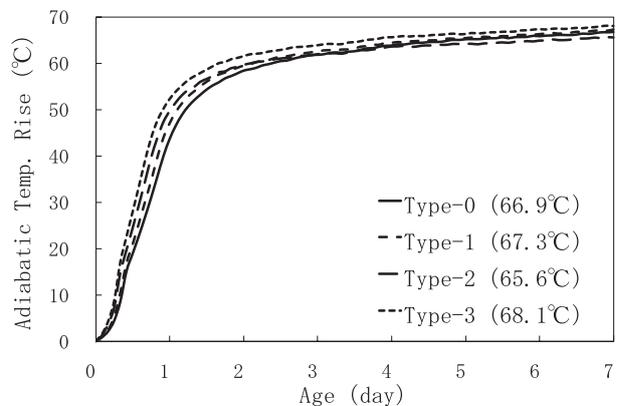


Fig. 4 Adiabatic temperature rise (mortar)

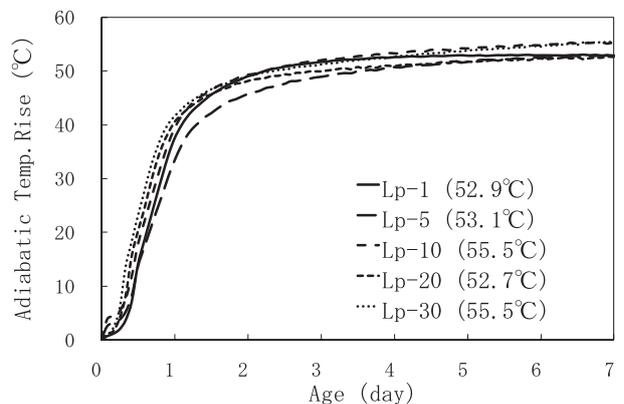


Fig. 5 Adiabatic temperature rise (concrete)

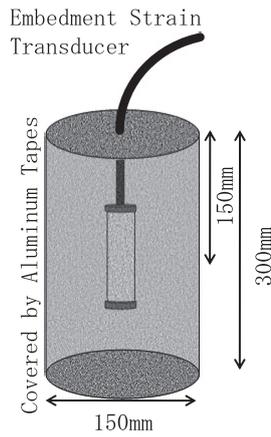


Fig. 6 Specimen for the thermal coefficient test

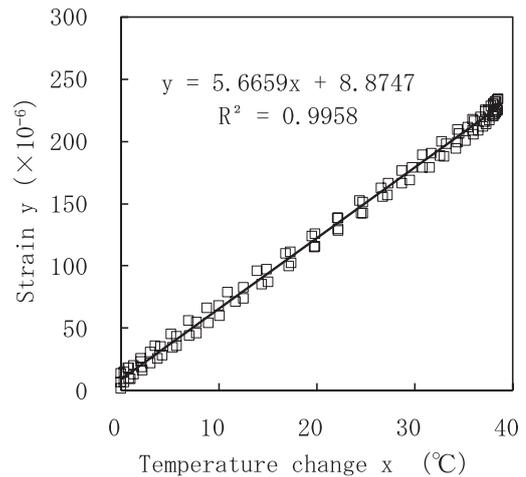


Fig. 7 Thermal strain - temperature response

3. 石灰石微粉末を多量に含むコンクリートの熱膨張係数

3.1 実験目的

既往の研究において石灰石を粗骨材とするコンクリートの熱膨張係数は普通のコンクリートに比べ低いという報告がある。そこで本実験では、石灰石微粉末を多量に含むコンクリートにおいて熱膨張係数の測定を行うことで、石灰石微粉末量の熱膨張係数への影響を調べた。

3.2 試験方法

この熱膨張係数試験では Fig.6 に示すようにφ150×300mm の円柱供試体の中央に埋込型ひずみ計を配置した。測定材齢は 28 日とし、配合は Lp-5、Lp-10、Lp-20、Lp-30 (Table 2 参照) とした。温度変化を与えた範囲は 20~60 °C とし、昇温速度は 5 °C/hr である。また、測定中の乾燥収縮を防ぐため、アルミ防水テープを用いて供試体を密封した。

3.3 実験結果

本実験では、Fig.7 の例に示すように、コンクリートの温度ひずみと温度変化の関係を一次式で回帰し、その式の傾きにより熱膨張係数を求めた。熱膨張係数の測定結果を Table 3 にまとめて示す。一般的なコンクリート熱膨張係数が $10(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ であるのに対して、本実験で測定を行った全配合において、その 60 % 相当の熱膨張係数であり、石灰石骨材を用いた既往の文献¹³⁾とも概ね一致するものであった。また、微粉末量に関わらずほぼ同等の熱膨張係数を示した。このことより、石灰石微粉末による熱膨張係数の影響はほとんどなく、石灰石骨材自体がコンクリートの熱膨張係数を小さくしているものと推察される。

4. 石灰石微粉末を多量に含むコンクリートの強度性状

4.1 実験目的

本章では、多量の石灰石微粉末を含むコンクリートの強度性状を調べるとともに、前章までの結果を踏まえ、強度に好・悪影響を及ぼす微粉分量の閾値を検討する。

Table 3 Thermal coefficients

I. D.	Lp-5	Lp-10	Lp-20	Lp-30
Thermal coefficient ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5.7	5.5	6.4	6.3

4.2 供試体および使用配合

圧縮強度試験 (JIS A 1108) および割裂引張強度試験 (JIS A 1113) はφ100×200mm の円柱供試体を用いて行った。コンクリートにおける試験材齢は 1、3、7、28、91 日である。なお、各材齢の圧縮強度試験および割裂引張強度試験に用いた供試体数はそれぞれ 3 本とした。また、強度試験は Table 2 の全配合について行った。

4.3 実験結果

圧縮強度および割裂引張強度の試験結果をそれぞれ Fig.8、Fig.9 に示す。また Table 4、Table 5 には微粉末量 1 % (Lp-1) に対する各配合の強度比を示す。これらの結果より、既往の研究^{7,8,9)}と同様に圧縮強度および割裂引張強度ともに、石灰石微粉末量の増加による初期強度の増加傾向が認められた。中でも、特に Lp-15、20、30 が高い初期強度を示している。また、割裂引張強度は圧縮強度に比べ、石灰石微粉末による強度向上の割合が顕著であった。この実験結果によると、微粉末量 1 % (Lp-1) および 5 % (Lp-5) では、初期材齢から緩やかな強度発現を示すが、微粉末量 10 % 以上の配合では、初期材齢における割裂引張強度が高い。そして、微粉末量 15 % (Lp-15) および 20 % (Lp-20) の配合では、材齢 91 日においても、他の配合に比べて高い割裂引張強度を示した。一方、割裂引張強度において、最も石灰石微粉末を多く含む Lp-30 は、材齢 7 日時点で最も高い割裂引張強度を示したが、材齢 91 日において Lp-15 および Lp-20 のような顕著な強度増加を示さず、Lp-1 と同程度の強度であった。これらの結果より、本実験で設定した微粉末量 20 % (Lp-20) を含むような石灰石骨材を用いた場合、同等の断熱温度上昇量となる配合より

も引張強度が向上し、ひいてはひび割れの少ないコンクリートを実現できると推察できる。

本実験の範囲内で最も石灰石微粉末を多く含む Lp-30 は、材齢 91 日の割裂引張強度において、強度発現がなかったこと、およびスランプ・空気量の測定結果より、Lp-30 はフレッシュ性状が顕著に低下した (Fig. 3 参照) ことより、微粒分量の上限値は 20 % が適当と考える。

5. まとめ

本研究では、石灰石粗骨材が最大 30 % までの微粒分を含有していることを想定し、その分の微粒分を石灰石微粉末で代用したコンクリートについて、断熱温度上昇試験、熱膨張係数試験、強度試験を実施した。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) モルタルの断熱温度上昇試験によると、石灰石微粉末は、初期の断熱温度上昇に対して若干影響するものの、終局断熱温度上昇量にはほとんど影響を及ぼさない。さらに微粉末量 30 % 以下の石灰石骨材を用いたコンクリートにおいては、モルタルと同様に、石灰石微粉末量の違いによらず、ほぼ同等の終局断熱温度上昇量を示した。
- (2) 石灰石コンクリートの熱膨張係数は、 $5.5 \sim 6.4 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ と一般的なコンクリートに比べて小さいが、石灰石微粉末量の増加による熱膨張係数への影響はほとんどなかった。
- (3) 圧縮強度および割裂引張強度はともに、石灰石微粉末量の増加に伴う強度増加がみられた。特に、初期材齢において割裂引張強度が、圧縮強度に比べて顕著に増進したことから、(1)(2)の結果を勘案すると温度ひび割れ抵抗性の向上が期待される。
- (4) 最も石灰石微粉末を多く含む Lp-30 において、長期材齢における割裂引張強度発現が緩慢になったことと、フレッシュ性状が顕著に低下したことより、石灰石粗骨材の微粒分量の上限値は 20 % が適当と考える。

謝辞：

本研究は国土交通省中国整備局受託研究「石灰石微粉末使用ルールの策定」(研究代表：井上正一)を受けて実施したものである。関係者各位に深甚の謝意を表す。

参考文献：

- 1) 古井博：中国地方における骨材事情について、コンクリート工学, Vol. 48, No. 1, pp.102-104 (2010)
- 2) 石灰石鉱業協会：石灰石骨材とコンクリート (2005)
- 3) 社団法人セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-46、石灰石骨材コンクリートの研究 (1992)
- 4) 兵頭彦次ほか：石灰石骨材がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp.571-576 (2009)
- 5) 小嶋明ほか：石灰石砕石の磨砕により増加した微粒

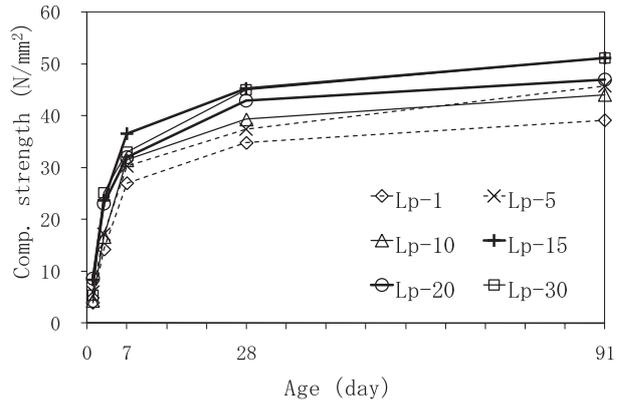


Fig. 8 Compressive strength (concrete)

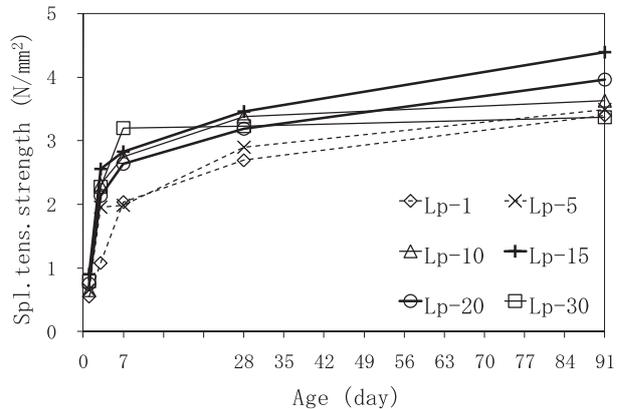


Fig. 9 Splitting tensile strength (concrete)

Table 4 Compressive strength ratio (vs. Lp-1)

I. D.	1day	3days	7days	28days	91days
Lp-1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Lp-5	1.52	1.21	1.12	1.07	1.17
Lp-10	1.09	1.17	1.16	1.13	1.13
Lp-15	2.10	1.66	1.35	1.30	1.31
Lp-20	2.14	1.62	1.19	1.23	1.21
Lp-30	1.35	1.76	1.22	1.29	1.31

Table 5 Tensile strength ratio (vs. Lp-1)

I. D.	1day	3days	7days	28days	91days
Lp-1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Lp-5	1.21	1.81	0.97	1.07	1.03
Lp-10	1.18	2.15	1.35	1.26	1.07
Lp-15	1.64	2.37	1.39	1.28	1.29
Lp-20	1.36	1.98	1.30	1.18	1.16
Lp-30	1.44	2.11	1.57	1.20	0.99

- 6) JIS A 5005：コンクリート用砕石及び砕砂 (2009)
- 7) 井元晴丈ほか：石灰石フィラーセメントの水和反

- 応解析、セメント・コンクリート論文集、No. 56、pp. 42-49 (2006)
- 8) 藤田仁ほか：石灰石骨材を使用したコンクリートのフレッシュおよび強度性状に及ぼすセメント種類の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29、No. 1、pp. 135-140 (2007)
- 9) 小林孝一ほか：石灰石微粉末の混和がセメントの初期水合に与える影響、セメント・コンクリート論文集、No. 50、pp. 570-575 (1996)
- 10) 長塩靖祐ほか：産地の異なる石灰石粗骨材を使用したコンクリートのフレッシュおよび強度性状、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29、No. 1、pp. 129-134 (2007)
- 11) 鶴田昌宏ほか：細骨材の一部を石灰石微粉末で置換したコンクリートの諸物性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 26、No. 1、pp. 99-104 (2004)
- 12) 吉武勇ほか：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案、土木学会論文集、No. 606/V-41、pp. 103-110 (1998)
- 13) 例えば P. K. Mehta et al. : Concrete-Microstructure, Properties, and Materials 3rd Edition, McGraw-Hill, p. 116 (2006)

FUNDAMENTAL EXPERIMENTS OF CONCRETE USING LIMESTONE AGGREGATE WITH HIGH VOLUME OF POWDER

Katsuya YOSHIMOTO^{*1}, Isamu YOSHITAKE^{*2}, Hisatsugu TSUDA^{*3} and Shoichi INOUE^{*4}

*1 MAEDA CORPORATION, Head Office (2-8-8, Sarugaku-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0064, Japan)

*2 YAMAGUCHI UNIVERSITY, Graduate School of Science and Engineering (2-16-1, Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan)

*3 IHI INFRASTRUCTURE SYSTEMS CO. LTD., Engineering Headquarter (3, Ohama Nishimachi, Sakai-ku, Sakai-shi, Osaka 590-0977, Japan)

*4 TOTTORI UNIVERSITY, Graduate School of Engineering (4-101, Koyama-Minami, Tottori-shi, Tottori 680-8552 Japan)

ABSTRACT : Limestone aggregate has much powder because of weak resistant to abrasion. In case of using limestone with rich powder, the powder may affect several properties of concrete, such as fresh properties and strength development. The objective of this study is to investigate fundamental properties of concrete using limestone aggregate with rich powder, and to obtain the upper limit of powder volume for structural concrete. Some fundamental tests were conducted using limestone coarse aggregate with rich powder up to 30 %. This paper reports adiabatic temperature rises of the concretes as well as fresh properties. In addition, the paper presents coefficients of thermal expansion of hardened concrete; and reports compressive and tensile strength developments. The test results indicate that concrete including the powder of 30 % has notable fresh properties, lower slump and air content. According to the simplified test using Styrofoam, the volume of limestone powder slightly affects the temperature rise at early age, but it hardly influences on the ultimate temperature rise of concrete. Furthermore, all limestone concretes used herein indicate lower coefficient of linear expansion than the coefficient of typical concrete. Strength of the concrete at early age tends to be improved by powder volume, especially splitting tensile strength develops significantly. The strength development, however, becomes negligible in over 20 % of the powder volume. Based on these test results, the upper limit of powder should be considered as 20 % of the aggregate.

KEY WORDS : Limestone Powder, Adiabatic Temperature Rise, Coefficient of Thermal Expansion, Strength at Early Age