

論文 高性能軽量コンクリートのアルカリ骨材反応抑制手法に関する実験的研究

笹倉 伸晃^{*1}・舟橋 政司^{*1}・鶴田 孝司^{*2}・玉井 謙^{*3}

要旨：これまで軽量コンクリートのアルカリ骨材反応による劣化事例は、ほとんど報告されていなかったが、最近、アルカリ骨材反応の兆候が見られる事例が報告されている。著者らは、単位セメント量が多く、コンクリート中のアルカリ濃度が高い PC 部材等にも高性能軽量コンクリートを適用するために、高性能軽量骨材の表層に改質材を付着させるアルカリ骨材反応抑制手法を考案した。本研究では、アルカリシリカ反応性試験により、骨材表面の改質効果を確認し、実構造物の配合を想定した高性能軽量コンクリートを用いてアルカリシリカ反応性判定試験を実施して、「反応性なし」との試験結果を得た。

キーワード：高性能軽量骨材，アルカリ骨材反応，コンクリート法，改質材，改良化学法

1. はじめに

人工軽量骨材が利用されてから 40 年以上経過した現在まで、アルカリ骨材反応による劣化事例はほとんど報告されていなかった¹⁾。しかし、最近、PC 構造物などの単位セメント量が多く、アルカリの総量規制値 (3kg/m^3 以下) を超えるような配合を用いたコンクリート構造物においてアルカリ骨材反応の兆候がみられる事例も報告されている^{2), 3)}。

人工軽量骨材の製造方法としては、頁岩、パーライトなどの鉱物や石炭灰などの各種副産物を高温焼成して製造するのが一般的であるが、この時、使用する軽量骨材の主原料によっては、高温で焼成する際に、高アルカリ性水溶液に溶出しやすい非晶質ガラス相が形成される²⁾。このことが、アルカリシリカ反応(以下、ASR と略記)を引き起こす要因になっているものと推察される。

軽量骨材の製造メーカーは、ASR 試験として化学法やモルタルバー法を実施することが多い。JIS では化学法で「無害でない」と判定され、モルタルバー法で「無害」と判定された場合には、

モルタルバー法の判定結果が優先されるため、この結果を受けて ASR に対して無害と判定していることが少なくない。しかしながら、人工軽量骨材の ASR の評価に関しては、JIS 規格である化学法およびモルタルバー法において、「人工軽量骨材(粗, 細)には適用しない」と明記されている⁴⁾。

したがって、今後、人工軽量骨材の適切な ASR 評価方法を確立するとともに、軽量コンクリートの ASR 抑制対策が求められるものとする。

そこで著者らは、ASR 抑制対策として、アルミナ系の改質材を高性能軽量骨材製造時に骨材表面に付着させることにより、骨材からのシリカの溶出を減少させる手法を考案した。本研究では、この手法で製造した高性能軽量骨材について、化学法および改良化学法による試験を実施し、骨材表面の改質効果を確認した。また、表面を改質した高性能軽量骨材について、PC 部材などで実際に適用される配合を想定したコンクリート供試体による ASR 判定性試験を行い、改質材による ASR 抑制効果について検討を行った。

*1 前田建設工業株式会社 技術本部技術研究所 技術開発土木グループ 工修 (正会員)

*2 財団法人鉄道総合技術研究所 事業推進室 構造物メンテナンス 工修 (正会員)

*3 財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 高性能軽量骨材および改質材の化学分析

軽量骨材表層部からのシリカの溶出が ASR の要因と考え、アルミナ系の改質材を骨材焼成時に骨材表層に付着させることで、シリカの溶出を減少させ、ASR を抑制する手法を考案した。焼成後の骨材表層部に改質材が付着していることを確認するため、高性能軽量骨材の表層部（粗骨材を摺り合わせて採取した試料）および内部（粗骨材を破碎した採取した試料）と改質材の加熱前および加熱後について X 線回折および蛍光 X 線分析を実施した。表 - 1 に分析に用いた試料の条件を示す。

2.2 化学法および改良化学法による ASR 試験

(1) 使用材料

化学法および改良化学法による試験に使用した人工軽量骨材は、表 - 2 に示すように、骨材 A（高性能軽量骨材）、骨材 B、骨材 C の 3 種類である。

(2) 試験方法

化学法は、JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）」に準じて実施し、改良化学法による試験は、JSCE-C511-2001「コンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性評価試験方法（改良化学法）（案）」に準じて実施した。なお、骨材表面の改質が ASR 特性に与える影響を検討するため、細骨材を規定の粒度（ $300\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ ）に篩い分けた試料を表層部試料とし、粗骨材を破碎して粒度調整した試料を内部試料とした 2 種類について試験を行った。

2.3 モルタルバー法による試験

(1) 使用材料

軽量粗骨材の ASR 評価を目的として、骨材 A および骨材 C の人工軽量粗骨材を用いてモルタルバー法による ASR 試験を行った。いずれの人工軽量骨材も規定された粒度の試料を得るために、粗骨材を 5 mm 以下の粒度に破碎して使用した。また、セメントは、普通ポルトランドセメント（密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、等価アルカリ量：0.48%）を使用し、アルカリ量の調整には、市販の $1\text{mol}/\text{l}$

表 - 1 X 線回折および蛍光 X 線分析試料

試料種別	試料部位・状態
骨材 A (高性能軽量骨材)	骨材内部
	骨材表層部
改質材	加熱前
	加熱（1100℃，3 時間）

表 - 2 化学法および改良化学法に用いた軽量骨材の種類

骨材名	主原料	骨材種類	破碎の有無
骨材 A (高性能)	河川堆積物	細骨材	無し
		粗骨材	有り
骨材 B	膨張頁岩	細骨材	無し
		粗骨材	有り
骨材 C	膨張頁岩	細骨材	無し
		粗骨材	有り

水酸化ナトリウム水溶液を用いるものとした。

(2) 試験方法

モルタルバー法は、JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）」に準じて実施した。また、規定のアルカリ量（1.2% = $5.5\text{kg}/\text{m}^3$ ）に加え、アルカリ量が 2.5、3.0、 $3.5\text{kg}/\text{m}^3$ となる供試体を製作し、モルタル中のアルカリ量が膨張特性に与える影響を検討した。

2.4 コンクリートによる ASR 試験

改質材を付着させた高性能軽量粗骨材（骨材 A）を用いてコンクリート供試体（ $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ ）を製作し、高性能軽量コンクリートのアルカリシリカ反応性を検討するために ASR 試験を行った。

(1) 使用材料および配合

使用材料およびコンクリートの配合を表 - 3 および表 - 4 に示す。セメントは、低熱ポルトランドセメント（密度： $3.22\text{g}/\text{cm}^3$ 、等価アルカリ量：0.38%）を用いるものとした。

(2) 試験方法

試験は、JCI-AAR-3-1987「コンクリートのアルカリシリカ判定性試験」に準じて実施し、規

表 - 3 コンクリートの使用材料

項目	記号	種類	物性値
水	W	上水道水	
セメント	N	低熱ポルトランドセメント	密度：3.22g/cm ³ ，比表面積：3360cm ² /g， 等価アルカリ量：0.38%
細骨材	S	木更津産山砂	表乾密度 2.59 g/cm ³ ，粗粒率 2.41
粗骨材	G	高性能軽量骨材：骨材 A	密度 1.17g/cm ³ ，24 時間吸水率 1.27%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エチル化合物と配向ポリマーの複合体
	AE	空気量調整剤	
水酸化ナトリウム	-	水酸化ナトリウム溶液	1mol/リットル水酸化ナトリウム水溶液

表 - 4 コンクリートの配合

配合名	組骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 <i>SP</i>	空気量調整剤 <i>AD</i>	アルカリ量
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>			
S40	15	40	5.5	48	167	418	806	394	4.18	0.013	2.40
C30	15	30	5.5	47	167	557	737	375	5.57	0.017	2.78
C40	15	40	5.5	48	167	418	806	394	4.18	0.013	2.09
C50	15	50	5.5	49	167	334	856	402	3.34	0.010	1.67

定のアルカリ量 (2.40kg/m³) とするために、水セメント比が 40% の配合 (S40) の練混ぜ水に水酸化ナトリウムを加えた。また、PC 構造物への適用を想定した単位セメント量が 557kg/m³ と多い配合 (C30) を含めて、水セメント比を変化させることで、コンクリート中のアルカリ量を 1.67kg/m³ (C50) , 2.09kg/m³ (C40) , 2.78kg/m³ (C30) とし、アルカリ量が膨張特性に与える影響を検討した。

3. 骨材改質効果確認のための化学分析

骨材 A 製造時に付着させる改質材の加熱前および加熱後の X 線回折結果を図-1 および図-2 に示す。また、改質材を付着させた骨材 A 表層部の X 線回折結果を図-3 に示す。

加熱処理前の改質材の主成分は Diaspore (AlO(OH))、アルミニウムの含水珪酸塩鉱物で粘土鉱物の一種である Kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄) および Rutile (TiO₂) である。この改質材を 1100 で 3 時間加熱すると、Diaspore (AlO(OH)) は Corundum (Al₂O₃) に変化し、Kaolinite からは Al₂O₃-SiO₂ 系の高温安

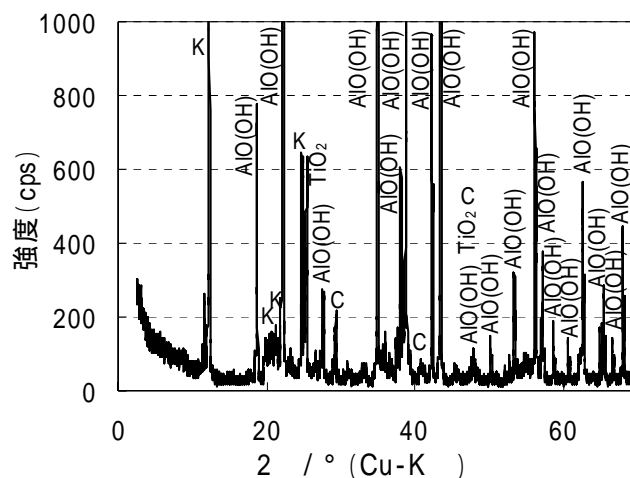


図 - 1 X 線回折結果 (改質材：加熱前)

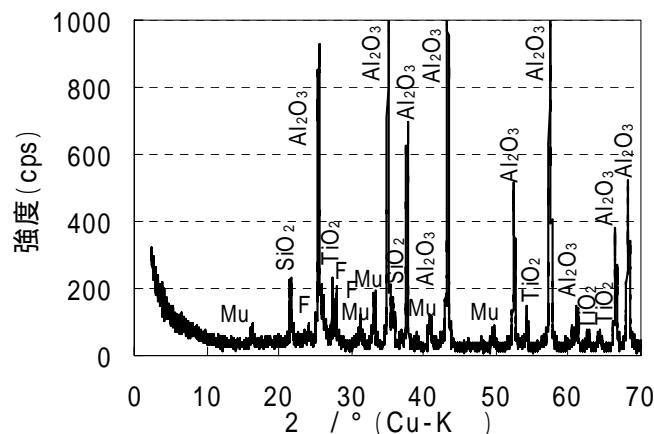
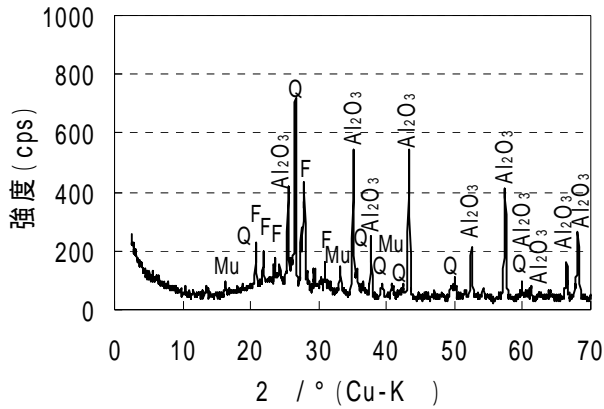


図 - 2 X 線回折結果 (改質材：加熱後)



K: Kaolinite($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), $AlO(OH)$: Diaspore,
 TiO_2 : Rutile, C: 炭酸カルシウム, Al_2O_3 :
 Corundum, SiO_2 : 高温型 Cristobalite
 Mu: Mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), Q: 石英, F: 長石

図 - 3 X線回折結果 (骨材 A : 表層部)

表 - 5 骨材 A の蛍光 X 線試験結果

	骨材 A 内部	骨材 A 表層部	
化学成分含有率 (%)	SiO_2	66.38	45.80
	Al_2O_3	16.74	36.24
	Fe_2O_3	2.57	4.98
	CaO	6.58	6.43
	MgO	1.08	0.83
	SO_3	0.15	0.26
	K_2O	3.35	1.85
	TiO_2	0.48	1.55
	P_2O_5	0.09	0.18
	MnO	0.09	0.08
	Cl	0.01	0.04

定化合物である Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) および高温型クリストバライト(C)が生成する。一方、粗骨材の摺り合わせにより採取した骨材 A 表層部の回折結果では、改質材を焼成した主成分である Corundum に加えて、骨材 A 内部の石英および長石が含まれている。このことより、溶解シリカ量を減少させる目的で付着させた改質材が、骨材表層部を粉体状で薄くコーティングした状態になっているものと推測される。

また、骨材 A 内部と表層部の蛍光 X 線による化学分析結果を表 - 5 に示す。骨材 A 内部に比

表 - 6 化学法結果一覧

骨材名	破碎 有無	S_c (mmol/l)	R_c (mmol/l)
骨材 A (高性能)	無し	117	93
	有り	172	80
骨材 B	無し	187	133
	有り	196	112
骨材 C	無し	342	272
	有り	244	131

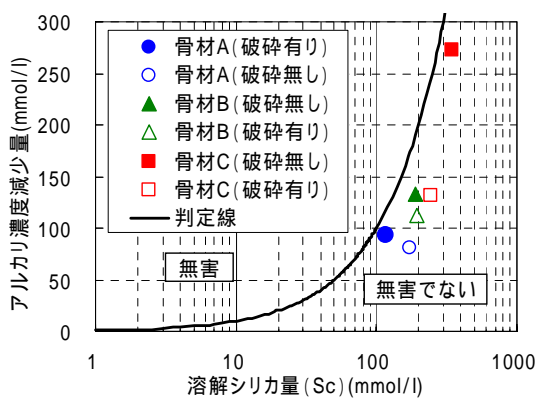


図 - 4 溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係

べて表層部は Al_2O_3 を多く含有しており、表層部に改質材が付着していることが確認された。

4. アルカリ骨材反応判定性試験結果

4.1 化学法および改良化学法による試験結果

(1) 化学法

化学法試験結果一覧および溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の関係を表 - 6 および図 - 4 に示す。

いずれの人工軽量骨材も溶解シリカ量がアルカリ濃度減少量を上回っており、通常骨材に対する基準では、「無害でない」の領域に位置する。しかし、3種類の骨材の内部試料(破碎有り)による結果を比較すると、骨材 A が溶解シリカ量およびアルカリ反応量ともに最も小さい値となった。また、骨材 B および C では、内部および表層部(破碎無し)の溶解シリカ量の減少はほとんど認められないが、骨材 A では、溶解シリカ量が減少する傾向が認められ、改質材の付

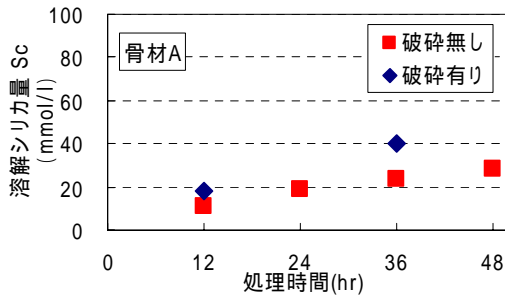


図 - 5 溶解シリカ量と処理時間の関係

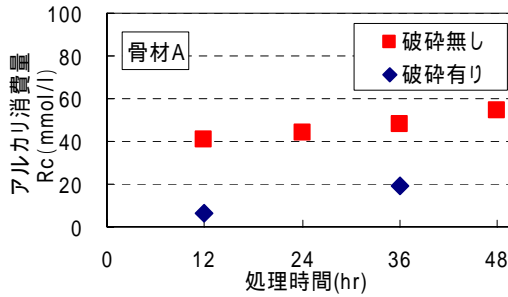


図 - 6 アルカリ消費量と処理時間の関係

着によって溶解シリカ量が減少したものと考えられる。

(2) 改良化学法

骨材 A に関して、溶解シリカ量およびアルカリ濃度減少量と処理時間の関係を図- 5 および図- 6 に示す。

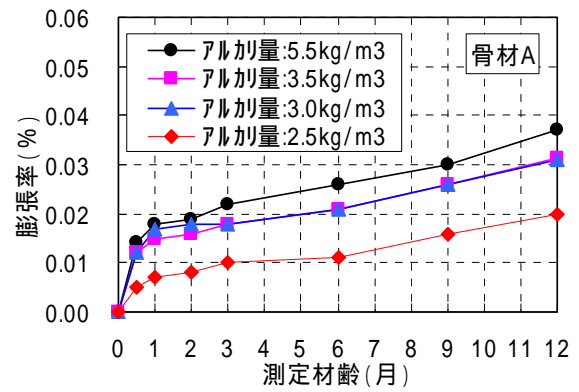
破碎有りの方が浸漬時間によらず溶解シリカ量は小さくなるものの、アルカリ濃度減少量は大きくなっている。これは、改質材を表面にコーティングしたことにより、骨材から溶解するシリカ量が減少するとともに、表層部の Al_2O_3 が増加したため、アルカリが Al_2O_3 の溶解に多く消費されたためと考えられる。

4.2 モルタルバー法による試験結果

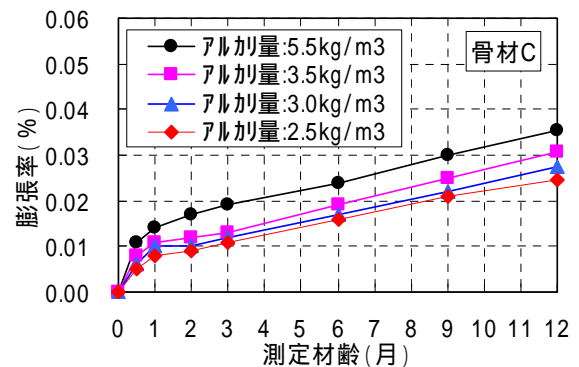
図 - 7 に測定材齢と供試体の膨張量の関係を示す。

いずれの軽量骨材を用いた場合も、モルタル中のアルカリ量の増加に伴い、膨張量は増加する傾向が認められるものの、6ヶ月の判定結果では、「無害」の判定結果となった。また、長期材齢の12ヶ月の試験結果においても、膨張量は、0.035%程度であった。

しかしながら、モルタルバー法による供試体

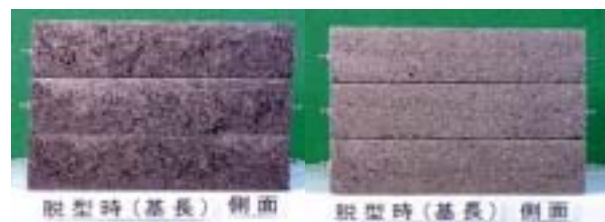


(a) 骨材 A (破碎試料)



(b) 骨材 C (破碎試料)

図 - 7 モルタルバー法の測定材齢と膨張量の関係



(a)骨材 A

(b)骨材 C

写真 - 1 モルタルバー法供試体外観

の配合は、質量比で決定されるため、軽量骨材を用いた場合は、通常の天然骨材を用いた配合と比較して、骨材の容積が極端に多くなる。そのため、写真 - 1 に示すようにモルタル供試体が粗な状態となり、アルカリシリカゲルによる膨張が生じた場合であっても、膨張量が緩和される可能性が考えられる。すなわち、ASR 評価をモルタルバー法で人工軽量骨材に適用することを JIS が対象外としているように、本試験により軽量粗骨材の ASR を判定することは適切でないと考えられる。

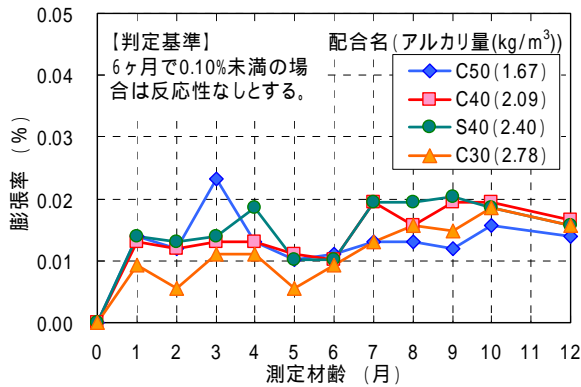


図 - 8 コンクリート供試体による測定材齢と膨張量の関係

また、今回の試料のように粗骨材を破碎して試験を実施した場合には、表層部試料と骨材内部試料が混合された試料となるため、改質材の効果が現れず、骨材種類による差も生じなかった。

4.3 コンクリート供試体の ASR 判定性試験

コンクリート法における測定材齢と膨張量の関係を図 - 8 に示す。

同一配合（同一骨材量）でコンクリート中のアルカリ量が違う S40（アルカリ量 2.40kg/m^3 ）および C40（ 2.09kg/m^3 ）では、膨張量に大きな違いは認められない。また、単位セメント量が 557kg/m^3 でアルカリ量が最も大きい C30（ 2.78kg/m^3 ）の場合であっても、膨張率は 6 ヶ月で 0.1% よりもかなり小さい値となった。すなわち、本研究の範囲内では、アルカリ量の違いによって、膨張量に顕著な違いは認められず、いずれの配合も「反応性なし」となった。

したがって、単位セメント量が多い配合であっても、高性能軽量骨材製造時に改質材を骨材表層に付着させることで、アルカリ骨材反応を生じることなく、PC 構造物などの実構造物への適用が可能であると考えられる。

5 まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- (1) 高性能軽量骨材の焼成工程において改質材を添加することで、骨材表面を改質材でコー

ティングすることが可能である。

- (2) 骨材表面に改質材を付着させることで、骨材内部試料に比べて、溶解シリカ量が減少する。
- (3) モルタルバー法による ASR 試験では、試料調整における骨材の破碎および質量比による配合上の問題により、適切に ASR の判定ができなかった。
- (4) 高性能軽量コンクリートによるアルカリシリカ判定性試験では、規定アルカリ量 (2.40kg/m^3) よりもアルカリ量が多い配合 (2.78kg/m^3) であっても、有害な膨張を生じおらず、いずれの配合も「反応性なし」と判定された。
- (5) 高性能軽量骨材製造時に改質材を骨材表層に付着させることで、ASR を抑制できる可能性があることがわかった。

今後は、改質材の添加量を増やして改質効果を確認するとともに、外部からアルカリが供給される環境条件を想定して、デンマーク法による試験を実施する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、財団法人鉄道総合技術研究所材料技術研究部コンクリート材料の佐々木孝彦博士、株式会社ネオマテリアルの木村薫氏に多大なるご指導、ご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉山彰徳，鳥居和之，本田貴子，石川雄康：人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1381-1386，2005.6
- 2) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか《試験，診断と対策の課題》，セメント・コンクリート，No.696，pp.1-9，2005.2
- 3) 松田芳範，津吉 毅，石橋忠良：軽量骨材コンクリートを用いた実構造物の調査報告，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 4 巻，pp.183-188，2004.10
- 4) 2005 年制定コンクリート標準示方書【規準編】，土木学会，2002