

論文 ASR 劣化状態に関する超音波法による評価

中川 裕之*1・横田 優*2・長尾 和明*3・松島 学*4

要旨：超音波法を用いてアルカリ骨材反応により生じた膨張量の評価を試みた。供試体による促進膨張実験から得られた膨張率と超音波伝播特性の関係をニューラルネットワークにより学習解析し、超音波法によりコンクリート膨張率を評価する手法を構築した。実構造物から採取したコアに発生している膨張率を超音波測定結果より評価し、アルカリ骨材反応による圧縮強度および静弾性係数の低下状態から評価した膨張率と比較した結果、超音波法で膨張率を評価できる可能性があることがわかった。

キーワード：超音波法, アルカリ骨材反応, 膨張率, ニューラルネットワーク, 超音波伝播特性

1. はじめに

アルカリ骨材反応（以下、「ASR」と称する）が生じたコンクリート構造物の反応性膨張量を把握するための方法は、採取したコアの解放膨張率および残存膨張率を測定する方法（JCI-DD2）¹⁾などがある。しかし、残存膨張率等から構造物に潜在する膨張量を評価することは可能であるが、既に生じている膨張量を把握することは難しいのが現状である。この既存の膨張量を適切に評価することは、構造物の将来的な維持管理手法や補修計画に対して重要な情報となる。

超音波法は、非破壊試験の一つであり、コンクリート構造物に対して定位置での重複測定が可能である。これは、ASRによってコンクリート構造物に生じる膨張等を定期的に定点測定する際に有効な手段になるものと思われる。

筆者らは、超音波測定から得られる伝播速度、受振波形および周波数特性等の超音波伝播特性を総合的に判断することによって ASR による膨張を評価する手法を検討している。これまでの検討では、実構造物から採取したφ100mmのコアを促進膨張させながら、超音波測定を行った結果、膨張量を評価できる可能性があることがわかった²⁾。

本研究では、超音波法を用いて、測定時に既存のコンクリート膨張率を評価することを目的として、いくつかの実構造物から採取したコアについて、ASRによるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数の低下状態から評価した採取コアの膨張率と、超音波法によって評価した膨張率を比較検討した。

2. 研究方法

2.1 超音波伝播特性

超音波測定は、円柱コアの端面をセンサで挟む透過法

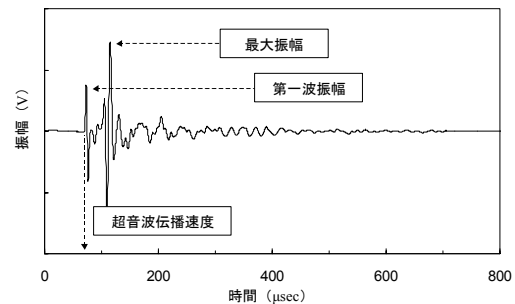


図-1 受振波より評価する指標

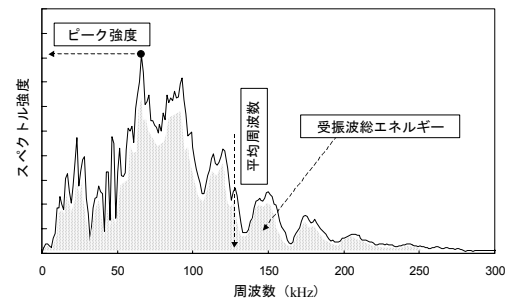


図-2 周波数スペクトルより評価する指標

で行った。発・受振センサは、共振周波数 0.5MHz のセラミック振動子（直径 40mm）を用いた。印加電圧 30V、サンプリング間隔 0.2 μ sec、サンプリング数 4096 である。コンクリートの膨張率を評価するための超音波伝播特性とした指標項目を図-1、図-2 に示す。伝播速度に加え、伝播エネルギー指標として、受振波からは最大振幅および第一波振幅、周波数スペクトルからはスペクトル強度の最大値（以下、「ピーク強度」と称する）、周波数毎のスペクトル強度を積算した面積（以下、「受振波総エネルギー」と称する）、周波数特性の指標として、受振波総エネルギーの 50%にあたる周波数（以下、「平均周波数」と称する）の 6 項目とした。

*1 (株) 四国総合研究所 土木技術部副主席研究員 (正会員)

*2 (株) 四国総合研究所 土木技術部・部長 工博 (正会員)

*3 四国電力 (株) 土木建築部建築技術グループリーダー 工修 (正会員)

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 C×(%)	AE調整剤 C×(%)
					水	セメント	細骨材	粗骨材		
20	50	12±2	4.5±1	44.4	165	330	784	981	0.5	0.0011

表-2 アルカリ含有量とコンクリート物性

等価Na ₂ O量 (kg/m ³)	圧縮強度 (材齢28日) (N/mm ²)	静弾性係数 (材齢28日) (×10 ⁴ N/mm ²)
1.9	31.0	2.50

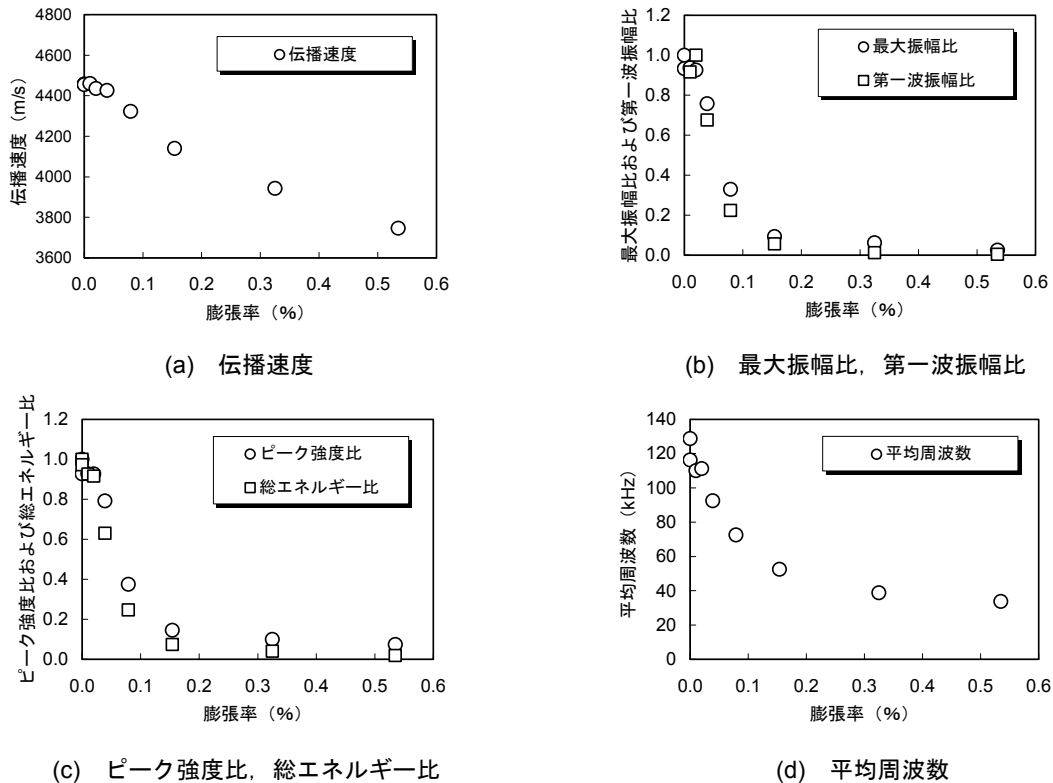


図-3 膨張率と超音波伝播特性の関係

2.2 促進膨張実験

ASR による膨張量と超音波伝播特性の関係を把握するために、供試体による促進膨張実験を行った。

供試体は、粗骨材に化学法 (JIS A1145₂₀₀₁) で「無害でない」と判定された安山岩と流紋岩の混合を用い、直方体の大型供試体 (900×600×500mm) を製作後、材齢 8 カ月後にコア (直径 100×長さ 250mm) を 9 本採取 (以下、「コア供試体」と称する) した。それらをデンマーク法を参考にして飽和塩化ナトリウム水溶液に浸せきし、50℃の恒温槽内で促進膨張させた。促進膨張中、コア供試体の超音波測定と同時に、コンタクトゲージによる長さ変化測定を行い、コア採取直後からの膨張率を求めた。コア供試体は、所定の膨張率で順次 1 本ずつ圧縮強度 (JIS A 1108₁₉₉₉) および静弾性係数 (JIS A 1149₂₀₀₁) を求めた。コア供試体のコンクリート配合および物性値

等を表-1、表-2 に示す。

コア供試体を所定の膨張率で長さ 200mm に切断整形後、圧縮強度および静弾性係数試験前に再度超音波測定して求めた超音波伝播特性と膨張率の関係を図-3 に示す。最大振幅、第一波振幅、ピーク強度、受振波総エネルギーは、各々最大値に対する比として整理した。

図-3 より、伝播速度が膨張率の増加に比例して減少しているのに対して、他の伝播特性は、膨張率 0.1%前後で膨張率増加に対する測定感度が大きくかわっていた。ASR 劣化により、ひび割れが骨材界面部からセメントマトリクス部へ拡張する時期を 0.1%としている研究結果³⁾もあり、コンクリート表面にひび割れ等の ASR が顕在化している場合、膨張率 0.1%以上は生じているものと考えられる。

2.3 膨張率の評価方法

9本のコア供試体が各々所定の膨張率で200mmに切断されるまで、促進膨張実験中に求められた超音波伝播特性と膨張率の関係を学習データとして、ニューラルネットワーク法（以下、「NN法」と称する）により回帰分析した。階層構造および入力因子を図-4に示す。学習の際の入力データ数は76データである。解析はバックプロパゲーション法で行い、中間ユニットおよび出力ユニットからの出力関数はシグモイド関数を用い、学習率は0.05、学習回数は2000回とした。

超音波法によるコンクリートの膨張率の評価は、このNN法の学習解析結果を用いて、測定から得られた超音波伝播特性を図-4に示した階層構造に入力することによって各超音波伝播特性を総合的に判断し、対象コンクリートの膨張率を算出させた。

2.4 評価した膨張率の検証方法

NN法により評価した膨張率（以下、「評価膨張率」と称する）は、測定した時点で既にコンクリートに生じている膨張率（以下、「既存膨張率」と称する）に相当すると思われる。本研究では、実構造物より採取したコアを用いて評価方法の妥当性を検討した。

評価膨張率の妥当性は、以下の方法によって検討した。

促進膨張実験したコア供試体の静弾性係数と圧縮強度の比と圧縮強度の関係をプロットしたものを図-5に示す。プロットには、各コア供試体において、コンタクトゲージによる長さ変化の実測より求めた膨張率を示す。コンクリート構造物は、ASRにより圧縮強度よりも静弾性係数の方が大きく低下することが知られており、図-5に示したように、発生した膨張率が大きくなるに従って、プロットが図の左下方向へ移動している⁴⁾。図中に示した健全なコンクリートが示す曲線（以下、「健全ライン」と称する）は、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕⁵⁾に示されている値を表している。

図-5に示した各コア供試体の膨張率は、既存膨張率にほぼ等しいと考えられるため、主に図-5中の膨張率0.08%と0.15%のプロット位置から、既存膨張率が0.1%相当のコンクリートが示すであろうプロット位置を想定し、図-5中に示した曲線（以下、「膨張率0.1%ライン」と称する）を設定した。なお、圧縮強度の違いによる曲線形状に関しては、実験データが少ないため、健全なコンクリートが示す曲線と同形状と考えた。

この図を用いて、いくつかの実構造物より採取したコアに対して、超音波測定による評価膨張率と、そのコアの圧縮強度および静弾性係数から求められるプロット位置から予想される既存膨張率を比較することによって、超音波法による評価膨張率の妥当性を検討した。

なお、採取したコアの超音波透過距離は200mm程度

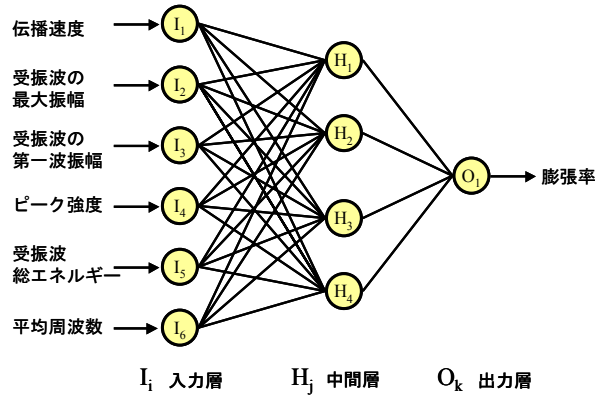


図-4 階層構造

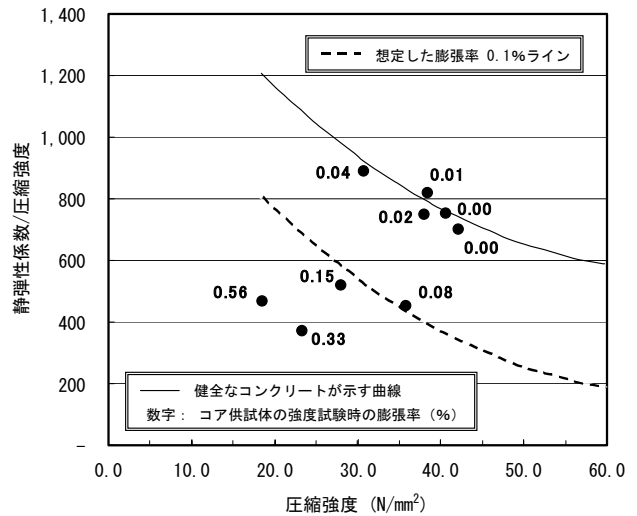


図-5 コンクリート強度と膨張率の関係

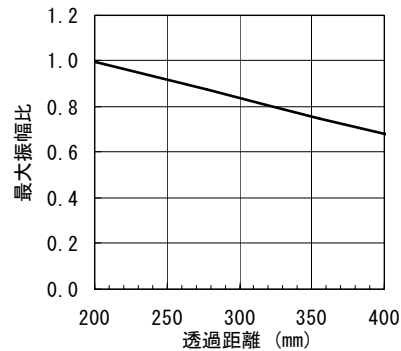


図-6 最大振幅と透過距離

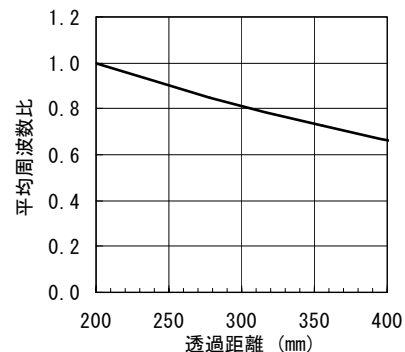


図-7 平均周波数と透過距離

だが、学習したコア供試体の透過距離は 250mm である。超音波伝播特性に対する透過距離の影響を考慮した。超音波伝播特性の内、筆者らの実験結果⁶⁾より得られた最大振幅と透過距離の関係を図-6、平均周波数と透過距離の関係を図-7 に示す。最大振幅、平均周波数共に、透過距離 200mm での値に対する比とした。採取コアの超音波測定から得られた透過距離 200mm での各伝播特性値を 250mm 相当の値に変換して、NN 法の階層構造に入力し、評価膨張率を求めた。

3. 膨張率の評価結果

3.1 膨張率 0.1%以内での評価

構造物 A~D は、全て構築後に約 32 年経過したボックスカルバートである。粗骨材は化学法 (JIS A1145₂₀₀₁) で「無害でない」と判定された安山岩が使用されていた。

各構造物 A~D から採取したコアを用いた膨張率の評価結果を図-8 に示す。同一構造物中の各プロットは、別位置で採取したコアであり、プロット位置は、各々圧縮強度および静弾性係数から求められたものである。図中に示した数値は、各採取コアを超音波測定した結果から、本研究の評価手法より求めた評価膨張率である。

各構造物外観には、ひび割れを生じていなかったが、採取コアのいくつかは、骨材に反応リムと言われる変色や白色析出物が少し見られたことや、図-8 の圧縮強度および静弾性係数から求められたプロット位置等から、構造物表面にひび割れ等の ASR が顕在化する前段階と思われる。全プロットが膨張率 0.1%ラインよりも上にあり、図-8 に示した 0.1%ラインの位置は妥当と思われる。

評価膨張率は、全て 0.1%以下を示しており、対象の採取コアの既存膨張率を評価できていた。プロット位置が左下方向へ低下するにしが、評価膨張率も大きくなっており、各プロットの相対位置から予想される既存膨張率の大小関係を概ね評価できていた。

ひび割れ等の ASR が顕在化する前段階は、図-3 に示した膨張率 0.1%以下の範囲であると思われる。膨張率に対する各超音波伝播特性の感度は高いので、測定時の誤

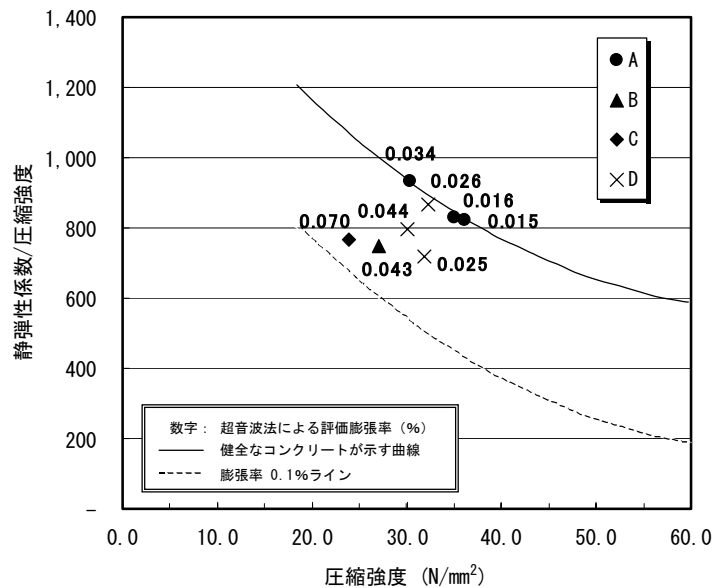


図-8 評価膨張率の検討 (A, B, C, D 構造物)

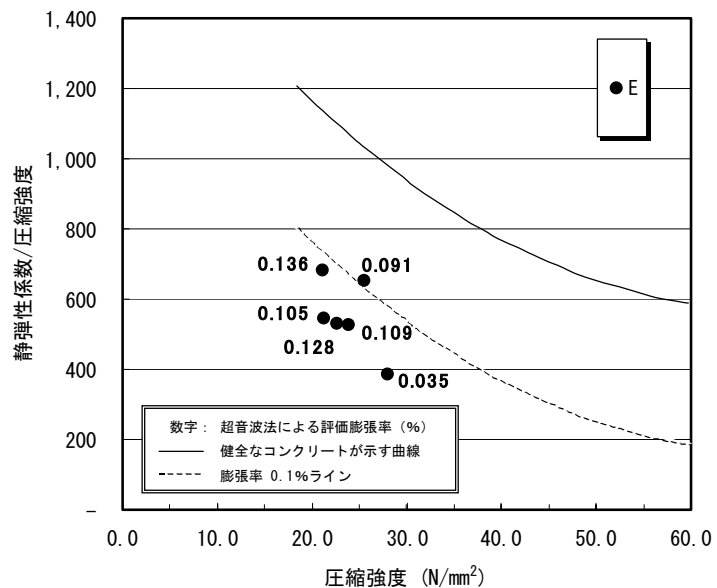


図-9 評価膨張率の検討 (E 構造物)

差が大きく生じなければ、本検討結果のように精度良く膨張率を評価できる可能性が高いのではないかと考えられる。

3.2 膨張率 0.1%より大きい場合の評価

構造物 E は、構築後に約 33 年経過したもたれ式擁壁である。粗骨材は、構造物 A~D と同様に「無害でない」と判定された安山岩が使用されていた。

構造物 E から採取したコアを用いた膨張率の評価結果を図-9 に示す。

構造物 E の外観にはひび割れが生じ、図-9 に示したプロット位置が左下方向へ低下していることから、すでに ASR が顕在化している状態と思われる。ほとんどのプ

ロットが膨張率 0.1%ラインよりも下にあり、図-9 に示した 0.1%ラインの位置は妥当と思われる。

評価膨張率は、ほとんどが 0.1%以上を示しており、対象の採取コアの既存膨張率を概ね評価できていた。ただし、膨張率 0.1%を超えていることは評価できていたが、各採取コアのプロット位置から予想される既存膨張率の大小関係と評価膨張率の相関はあまり良くなかった。採取コアの一つは、評価膨張率が 0.035%と相当小さい評価となっていた。

ASR によるひび割れが顕在化した状態は、図-3 に示した膨張率 0.1%を超えた範囲であると思われる、各超音波伝播特性の膨張率に対する感度が低く、超音波法では正確な膨張率の評価ができなかったものと考えられる。

3.3 ASR を生じていない場合の評価

構造物 F は、約 35 年経過した鉄筋コンクリートの設備基礎である。

構造物 F から採取したコアを用いた膨張率の評価結果を図-10 に示す。

粗骨材は砂岩であり、構造物外観にひび割れはなく、図-10 に示したプロット位置からも ASR は生じていなかったと考えられる。

評価膨張率は 0.01%~0.013%程度となっていた。構造物 F から採取したコアは、膨張していないと思われるが、評価膨張率も 0.01%程度とほぼ 0%に近い値を評価できていた。

評価膨張率が 0%とはならず 0.01%程度の値を示していた原因として、供試体による促進膨張実験結果を NN 法により学習解析する際に、膨張率 0.1%前後の学習精度を向上させるために、膨張率 0~0.01%までのデータを削除した²⁾ことによって、0.01%が学習した膨張率の最小値となっていること、また、促進膨張実験のコンクリートとは配合や骨材性状が違うことによる評価精度の問題も考えられる。

3.4 評価膨張率への影響因子

(1) 骨材の影響

構造物 G は、約 37 年経過した鉄筋コンクリートの設備基礎、構造物 H は、約 27 年経過した橋台天端付近の鉄筋コンクリート部である。

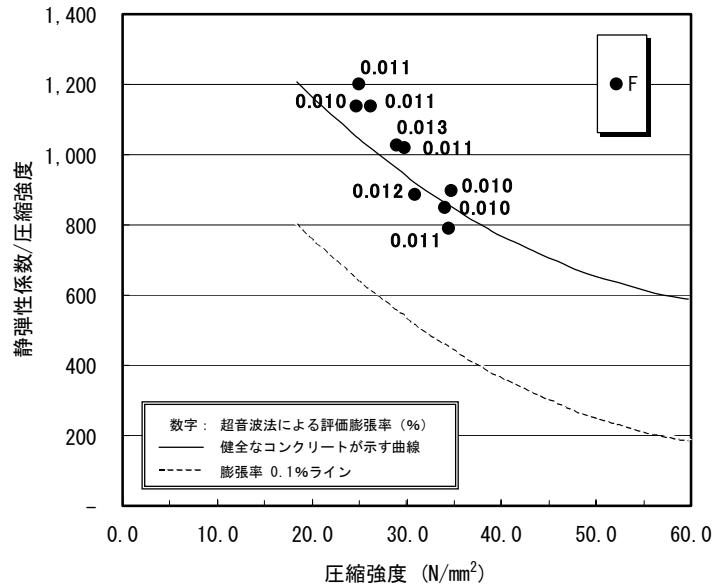


図-10 評価膨張率の検討 (F 構造物)

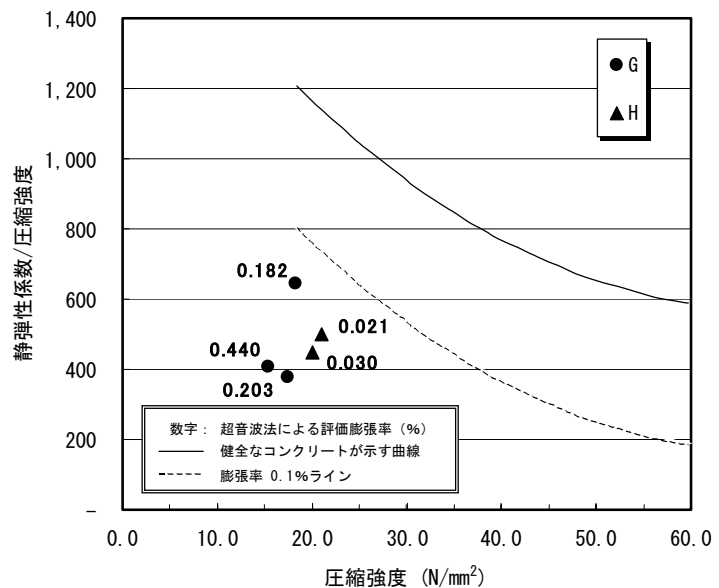


図-11 評価膨張率の検討 (G, H 構造物)

各構造物 G, H から採取したコアを用いた膨張率の評価結果を図-11 に示す。

構造物 G, H 共に、外観はひび割れが生じており、採取コアにもコア側面のひび割れや一部コアの破断も見られた。粗骨材には白色析出物や骨材内部のひび割れが見られ、図-11 に示したプロット位置からも、既存膨張率は、構造物 E よりも大きかったと思われる。

構造物 G の評価膨張率は、全ての採取コアに対して、構造物 E の評価膨張率 (0.035~0.136%) を超えていることは評価できていたが、プロット位置から予想される既存膨張率の大小関係は、精度良く捉えられていなかった。構造物 H は、プロット位置とは違い、評価膨張率は

0.03%, 0.021%と小さくなっていった。

超音波法による評価膨張率の精度が低い原因は、構造物 E と同様に ASR によるひび割れが顕在化した状態では膨張率に対して各超音波伝播特性の感度が低いことに加えて、粗骨材の影響が考えられる。膨張率を評価するために行ったコア供試体の促進膨張実験で使用した粗骨材が安山岩や流紋岩の碎石であったのに対して、構造物 G, H は、骨材形状から川砂利と碎石の混合であり、骨材の色などからも複数の岩種が含まれていた。膨張率と各超音波伝播特性の関係は、骨材の種類や形状等によって違って来る可能性が高い。今後、膨張率を評価する際に骨材の影響を考慮するための検討が必要と思われる。

(2) 圧縮強度の影響

構造物 I は、約 32 年経過した設計基準強度が 16N/mm^2 (材齢 28 日) 程度の無筋コンクリートの設備基礎である。

構造物 I から採取したコアを用いた膨張率の評価結果を図-12 に示す。

粗骨材は砂岩が主体の碎石で、ひび割れ等は見られず、図-12 に示したプロット位置からも ASR は生じていなかったと考えられる。

評価膨張率は、全ての採取コアに対して 0.03% ~ 0.04% 程度の膨張を示す値となっていた。構造物 F の検討結果から、ASR が生じていないコンクリートの評価膨張率は 0.01% 程度となることから、構造物 I は、少なくとも 0.02% ~ 0.03% は膨張している評価となっていた。

現段階で原因は不明であるが、構造物 I の採取コアに微細なひび割れも見られないことから、低強度のコンクリートの場合、水セメント比などによる密度度の違いを膨張と評価した可能性が考えられる。骨材の種類が異なっている影響も当然含まれているものと思われるため、圧縮強度の影響とは限らないが、今後検討が必要である。

4. まとめ

超音波法により、測定時の ASR 既存膨張率を評価する検討を行った。コア供試体の促進膨張実験より得られた膨張率と超音波伝播特性の関係を NN 法により学習解析し、その学習結果を用いて、実構造物から採取したコアの既存膨張率を評価した。採取コアに対する超音波法による評価膨張率と ASR による圧縮強度および静弾性係数の低下状態から評価した膨張率を比較検討した。以下に検討結果を示す。

(1) 本研究と同様な特性のセンサを用いて、 $\phi 100\text{mm}$ 程

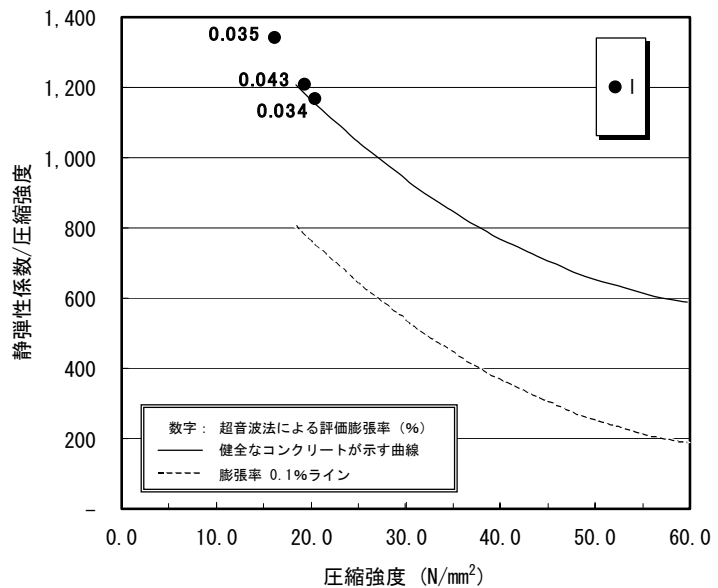


図-12 評価膨張率の検討 (I 構造物)

度の円筒形コンクリートを超音波測定した場合、ひび割れ発生前の段階ならば、精度良くその既存膨張率を評価できる可能性が高いが、ひび割れ発生以降は、既存膨張率が 0.1% を超えているような状態であることは評価できるが、その精度は低いことがわかった。

- (2) コンクリートに使用されている骨材の種類や形状、あるいはコンクリートの圧縮強度等が既存膨張率の評価精度に影響を与える場合があり、骨材の超音波伝播特性への影響や圧縮強度の違いを補正する膨張率評価方法の検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: JCI 規準集 (1977~2002 年度), pp.152-156, 2004.4
- 2) 中川裕之, 横田優, 松田耕作, 松島学: 超音波法による ASR 膨張量測定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.625-630, 2007.
- 3) 岩波光保: コンクリート中における弾性波伝播挙動とその劣化評価への適用に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1999
- 4) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460, V-18, pp.151-154, 1993.2
- 5) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.28, 2002.3
- 6) 中川裕之, 横田優, 松田耕作: 超音波法によるコンクリート物性予測手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1889-1894, 2006.