論文　アルカリ骨材反応を生じたコンクリート部材の弾性波法による品質評価について

森　寛晃[*1]・小川　彰一[*2]・久保　善司[*3]・渡邉　悠輔[*4]

要旨：拘束下で ASR を生じたコンクリートの品質，ならびに部材としての性能を評価するため，鉄筋による拘束を模擬した 3 軸拘束供試体を作製し，これを促進 ASR 膨張させた後に，鋼球打撃による振動計測を行って動弾性係数を算出した。その結果，3 軸拘束下のコンクリートにおいて ASR が生じると，最終的には自由膨張供試体とほとんど変わりない体積ひずみが生じて動弾性係数が低下することが分かった。また，拘束方向によって生じる膨張異方性により，たわみ振動計測で求めた動弾性係数は低下率が大きくなること，拘束供試体の軸方向の縦弾性波速度は，同じ膨張レベルの自由膨張供試体の速度と変わらないことなどが分かった。

キーワード：アルカリ骨材反応，3 軸拘束，たわみ振動，縦振動，動弾性係数，縦弾性波速度

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下，ASR とする)を受けるコンクリート構造物は，鉄筋で拘束されるほか，上載荷重やプレストレス力など応力作用下で拘束を受ける。鉄筋拘束の影響に関する検討[1), 2)]はこれまでにも行われているが，構造物内のコンクリートの拘束状態を再現するのは難しく，一般に単純にモデル化した供試体を用いてコンクリート品質が評価されている。

ASR を生じたコンクリート品質を非破壊的に評価する手法に超音波法があり，伝播速度や周波数スペクトルを用いる方法など種々検討はされているが，テストピースでの検討，部材レベルでの検討[3)]，採取コアや実構造物での計測[4), 5)]などで得られる結果が異なり，部材の構造性能を評価するには至っていないのが現状である。

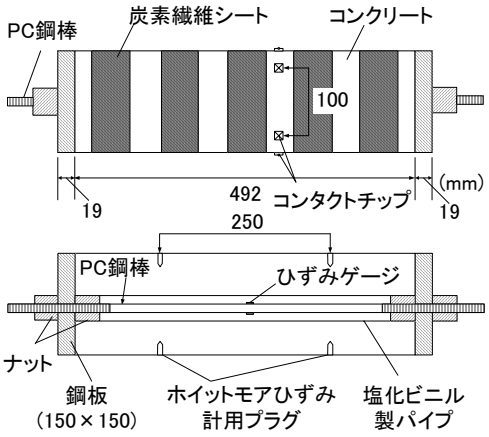
コンクリートの物理的特性を表す指標として動弾性係数があり，JIS やコンクリート示方書に規定されている。これは振動の周波数をスイープさせ，共鳴振動が生じる時の振動数を求める手法である。鋼球で打撃してマイクロフォンで振動を計測する打音法[6)]や衝撃弾性波法でも同等の計測が可能とされている。これらの弾性波法は，他の非破壊試験法と比較して，直接，コンクリートの物理的特性，すなわち動弾性係数や動せん断弾性係数と結びついており，単なるひび割れ深さなど欠陥検知やコンクリート床版厚さ測定に加え，コンクリートの部材としての性能をも評価できる可能性がある。

本研究では，拘束下で ASR を生じたコンクリートの品質，ならびに部材としての性能を評価するため，鉄筋による拘束を模擬した供試体を作製し，これを促進 ASR 膨張させた後に，鋼球打撃による振動計測を行って動弾性係数を算出した。

2. 実験概要

2.1 拘束供試体の概要

鉄筋で囲まれた内部のコンクリートを模擬するため，軸方向を PC 鋼材，軸直交方向を炭素繊維シートにより拘束を与えたコンクリート供試体(コンクリート寸法 150×150×492mm)を作製した。**図－1** に示すように，コンクリート断面中央の塩化ビニル製パイプ(内径 25mm，外径 32mm)内に PC 鋼材を配置し，両端の鋼板をナットにより固定した。コンクリートが膨張すると，鋼板を介して PC 鋼材に引張力が導入され，その反作用によってコンクリートは圧縮力を受ける。



図－1　拘束供試体

*1 太平洋セメント（株）　中央研究所　補修診断チーム　工修　(正会員)
*2 太平洋セメント（株）　中央研究所　補修診断チーム　薬修　(正会員)
*3 金沢大学工学部　土木建設工学科　(正会員)
*4 金沢大学大学院　自然科学研究科　社会基盤工学専攻　（非会員）

表－1　使用材料

材料		種類	記号	物性
セメント		普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm^3，全アルカリ 0.52%
細骨材		陸砂	S	表乾密度 2.62g/cm^3
粗骨材		安山岩砕石	G	表乾密度 2.68g/cm^3，吸水率 1.48%，アルカリシリカ量 Rc=130mmol/l，溶解シリカ量 Sc=519mmol/l
混和剤	減水剤	ポゾリス NO.70	AD	4 倍液にて添加
	AE 剤	マイクロエア 775S	AE	1A=C×0.002wt.%
水		上水道水	W	20℃室内に 24 時間以上静置
アルカリ		水酸化ナトリウム	―	特級試薬

表－2　コンクリート配合

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m^3)				
				W	C	S	G	NaOH
50.0	44.0	4.0±1.5	12±2.5	168	336	790	1029	8.6

(1) **使用材料とコンクリート配合**

セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は非反応性の陸砂，粗骨材には反応性砕石(化学法の結果，無害でない)を用いた。水セメント比は 50%とし，ASR を促進させるため等価アルカリ量が 8.6kg/m^3(C×2.5%に相当)となるように NaOH を練混ぜ水に添加した。粗骨材の最大寸法は 20mm である。本実験に使用した材料を**表－1** に，コンクリート配合を**表－2** に示す。

(2)**軸方向の拘束**

鋼材φ9.2，φ15，φ19 およびφ26mm(引張強度 1250～1330N/mm^2，弾性係数 205～208kN/mm^2)を使用することで軸拘束筋比 4 水準(0.30%，0.80%，1.29%，および 2.37%)の供試体を作製した。このほか，異形鉄筋 D10 を配置した供試体(拘束筋比 0.28%)を作製した。

(3)**軸直交方向の拘束**

横拘束には，鉄筋と同等の弾性率を有する炭素繊維シート(繊維目付 300g/m^2，公称厚さ 0.167mm，引張強度 3400 N/mm^2，引張弾性率 245 kN/mm^2)を用いた。シートの貼付けには，エポキシ系のプライマーおよび含浸樹脂を用いた。横拘束量は，平成 8 年度以前のコンクリート標準示方書(耐震設計編)の最低レベルに相当する 0.2%を標準としたが，比較のため横拘束のない供試体を作製した。以上，拘束供試体の水準をまとめて**表－3** に示す。なお，拘束しない自由膨張供試体(A0)およびアルカリを添加しない供試体(NA0)を比較用として用意した。

(4)**促進 ASR 養生方法**

シートに含浸させた樹脂が硬化した後，よく絞った湿布で供試体をくるみ，その上からラップを巻付け，温度 40℃，湿度 98%の恒温室内にて促進 ASR 養生を行った。

表－3　供試体一覧

供試体名	軸鉄筋(拘束筋比)	横拘束量 (%)	アルカリ添加
NA0	なし(0.0%)	0.0	なし
A0	なし(0.0%)	0.0	あり
A2-0	PC 鋼材φ9.2 (0.30%)	0.0	
A2		0.2	
A8-0	PC 鋼材φ15 (0.80%)	0.0	
A8		0.2	
A12-0	PC 鋼材φ19 (1.29%)	0.0	
A12		0.2	
A24-0	PC 鋼材φ26 (2.37%)	0.0	
A24		0.2	
A2D-0	異形鉄筋 D10 (0.28%)	0.0	
A2D		0.2	

2.2 コンクリート表面の長さ変化と鋼材ひずみの測定

軸方向の長さ変化は，供試体側面に埋設したゲージプラグ間をホイットモアひずみ計(基長 250mm)により，また，軸直交方向の長さ変化は，供試体中央の打設底面を除く 3 面に貼付したゲージプラグ間をコンタクトゲージ(基長 100mm)により計測した。促進養生開始直後から 49 日までは 7 日ごとに，それ以降は 14 日から 28 日ごとに行い，促進材齢 150 日以降は，数ヶ月ごとに計測を行った。なお，計測は供試体を 20℃恒温室へ移動し，コンクリート供試体の温度が 20℃前後に安定してから行った。

PC 鋼棒のひずみは，鋼材中央の両側面に貼付したひずみゲージにより計測した。

2.3 弾性波法による計測

拘束下で ASR を生じたコンクリートの材質劣化を調べるため，促進養生中に透過法による超音波パルス速度の計測を行った。また，膨張が収束した段階において，ASR を生じた部材剛性や弾性率を評価するため，鋼球打撃による振動計測を行った。

(1) **超音波法による伝播速度計測**

軸直交方向の伝播速度計測は，シートを巻いていないコンクリート面 3 箇所で超音波パルス法を用いて行った。計測箇所を**図－2** に示す。弾性波の発振，受振には AE センサ(共振周波数 15kHz，振動子φ25mm)を使用し，シリコングリスを介して供試体に密着させた。パルサ(立ち上り時間 20ns，印加電圧 375V)により矩形パルス波を発振側センサに入力し，これを反対側の AE センサで受振して，波形到達時間差を読み取った。計測条件はサンプリング間隔 1μs，記録長 2.5ms とした。なお，ノギスに

より透過距離を測定し，パルス透過速度を算出した。

(2) **鋼球打撃による振動計測**

JIS A 1127 に規定される共鳴振動による動弾性係数試験方法を参考に，拘束供試体のたわみ振動の共振周波数を求めた。**図－2** に示すように，たわみ 1 次共振の節位置(全長 L，端部から 0.224L)で支持された供試体の長手方向中央部をφ20mm の鋼球で打撃し，供試体上面の端部に取り付けた加速度センサ(共振周波数 20kHz)で振動を計測した。サンプリング間隔は 12.5μs，FFT 変換におけるデータ数は 4096 とした。なお，事前にφ15mm とφ25mm の鋼球でも同様の計測を行い，たわみ共振と思われる明瞭な共振周波数が現れることを確認した。また，支持条件はたわみ振動のまま供試体端部を鋼球で打撃し，反対側端部でピックアップを行い，いわゆる縦振動に対応した振動計測も実施した。

2.4 小型供試体の共鳴法による動弾性係数測定

φ10×20mm の円柱供試体を作製し，拘束供試体と同様に促進 ASR 養生を行った。所定の材齢において JIS A 1127 に準拠した共鳴法による動弾性係数の計測および鋼球打撃による縦弾性波速度の計測[7]を実施した。

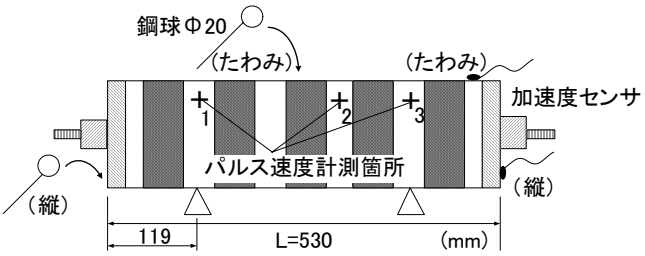
3. 実験結果および考察

3.1 拘束下における ASR 膨張特性

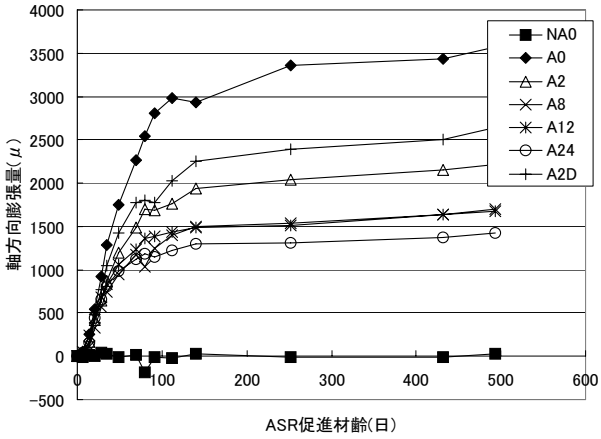
(1) **膨張量と拘束筋比の関係**

各供試体の ASR 促進材齢約 500 日までの軸方向および軸直交方向の膨張量変化を**図－3** および**図－4** に示す。いずれの方向でも ASR 促進養生の開始とともに急激に膨張量が増加した。軸方向に関しては，拘束のない自由膨張供試体 A0 の膨張量が最も大きく，最終的に 3500μに達した。軸拘束筋比 0.80%～2.37%の供試体は，膨張が大幅に抑制され，最終的に A0 よりも約 2000μ程度小さくなった。一方，軸直交方向の膨張量は，いずれの供試体も軸方向より大きく，最終的に 4000μに達した。特に，軸拘束筋比が最も大きい A24 は 5500μに達した。

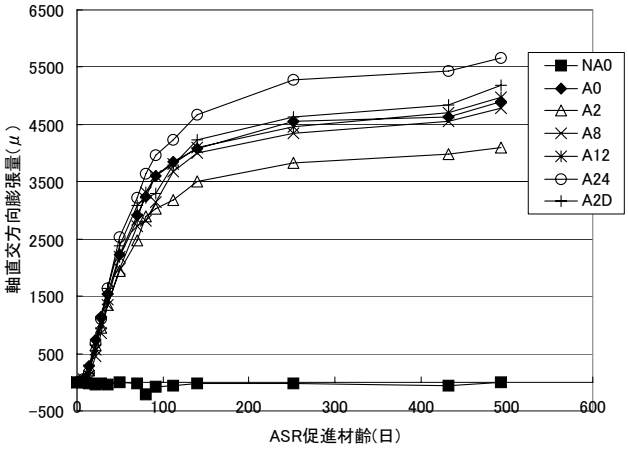
鉄筋拘束の影響を検討した既往の検討[1), 2)]では，0.4～0.7%程度の拘束量でも膨張が抑制されることが示されている。**図－5** は，文献 8)中の軸拘束筋比と(拘束膨張量／自由膨張量)の関係に，今回の結果(膨張収束時のデータ)を同時に示したものである。研究者によってデータにばらつきはあるが，いずれも軸拘束筋比 1.0%以上で大幅に膨張が抑制される傾向を示しており，今回の結果もこれらとほぼ同じ傾向である。しかし，3 軸拘束を与えた横拘束有り供試体では，軸拘束筋比 1.2%以上の場合にデータ群を外れ，やや上にプロットされている。これは，横方向への膨張が過大となり炭素繊維シートでの横拘束効果が発揮され，さらに軸方向の膨張量が伸びたためと考えられる。



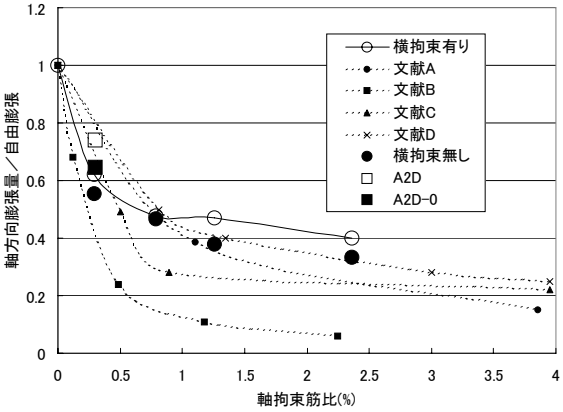
図－2　超音波法と衝撃弾性波法の計測方法



図－3　軸方向膨張量の経時変化



図－4　軸直交方向膨張量の経時変化



図－5　軸拘束筋比と拘束膨張量/自由膨張量の関係

軸方向と軸直交方向で膨張特性が大きく異なるため，ASR 膨張による供試体全体の体積変化量を表す指標として体積ひずみ ε を定義し，以下の式により算出した。

$$\varepsilon = \frac{(r+\Delta r)^2(l+\Delta l) - r^2 l}{r^2 l} \approx 2\frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l} = 2a + b$$

・・・・・・・式(1)

ここに, l と r はそれぞれ供試体軸方向長さと正方形断面の 1 辺の長さ，a と b はそれぞれ軸直交方向と軸方向の膨張量であり，$a = \frac{\Delta r}{r}$，$b = \frac{\Delta l}{l}$ である。

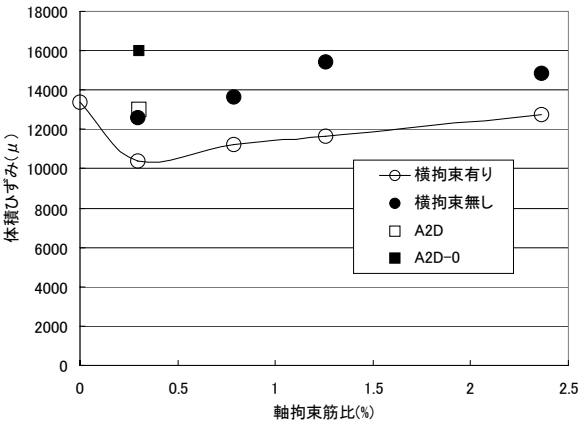
図－6 に膨張収束時の体積ひずみと軸方向の拘束筋比の関係を示す。横拘束無し供試体は，軸直交方向の膨張量が大きくなり，その体積ひずみは自由膨張供試体よりも大きくなった。これに対して，横拘束有り供試体は，同じ軸鉄筋比の横拘束無しと比べて体積ひずみは小さい。また， A2D の体積ひずみは A2 よりも大きく，自由膨張供試体とほぼ同じであった。これは，軸鉄筋の降伏で軸方向に抑制されていた膨張が開放され，体積ひずみが大きくなったと考えられる。

横拘束有り供試体は，横方向への膨張がシートで拘束されたため，体積ひずみが小さくなったと考えられ，3 軸拘束下で現実に近い膨張挙動を示したと考えられる。しかし, 拘束供試体の軸直交方向膨張量は 4000 μ に達しており，一般的な鉄筋であれば降伏している可能性が考えられる。今回は横方向の拘束に炭素繊維シートを使用しているため，このように過大な膨張が生じても降伏することなく，かえって拘束効果を発揮した可能性がある。したがって，実構造物における鉄筋で囲まれたコンクリートの膨張特性とは必ずしも合致するものではないが，実際には横拘束有りと横拘束無しの中間的な膨張特性を示すと考えられ，膨張収束時には自由膨張供試体とほぼ同じレベルの体積ひずみを生じると考えられる。

(2) 鋼材ひずみとコンクリート発生応力

鋼材ひずみは ASR 促進材齢 80 日程度までほぼ直線的に増加した後，やや低下して横ばいとなった。この原因としては，ASR を生じたコンクリートが発生応力によってクリープ変形を起こす，あるいは，コンクリートにひび割れが生じ，ひび割れ発生断面内で応力再配分が生じたことなどが考えられる。

コンクリート断面内に一様な応力が作用すると仮定すれば発生応力が計算できる。期間中に計測された最大の鋼材ひずみとその時のコンクリート発生応力を**表－4** に示すが，拘束筋比の大きな供試体ほど発生応力は大きくなり，拘束鉄筋比 2.4%の場合に，最大で 2.38N/mm^2 となった。これは既往の検討結果 [1]とほぼ同等であるが，



図－6　軸拘束筋比と体積ひずみの関係

表－4　最大の鋼材ひずみとコンクリート発生応力

供試体名	鋼材ひずみ(μ)	発生応力(N/mm^2)
A2	1450	0.885
A8	967	1.59
A12	708	1.88
A24	485	2.38
A2D	1513	0.850

コンクリート表面ひずみで算出するとさらに大きくなる。いずれにせよ，ASR による体積膨張と軸鉄筋拘束によりコンクリートに生じる拘束応力(以下, ケミカルプレストレスとする)は, はり部材の耐荷性状などを考える上では無視できないオーダーのものである。

3.2 ASR の進行に伴う超音波パルス速度の変化

各供試体の超音波パルス速度の経時変化を**図－7** に示す。アルカリを添加しない NA0 を除き，促進開始直後から超音波パルス速度は低下し，材齢 100 日付近で 3700～3900m/s 程度となった。その後，速度は回復して，ほぼ横ばいとなった。以上の結果，超音波パルス速度の劣化前のコンクリートからの低下割合は最終的に約 1 割程度にとどまった。なお，拘束筋比の影響に関しては，軸方向の拘束筋比が大きいものほど超音波パルス速度は小さくなる傾向はあるが, その差は 100m/s と小さかった。

超音波パルス速度は，一度低下してもひび割れがゲルや水分で充填されて回復する，あるいは，相当に劣化した場合でも速度低下割合が小さいことが指摘され，ASR で劣化したコンクリート品質の変化を捉えるのは難しいとされている [9]。その一方，透過距離が一定以上(例えば，400mm 以上)の比較的大きな部材レベルでは，膨張率に応じて超音波パルス速度は低下したとの報告もある [3]。さらに，現場から採取したコアの速度を検討した文献 [5]では，コア長さによって速度が変化し，長いものほど速度は低下すると報告している。

超音波パルス速度が低下する原因は，主として ASR 膨張で生じたひび割れによる弾性波の減衰や迂回によ

るものと考えられる。今回は透過距離が 150mm と短いため，超音波パルス速度では横拘束量の違いで生じた 1000μ程度の膨張量差を捉えることは出来なかったが，劣化前の初期値が分かっていれば，ASR が生じたか否かの判定は可能であると考えられる。

3.3 ASR 膨張収束時の部材剛性

ASR による膨張が収束した横拘束有りの供試体について，鋼球打撃による振動計測を行った。振動計測時(促進材齢 493 日)の各供試体の膨張量とたわみ振動および縦振動計測で得られた共振周波数(f_1 および f_2)から，以下の式により動弾性係数(E_D1 および E_D2)を算出した。これらをまとめて**表－4** に示す。

$$E_D1 = 9.47\times10^{-4}\frac{L^3T}{bt^3}mf_1^{\ 2} \quad ・・・・式(2)$$

$$E_D2 = 4.00\times10^{-3}\frac{L}{A}mf_2^{\ 2} \quad ・・・・・式(3)$$

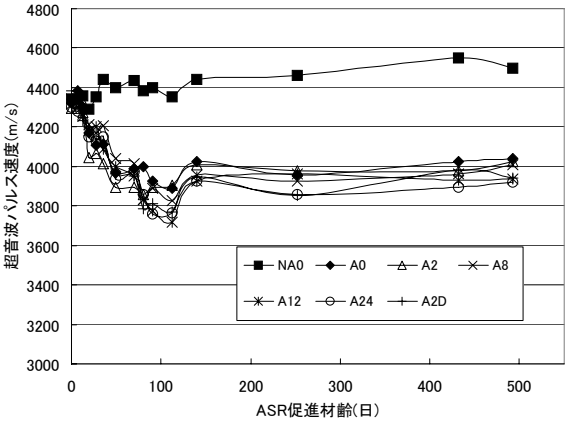
ここに，L は供試体長さ(mm)，b と t は角柱供試体の断面各辺の長さ(mm)，m は供試体質量(kg)で鋼材および端板の質量を含む，T は修正係数(今回は 1.48)，A は供試体断面積(mm^2)

なお，促進前に実施したたわみ振動計測によると，アルカリを添加しないNA0と自由膨張供試体A0の共振周波数はいずれも 1.95kHz，動弾性係数は 44.1kN/mm^2 であった。

算出した各供試体の動弾性係数を**図－8** に示す。アルカリを添加しない NA0 を除いて，いずれの供試体でも動弾性係数は促進前と比べて大きく低下した。また，NA0 の E_D1 と E_D2 は一致したが，ASR を生じた供試体では両者は一致せず，E_D2 の方が大きく算出された。

円柱供試体の共鳴法から求めた動弾性係数を ASR 膨張量に対してプロットしたものを**図－9** に示す。なお，図中に拘束供試体の E_D2 を軸方向の膨張量に対してプロットした。これによると，自由膨張供試体 A0 の E_D2 は円柱供試体の曲線上にあるが，それ以外の拘束供試体は曲線よりも下にあり，特に，A2 や A2D で動弾性係数が小さい。また，データは少ないものの，軸方向膨張量の増加に応じて動弾性係数は低下する傾向がある。

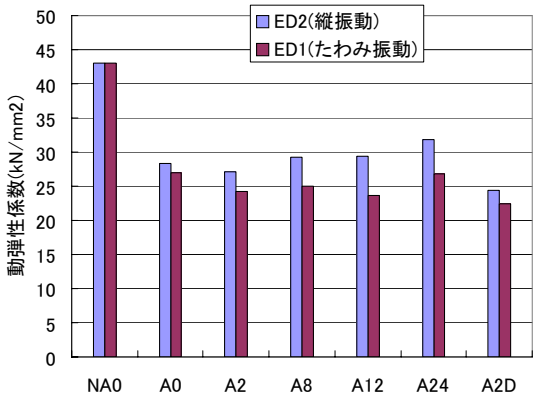
拘束供試体では，方向によって膨張に異方性が生じており，軸方向に比べて軸直交方向の膨張が大きい。縦振動の計測は，供試体端部を打撃し，長手方向に共振を生じさせるため，軸方向の膨張量に対応した共振周波数が出現したと考えられる。一方，たわみ振動計測より算出した E_D1 は，いずれも縦振動の場合より小さくなり，自由膨張供試体も含めて供試体による差はほとんどない(**図－8** 参照)。**図－5** より，拘束供試体の体積ひずみは自由膨張供試体とほとんど同じレベルであり，拘束供試体



図－7　超音波パルス速度の経時変化

表－4　振動計測時の膨張量と振動計測結果

供試体名	膨張量(μ)		共振周波数(Hz)		動弾性係数(kN/mm^2)	
	軸方向	直交方向	たわみ f_1	縦 f_2	たわみ E_D1	縦 E_D2
NA0	30	-7	1950	4080	43.1	43.1
A0	3567	4905	1520	3260	26.9	28.3
A2	2211	4103	1320	2920	24.2	27.1
A8	1697	4777	1320	2990	25.0	29.3
A12	1671	4983	1270	2960	23.7	29.4
A24	1429	5657	1320	3010	26.8	31.8
A2D	2643	5183	1270	2770	22.4	24.3



図－8　拘束供試体の動弾性係数

のコンクリート内部にも微細ひび割れや亀裂が生じているものと推察される。たわみ振動の計測は，供試体中央を打撃して全体を振動させるため，コンクリートの全体的な緩みを表す体積膨張に対応した共振周波数が出現し，供試体による差が現れなかったと考えられる。たわみ振動による E_D1 は，促進前の動弾性係数からの低下割合が大きいことから，ASR が生じているかどうかを判定する指標として使える可能性がある。

続いて，縦振動計測で得られた共振周波数 f_2 から，以下の式により縦弾性波速度 V を算出した。

$$V = 2 f_2 L' \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot \text{式(4)}$$

ここに，L'は端部の鋼材長さを含む全長(mm)

式(4)で算出した縦弾性波速度を円柱供試体で求めた縦弾性波速度と膨張量の関係と併せて**図－10** に示す。

これより，拘束コンクリートの弾性波速度は自由膨張した供試体と同じ膨張レベルの速度と変わらないことが分かる。縦弾性波速度は，動弾性係数と密接な関係があり，ほぼ同じ傾向を示したと言える。拘束供試体の体積ひずみは自由膨張供試体とほぼ同じであり，また，動弾性係数は初期の 60%程度に低下したことから，拘束コンクリート内にもひび割れや亀裂が発生していると予想される。軸鉄筋の降伏が疑われる A2D の動弾性係数と縦弾性波速度は自由膨張供試体よりも低下していることから，ケミカルプレストレスの作用する PC 鋼材を軸鉄筋とした供試体では，ひび割れが閉じた状態にあるため縦弾性波速度が保持されたと考えることができる。

4. まとめ

今回の検討により，以下のことが明らかとなった。

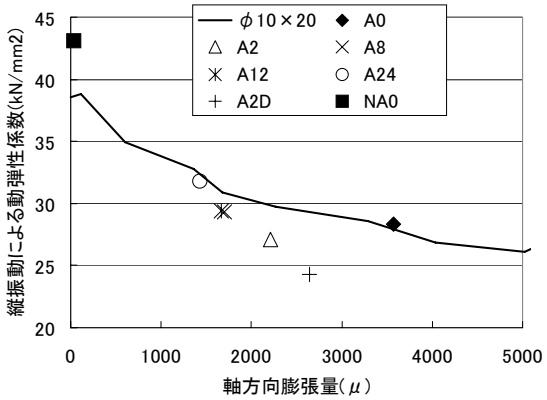
(1) 3 軸拘束下のコンクリートにおいて ASR が生じると，一方向拘束の場合よりも横方向の膨張は抑制されるが，横拘束の効果が発揮されることにより軸方向の膨張量は大きくなった。

(2) 3 軸拘束下で ASR を生じたコンクリートは，最終的に自由膨張供試体とほとんど変わりない体積ひずみを生じた。

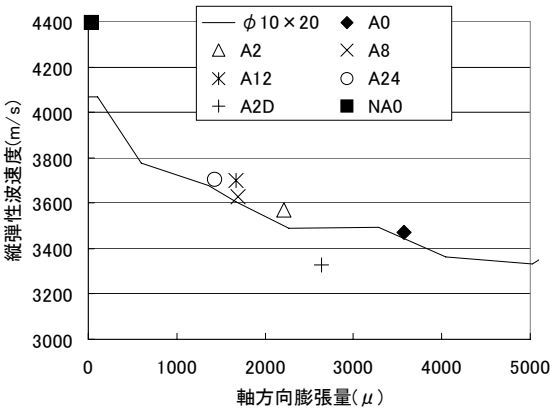
(3) 拘束供試体ならびに自由膨張供試体の動弾性係数は，たわみ振動および縦振動いずれの方法で求めても低下した。鋼球打撃による簡易な振動計測により，拘束内部のコンクリート剛性を評価することが可能であった。

(4) 拘束供試体の動弾性係数は，拘束方向で生じる膨張異方性により，縦振動よりもたわみ振動で求めた値の方が初期値からの低下率が大きかった。

(5) 拘束供試体の縦弾性波速度は，初期値から低下したものの，自由膨張供試体と同じ膨張レベルの速度を保持した。これは，ケミカルプレストレスが作用し，ひび割れが閉じた状態にあるためと推察された。



図－9　膨張量と縦振動で求めた動弾性係数の関係



図－10　膨張量と縦弾性波速度の関係

参考文献

1) 矢村潔，西林新蔵，田中修一：鉄筋拘束がアルカリ骨材反応に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.135-140，1989

2) 小柳治ほか：低鉄筋比の RC 部材における ASR の膨張拘束に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.52，pp.786-791，1998

3) 岩波光保ほか：ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.704／Ⅴ－55，pp.129-142，2002.5

4) 冨田穣，幸左賢二，中野錦一，中上明久：コア採取法による ASR 変状構造物診断の基礎的研究, セ技年報，42，pp.335-338，1988

5) 笹谷輝彦ほか：弾性波法による ASR 損傷コンクリート橋脚の内部探査，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.115-120，2003

6) 魚本健人，伊東良浩：打音法によるコンクリートの非破壊検査，コンクリート工学論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.143-151，1996.1

7) 森寛晃ほか：弾性波法による ASR 劣化コンクリートの劣化度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1，pp.1905-1910，2004

8) The Institution of Structural Engineers, Structural effects of alkali-silica reaction -Technical guidance on the appraisal of existing structures-, pp.12-15, July 1992

9) 小林一輔，森弥広：ASR を生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察，土木学会論文集，No.420／Ⅴ－13，pp.245-250，1990.8