

論文 骨材の鉱物組成がモルタルの力学的性質に及ぼす影響

桑江 ひとみ^{*1}・迫田 恵三^{*2}

要旨: 骨材の鉱物学的な特性がモルタルマトリックスに及ぼす影響を明らかにするため、骨材の鉱物組成や等価アルカリ量の異なるモルタル供試体を作製し、温度や湿度の異なった条件下で4ヵ月間の養生試験を行った。その結果、圧縮強度は骨材の物理的な性質に依存した。AE 試験では、ひび割れのない健全なモルタル供試体において荷重載荷初期の AE 発生数にピークが認められた。このピークを遷移帯部分の破壊音と評価し、材齢および使用骨材種が遷移帯特性に影響することが明らかとなった。

キーワード: 促進養生、遷移帯、圧縮強度、AE 法、X 線回折強度試験

1. はじめに

骨材はコンクリート容積のおよそ 70%を占めているため、コンクリートの多くの重要な特性を決定付けると言われている。その一方で、コンクリート工学の分野においては、骨材は不活性な充填材として取り扱われることが多い。

しかしながら、岩石の種類、形成履歴などによって多くのコンクリートの力学的性質や耐久性が変化すること、また多くの場合骨材はセメントペーストに対し予想以上に活性であることが明らかにされている。Paulo J. M. Monterio らは¹⁾、アルカリシリカ反応を起こす同一種の岩石でも、形成履歴が異なった場合、膨張挙動やひび割れの発生時期が変化すると報告しており、膨張は微晶石英の粒径に大きく依存する述べている。また、W. A. Tasong らは²⁾、4種の岩石をセメント溶液に浸漬した結果、全ての骨材はセメントペーストに対し化学的に活性であり、このことが遷移帯形成に関与するかもしれないと示唆している。

そこで本研究では、骨材の鉱物学的な性質が強度や遷移帯に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。セメントの等価アルカリ量や鉱物組成の異なる骨材を使用したモルタル供試体を作製し、室温及び湿度の異なった環境で4ヵ

月間養生し、所定の材齢で強度試験を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

本研究では、国内で使用される代表的な4種のコンクリート用骨材を使用した。表-1に使用した骨材の岩種および物理的な性質を示す。両輝石安山岩はアルカリシリカ反応性骨材である。角閃安山岩についてはモンモリロナイト量が18%と多量に含まれている。粘板岩質砂岩は、偏光顕微鏡観察においてアルカリシリカ反応（以下、ASR）性を示す鉱物が認められたが、モルタルバー法においてはアルカリ反応性を示していない。これら4種の碎石をジョークラッシャで粉砕し、各粒径の調整をした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、等価アルカリ量 0.6%）を用いた。セメントの等価アルカリ量（以下、R₂O 量）を 1.2%とするために、練り混ぜ水への添加アルカリとして 1mol/l の NaOH 水溶液を使用した。

2.2 配合および供試体寸法

モルタルの配合は、W/C を 50%とし、1バッチ当りのセメント量は 600g、練り混ぜ水は 300ml 使用した。各種細骨材については表-2に示すように、3種類の粒度に分級し用いた。

*1 （株）沖縄構造設計 工博（正会員）

*2 東海大学 海洋学部海洋土木工学科教授 工博（正会員）

表-1 各種碎石の物理的性質

骨材名	石灰石碎石	反応性骨材(碎石)	砂岩碎石	モンモリロナイト含有骨材(碎石)
産地名	埼玉県秩父	山形県	静岡県鞠子	静岡県安良利
岩石名	石灰岩	両輝石安山岩	粘板岩質砂岩	角閃安山岩
密度(g/cm ³)	2.71	2.74	2.65	2.63
吸水率(%)	0.22	0.72	1.39	2.33
FM 値	7.08	-	6.37	-
単位容積質量(kg/l)	1.69	1.54	1.51	1.47

表-2 1 バッチ中の粒径ごとの細骨材量

粒径(mm)	石灰石骨材(g)	反応性骨材(g)	砂岩骨材(g)	モンモリロナイト含有骨材(g)
5.0-2.5	400	394	382	379
2.5-1.2	400	394	382	379
1.2-0.6	400	394	382	379

各種細骨材量が異なるのは、モルタル中の細骨材の絶対容積をほぼ等しくしたためである。圧縮試験用の供試体寸法は、直径 50mm×高さ 100mm である。

2.3 養生方法および試験項目

本研究では、封かん養生および湿布養生を行った。封かん養生用の供試体は脱型後に市販のラップおよびアルミホイルでシールし、恒温 20℃の環境に 2 ヶ月間静置した。封かん養生期間は材齢 2 ヶ月まで行い、その後 20℃湿布養生を 2 ヶ月間行い、再水和させた。

湿布養生用の供試体は脱型後に市販のサランラップでシールした後、底が水で満たされた保存容器に入れ、恒温 40℃の環境に 4 ヶ月間静置した。

本研究の試験期間は材齢 4 ヶ月とし、所定の材齢で圧縮強度試験、静弾性係数試験および AE(Acoustic Emission)試験を行った。AE 試験および静弾性係数試験は、圧縮応力载荷時に端子やひずみ計を取り付けて測定した。また、若材齢におけるセメント水和物の同定・定量を行うため、X 線回折強度試験を行った。

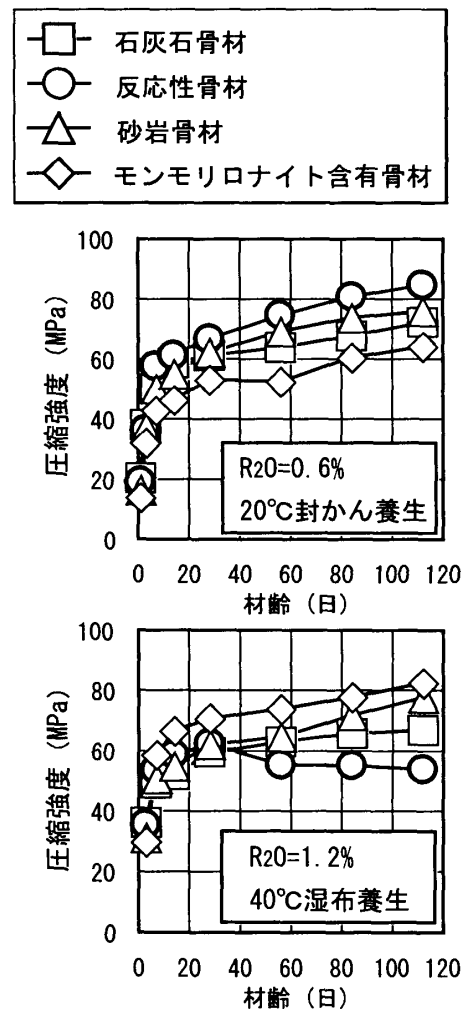


図-1 各種骨材モルタルの圧縮強度

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 に各種骨材モルタルの圧縮強度の結果を示す。20℃で封かん養生した場合、反応性骨材、砂岩骨材、石灰石骨材、モンモリロナイト含有骨材の順に圧縮強度は低下した。封かん養生は

外部からの水分供給がまったく無いため、水和反応は練混ぜに使用した水分のみで行われる。したがって、各種モルタル中の水和セメントペーストの水和度は材齢が長くなるにつれて同程度となり、硬化セメントペーストの空隙率がほぼ等しくなると考えられる。このようなことか

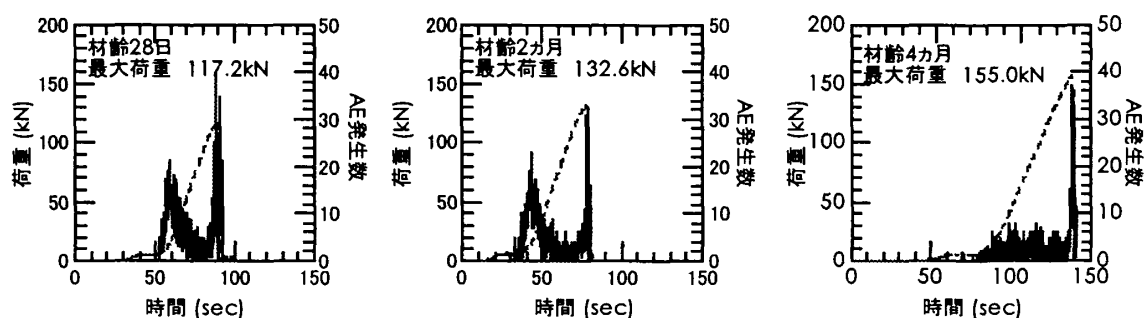


図-2 $R_2O=0.6\%$ 、石灰石骨材モルタルの AE 発生状況

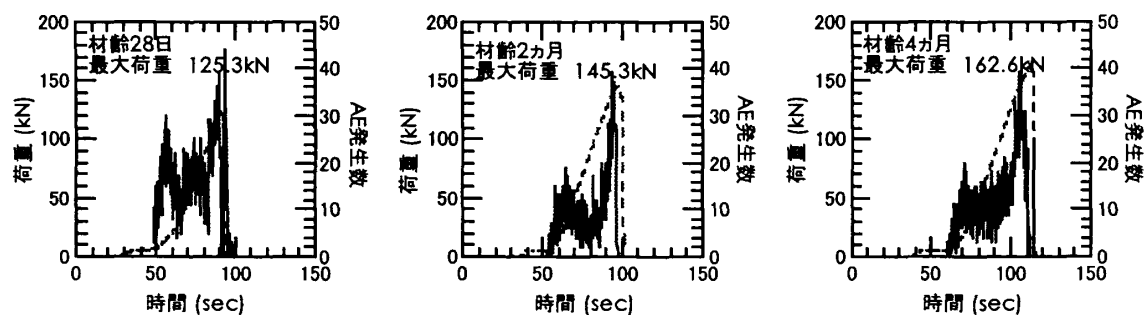


図-3 $R_2O=0.6\%$ 、反応性骨材モルタルの AE 発生状況

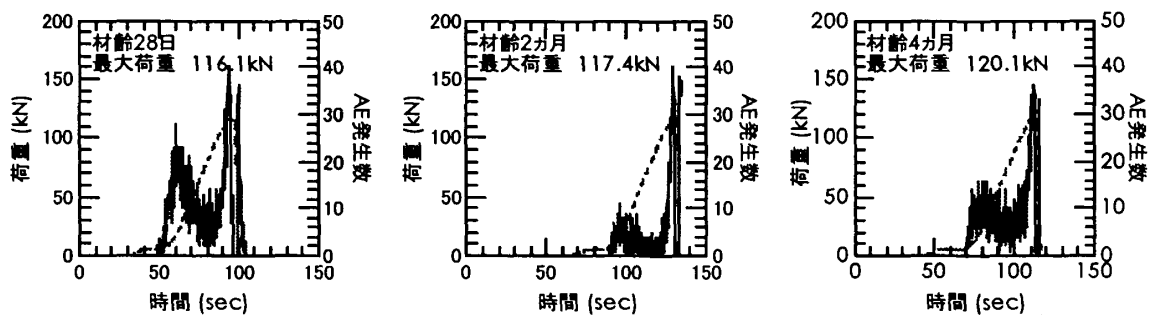


図-4 $R_2O=0.6\%$ 、モンモリロナイト含有骨材モルタルの AE 発生状況

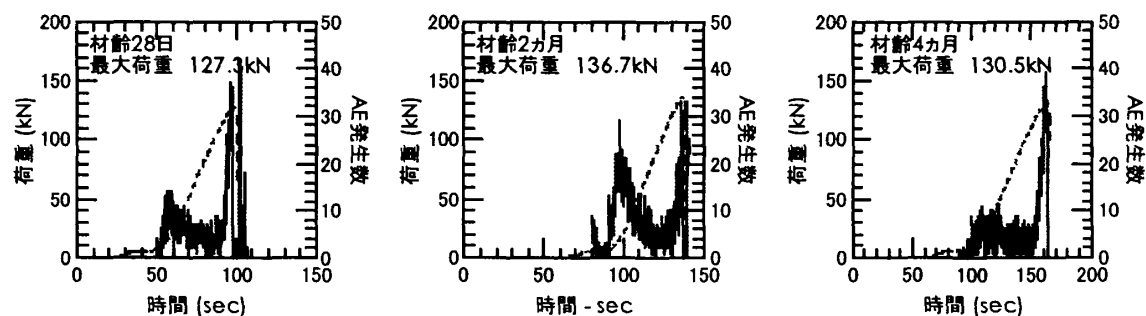


図-5 $R_2O=0.6\%$ 、砂岩骨材モルタルの AE 発生状況

ら、各種モルタルの圧縮強度は硬化セメントペースト部分よりもより密な骨材の物理的な性質に依存したと推察される。

一般に、吸水率の高い骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は低くなると言われているが、

40℃湿布養生では、吸水率が最も高いモンモリロナイト含有骨材を使用したモルタルの圧縮強度は他の骨材を使用した供試体よりも増加している。これについては、骨材中のモンモリロナイトの陽イオン交換によって金属イオンがセメ

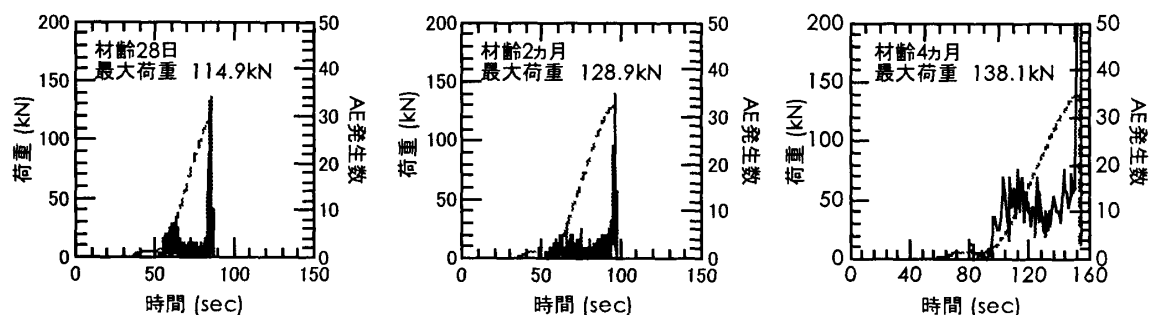


図-6 $R_2O=1.2\%$ 、石灰石骨材モルタルの AE 発生状況

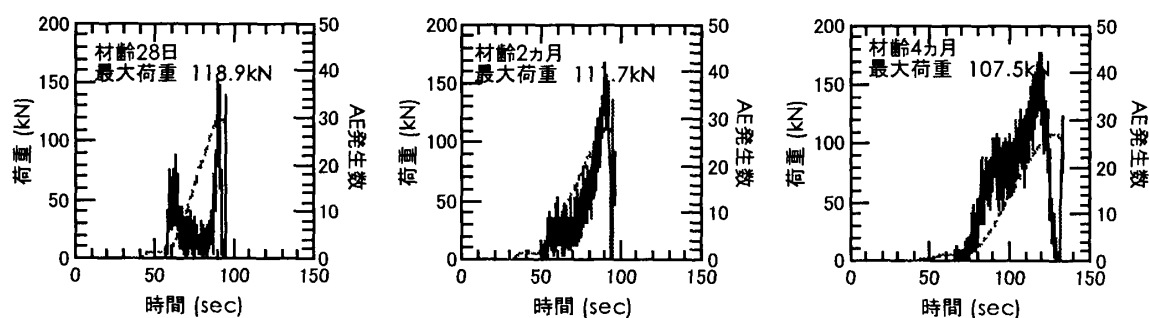


図-7 $R_2O=1.2\%$ 、反応性骨材モルタルの AE 発生状況

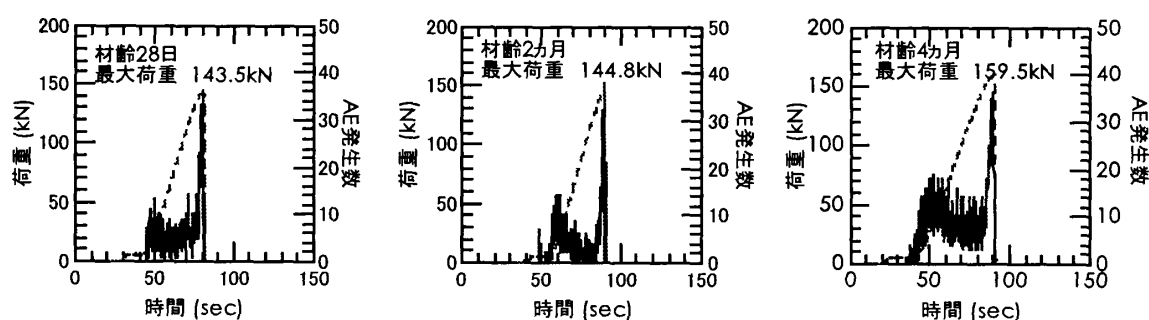


図-8 $R_2O=1.2\%$ 、モンモリロナイト含有骨材モルタルの AE 発生状況

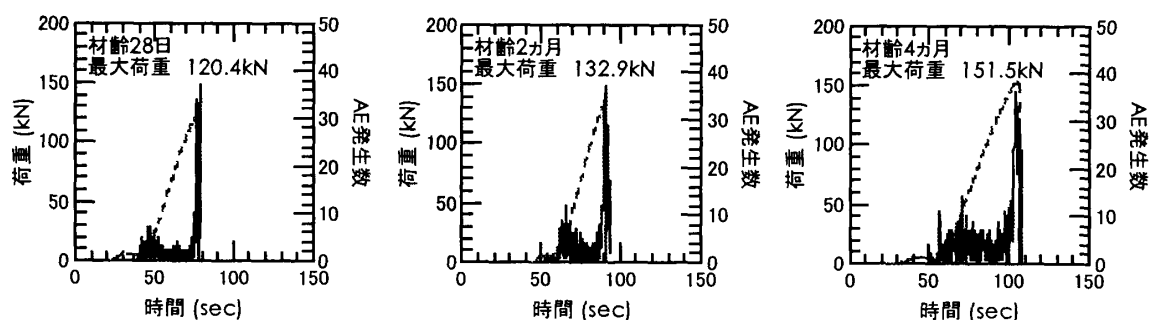


図-9 $R_2O=1.2\%$ 、砂岩骨材モルタルの AE 発生状況

ントペースト中に放出され、モルタルの強度に影響するようなカルシウムアルミネート相を形成したため、圧縮強度が増加したと考えられる。モルタル供試体中のセメント水和物の成長については、3.3節で述べる。

また、反応性骨材を使用したモルタルは材齢56日以降の圧縮強度が低下した。高温多湿環境ではASRが促進され、およそ2ヵ月程度でひび割れが生じる。このようなことから、反応性骨材モルタルの圧縮強度の低下は、ASR膨張によるひび割れが原因と考えられる。

3.2 載荷時のAE発生状況

AE試験は圧縮荷重載荷時に発生する破壊音を継続的に計測することが可能である。本研究では、AE端子を円柱供試体の側面中央部分に取り付け、載荷直後から破壊に至るまでのAE発生数を測定している。AE試験では、荷重とAE発生数を相対的に捉えることを目的とした。各種骨材モルタルのAE発生履歴および荷重履歴を図-2～図-9に示す。

図中の破線は載荷履歴を表し、実線は載荷時のAE発生履歴を表す。このように、AE試験においては荷重履歴とAE発生履歴との双方の結果に基づいて試験供試体の破壊モードを検証することが可能である。

一般に、低、中強度のコンクリートやモルタルが圧縮を受ける時、破壊応力の50%まではマトリックス中にひび割れは発生しないと言われている³⁾。したがって荷重が増加を始める頃に破壊するのは、モルタル構成相で最も脆弱な骨材-セメントペースト界面間の遷移帯と思われる。

R_2O 量0.6%, 20℃封かん養生したモルタル供試体のAE発生状況は、全体的に材齢1, 2ヵ月よりも材齢4ヵ月の方が荷重載荷初期のAE発生数が減少した(図-2～図-5)。これは、材齢2ヵ月以降に養生方法を封かん養生から湿布養生へと変更したことによりセメントペースト部分が再水和し、遷移帯領域が密になったためだと考えられる。

R_2O 量1.2%, 40℃湿布養生した石灰石骨材、モ

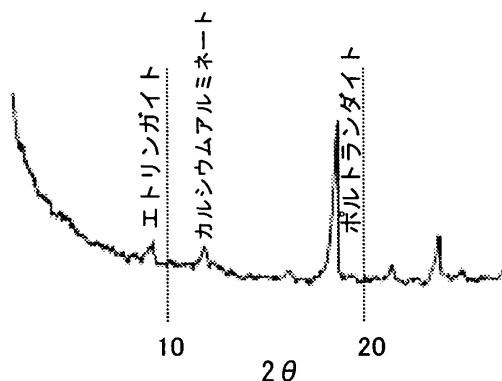


図-10 X線回折強度試験結果

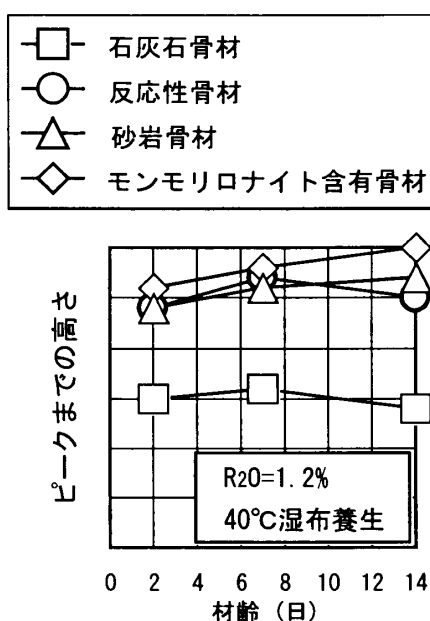


図-11 各種骨材モルタルのカルシウムアルミネート

ンモリロナイト含有骨材および砂岩骨材を使用したモルタル供試体では、材齢の経過とともに荷重載荷初期のAE発生数が増加した(図-6～図-9)。これについては、高温多湿環境下において水和反応が促進され、セメントペースト部分が緻密化し、遷移帯部分との強度差が生じたからだと考えられる。

本節で最も興味深いのは、図-7に示した反応性骨材モルタルのAE発生履歴の変化である。ひび割れを起こしていない材齢28日のAE発生履歴には他の骨材と同様に初期のAE発生数にピーク点がみられたが、ひび割れ損傷を起こした材

齢 56 日以降ではピーク点が消失した。これは、ASR によるひび割れが原因と考えられる。応力載荷前にすでに遷移帯部分やセメントペースト部分にひび割れが生じている場合、破壊は遷移帯やセメントペーストの空隙量の違いに影響されず、モルタル硬化体は ASR ひび割れを伝播して崩壊すると思われる。このようなことが、AE 発生履歴に大きな違いを生じさせたと考えられる。

3.3 X 線回折試験による水和物の同定・定量

X 線回折強度試験では、水和物の同定を回折角 (2θ) で行い、回折強度による水和物の定量が可能である (図-10)。本研究では材齢 14 日までのモルタル供試体から試料を採取し、短期材齢における水和物の特定を行った。 R_2O 量 1.2% のカルシウムアルミネート相の生成量を図-11 に示す。図-11 のピークまでの高さが図-10 における回折強度である。一般に、セメントペースト部分の強度は、エトリンガイトがモノサルフェート水和物へ移行することによって得られる³⁾。モンモリロナイト含有骨材を使用したモルタルのカルシウムアルミネート相 (モノサルフェート水和物) は若材齢から多く生成されており、これが圧縮強度増加に影響したと考えられる。石灰石骨材モルタルのカルシウムアルミネートの生成量は、他の細骨材を使用したモルタルよりも少なかった。

4. おわりに

鉱物組成の異なる細骨材を使用したモルタルを、4 ヶ月間封かん養生および湿布養生した結果、

以下のような結果が得られた。

- (1) 20℃封かん養生した R_2O 量 0.6% のモルタル供試体の圧縮強度は骨材の物理的な性質に依存した。
- (2) AE 試験では、セメントペースト部分と遷移帯部分の強度との違いによって初期の AE 発生数が材齢とともに増加した。ASR によってひび割れを起こした反応性骨材モルタルの AE 発生履歴では、他の供試体に見られた初期の AE 発生のピークが消失した。
- (3) X 線回折強度試験では、モンモリロナイト含有骨材モルタルのカルシウムアルミネートが成長しており、これがモルタルの圧縮強度を増加させたと考えられた。

参考文献

- 1) Paulo J. M. Monteiro ほか : Effect of Aggregate Deformation on Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, pp179-183, 2001
- 2) W. A. Tasong ほか : AGGREGATE-CEMENT CHEMICAL INTERACTIONS, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, pp1037-1048, 1998
- 3) 田澤榮一・佐伯昇監訳 : コンクリート工学—微視構造と材料特性—, 技報堂出版, 1998 年発行