

論文

[1128] 超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究

正会員 尼崎 省二 (立命館大学理工学部)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化・損傷が社会問題となるとともに、コンクリートの非破壊試験および品質評価方法の確立に関心が持たれている。非破壊試験結果から何等かの診断を下すには、試験方法が診断目的に合致していると同時に、コンクリートの品質あるいは品質変化が試験結果に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

コンクリートの品質低下の一因であるアルカリシリカ反応 (ASR) を超音波法 (音速) で評価する場合には、ASRによる損傷が超音波パルス伝播速度にどの程度影響するかを検討することが必要となる。実構造物におけるアルカリ骨材反応の変状調査結果によれば、ASRを起こしたコンクリート構造物の音速は3.5 km/s以下になるとの指摘がなされている^{1,2)}。しかしながら、これらの報告はASR損傷が顕著になった時点での測定結果であり、ASR損傷構造物の補修の観点からは、より早い段階でASRを発見することが必要である。アルカリ骨材反応によるコンクリートの物性変化の研究は比較的小さい供試体を用いた例が多く³⁻⁵⁾、音速の低下は実構造物ほど大きくないのが現状であり、音速により適切に非破壊評価をするには、さらにデータを積み重ねる必要があると思われる。

本研究は、コンクリート構造物のASR損傷の超音波法による非破壊評価方法の基礎的データを得るために、大小2種類の鉄筋コンクリート供試体を用いて、ASRによる膨張ひずみと音速の関係および残存膨張量測定のためのコア採取時の膨張量変化を検討したものである。

表1 コンクリートの示方配合

2. 実験の概要

2.1 使用材料

材料は、セメントが普通ポルトランドセメント (等価Na₂O=0.54%)、細骨材が野洲川産川砂 (比重2.59, 吸水率1.89%, FM=2.57)、反応性粗骨材が豊

島産古銅輝石安山岩 (比重2.55, 吸水率1.54%, FM=6.61)、非反応性粗骨材が高槻産硬質砂岩碎石 (比重2.69, 吸水率0.72%, FM=6.64) である。反応性粗骨材の使用量はベシマム量と考えられている50% (容積比) とした。コンクリートの示方配合を表1に示す。なお等価Na₂OはNaCl (純度99.5%) を用いて8.0 kg/m³とした。

2.2 供試体

供試体は、実橋梁の全断面鉄筋比およびその1/2にほぼ等しい鉄筋比 $p_1=1.43%$ (スターラップ比 $p_2=0.2%$: 供試体A₁) および $p_1=0.71%$ ($p_2=0.1%$: 供試体B) の2種類の鉄筋および無筋コンクリート (供試体C) の立方体とし、一辺の長さ60および20 cm のものを作製した。非反応性コンクリートはA₁と同じ鉄筋量 (供試体A₂) とした。60 cm 立方体は一つの供試体でひずみおよび音速の測定が可能であるが、20 cm 立方体は困難であるため、ひずみ測定用と音速

配合の種類	MS (mm)	スラブ° (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						W	C	S	GN	GR
反応性	20	1~10	4.5±1	50	43	176	352	735	486	512
非反応						165	330	755	1052	0

GN: 非反応性粗骨材, GR: 反応性粗骨材

測定用の2体を同時に作製した。供試体の配筋、ひずみおよび音速の測定位置の一例を図1に示す。鉄筋コンクリート供試体での測定位置はすべて同じである。また60 cm 供試体は、主鉄筋間心までのかぶり150 mmの場合の実験結果⁶⁾との比較を行ない、主鉄筋間隔が膨張および音速に及ぼす影響を検討した。ひずみ測定には、温度計測も可能な埋込み型ひずみ計（標点距離100 mm）を使用し、膨張量におよぼす温度の影響を除去した。埋込み型ひずみ計によるひずみは型わく脱型時のひずみを基準とした。

供試体は、材令2日で脱型、材令2週までの散水養生後、室内に保存をしてから材令28日から60 cm 立方体の音速が大きく変化しなくなるまで促進養生を行った。促進養生後、コア採取までは、室内保存とした。促進養生は、養生室内に設置した水槽内の水のヒータ加熱および自然冷却により行なった。すなわち加熱後96時間で加熱を停止して、自然冷却とし、168時間で再加熱するまでを1サイクルとした。加熱時の温度制御は、温度センサーを $40 \pm 2^\circ\text{C}$ にセットして行ない、送風機による空気の循環を行なった。1サイクルの最終日に立方体の音速およびひずみ、円柱および角柱供試体の音速および動弾性係数を測定した。

促進養生終了後、60 cm立方体のひずみ計埋設位置と12.5 cm離れた位置から $\phi 10$ cm、20 cm立方体はひずみおよび音速測定用の各供試体から、それぞれ、 $\phi 7.5$ cmのコアを採取し、コア採取時のひずみ変化および音速を測定し、最後にコアおよび円柱供試体の圧縮強度試験を行なった。

2. 3 音速の測定

供試体の音速は受振波観察方式⁷⁾により測定した。使用した振動子は、ジルコン・チタン酸鉛セラミック（ $\phi = 5$ cm、半波長共振周波数=95.7 KHz、電気機械結合係数 $k = 68\%$ ：PZT-7）をステンレス製枠に入れたもので、共振周波数は42.3 KHzである。超音波の放射は発振子に1200 Vの直流を印加し、 $0.5 \mu\text{s}$ で放電する方式を採用した。またコア採取時には、市販の飽和増幅方式による測定も行ない、測定方法による音速の相違についても検討した。

3. 実験結果および考察

3. 1 コンクリートの力学的特性

コンクリートの力学的特性を表2に示す。表2の円柱供試体採取時とは、コアと同じ材令での測定値の意味である。反応性と非反応性の材令28日の特性はほぼ同様であるが、ASRによりコンクリートの圧縮強度は、円柱供試体が非反応性コンクリートの約70%、コアが約1/2で、コア強度の低下が著しい。またヤング係数はほぼ40~50%、動弾性係数はほぼ50~60%であり、ASRを受けたコアコンクリートの特性は実構造物の特性¹⁾とほぼ同じ傾向にある。

ASRを受けたコンクリートの力学的特性はばらつきが大きく、円柱供試体のヤング係数の最大値は 2.23×10^5 kgf/cm²、最小値は 1.05×10^5 kgf/cm²、動弾性係数の最大値は 2.81×10^5 kgf/cm²、

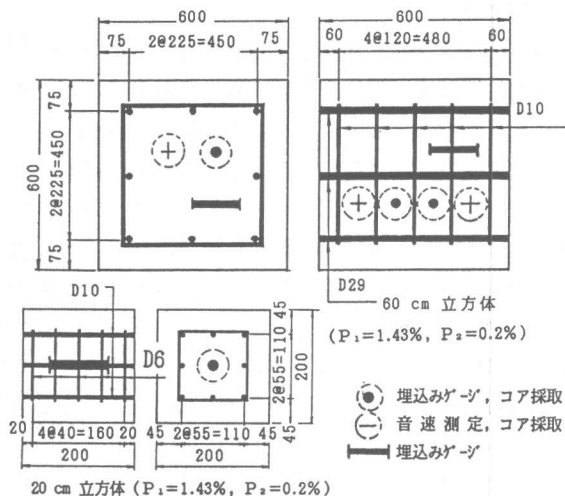


図1 供試体の配筋、ひずみ測定位置の一例

最小値は 1.89×10^5 kgf/cm²であった。

表2 コンクリートの力学的特性

配合 の 種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)				ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)				動弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)			
	円柱供試体		コア		円柱供試体		コア		円柱供試体		コア	
	28日	採取時	①	②	28日	採取時	①	②	28日	採取時	①	②
非反応	415	608	496	484	3.26	4.16	3.31	3.43	4.09	4.53	3.81	4.25
反応性	410	415	285	261	3.21	1.59	1.22	1.60	3.98	2.28	2.18	2.53
比率%	99	69	53	53	98	38	37	47	97	50	57	59

J7①は60 cm, J7②は20 cmの無筋立方供試体から採取, J7①は3供試体の平均値
比率: 反応性コンクリートの特性の非反応性特性に対する比率

3.2 促進養生中の膨張特性

図2は, 促進養生中のコンクリート温度および膨張量の変化の一例で, ASR膨張がかなり進行した促進材令16週後の2週間について, 1時間毎に測定した60 cm立方体の主鉄筋方向の結果である。前半1週と後半との温度および膨張量の変化は異なっており, 促進養生によるASR膨張機構の複雑さがうかがえる。図からひびわれの最も多い無筋供試体Cは, 昇温速度が早く, 最高温度は最も大きい。一方, ひびわれのない非反応性供試体は, 昇温速度が遅く, 最高温度は最も低くなっている。環境温度が供試体内部温度に及ぼす影響は明らかではないが, コンクリートの熱拡散率(空気のほぼ1/70)が小さいため, ひびわれにより供試体内部の温度上昇が早くなるとともに, 水分の供給が容易になり, ASR膨張が促進されたものと思われる。

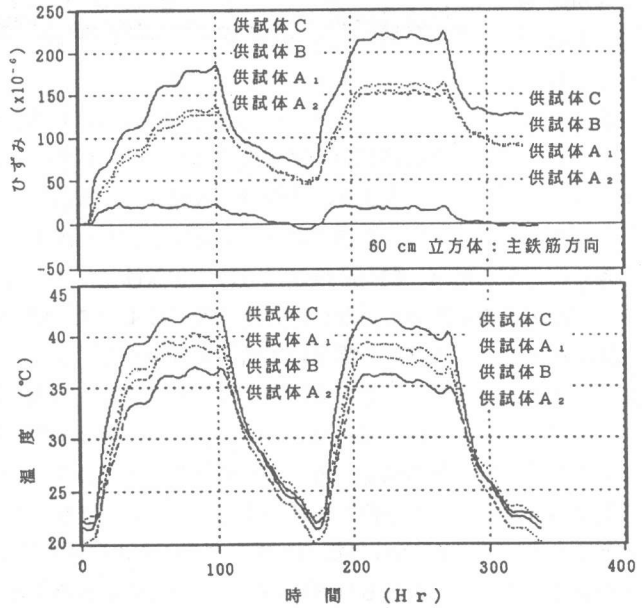


図2 促進養生中のコンクリートの温度, ひずみ変化

鉄筋比の異なる供試体A₁とBに大きな差がなく, 温度とひずみの大小関係が逆になっているのは, 60 cm立方供試体の主鉄筋が短かいため, 十分に膨張拘束をしなかったためと思われる。

本実験での一サイクルの促進温度変化による膨張量は $50 \sim 70 \times 10^{-6}$ 程度である。加湿時の非反応性供試体A₂が膨張しているように, 加湿時の膨張には湿潤膨張が含まれているが, 後述の膨張量は供試体が外気温に自然冷却されたときのものであり, 湿潤膨張の影響はないと考えられる。

なお本研究では, NaClにより等価Na₂Oを 8.0 kg/m³としたため, Clイオンによる鉄筋腐食が懸念されたが, 主鉄筋端部に錆汁は認められたものの, 鉄筋腐食が原因と思われる鉄筋に沿ったひびわれは認められなかった。

3.3 供試体のひずみ変化

図3に供試体にASR膨張の経時変化を示す。20 cm 立方体は促進養生1週間で膨張を開始しているが、60 cm 立方体は促進養生3週間後から膨張をはじめており、供試体の大きさがASR促進膨張に影響することが示され

ている。これは、コンクリートの熱拡散率の低さが原因していると思われる。

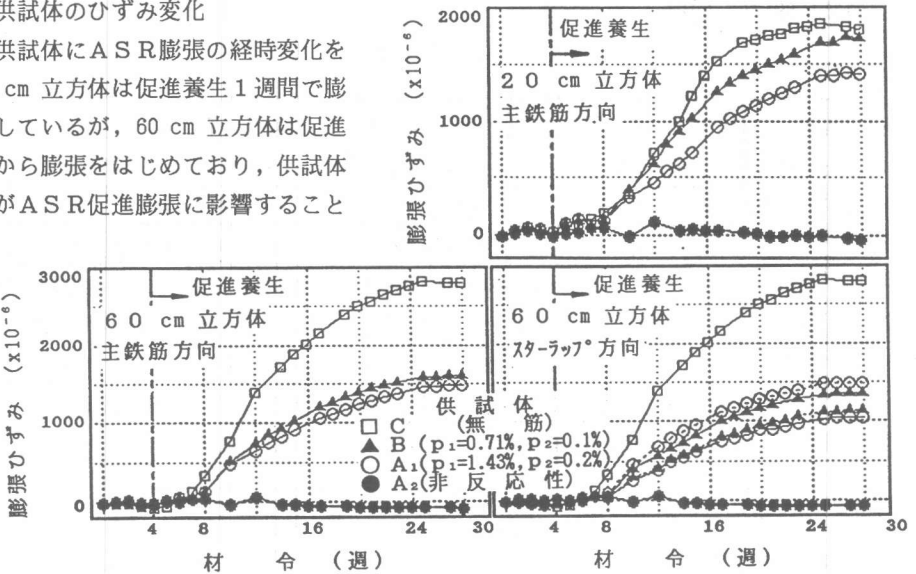


図3 供試体のASR促進膨張の変化

60 cm 立方供試体C(無筋)の膨張量は 3000×10^{-6} 程度で、20cm立方体より約 1000×10^{-6} 大きい。鉄筋コンクリート供試体の膨張量は供試体による差はほとんどなく、 1500×10^{-6} 程度である。

鉄筋量の膨張に及ぼす影響は20 cm 立方体の方が明瞭で、鉄筋量の増大とともに膨張ひずみは小さくなっているが、60 cm 供試体では、主鉄筋量による膨張量の変化はほとんどなく、スターラップ比の影響も生じていない。これは前述のように、60 cm 立方体の主鉄筋間隔が大きく、供試体が短いことが主鉄筋の膨張拘束効果を低減させ、またスターラップ比が0.2および0.1%と小さいことがスターラップ方向の膨張に影響しなかった原因と思われる。また60 cm 立方体のスターラップ方向ひずみは、僅か12.5 cm の隔たりであっても、 500×10^{-6} 程度の差があり、促進養生によるASR膨張量は測定位置により異なることがわかる。

供試体寸法による主鉄筋および主鉄筋方向のコンクリートひずみの相違を図4、5に示す。図4と5から、20 cm立方体の鉄筋とコンクリートのひずみはほぼ等しいが、60 cm立方体の鉄筋ひずみはコンクリートよりもはば 1000×10^{-6} 小さい。またかぶりすなわち主鉄筋間隔の膨張量に及ぼす影響が顕著であり、かぶりが小さく、主鉄筋間隔が大きくなると、膨張ひずみが大きくなっている。これは、前述のように、主鉄筋の膨張拘束効果が少なかったことが原因と思われる。

3.4 ASR膨張と音速との関係

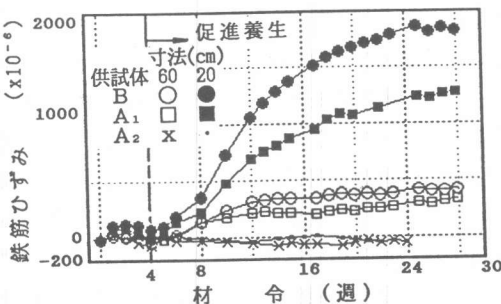


図4 主鉄筋ひずみの変化

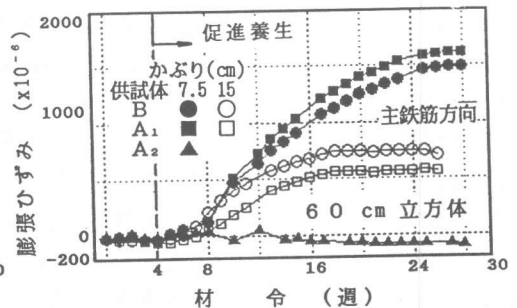


図5 主鉄筋方向ひずみに及ぼすかぶりの影響

図6および7に、それぞれ、60および20 cm 立方体のASR膨張と音速の関係を示す。60 cm 立方体の音速は膨張とともに、膨張が大きいほど大きく低下し、4600 m/s程度から3700 m/s程度へ約20%低下している。一方20 cm 立方体では、4800 m/s程度から4400 m/sへせいぜい8%程度の低下であり、必ずしも膨張量と対応していない。非反応性供試体A₂の音速は60 cm 立方体が4.6km/s、20 cm 立方体が4.9km/sであるから、鉄筋が音速に影響したことは明らかであるが、ASR後の20 cm 立方体と健全な60 cm 立方体の音速には大きな差はない。したがって、構造物の音速測定によるコンクリートの品質評価にあたっては、鉄筋の影響を考慮するか、あるいは音速の経時変化から品質変化を評価する必要があると思われる。

3.5 コア採取時の影響

図8は20 cm 立方体のコア（直径7.5 cm）

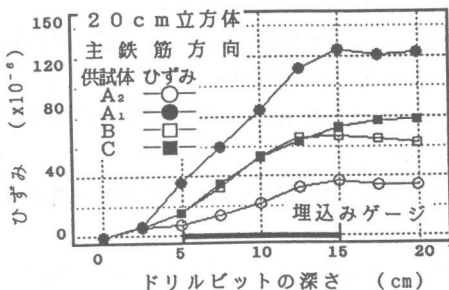


図8 コア採取時の瞬間解放膨張

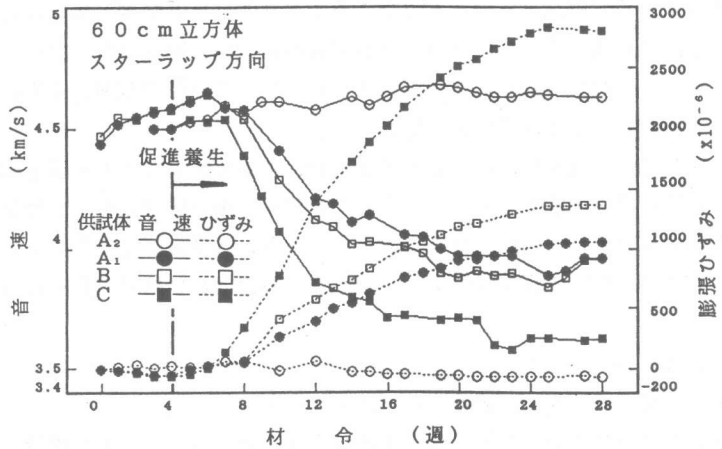


図6 ASR膨張と音速の関係 (60 cm 立方体)

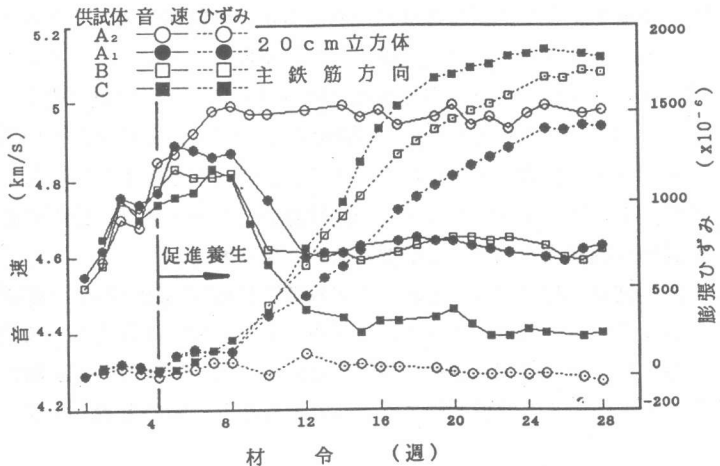


図7 ASR膨張と音速の関係 (20 cm 立方体)

供試体	60 cm 立方体 (m/s)				20 cm 立方体 (m/s)			
	供試体		コア		供試体		コア	
	波形	飽和	波形	飽和	波形	飽和	波形	飽和
A ₁	3730	3510	3640	3430	4640	4330	4460	4100
		3920	3640	3760	3600			
B	3720	3430	3930	3400	4620	4400	4580	4210
		3950	3690	3750	3540			
C	3610	3460	3480	3300	4210	4120	4240	4140
A ₂	4610	4530	4590	4520	4880	4770	4910	4760
		4590	4500	4620	4520			

60 cm 立方体の下段はスタラップ方向の測定

採取時の瞬間解放膨張量の変化である。ドリルビットが深くなるとともにコアが膨張し、鉄筋による膨張拘束の大きな供試体ほどコア採取時の瞬間解放膨張が大きくなっている。非反応性供試体A₂にも膨張(40x10⁻⁶以下)が生じているが、乾燥収縮ひずみの鉄筋による拘束の解除あるいは冷却水による湿潤膨張と思われる。

表3にコア採取時の供試体とコアの音速の測定装置による相違を示す。一般に、飽和増幅方式の音速は受振波観察方式よりも遅くなる⁷⁾が、供試体が大きく、コンクリートが劣化するほど、飽和増幅方式による速度低下が大きい。また、ASR膨張を生じたコアの音速は供試体よりも低下するが、低下の程度は鉄筋による膨張拘束が大きいほど大きくなっている。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) ASRによる強度低下は、供試体よりもコアコンクリートが著しく、コア強度は1/2程度に低下する。またASRを受けたコンクリートの弾性係数はばらつきが大きい。
- (2) 促進養生による膨張特性は複雑であるが、供試体が大きくなると、ASR膨張は測定位置により異なる。また小さい供試体ほど内部温度の上昇が早く、劣化も早い。さらにひびわれの発生によりコンクリート内部の温度上昇が早くなり、劣化が加速される。
- (3) 同じ鉄筋比であっても、鉄筋間隔が小さいほどASR膨張拘束効果は大きくなるが、音速に及ぼす鉄筋の影響が大きくなり、ASR膨張によっても音速の低下は大きくなる。構造物の音速測定によるコンクリートの品質評価にあたっては、鉄筋の影響を考慮するか、あるいは音速の経時変化を測定する必要があると思われる。
- (4) 膨張拘束の程度にもよるが、コア採取時には100x10⁻⁶程度の膨張が生じ、ASR膨張を生じたコアの音速は供試体よりも低下する。低下の程度は音速測定装置によって異なる。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金〔総合研究(A)、課題番号01302041、研究代表者/小柳 治、岐阜大学教授)によったことを付記し、謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 岡田 清, 「コンクリート構造物のアルカリ骨材反応による変状」, 材料, 第35巻, 第397号, 昭和61年10月, pp.1-11
- 2) 二村誠二, 福島正人, 「アルカリ・シリカ反応による劣化コンクリート建物の一調査」, セメント技術年報, 第40巻, 昭和61年, pp.292-295
- 3) 田村 博, 高橋利一, 五十嵐千津雄, 「生コンクリートのアルカリ骨材反応早期判定試験方法に関する一実験」, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986, pp.177-180
- 4) 鈴木宏信, 小林茂広, 中野錦一, 「反応性骨材を用いたコンクリートの膨張におよぼす養生条件および供試体形状の影響」, セメント技術年報, 第41巻, 昭和62年, pp.395-398
- 5) 中野錦一, 小林茂広, 中上明久, 「アルカリシリカ反応による損傷度とコンクリートの諸物理特性との関連性の検討」, セメント技術年報, 第41巻, 昭和62年, pp.419-422
- 6) 尼崎省二, 「アルカリ骨材反応の非破壊試験評価」, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第V部, 平成元年, pp.16-17
- 7) 尼崎省二, 「耐久性診断と非破壊検査方法—超音波」, コンクリート工学, Vol.26, No.7, July, 1988, pp.120-122