

論文 紫外線を照射した酸化チタンによるフライアッシュを大量混和したセメント硬化体の初期強度発現性状の改善

文野 光^{*1}・橋本 和樹^{*2}・Sungchul Bae^{*3}・兼松 学^{*4}

要旨：紫外線を照射し励起させた TiO₂(活性化 TiO₂), TiO₂ を添加したペースト, FA 混合ペーストの水和反応熱量を測定し、セメントの初期水和への影響を評価した。更に CH 量及び結合水量と圧縮強度特性との相関関係について検討を行い、ポゾラン反応への影響を追究した。また、検討をモルタルまで拡張し、圧縮強度特性を評価した。活性化 TiO₂ を混合した場合、セメントの初期水和をわずかに遅延させ、モルタルの材齢 1 日の強度を低下させるが、長期材齢ではセメントの水和度を向上させ、強度増進に寄与した。ポゾラン反応の挙動は、材齢 3 日から兆候が表れ、7 日以降の強度増進に顕著であり、反応が促進されることが実証された。

キーワード：酸化チタン, 光触媒, フライアッシュ, ポゾラン反応, 水和反応熱量, 強度発現性状, 結合水量

1. はじめに

フライアッシュ(FA)をコンクリートに利用した場合、セメントの水和反応で生じる水酸化カルシウム(CH)と反応し(ポゾラン反応)、珪酸カルシウム水和物(C-S-H)もしくは、Al 置換された C-S-H (C-A-S-H)が生成されること¹⁾で、組織が緻密化し、長期強度が増進するが、ポゾラン反応が生じる前の初期材齢における強度発現が緩慢になる特徴がある。

一方酸化チタン(TiO₂)は、セメントペーストに混入すると、空隙がマイクロフィラー効果により充填され、強度増進することが知られている²⁾。この TiO₂ に紫外線(UV)照射すると(活性化 TiO₂)、内部の電子が荷電子帯へと励起され、自由電子(e⁻)と正孔(h⁺)が生成される。



e⁻ と h⁺ は空気中の酸素や水と反応しスーパーオキシドアニオン(·O₂⁻)、ヒドロキシラジカル(·OH)が生成される。



この·OH は反応性が高く、セメントの水和反応の過程で溶出されるカルシウムイオン(Ca²⁺)と反応し、CH の生成を促進させ、ポゾラン反応を加速させることが期待される。

本研究では活性化 TiO₂ を、FA を大量混和したセメント硬化体に適応させ、初期強度発現性状を改善することを目的とした。そのため活性化 TiO₂ がセメントの水和反応に与える影響に着目し、水和反応熱量を定量的に評価した。更に活性化 TiO₂ がセメント硬化体の強度発現性状に与える影響を追究するため、CH 量及び結合水量と、圧縮強度特性との相関関係について検討を行った。また、ペーストレベルでの検討をモルタルレベルまで拡張させ、圧縮強度特性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1 に示す。活性化 TiO₂ 溶液調整には、アナターゼ型の TiO₂ を使用した。TiO₂ を活性化させるため、中心波長 365 nm の紫外線(UV)(紫外線強度: 8,000 μW/cm²(距離 38cm), 照射範囲(2,000 μW/cm² 以上):380 × 150 mm)を用いた。イオン交換水に TiO₂ を入れ溶液中の TiO₂ に一様に照射されるように、スターラーで攪拌しながら 1 週間 UV 照射を行った。また UV 照射中に容器の表面に付着した TiO₂ は薬さじを用いて数回掻き落とした。

また後述した水和反応熱量の測定では、活性化 TiO₂ が C-S-H 及び CH へ与える影響に焦点を当て、セメントの代わりに純粋な C₃S を用いた。

モルタルには、大井川水系陸砂(実績率:67.8 %, 吸水率:1.92 %, 粒子径:2.0 mm 以下)を細骨材として使用した。

2.2 活性化 TiO₂ がセメントの初期水和に与える影響

TiO₂ がセメントの初期の水和反応に及ぼす影響を、水和反応熱量の測定にて評価した。

表-1 使用材料

材料	名称	記号	物性等
セメント	珪酸三石灰	C ₃ S	比重:3.15 g/cm ³
	普通ポルトランドセメント	OPC	密度:3.16 g/cm ³ 比表面積:3360 cm ² /g
混和材	フライアッシュ	FA	密度:2.39 g/cm ³ 比表面積:6050 cm ² /g SiO ₂ 含有量:54.3 % Al ₂ O ₃ 含有量:24.4 % 活性度指数 (材齢 28 日):91 % 活性度指数 (材齢 91 日):102 %
	酸化チタン	T	結晶構造:Anatase 型 純度:98.5 % 粒子径:10-50 μm

*1 東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻

*3 Hanyang University Assistant Professor, Dr. Eng.

*4 東京理科大学 教授博士 (工学) (正会員)

試験体は表-2 に示した C₃S ペースト(C₃S-TO, C₃S-TO-UV)及び C₃S と FA(C₃S-FA-TO, C₃S-FA-TO-UV)のペーストである。試験体名の T は TiO₂, T の後の数値は(表中では○で表記)TiO₂ の添加率, UV は紫外線照射の有無を示す。TiO₂ の添加率はバインダーの質量に対する添加率である。

水和反応熱量の測定は、コンダクションカロリメータ(TAMAIR)装置を用い、測定温度 20 °C±20 μW の範囲で行った。

試料及び混合装置は、試験前に 20 °C 環境下にて、24 時間静置させた。試料は、C₃S に TiO₂ 水溶液を加え、2 分間混合した後、熱量計に入れ 48 時間測定を行った。測定開始から 15 分間の測定データは、試料が装置内で平衡になるために必要とする時間であるため除外した。

水和度は水和反応経過 t (h) の総発熱量を C₃S の反応エンタルピー(-121 kJ/mol)で除すことで算出した³⁾。

$$\alpha_t = (Q_t / \Delta H) \times 100 \quad (4)$$

ここで、 α_t (%) : 水和反応経過 t (h) の水和度, Q_t (kJ/mol(C₃S)) : 水和反応経過 t (h) の総発熱量, ΔH (kJ/mol) : C₃S の反応エンタルピー

2.3 活性化 TiO₂ を利用したセメントペーストの挙動

(1) セメントペースト 圧縮強度試験

圧縮試験用のペースト試験体は OPC ペースト(OPC-TO, OPC-TO-UV)及び FA 混合ペースト(OPC-FA-TO, OPC-FA-TO-UV)の 2 種類を作製した。(表-2)

練り混ぜ方法は、まず、セメントと溶液をモルタルミキサーの練り鉢に投入し、低速で 60 秒×2 回練り混ぜた後、高速で 90 秒×2 回練り混ぜた。FA を混合した試験体は、注水前にセメントと FA を空練りした。掻き落としは、各練り混ぜが終わるごとに行った。練り混ぜたペーストは、ぶりき製軽量型枠(JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」付属書参照)に打設し、24 時間経過後に脱型し、水中養生を行った。OPC 試験体は材齢 1, 3, 7, 28 日において圧縮強度試験を行い、また、OPC-FA 試験体はボゾラン反応の影響を検討するため、材齢 56 日も試験を行った。なお、圧縮強度は同水準の試験体 3 体の平均値を用いた。

(2) セメントペースト 示差熱重量分析(TG-DTA)

活性化 TiO₂ が FA のボゾラン反応に及ぼす影響を検討す

るため、TG-DTA によって CH 量及び結合水量を計測した。

試料は、前項(2.3 (1))で圧縮破壊した硬化体の中央部から採取した。採取後アセトンに 24 時間含浸させ、水和反応を停止させ、乳鉢で細かくすり潰し、ふるい(目開き 90 μm)を通過したものを使用した。

測定には示差熱熱量同時測定装置を用いた。測定条件は、標準物質:Al₂O₃, 試料重量:10 mg, 温度範囲:20 °C ~1000 °C, 昇温速度:10 °C/min とした。CH 含有量は 400 °C 付近の重量変化により算出し、結合水量は、105 °C~1000 °C の減少値から算出した。TiO₂ を添加したものは、セメント量で補正を行った。

2.4 モルタル 圧縮強度試験

試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して行った。

TiO₂ を添加した試験体は、TiO₂ を均一に分散させるため、規格に比べ長く練り混ぜた。練り混ぜ方法は、まず、セメントと溶液を練り鉢に投入し、低速で 30 秒×4 回練り混ぜた。ただし、TiO₂ を添加していない試験体は 30 秒×2 回練り混ぜとした。次に細骨材を投入し、高速で 30 秒×1 回練り混ぜた。最後に、高速で 60 秒×2 回練り混ぜた。FA で置換した試験体はペースト試験体と同様に溶液投入前に空練りを行った。掻き落としは、各練り混ぜが終わるごとに行った。

養生方法及び試験材齢は、ペースト試験体と同様である。

3. 実験結果及び考察

3.1 活性化 TiO₂ がセメントの初期水和に与える影響

(1) C₃S-T ペースト

C₃S-T ペーストの C₃S 単位重量当たりの水和発熱速度を図-1 (a) に示す。

C₃S に TiO₂ を添加したものの(C₃S-T)は無添加ペースト(C₃S)と比べ、水和発熱速度が加速されることが確認された。この現象は、TiO₂ の添加率が上昇するにつれ顕著であり、高比表面積を持つ TiO₂ ナノ粒子の添加により、水和物の析出空間が提供され、水和反応が促進されたと考えられる³⁾。

活性化 TiO₂ を添加したものの(C₃S-T-UV)は、C₃S-T に比

表-2 試験体調合及び試験概要

試験体名	調合表			UV	試験項目	試験材齢(日)
	W/B	FA (wt %)	TiO ₂ (wt %)			
C ₃ S-TO	0.5	50	0,5,10,15	○	コンダクション カロリメータ	1
C ₃ S-TO-UV						2
C ₃ S-FA-TO						
C ₃ S-FA-TO-UV						
OPC-TO		50	ペースト 0,10 モルタル 0,5,10,15	○	ペースト 圧縮強度試験 示差熱重量分析 モルタル 圧縮強度試験	1,3,7,28
OPC-TO-UV						1,3,7,28,56
OPC-FA-TO						
OPC-FA-TO-UV						

※○には TiO₂ の添加率(5,10,15) が入る。

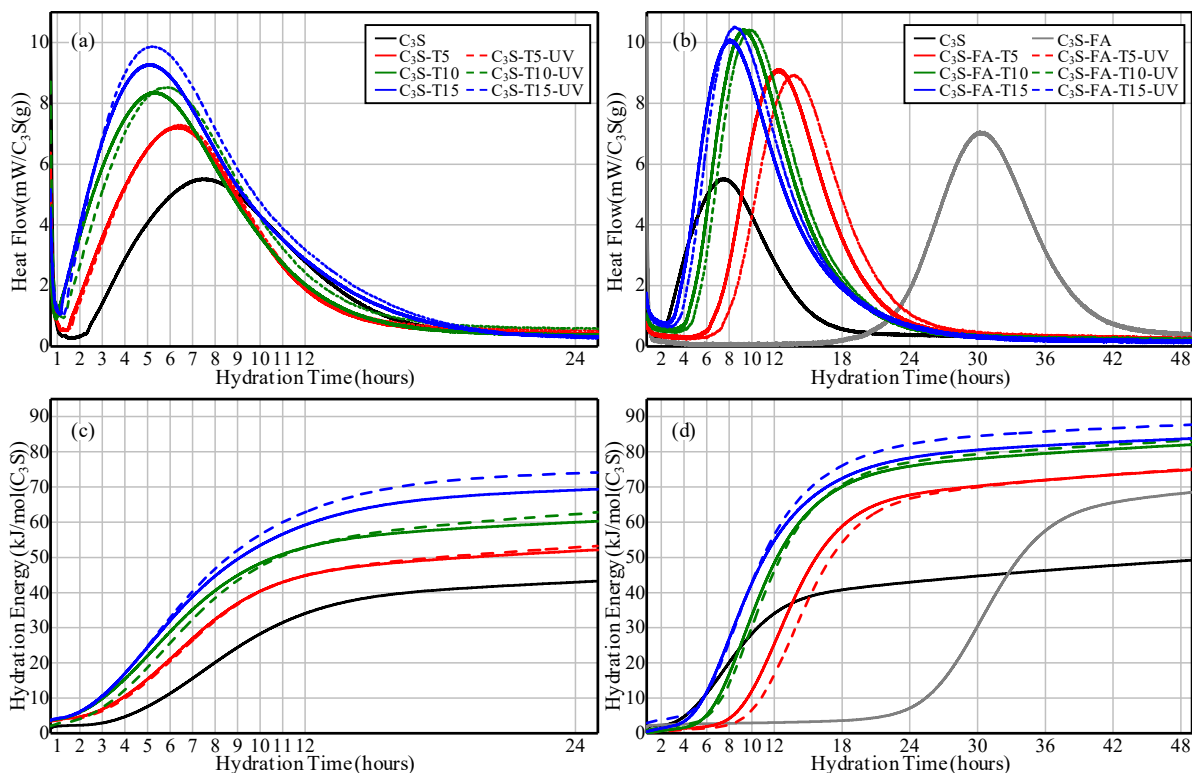


図-1 コンダクションカロリメータ 試験結果

(a) C_3S -T 水和発熱速度, (b) C_3S -FA-T 水和発熱速度, (c) C_3S -T 総発熱量, (d) C_3S -FA-T 総発熱量

して、誘導期の水和が緩慢であったが、加速期の水和が促進され、水和発熱ピークの増大が認められた。

C_3S -T ペーストの総発熱量の結果を図-1(c)に示す。また表-3に C_3S -T ペーストの水和度を示す。24時間経過した時点の、 C_3S -T の総発熱量は、 C_3S に比して増加した。この傾向は、 TiO_2 の添加率が高くなるにつれ顕著であり、 C_3S -T15の水和度は C_3S に比して58.1%増大した。 C_3S -T-UVと C_3S -Tを比較すると、活性化の影響を受け、水和熱の発現時期は遅延されたが、総発熱量は結果的に増大する傾向が観測された。総発熱量は、活性化 TiO_2 の添加率が高くなるにつれ、 TiO_2 を添加した場合に対し、乖離度が大きくなることが確認された。

(2) C_3S -FA-T ペースト

C_3S -FA ペーストの C_3S 単位重量当たりの水和発熱速度を図-1(b)に示す。 C_3S -FAは C_3S に比べ、FA50%置換による初期水和熱の発現の遅延が確認された。これは、FAの接水と同時に Al^{3+} が液相中に溶出した後、液相中の Ca^{2+} がフライアッシュに吸着されるため、液相中の Ca^{2+} 濃度が低く保たれた為、水和反応が遅延したと考えられる⁴⁾。

C_3S -FAに TiO_2 を添加すると(C_3S -FA-T)、水和発熱速度が急激に早くなることが確認できた。

活性化 TiO_2 を利用すると(C_3S -FA-T-UV)、水和発熱速度が C_3S と同様に、わずかに遅延した。

C_3S -FA ペーストの総発熱量を図-1(d)に示す。また表-3に C_3S -FA-T ペーストの水和度を示す。

表-3 C_3S -T 及び C_3S -FA-T の水和度

試験体名	水和度 (%)	
	24 時間	48 時間
C_3S -T0	35.5	40.5
C_3S -T5	43.7	-
C_3S -T5-UV	49.6	-
C_3S -T10	51.5	-
C_3S -T10-UV	57.1	-
C_3S -T15	61.1	-
C_3S -T15-UV	67.9	-
C_3S -FA-T0	5.9	56.3
C_3S -FA-T5	56.0	61.8
C_3S -FA-T5-UV	55.1	62.0
C_3S -FA-T10	62.7	67.7
C_3S -FA-T10-UV	63.7	68.7
C_3S -FA-T15	64.7	69.1
C_3S -FA-T15-UV	67.9	72.4

試験開始48時間経過した時点で、 C_3S -FA-Tの総発熱量は、 C_3S -FAに比べ増加し、水和度を向上させることが確認できた。(表-3) C_3S -FA-T-UVと C_3S -FA-Tを比較すると、前項(3.1(1))と同様に、水和熱の発現時期は遅延され、総発熱量は結果的に増大する傾向が見られた。

C_3S -FA-T-UVと C_3S -FA-Tの総発熱量は、 C_3S -FAの総発熱量に収束していくことから、 TiO_2 添加が、初期の水和反応を促進させることが実証された。また、活性化 TiO_2 を混合した場合、 C_3S の初期水和反応が若干遅延されるが、水和開始48時間後の水和度を向上させることが確認された。

3.2 活性化 TiO_2 を混合したセメントペーストの強度発現

(1) OPC-T ペースト

OPC-T ペーストの圧縮強度試験の結果を図-2に示す。図中のエラーバーは標準誤差である。

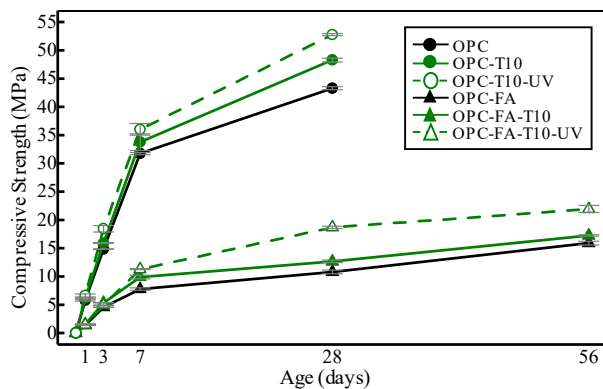


図-2 ペースト圧縮強度試験結果

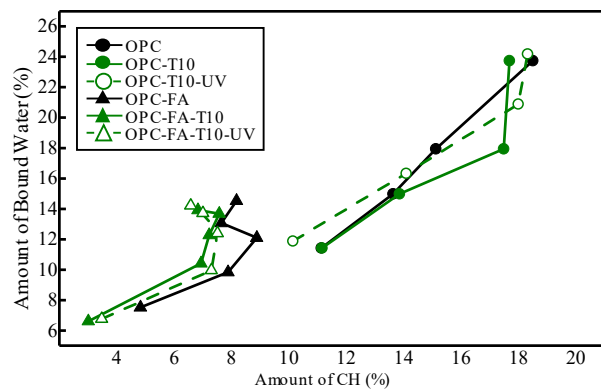


図-4 ペースト CH 量と結合水量の関係

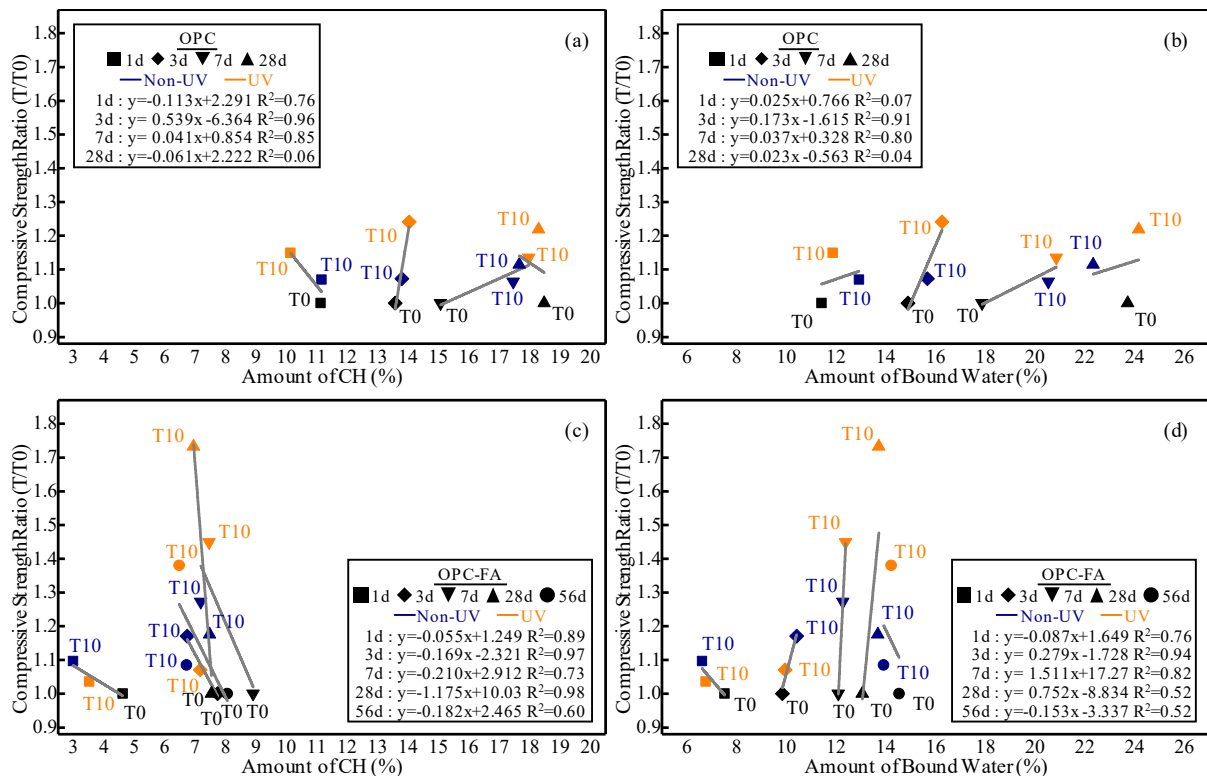


図-3 圧縮強度試験結果と示差熱重量分析結果の比較

- (a) OPC 圧縮強度比 vs CH 量, (b) OPC 圧縮強度比 vs 結合水量,
(c) OPC-FA 圧縮強度比 vs CH 量, (d) OPC-FA 圧縮強度比 vs 結合水量

材齢 1 日の場合、OPC ペーストに TiO_2 を添加したものの(OPC-TiO)は、無添加ペースト(OPC)に比べ、約 7.0 % の強度増進が確認された。これは、 TiO_2 の水和促進効果³⁾と、マイクロファイバー効果²⁾が作用したことが原因だと考えられる。一方、OPC ペーストに活性化 TiO_2 を添加したものの(OPC-TiO-UV)は、OPC-TiO に比して、7.4 % の強度増進が確認された。

材齢が進行するにつれ、活性化の影響は顕著に見られ、材齢 28 日では、OPC-TiO-UV の圧縮強度は、OPC-T0、TiO に比して、21.9, 9.3 %強度が増大した。

OPC-T ペーストの圧縮強度比(T/T0)と CH の相関図を図-3(a)に、圧縮強度比(T/T0)と結合水の相関図を図-3(b)に示す。T は TiO_2 の混合を、T0 は無混和を示している。

図中には、トレンド把握のため、直線近似した直線を同時に示した。図-3(a)から、材齢 3 日から 7 日にかけて圧縮強度比と CH 量には、正の相関が確認された。また、図-3(b)から材齢 3 日から 7 日にかけて圧縮強度比と結合水量には、正の相関があることが明確に確認された。

図-4 に OPC ペーストの CH 量と結合水量の関係を示す。材齢 1 日の OPC-TiO-UV の CH 量は、OPC-TiO より低かったが、以降の材齢では CH 量、結合水量共に増加傾向にあった。しかし、材齢 28 日の結合水量は OPC、OPC-TiO に収束した。この結果から、活性化 TiO_2 の OPC ペーストへの混合は、材齢 1 日以降の水和反応が急激に促進され強度増進するが、長期材齢になるにつれ反応が緩やかになることが確認された。

(2) OPC-FA-T ペースト

OPC-FA ペーストの圧縮強度試験結果を図-2に示す。図中のエラーバーは標準誤差である。

材齢 1 日の場合、OPC-FA ペーストに TiO_2 を添加したもの(OPC-FA-T10)は、無添加ペースト(OPC-FA)に比べ、9.6 %強度が増進した。これは TiO_2 によって水和反応が促進されたこと¹⁾、マイクロフィラー効果³⁾が作用したことが原因として考えられる。一方、活性化 TiO_2 を添加したもの(OPC-FA-T10UV)は、OPC-FA-T10 に比して、5.5 %の強度低下が確認された。

活性化 TiO_2 の影響は材齢 3 日から 7 日に掛けて顕著であり、材齢 28 日では、OPC-FA-T10-UV の強度が OPC-FA-T10 に比べ、47.3 %増加した。また、材齢 56 日では、OPC-FA-T10-UV の強度が OPC-FA に比べ、38.0 %増加した。

OPC-FA-T ペーストの圧縮強度比(T/T0)と CH 量の相関図を図-3(c)に、圧縮強度比(T/T0)と結合水量の相関図を図-3(d)に示す。OPC-T(図-3(a), (b))に比べ、FA50 %置換による CH 量、結合水量の低下が確認された。

図-3(c)から、圧縮強度比と CH 量には、負の相関、すなわち CH 量の増加に伴い圧縮強度が低下する明確な傾向が確認された。また、図-3(d)から圧縮強度比と結合水量には、正の相関があることが確認された。

図-4 に OPC-FA ペーストの CH 量と結合水量の関係を示す。材齢 3 日から 7 日の OPC-FA と OPC-FA-T10-UV を比較すると、共に CH 量の増大に伴い結合水量の上昇が認められたが、OPC-FA-T10-UV の方が、傾きが急であることがわかる。材齢 3 日から 7 日の OPC-T10-UV と比較すると、上昇傾向の違いが明確に表れた。これは、ポズラン反応の兆候だと考えられる。

材齢 28 日では、OPC-FA-T10-UV の CH 量は、材齢 7 日に比して減退したにも関わらず、結合水量は増進した。この傾向は、OPC-T10 でも観測され、材齢 56 日になるにつれ顕著であった。

3.3 活性化 TiO_2 がモルタルの強度発現に与える影響

(1) OPC-T モルタル

OPC-T モルタルの圧縮強度試験の結果を表-4に、圧縮強度比を図-5(a)に示す。材齢 1 日の場合、 TiO_2 を添加したもの(OPC-T)は、無添加モルタル(OPC)に比べ、強度増進が確認された。これは、ペーストと同様に TiO_2 による水和反応の促進³⁾、マイクロフィラー効果²⁾が作用したことが原因だと考えられる。

一方、活性化 TiO_2 を添加したもの(OPC-T-UV)は、OPC と比べ強度増進が確認されなかった。しかし、材齢 3 日には、OPC-T15-UV は OPC-T15 より 8.1 %強度が増進した。前述(3.2 (1))より、ペーストの材齢 1 日の圧縮強度が、15.0 %強度増進されたことから、強度減退の原因は、細骨材が混合されたことで、活性化 TiO_2 が均一に分散さ

れず水和促進効果が遅延したためだと示唆された。

材齢 7 日からこの活性化 TiO_2 による強度増進傾向は顕著に見られ、材齢 28 日では OPC-T15-UV の強度が、OPC に比べ 28.5 %増加した。

既報⁵⁾によると、W/C50 %で TiO_2 を 10 %添加したモルタルの材齢 3 日から 28 日までの強度増進率が約 62.0 %であった。本研究の、材齢 3 日から 28 日にかけての OPC-T10 の強度増進率は 65.1 %であり、文献値とほぼ一致した。しかし、材齢 3 日から 28 日にかけての OPC-T10-UV の強度増進率は 86.6 %であり、既報⁵⁾に比べ、高い強度増進率を示した。

(2) OPC-FA-T モルタル

OPC-FA-T モルタルの圧縮強度試験結果を表-4に、圧縮強度比を図-5(b)に示す。OPC-T(図-5(a))に比べ、FA50 %置換による強度低下が確認された。

材齢 1 日では OPC-FA モルタルに TiO_2 を添加したもの(OPC-FA-T)は、無添加モルタル(OPC-FA)に比べ、高い強度発現を示し、前述と同様に TiO_2 による水和反応の促進³⁾、マイクロフィラー効果²⁾が作用したと考えられた。また、活性化 TiO_2 を添加したモルタル(OPC-FA-T-UV)は OPC-T 同様に強度発現が見られなかった。

活性化 TiO_2 による強度増進は 7 日から 28 日にかけて顕著であり、材齢 28 日では、OPC-FA-T10-UV の強度が OPC-FA-T10 に比べ、13.9 %増加した。既報によると、FA のポズラン反応の開始時期は W/B50 %、養生温度 20 °C では材齢 28 日以降であること⁶⁾、また、材齢 28 日において、微量であるが、FA 粒子表面に結晶が見られ、その周辺には、反応生成物や反応相が確認されたこと⁷⁾が報告されている。しかし、材齢 7 日から 28 日にかけての OPC-FA-T10 の強度増進率が 49.2 %であるのに対し、材齢 7 日から 28 日にかけての OPC-FA-T10-UV の強度増進率は 71.9 %であった。このことから、活性化 TiO_2 の影響により、ポズラン反応が促進され強度増進したこと、また、その発現時期は材齢 7 日から 28 日にかけて顕著であると考えられた。

材齢 56 日では、OPC-FA-T10-UV の強度が OPC-FA に比べ、22.0 %増加した。これは、活性化 TiO_2 の水和促進効果に伴い初期材齢で過剰に生成された CH が、材齢の進行に伴い、FA と反応して C-S-H を形成し、強度発現に寄与したと推察される。

材齢 7 日から、この活性化 TiO_2 による強度増進傾向は顕著に見られ、材齢 28 日では、OPC-T15-UV の強度が OPC に比べ、28.5 %増加した。

既報⁵⁾によると、W/C50 %で TiO_2 を 10 %添加したモルタルの材齢 3 日から 28 日までの強度増進率が約 62.0 %であった。本研究の、材齢 3 日から 28 日にかけての OPC-T10 の強度増進率は 65.1 %であり、文献値とほぼ一致した。

しかし、材齢 3 日から 28 日にかけての OPC-T10-UV の強度増進率は 86.6 %であり、既報⁵⁾に比べ、高い強度増進率を示した。

4 まとめ

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) TiO_2 を C_3S ペーストに利用すると、初期の水和反応を促進させ水和度を向上させることが確認された。また、活性化 TiO_2 を混入した場合、誘導期の水和がわずかに遅延されるが、加速期の水和を促進し水和反応 24 時間後の総発熱量を増大させ、セメントの水和度を大幅に向上させることが実証された。
- (2) TiO_2 を OPC ペーストに混和すると、マイクロファイラー効果により強度増進することが確認された。活性化 TiO_2 を混合した場合、材齢 1 日以降の水和反応が急激に促進され強度増進するが、長期材齢になるにつれ反応が緩やかになることが明らかにされた。FA 混合ペーストに混和した場合、材齢 3 日からポズラン反応の兆候が表れ、材齢 7 日以降の強度増進に寄与することが推察された。
- (3) 活性化 TiO_2 をモルタルに混入した場合モルタルの材齢 1 日の強度を低下させたが、材齢 3 日以降の水和反応が促進され強度増進することが明らかにされた。FA 混合モルタルに混合した場合、活性化の影響は材齢 7 日から 28 日にかけて顕著であり、OPC-FA-T-UV の強度増進傾向は OPC-FA-T に比して大きかった。材齢 56 日での強度増進は、活性化 TiO_2 の水和促進効果によって、初期材齢で過剰に生成された CH が、材齢の進行に伴い、FA と反応して C-S-H を形成し、強度発現に寄与したと推察された。

以上の知見から、活性化 TiO_2 を、FA を大量混和したセメント硬化体に利用するとポズラン反応を促進させ、初期強度発現性状を改善できることが実証された。

強度増進の詳細なメカニズムや、活性化の影響が長期に亘って維持される原因の解明が今後の検討課題である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 15K14068 の助成を受けて行った研究であることを付記し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) S. Bae, et al., : Effects of Incorporating High-Volume Fly Ash into Tricalcium Silicate on the Degree of Silicate Polymerization and Aluminum Substitution for Silicon in Calcium Silicate Hydrate, Materials, 10[2] 131, 2017
- 2) Jun Chen, Shi-cong Kou, Chi-sun Poon : Hydration and properties of nano- TiO_2 blended cement composites, Cement and Concrete Composites, Vol.34, No.5, pp.642-649, 2012
- 3) B.Y.Lee, K.E.Kurtis. : Influence of TiO_2 Nanoparticles on Early C_3S Hydration, J Am Ceram Soc, Vol.93, No.10, pp.3399-3405, 2010

表-4 OPC モルタル及び OPC-FA モルタルの圧縮強度

試験体名	圧縮強度 (MPa)				
	1 日	3 日	7 日	28 日	56 日
OPC-T0	9.0	21.0	29.1	39.8	-
OPC-T5	11.4	21.1	30.8	41.0	-
OPC-T5-UV	8.2	20.5	34.8	44.1	-
OPC-T10	10.7	26.1	38.2	43.1	-
OPC-T10-UV	9.0	25.6	40.7	47.7	-
OPC-T15	13.3	26.4	40.6	44.2	-
OPC-T15-UV	9.7	28.6	43.1	51.1	-
OPC-FA-T0	2.8	7.1	11.0	17.0	19.5
OPC-FA-T5	3.0	7.5	12.1	15.8	22.1
OPC-FA-T5-UV	2.5	6.6	11.5	18.1	22.9
OPC-FA-T10	3.5	8.2	11.8	17.5	22.9
OPC-FA-T10-UV	2.7	7.2	11.6	20.0	23.8
OPC-FA-T15	3.9	8.7	13.6	20.0	24.9
OPC-FA-T15-UV	2.9	8.1	12.5	20.4	25.6

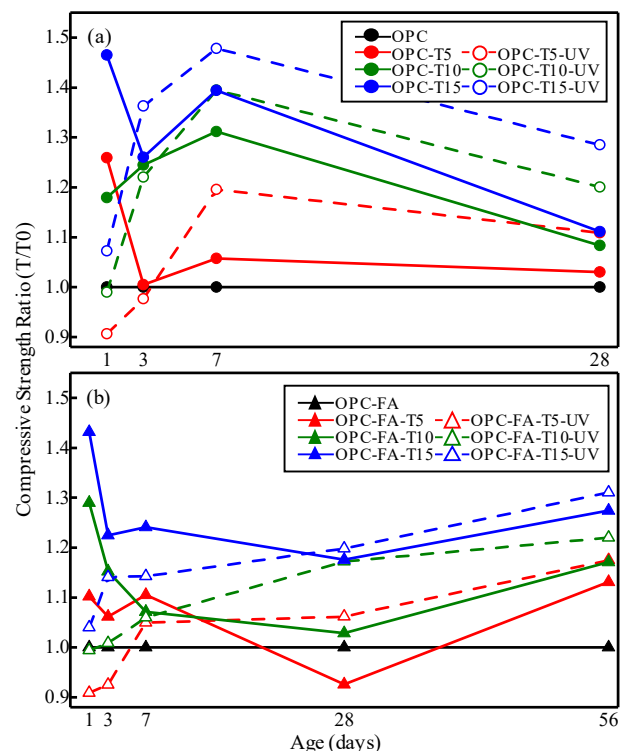


図-5 圧縮強度比 (T/T0)
(a) OPC モルタル, (b) OPC-FA モルタル

- 4) 内川 浩: 混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混合材の効果(その 2), セメント・コンクリート, No. 484, pp. 81-93, 1987
- 5) M.Hasebe, H.Edahiro : Experimental Studies on Strength, Durability and Antifouling Properties of Concrete Using TiO_2 as Admixture, Cement Science and Concrete Technology, Vol.67
- 6) 小早川 真, 黄 光律, 羽原 俊祐, 友澤 史紀 : 水比, 混合率および養生温度がフライアッシュのポズラン反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, 1999
- 7) 山本 一雄, 石川 嘉崇: フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現とポズラン反応についての一考察(その 5: フライアッシュセメントペーストの SEM 及び EPMA 分析), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2009