

報告 イラク産骨材のアルカリ骨材反応性について

伊勢 隆*1・柿崎 正義*2・佐藤 次郎*3

要旨:イラク国のアルシャヒードモニュメント&ミュージアムの建設工事において、使用するコンクリート骨材は、政府機関のNCCLの品質検査を受けることになっている。今回は数種類の砂漠産骨材の品質結果から工事に使用できる砂(Tamr産)、砂利(Tikrit産)を選定した。また、その骨材は、アルカリ骨材反応性および供試体にそり、ひびわれなど外観に異状が認められないことがわかった。

キーワード:骨材の潜在反応性、アルカリ骨材反応、アルカリ濃度減少量、溶解シリカ量

1. はじめに

中近東諸国での建設工事の量は、これまでも著しい増加の傾向を示している。本報告は、イラク、バグダット、アルシャヒードモニュメント&ミュージアムの建設において、コンクリート用骨材に使用する砂漠産の砂(Tamr)、砂利(Tikrit)がアルカリ反応性を有する成分をもっているかどうかを明らかにするために、次の4つの試験を行い、その結果をもとに使用の可能性について判定したものである。

- a. 岩石試験(ASTM C 295) ¹⁾
- b. 骨材の潜在反応性試験(ASTM C 289) ²⁾
- c. セメント-骨材の潜在アルカリ反応性試験(ASTM C 227) ³⁾
- d. 乾燥養生-湿潤養生の繰返し方法によるアルカリ反応促進試験(ASTM C 227に準ずる) ³⁾

2. 試験項目と試験内容

表-1に試験項目別による試験内容を示す。

表-1 試験項目と試験内容

試験項目	試験内容
岩石試験	a 記載岩石学試験*1
	b 骨材中の岩石・鉱物構成比
骨材の潜在反応性	a アルカリ濃度減少量
	b 溶解シリカ量
セメント-骨材の潜在アルカリ反応性 a、ASTM C227 b、促進試験*2	a 長さ変化率
	b 供試体のそり
	c 供試体の検査
	(i) ひびわれの存在、位置および形態
	(ii) 表面および表面の斑点の外観
(iii) 表面沈降物および浸出物の性状、厚さ	

注*1)岩石学の一分野で、岩石の地質学的状態や岩石の諸性質(組織、構造、鉱物組成、化学組成、物理的性質など)の系統的な記載や岩石の分類などを取り扱う部門。

注*2)促進試験は、ASTM C 227試験方法に準じて養生条件とサイクルを適節にして行った。従って試験結果は短期間で求めて使用の可能性を早く評価するための基準資料としたものである。

3. 試料

3.1 品質

本項では、工事に使用するコンクリート用骨材を選定するために砂漠産の砂6種類、砂利8種類の中から調合計画、必要とする物理的性

表-2 骨材の試験方法

ふるい分け	絶乾密度 g/cm ³	吸水率 %	単位容積質量 t/m ³	実績率 %	硫酸量% (SO ₃)	塩化物 (Cl,%)	シルト量 %	粘土量 %
BS 882-65 5)	ASTM C 127-77		BS 882-65	JIS A 1104	BS 1377-75 8)			BS 882-65

*1 三友エンジニアリング(株) 技術部次長兼工事課長 (正会員)

*2 三友エンジニアリング(株) 専務取締役 工博 (正会員)

*3 三友エンジニアリング(株) 代表取締役社長 (正会員)

表-3 砂・砂利の物理的性質

項目 骨材	No.	産地	最大寸法	粗粒率	粒度範囲	密度 g/cm ³		吸水率	単位容積質量	突積率	硫酸量	塩化物量	シルト量	粘土含有量	判定結果
			(mm)	(%)	(Zone)	絶乾	表乾	(%)	(t/m ³)	(%)	(SO ₂)	(NaCl,%)	(%)	(%)	
砂	1	Kasaru	2.5	2.75	× (2)	2.70	2.75	1.88	1.67	61.9	0.14	0.03	2.7	0.10	否
	2	同上	2.5	2.53	× (2)	2.66	2.71	1.75	1.67	63.0	0.15	0.04	2.1	0.13	否
	3	同上	2.5	2.95	(2)	2.65	2.7	2	1.67	63.0	0.18	0.04	1.3	0.09	合
	4	Tamr	2.5	2.71	(2)	2.59	2.62	1.05	1.72	65.0	0.15	0.03	1.46	0.02	合
	5	Samara	2.5	1.97	× (2)	2.71	2.74	1.09	1.56	58.0	0.26	0.03	× 8.1	0.20	否
	6	同上	2.5	2.73	× (2)	2.69	2.73	1.45	1.75	65.3	0.24	× 0.10	× 5.2	0.21	否
仕様限界値			2.5	2.8±0.1	Zone (2) or (3)	2.5以上	-	3.5以下	-	-	0.6以下 0.04以下	NaCl 3.0以下	0.25以下		
砂利	1	Samara	40	6.95	× 1 1/2"	2.68	2.69	0.5	1.61	60	0.09	0.02	0	0	否
	2	同上	20	6.83	× 3/4"	2.66	2.69	1.0	1.69	61	× 0.52	0.12	0	0	否
	3	Sadur	40	7.38	× 1 1/2"	2.70	2.72	0.7	1.60	59.3	0.04	0	0	0	否
	4	同上	40	7.38	× 1 1/2"	2.67	2.69	0.7	1.62	61	× 0.29	0.02	0	0	否
	5	Tikrit	20	6.68	3/4"	2.62	2.71	0.87	1.64	60.5	0.03	0	0.01	0	合
	6	Samara	40	7.36	× 1 1/2"	2.68	2.69	0.5	1.66	62	0.04	0	0.1	0	否
	7	同上	20	6.45	3/4"	2.67	2.7	1.2	-	60.3	0.07	0.02	0.12	0	やや合
	8	同上	40	7.01	× 1 1/2"	2.66	2.68	0.6	1.61	60.2	× 0.36	0.02	0	0	否
仕様限界値		0.2以下	20		3/4" or 1 1/2"	2.5以上	-	3.0以下	-	55以上	0.1以下	-	1.0以下	0.25以下	

注) 仕様限界値: イラク (NCCL) 規格: 太字網掛け, JIS規格: 太字網掛け以外, ×印: 仕様限界値を外れているもの

さらに供給量を考慮して、砂はNo. 4のTamr産、砂利はNo. 5のTikrit産を選定した。これらのTamr, Tikritの両骨材の品質は、日本で通常使用されている骨材とほぼ同じのものであった。

3. 2 試料の調整方法

(1) 岩石試験

岩石試験は、ASTM C 295による規格に準じて行った。¹⁾砂は所定の粒度に分級して、5~2.5mmのもの138g, 2.5~1.2mmのもの155g, 1.2~0.6mmのもの170g, 砂利は25~10mmのもの210個, 重量513gを用いた。

(2) 骨材の潜在反応性試験

試料は砂, 砂利ともそれぞれ7kgを用いた。

(3) セメント-骨材の潜在アルカリ反応性試験

砂の粒度は、ASTM C 227に規定する粒度となるように、各ふるいごとに分級したものを調整して使用した。また、砂利の粒度は粉砕機を使用して砂状に破碎して、ASTM C 227に規定するように各ふるいごとに分級したものを調整して使用した。

(4) モルタル調合

モルタルパーの調合は、セメント-骨材の潜在アルカリ反応性試験(ASTM C 227)に準じて、フロー値を105~120(JIS:200~220), 砂セメント比

を2.25(重量比)とした。使用したセメントは、普通ポルトランド(N社製)で、アルカリ成分は0.61%である。試験結果は4本(2バッチ×2本)の平均値とした。

4. 試験方法

4. 1 岩石試験

砂は、粒度5~2.5mmのものについて肉眼鑑定試験と塩酸による発泡試験(炭酸塩岩は塩酸に浸けると反応して発泡する:以下 酸試験という)によって分類した。また、2.5mm以下の砂については炭酸塩岩を塩酸により分解した後、分解しなかった残分につき肉眼鑑定と実体顕微鏡(図-1)による鑑定を行った。砂利は肉眼鑑定試験と酸試験により同一種類のものに分類して、各々の個数と重量を求め、また代表的な試料1個につき薄片を製作し、偏光顕微鏡下(図-2)で、骨材中の岩石・鉱物構成比を検討した。⁹⁾

4. 2 骨材の潜在反応性試験

砂と砂利によるアルカリ濃度減少量と溶解シリカ量およびモル濃度は、ASTM C 289(化学法)によって求めた。

4. 3 セメント-骨材の潜在アルカリ反応性試験

試験は、ASTM C 227(セメント-骨材の潜在

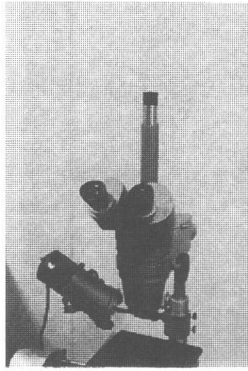


図-1 実体顕微鏡
(ズーム式三眼実体顕微鏡)

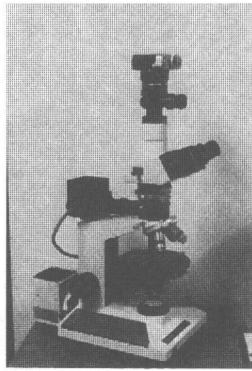


図-2 偏光顕微鏡
(メーカー:オリンパス、BH-SP)

アルカリ反応性試験方法、モルタルバー法)の方法とASTM C 227に準じた乾燥養生-湿潤養生の繰返しによるアルカリ反応性促進試験の二つの方法によって行った。

(1) 試験内容

試験は、表-4の項目と方法によって行った。

(2) 練り混ぜ

練り混ぜは、ASTM C 305¹²⁾の方法によって行った。

(3) 供試体の寸法

供試体の大きさは、「25×25×285mm」の角柱体とした。成型した供試体は、24時間後に脱型して所定の条件で養生した。

(4) 養生方法および長さ変化

1) ASTM C 227による方法

供試体は、密封したブリキ缶(水を500ml入れてある)に収納して、温度 $37.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$ の恒温箱内で養生した。長さ変化の測定は、ASTM C 490¹¹⁾によってコンパレータを用いて材齢14日および1, 2, 3か月で行った。そのときの養生方法は、ASTM C 227に準じた。図-3に「温度履歴とサイクル」の関係を示す。

2) 乾燥養生-湿潤養生の繰返しによる促進試験の方法

供試体は密封しないで養生した。養生は、現地における過去の過酷な環境条件を考慮して温度 $20 \sim 70^\circ\text{C}$ の範囲で乾燥養生-湿潤養生を繰返し行った。恒温・恒温室内は温度 $70 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ に調整した。長さ変化の測定は、上述と同

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
フロー値	ASTM C 109(モルタルの圧縮強度試験) ¹⁰⁾
長さ変化率	ASTM C 490(長さ変化試験) ¹¹⁾
供試体のそり	供試体のそりは、モルタルを養生終了後に平板の上に乗せて、シックネスゲージを用いて行った。
供試体の検査	a 目視観察
	b 検査項目-表1参照

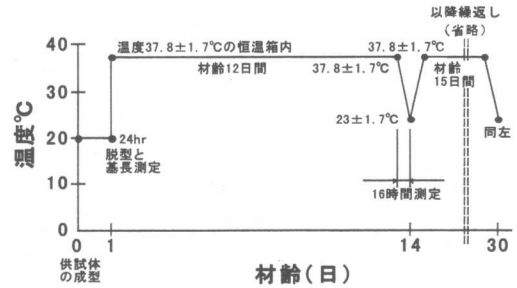


図-3 温度履歴とサイクル(ASTM C 227)

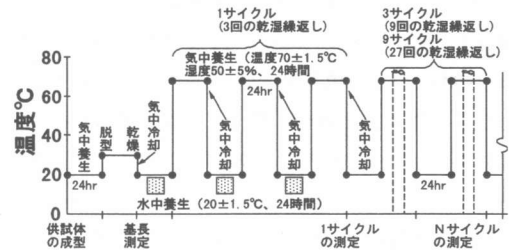


図-4 温度履歴とサイクル

(乾燥養生-湿潤養生の繰返しの促進試験)

様にコンパレータを用いて乾燥養生-湿潤養生の繰返しを3, 6および9サイクルした後にを行った。上述以外の方法は、ASTM C 227に準じた。図-4にASTM C 227に準じた促進試験の「温度履歴とサイクル」の関係を示す。

5. 試験結果および考察

5.1 岩石試験

(1) 肉眼鑑定試験

使用骨材は堆積岩より成り、砂が2種類の鉱物、砂利が7種類の岩石で構成されていた。そのうち、砂の鉱物は、石灰石(方解石を $0.5\text{mass}\%$ 含む)がほとんどで、粒度 $5 \sim 2.5\text{mm}$ のとき約 $90\text{mass}\%$ 、 $2.5 \sim 0.6\text{mm}$ のとき約 $87\text{mass}\%$ 以上含まれ、わずかに石英が含まれていた。これより、砂は、アルカリ骨材

反応を生じさせない骨材であるといえる。これに対して、砂利は丸みを持った堆積岩で、赤色頁岩と砕削性石灰岩(既成石灰岩が砕けて再度組織を作り、結晶した石灰岩)が65mass%を占めており、それ以外は砂岩が16mass%、けい岩(石英)が14mass%アルコース砂岩(石英と長石との両方に富む粗粒の砂岩)、チャートおよび方解石の7種類であった。砂利もアルカリ骨材反応を生じさせない骨材であることがわかった。これらの結果から、Tamr, Tikritの骨材はコンクリート用骨材として使用できるものと考えられる。しかし、最近の研究成果では、非結晶質のシリカ鉱物であっても含水性のない骨材のとき、アルカリ骨材反応を生じさせないことが現場の実験結果からも知られている。¹⁴⁾

(2) 偏光顕微鏡下の観察

砂利の分類後の7種類より代表的な試料を選び、薄片を作製し偏光顕微鏡下で、その鉱物組成と組織を観察した。赤色頁岩と砕削性石灰岩を顕微鏡で観察した写真を図-5、図-6に示す。図-5の左は偏光ニコル、右は同一場所の直交ニコル下の状態として示し、図-6では直交ニコルの2か所を示した。全写真の倍率は、同一で35倍である。この結果、偏光顕微鏡下の観察は、肉眼鑑定試験によく適合していることがわかった。

5.2 骨材の潜在反応性

試験は、使用骨材のアルカリ反応性を確認するために、原石を300 μ m~150 μ mの範囲に粉碎してアルカリ濃度減少量および溶解シリカ量を求めた。表-5、図-7にアルカリ骨材反応試験結果を示す。これより、本工事で使用する骨材は、Tamr, TikritともASTM C 289における図-7の骨材の有害度の判定区分より無害であると判定された。また、アルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)の比(Sc/Rc)は、Tamr砂が「0.27」、Tikrit砂利が

表-5 アルカリ骨材反応試験結果

種類	項目	アルカリ濃度減少量、Rc (m mol/l)	溶解シリカ量、Sc (m mol/l)	Sc/Rc	判定
砂	Tamr	51.1	14	0.27	無害骨材
	相模川	139.2	120	0.86	
砂利	Tikrit	89.1	75	0.84	無害骨材
	安倍川	184.3	140	0.76	

注)相模川, 安倍川: 文献13

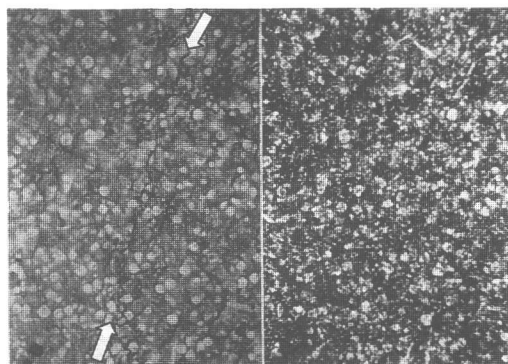


図-5 赤色頁岩

茶褐色の軟質の岩石で、酸化鉄を主成分とする赤色粘土より成り、偏光ニコルで白色の点は炭酸カルシウムより成る石灰石である。また堆積作用によって生じた層理面を \swarrow として示した。

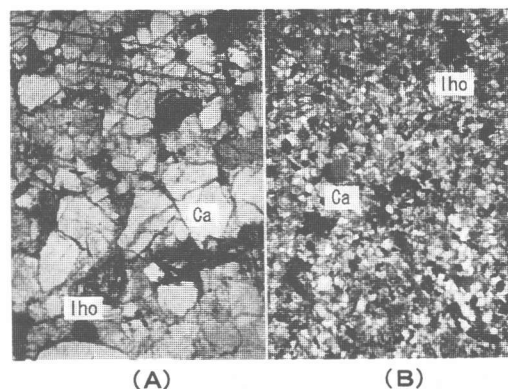


図-6 砕削性石灰岩

深緑色または薄茶色の密実重量感のある岩石で、既存の石灰石の浸食によって形成された成層の堆積岩である。(A)は、各粒子とも大きく石灰レキ岩であり、(B)は石灰砂岩である。石灰岩(Ca)の粒子の間を方解岩の結晶が充填しており、ところどころに酸化鉄(Iho)が存在する。

「0.84」で、代表的な骨材である相模川産砂「0.86」¹³⁾、安倍川産砂利「0.76」¹³⁾のそれより小さい。

5.3 セメント骨材の潜在アルカリ反応性

(1) ASTM C 277による試験

図-8, 9にセメント骨材のアルカリ反応性試験結果を示す。これより、Tamr, Tikrit骨材によるモルタルの長さ変化率は、材齢28日で「約0.01%」を示していたが、材齢2, 3か月では「0.00%」となり、アルカリ骨材反応による膨張は認められなかった。

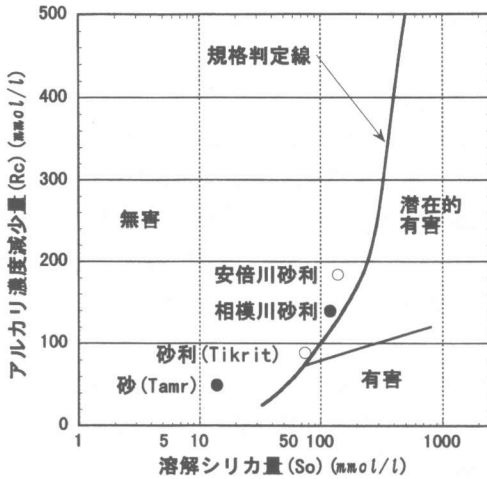


図-7 アルカリシリカ反応性試験(化学法)の判定

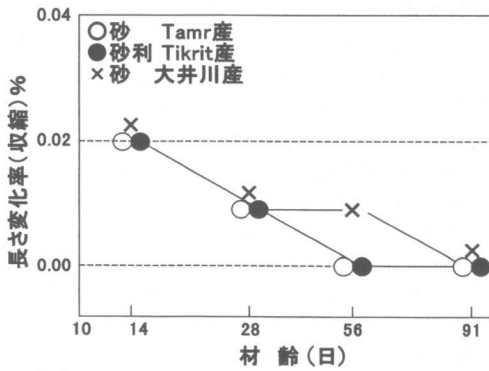


図-8 ASTM C-207によるモルタル長さ変化



図-9 ASTM C 227のアルカリ反応状況 (供試体側面)

また、比較用の大井川産川砂モルタルの長さ変化率は、Tamr砂のそれと同じであり、膨張も認められなかった。既往文献¹³⁾によると、アルカリー骨材

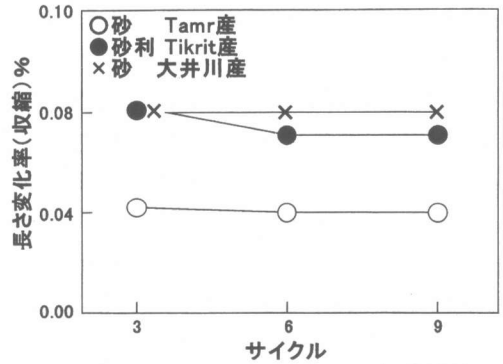


図-10 乾燥-湿潤の繰返しによる促進試験のモルタル長さ変化

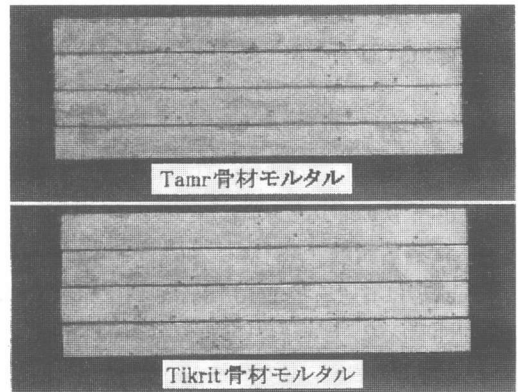


図-11 乾・湿養生の繰返し促進によるアルカリ反応状況(供試体側面)

反応による有害な膨張は、3か月で「0.05%(膨張)」より大きく、6か月で「0.1%(膨張)」以上のとき発生すると指摘されている。また、供試体にそり、ひびわれ発生および斑点の外観などは、目視によって観察したが、異状は認められなかった。これより、Tamr, Tikritの骨材はコンクリート用骨材として使用可能であるといえる。

(2) 乾燥養生-湿潤養生の繰返しによるアルカリ反応性促進試験

試験は上述のASTM C 277に準じて、養生条件とサイクルを過酷にして行ったものである。それは、上述(1)の試験結果よりも骨材の使用可能性を早く評価することができるからである。図-10, 11に乾燥養生-湿潤養生の繰返しによるアルカリ反応性促進試験結果を示す。これより、Tamr, Tikrit骨材によるモルタルの長さ変化率は、3サイクルから9サ

イクルまでほとんど同じ値を示した。9サイクルにおけるモルタルの長さ変化率(収縮)は、Tamr砂の場合に「約0.04%」、Tikrit砂利の場合に「約0.07%」となり、アルカリ骨材反応による膨張は認められなかった。また、大井川産の川砂モルタル長さ変化率(収縮)は「約0.08%」で、Tamr砂のモルタル長さ変化率より約2倍大きい値を示した。しかし、促進試験によるアルカリ骨材反応は、ほとんど認められなかった。また、供試体にそり、ひびわれ発生および斑点の外観および表面沈降物などは、9サイクルの結果でも認められなかった。この結果からも、Tamr、Tikritの両骨材はコンクリート用骨材として使用可能であるといえる。

6. まとめ

使用骨材のアルカリ骨材反応性に関する試験の結果から、次のようなことがわかった。

6.1 岩石試験 (ASTM C 295)

Tamr砂は石灰石と石英、Tikrit砂利は赤色頁岩、砕削性石灰石、砂岩、けい岩、アルコース砂岩および方解石の岩石で構成されていた。

6.2 骨材の潜在反応性

Tamr、Tikrit骨材のアルカリ濃度減少量(Rc)と溶解シリカ量(Sc)の比(Sc/Rc)は、「0.27、0.84」となり無害骨材と判定された。

6.3 セメント骨材の潜在アルカリ反応性

(1) ASTM C 227による試験

Tamr、Tikrit骨材によるモルタルの長さ変化率(収縮)は、材齢28日で「約0.01%」を示していたが、材齢2、3か月では「0.00%」となり、アルカリ骨材反応による膨張は認められなかった。また、供試体にそり、ひびわれ発生および斑点などの異状は認められなかった。

(2) 乾燥養生一湿潤養生の繰返し方法によるアルカリ反応性促進試験

Tamr、Tikrit骨材によるモルタルの長さ変化率(収縮)は、それぞれ「0.04%、0.07%」程度で、3サイクルから9サイクルまではほとんど同じ値を示した。アルカリ骨材反応による膨張も認められなかった。また、外観による異状は上述と同様に認めら

れなかった。

7. 結論

アルシャヒードモニュメント&ミュージアムのコンクリート工事で使用するTamr、Tikrit骨材は、各規格試験の結果、アルカリ骨材反応性が認められないことがわかった。また、骨材の物理的性質は、通常日本で使用されている骨材と同じであった。

謝辞: この実験に多大なご協力を頂いた(株)エヌエムビー中央研究所の関係各位に紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) ASTM C 295-74 Rec. Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
- 2) ASTM C 289-76 Test for Potential Reactivity of Aggregate (Chemical Method).
- 3) ASTM C 227-76 Test for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).
- 4) IRAQ-National Center for Construction Laboratories, Construction Works Specification 1981.
- 5) BS882-1201:Part 1-65 Aggregates from Natural Sources for Concrete Part 2-73 Metric Units.
- 6) ASTM C 127-77 Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate.
- 7) JIS A 1104-99 骨材の単位容積質量及び実率率試験
- 8) BS1377-75 Method of test for Soil for Civil Engineering Purposes.
- 9) 地団研地学事典編集委員会(代表 端山好和):地学事典, 平凡社, 1970.11.10
- 10) ASTM C 490-77 Spec. for Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete.
- 11) ASTM C 109-77 Test for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or 50-mm Cube Specimens).
- 12) ASTM C 305-77 Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- 13) 村田二郎, 関 眞吾, ほか: アルカリ骨材反応を起こしたコンクリート, セメント・コンクリート, No.220, pp.7~13 June 1965
- 14) 有泉 昌: わかりやすいセメントとコンクリートの知識 pp.161~203, 鹿島出版会, 1989.5