

論文 高温乾燥環境下の自己充てんモルタルの強度発現

武藤 貴彦^{*1}・大内 雅博^{*2}

要旨: 常温で練混ぜを行った自己充てんモルタルを温度 60℃, 相対湿度 5~10%の高温乾燥環境下に直接打込んだ場合の配合と強度発現の関係を明らかにした。乾燥による強度低下の要因には水和反応に必要な水分が不足することに加えて, 水和物で充てんされる空げきの減少であることがわかった。そのことを, セメントを石灰石微粉末に置換することで水セメント比を固定したまま, 水和反応で充てんされる空げきの大きさを変化させた実験を行い確認した。一方, 温度 60℃, 相対湿度 5~10%の高温乾燥環境下では, すでに発現した強度は乾燥により低下しないこともわかった。

キーワード: 自己充てんモルタル, 高温乾燥環境, 強度発現

1. はじめに

これまで, 十分に水和したコンクリートを対象に, 温度や湿度の違う環境条件で養生を行い, 養生条件が力学性能に与える影響についての研究は行われている¹⁾。しかし, 練上がり直後から高温乾燥環境下にさらされ続ける自己充てんモルタルの強度発現についてはこれまで研究されていない。

本研究の目的は, 常温にて練混ぜを行った自己充てんモルタルを高温乾燥環境下に直接打込んだ場合の強度発現と配合の関係を明らかにすることである。これは廃棄物処理のための密閉空間への充てん材として自己充てんモルタルを適用することを想定したものである。ここでの高温環境は現実には起こりえるものであるが, 乾燥条件は研究のため厳しい条件を設定した。

本研究での高温乾燥環境とは温度が 60℃, 相対湿度が 5~10%の環境のことである。そこに常温にて練混ぜを行った自己充てんモルタルを打込んだ場合, モルタルには急激な温度上昇と水分の蒸散が起こればと考えられる。そこで, 本研究では高温環境下での水分の蒸散が強度発現に及ぼす影響に着目した。

2. 各種実験方法

2.1 高温乾燥環境の再現方法

温度が 60℃, 相対湿度が 5~10%の高温乾燥環境を送風定温乾燥機(写真-1)で再現した。



写真-1 送風定温乾燥機

2.2 自己充てんモルタルの練混ぜ方法

自己充てんモルタルの練混ぜ手順を図-1に示す。

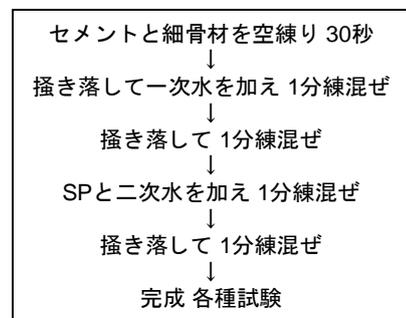


図-1 自己充てんモルタルの練混ぜ手順

2.3 フレッシュモルタルの性状確認試験方法

フレッシュモルタルの性状を確認するためにモルタルフロー試験及びロート試験を行った。

図-2 にモルタルフロー試験器, 図-3 にモルタル用ロートを示す。

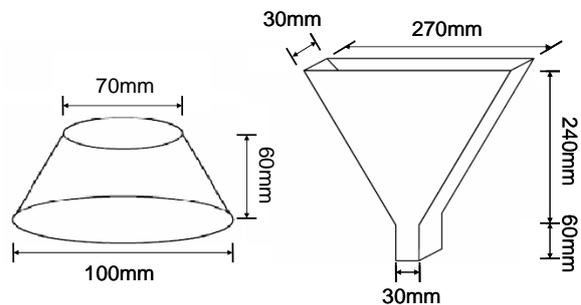


図-2 モルタルフローコーン 図-3 ロート試験器

2.4 モルタルの圧縮強度試験方法

モルタルの圧縮強度試験は, 「コンクリートの圧縮強

*1 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻 (正会員)

*2 高知工科大学准教授 工学部社会システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

度試験方法(JIS A1108:1999)」を参考にして試験を行った。モルタルの供試体は直径 50mm, 高さ 100mm とした。

荷重を加える速度は, 圧縮応力度の増加が毎秒 0.6±0.4 N/mm²になるようにした。

3. 自己充てんモルタルの配合と性状

自己充てんモルタルの配合は JIS A 5201 による 0 打モルタルフローが 270±20 mm, かつ 細骨材が沈まないように高性能 AE 減水剤添加量を調節した。

表-1 に使用材料を示す。表-2 に自己充てんモルタルの配合と性状を示す。使用したロートを図-4 に示す。

表-1 使用材料

	種類	物性又は成分
結合材	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³
	低熱ポルトランドセメント	密度 3.24g/cm ³
細骨材	石灰石砕砂	密度 2.68g/cm ³ 吸水率 0.81% FM 2.98
混和材 (P)	石灰石微粉末	密度 2.71g/cm ³ 比表面積 4,000 cm ² /g
混和剤 (SP)	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 自己充てんモルタルの配合と性状

No.	Vw/Vp (%)	W/C (%)	s/m (%)	kg/m ³					セメントの種類	モルタルフロー (mm)	ロート流下時間 (秒)
				W	C	LS	S	SP			
1	80	25	45	237	931	0	1170	23.3	普通ポルトランドセメント	286	
2	80	25	45	237	960	0	1170	15.4	低熱ポルトランドセメント	263	16.69
3	97	30	45	263	877	0	1170	9.7	低熱ポルトランドセメント	261	6.63
4	114	35	45	284	808	0	1170	6.1	低熱ポルトランドセメント	251	3.39
5	80	35	45	237	672	241	1170	9.1	低熱ポルトランドセメント	250	12.28

P: 粉体

4. 十分に水和した自己充てんモルタルに高温乾燥環境が及ぼす影響

4.1 実験の内容

本研究に先立ち, 十分に水和した自己充てんモルタルが乾燥によって圧縮強度が低下しないことの確認を行った。打込み後材齢 1 日まで封緘養生し脱型した。その後材齢 28 日まで標準水中養生を行った。標準水中養生後, 送風定温乾燥機内で材齢 112 日まで養生を行なったケース 1 と材齢 112 日まで標準水中養生を続けたケース 2 の比較を行った。

また, 脱型後乾燥させたため供試体全面から水分が蒸散している。供試体から減少した水分量を練混ぜ水量で割ったものを水分量の変化率とした。

そして各ケース, 各材齢につき供試体を 3 本作製した。

使用材料を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。自己充てんモルタルの配合と性状を表-2 の No.1 に示す。

4.2 実験結果

図-4 に水中養生後, 送風定温乾燥機内で養生を行なったケース 1 と水中養生を継続して行なったケース 2 の水分量の変化率と圧縮強度の関係を示す。乾燥により圧縮強度は低下しなかった。また, 水中養生を継続して行なったものと比較しても圧縮強度は低くならなかった。

図-5 に水中養生後, 送風定温乾燥機内で養生を行なったケース 1 と水中養生を継続して行なったケース 2 の材齢と水分量の変化率の関係を示す。乾燥曲線より温度 60℃ 相対湿度 5~10% の環境内では材齢 112 日にはほぼ乾燥の限界に達していると推測できる。

図-6 に水中養生後, 送風定温乾燥機内で養生を行なったケース 1 と水中養生を継続して行なったケース 2 の材齢と圧縮強度の関係を示す。

これらの実験結果より, 温度 60℃ 相対湿度 5~10% の高温乾燥環境内では発現した圧縮強度は低下しないと結論づけた。以後, 乾燥の影響はすでに発現した強度にはなく, 強度発現に対してであると見なした。

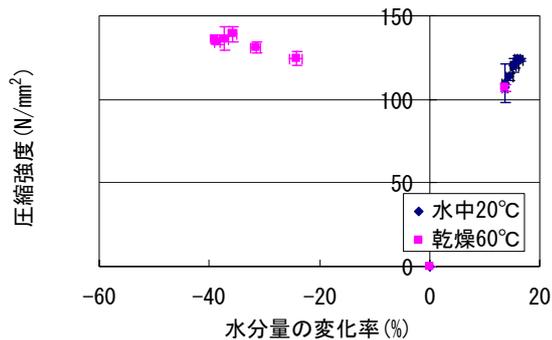


図-4 十分に水和させた自己充てんモルタルの水分量の変化率と圧縮強度に養生方法が及ぼす影響

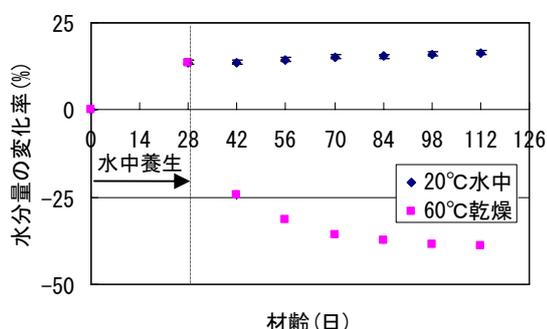


図-5 十分に水和させた自己充てんモルタルの材齢と水分量の変化率に養生方法が及ぼす影響

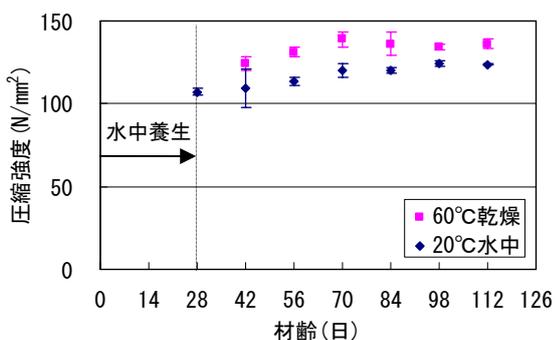


図-6 十分に水和した自己充てんモルタルの材齢と圧縮強度に養生方法が及ぼす影響

5. 水和に必要な水分の不足が強度発現に及ぼす影響

5.1 目的

高温乾燥環境下に打ち込んだ自己充てんモルタルは材齢初期からの急激な水分の蒸発によって、水和反応に必要な水分が不足すると考えた。余分な水分を含む配合が有利なのではないかと予想した。そこで、水セメント比を変えた自己充てんモルタルの強度発現の比較を行

った。

5.2 実験内容

水セメント比が 25%, 30%, 35% の自己充てんモルタルをそれぞれ練混ぜた。練混ぜ直後にモルタルフロー試験及びポット試験を行った後、型枠に打込み質量を計測した。乾燥の影響を調べるために、封緘する供試体と乾燥させる供試体を作製した(写真-2)。乾燥用の供試体は打込み直後から高温乾燥環境にさらすため、上面のみ露出させた。そして、練上がりから 40 分で送風定温乾燥機に投入した。材齢 14 日まで送風定温乾燥機内で養生を行ない、それまでの圧縮強度及び質量変化を求めた。また、脱型は圧縮強度試験の直前に行った。

しかし、乾燥用の供試体は材齢初期から急激な水分の蒸散によって急激に収縮する為、型枠の拘束によってひび割れが生じ、圧縮強度が低下した。そこで、本研究では型枠とモルタルの間にフィルムを挟むことで、モルタルと型枠の縁を切り型枠の拘束による強度低下を防いだ(写真-3)。

使用材料を表-1 に示す。セメントは低熱ポルトランドセメントを使用した。自己充てんモルタルの配合と性状を表-2 の No.2, No.3, No.4 に示す。



写真-2 養生条件と供試体



写真-3 ひび割れを防いだ供試体

5.3 実験結果

図-7 に封緘したモルタルの材齢と圧縮強度の関係を示す。図-8 に乾燥したモルタルの材齢と圧縮強度の関係を示す。図-9 に材齢と乾燥による圧縮強度の低下量の関係を示す。乾燥による圧縮強度の低下量とは封緘したモルタルの圧縮強度から乾燥したモルタルの圧縮強度を差し引いたものである。

図-10 より乾燥による水セメント比の上下関係は変

わっていないことがわかる。よって、セメント比が高い配合ほど水和に必要な水分が不足していることになる。

しかし、予想に反して余分な水分を含む配合ほど圧縮強度の低下が小さいという結果は得られず、圧縮強度の低下量は配合によらずほぼ同じ値となった。よって、水和に必要な水分の不足とは逆に水セメント比が高いほど圧縮強度の低下が大きくなる要因があると考えられる。

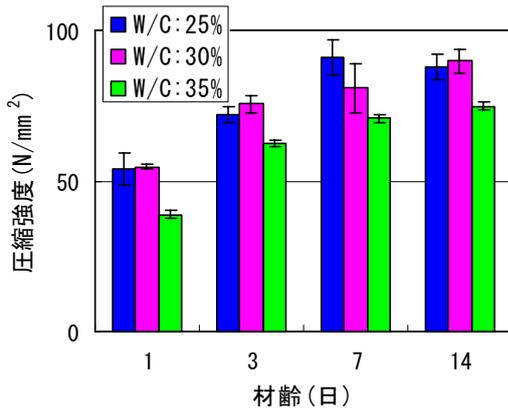


図-7 封緘したモルタルの材齢と圧縮強度の関係

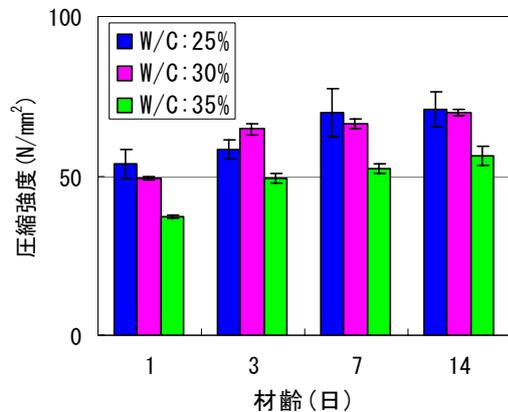


図-8 乾燥したモルタルの材齢と圧縮強度の関係

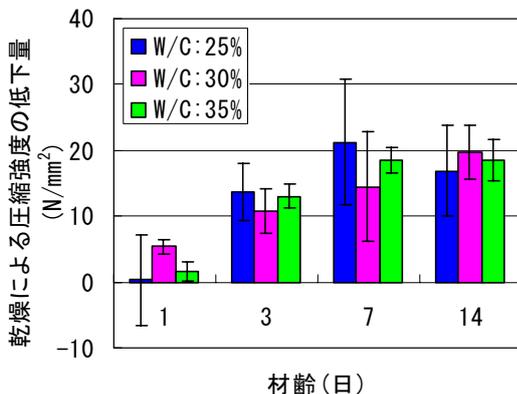


図-9 材齢と乾燥による圧縮強度の低下量の関係

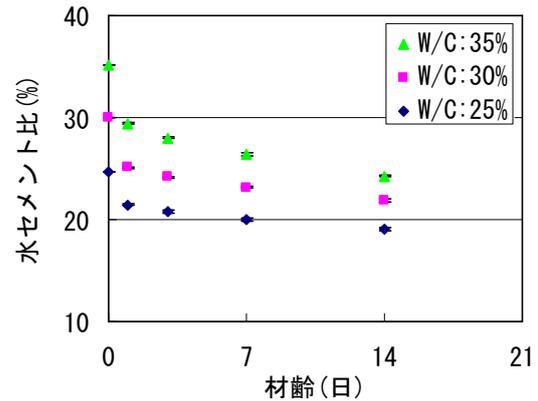


図-10 材齢と乾燥による水セメント比低下の関係

6. 水和物で充てんされる空げきの減少が強度発現に及ぼす影響

6.1 仮説の設定

乾燥による強度低下の要因として水和物で充てんされる空げきの減少を考えた。

田澤らによれば、水は反応物質そのものであると同時に、反応の場として生成した水和物の空間となる²⁾³⁾。それは、水和生成物は水中でしか生成しない、水が占めている空間は新しい水和生成物で充てんされる可能性のある空間である。逆に言えば乾燥により既に空げきになった空間は新しい水和生成物が成長し得ない。水和物の生成の仕方には2通りある。まず1つ目はセメントの組成物がいったん水中に溶解し、溶解物が過飽和になることにより水中に核が発生し、成長する。核は水中であればどこにでも発生する。二つ目は未反応物の表面のみで起こる固体反応であると言われている。

強度発現に大きく貢献するC-S-Hの生成は1つ目の反応である為、水で満たされている空間であればどこでも生成することができる。そこで、モルタルが乾燥することで、大きい空げきを満たす水は自由水として存在し固体表面に吸着されないため、水分が蒸散しやすい。また、乾燥が進行するに従い毛細管張力によって、より小さな空げきへと水は移動する。その結果、初期からの水分の蒸散によって大きな毛管空げきが水和生成物で充てんされないまま残り水和生成物のできる場所の偏りが大きくなった結果、水和生成物で満たされない大きな毛管空げきが弱点となり強度が低下すると考えた。

モルタル又はコンクリートの破壊は、荷重を加えられることにより欠陥部分や界面部分に応力集中が起こることによってクラックが生じそのクラックが進展することで生じる。よって、大きな毛管空げきが水和生成物で充てんされずに残れば大きな弱点となる。

6.2 仮説の検証方法

配合に含まれる水分量が多ければ、練混ぜ直後の水分で満たされた毛管空げきも大きくなる。よって、乾燥した後に生じる空げきも大きくなるため封緘した場合と乾燥した場合で強度に大きな違いが生じると考えた。そこで、水和反応に必要な水分の不足による影響を排除するために水セメント比を固定し、配合に含まれる水分量を変化させる方法としてセメントを石灰石微粉末で置換することを考えた。

水粉体容積比 80%、水セメント比 25%の自己充てんモルタル（表-2 の No.2）のセメントの一部を石灰石微粉末にて容積の内割で3割置換することによって水セメント比を 35%になるように調整し、水和に必要な水分の不足による影響を水粉体容積比 114%、水セメント比 35%の自己充てんモルタル（表-2 の No.4）と同程度とした。水粉体容積比 80%、水セメント 35%の配合（表-2 の No.5）は表水粉体容積比 114%、水セメント比 35%の配合（表-2 の No.4）に比べ水分の絶対量が少ないことから水和物で充てんされる空げきの減少による影響は小さいと考えた。そこで、水粉体容積比 114%、水セメント比 35%の自己充てんモルタル（表-2 の No.4）と水粉体容積比 80%、水セメント 35%の自己充てんモルタル（表-2 の No.5）の乾燥による圧縮強度の低下量を比較することにより水和物で充てんされる空げきの減少による影響の有無を確かめた。各配合の容積割合を図-11 に示す。

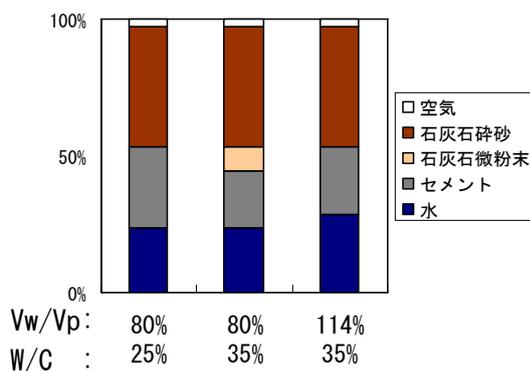


図-11 各配合の容積割合

6.3 実験内容

水粉体容積比 80%、水セメント比 35%の自己充てんモルタルを練混ぜ直後にモルタルフロー試験及びロート試験を行った後、フィルムを敷いた型枠に打込み質量を計測した。乾燥の影響を調べるために、封緘する供試体と乾燥させる供試体を作製した。乾燥用の供試体は打込み直後から高温乾燥環境にさらすため、上面のみ露出させた。そして、練上がりから 40 分で送風定温乾燥機に投

入した。材齢 14 日まで送風定温乾燥機内で養生を行ない、それまでの圧縮強度及び質量変化を求めた。また、脱型は圧縮強度試験の直前に行った。

使用材料を表-1 に示す。セメントは低熱ポルトランドセメントを使用した。自己充てんモルタルの配合と性状を表-1 の No.5 に示す。

6.4 実験結果

図-12 に、水分の減少量と乾燥による強度低下量の関係を示す。水分の減少量ができた空げきの量に相当すると見なすと、水分で充てんされる空げきの減少が大きいほど強度が低下すると言える。また、図-13 に示す材齢と水セメント比の関係より、水セメント比の変化が水粉体容積比 80%、水セメント 35%の自己充てんモルタルと水粉体容積比 114%、水セメント 35%の自己充てんモルタルと同程度であることから水和に必要な水分の不足による影響は排除できたと考えられる。図-14 に封緘したモルタルの材齢と圧縮強度の関係を示す。図-15 に乾燥させたモルタルの材齢と圧縮強度の関係を示す。図-16 に材齢と乾燥による圧縮強度の低下量の関係を示す。

これらの結果より、乾燥による強度低下の要因として水和物で充てんされる空げきの減少を確認出来た。また、その影響はモルタルに含まれる水分量が多いほど顕著になる。

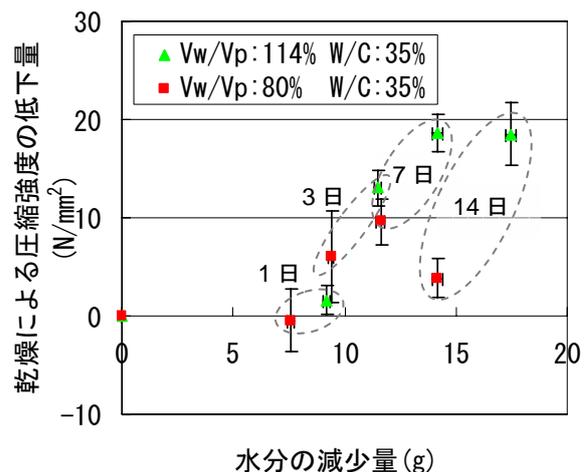


図-12 水分の減少量と乾燥による圧縮強度の低下量の関係

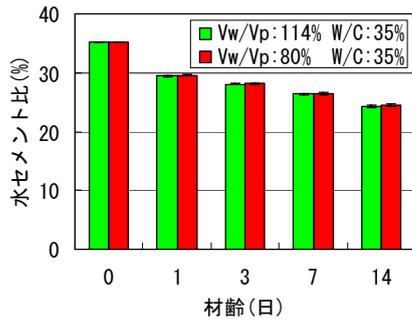


図-13 材齢と水セメント比の関係

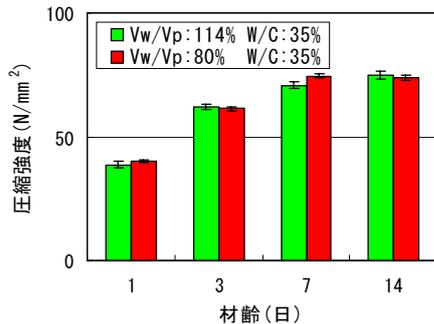


図-14 封緘したモルタルの材齢と圧縮強度の関係

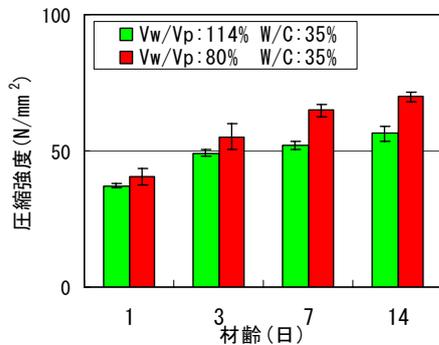


図-15 乾燥させたモルタルの材齢と圧縮強度の関係

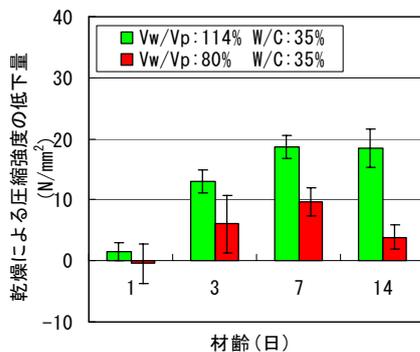


図-16 材齢と乾燥による圧縮強度の低下量の関係

7. 結論

乾燥による強度低下の要因には水和反応に必要な水分が不足することに加えて、水和物に充てんされる空げきの減少がある。後者の影響は配合に含まれる水分量が多くなるほど顕著になることがわかった。

その理由は、モルタルに含まれる水分量が多ければ練混ぜ直後の水分で満たされた毛管空げきも大きくなる。そして、大きい空げきを満たす水は自由水として存在し、固体表面に吸着されないため、水分が移動し易い。また、乾燥が進行するに従い毛細管張力によって、より小さな空げきへと水は移動する。その結果、初期からの水分の蒸散によって大きな毛管空げきが水和生成物で充てんされないまま残り水和生成物のできる場所の偏りが大きくなり、水和生成物で満たされない大きな毛管空げきが弱点となり強度が低下するからであると結論づけた。

石灰石微粉末を用いて粉体量を大きくし単位水量を小さくすることで、乾燥による強度低下を抑えることができた。

なお、今回の高温乾燥環境下では、すでに発現した強度は乾燥により低下しなかった。

謝辞 本研究の実験を行うにあたり、高知工科大学 宮地 日出夫助手に御指導いただきました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷 修, 武田三弘: 高温および低湿度環境下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験検討, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp15-22, 2007.5
- 2) 田澤榮一: セメントコンクリート中の水の役割, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.6-11, 1994.9
- 3) 田澤榮一, 佐伯 昇: コンクリート工学-微視的構造, 技報堂出版, 1998.1