

論文 ASR 劣化の違いが RC はりのせん断圧縮破壊に及ぼす影響に関する基礎的研究

上田 尚史*1・武居 凜太郎*2・三木 朋広*3・寺澤 広基*4

要旨：本研究では、ASR 劣化の違いが RC 構造の性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、複数の同一諸元の RC はりを用い、ASR 膨張試験と曲げせん断荷試験を行った。その結果、RC はりの ASR 膨張挙動はある程度ばらつくのに対して、超音波伝播速度のばらつきは膨張と比較して小さいことが確認された。また、ASR 劣化した RC はりのせん断圧縮耐力のばらつきは小さく、材料劣化のばらつきがせん断圧縮挙動に及ぼす影響は小さいことが示唆された。

キーワード：ASR 膨張, 超音波伝播速度, せん断圧縮破壊, 変動係数

1. はじめに

ASR 劣化したコンクリートは、弾性係数等の力学特性は低下するが、RC 部材としての性能については、内部鋼材が健全であれば、大きく低下しないことが知られている¹⁾。一方、ASR が生じた実構造物を維持管理するためには、現時点の性能を適切に評価する必要がある²⁾。その際、一般的には構造物の劣化状態を非破壊試験等により把握することになるが、得られた情報と構造物の性能については、必ずしも直接的に関係していないことがある。そのため、膨大に蓄積された点検記録が十分に生かされていない状況にある。この理由は様々あると考えられるが、その一つとしては、性能を評価するために必要な情報についての共通認識が十分ではないとともに、材料劣化の空間的なばらつきが構造物の性能に及ぼす影響について、十分に検討されていない点にあると考える。

そこで本研究では、ASR 劣化の違いが RC 構造の性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、基礎的な検討を行った。複数の同一諸元の RC はりに対して、同一条件下で ASR を生じさせ、膨張挙動のばらつきを把握するとともに、超音波伝播速度による劣化状況の推定を試みた。また、曲げせん断試験を行うことで ASR 劣化がせん断圧縮破壊に及ぼす影響について検討した。

置していない。

コンクリートの配合は、水セメント比を 50%とし、細骨材率を 48.2%とした。ASR を生じさせるために、粗骨材体積の 50%に対して反応性骨材を混入するとともに、コンクリート中の Na₂O 等量を 5kg/m³とした。反応性骨材には北海道産の安山岩を使用した。Na₂O 等量は NaOH を練り混ぜ水に混入することで調整した。

供試体は、脱型後材齢 21 日まで 20℃の環境にて湿布養生を行い、材齢 261 日までおよそ 40 度の養生槽内にて 240 日間湿布養生を施した。材齢 261 日から 372 日までは、防水シートで覆ったステンレス製の棚を用いて屋外にて湿布養生を行った。その後は材齢 443 日まで同ステンレス棚にて気中養生とした。後述するように、材齢 443 日において膨張量を測定した後、材齢 455~457 日に載荷試験を行った。

RC はり供試体は 9 体作製した。併せて直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を 9 体作製した。RC はり、円柱供試体ともに、供試体は全て同一の環境で養生した。

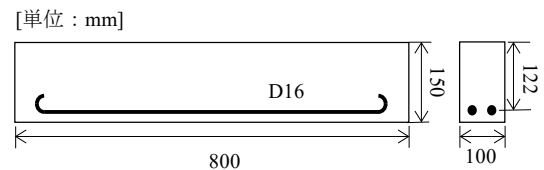


図-1 RC はりの寸法

2. 実験概要

2.1 供試体概要および養生条件

図-1 に供試体の概要を示す。供試体の寸法は 100×150×800mm であり、かぶりを 20mm とし D16 (降伏強度 $f_y=404 \text{ N/mm}^2$) を 2 本配置した単鉄筋の RC はりである。有効高さは 122mm であり、鉄筋比は 3.25%である。なお、せん断破壊が先行するよう、せん断補強鉄筋は配

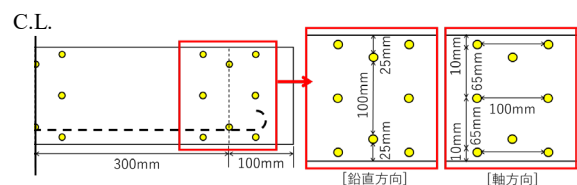


図-2 RC はりの膨張量測定箇所

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科

*3 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*4 大阪大学 大学院工学研究科地球総合工学専攻助教 博(工) (正会員)

2.2 測定項目

(1) 膨張量の測定

RC はりの膨張量の測定には、コンタクトストレーンゲージ（計測精度 0.001mm、検長 100mm）を用いた。図-2 に示すように、RC はりの両端部から 100mm の位置と端部から 400mm の中央位置において、それぞれ鉛直方向を 1 か所、軸方向を 3 か所測定した。また、円柱供試体の膨張量の測定には、ダイヤルゲージ（計測精度 0.0005mm、検長 200mm）を用いた。

初期値は材齢 13 日目に計測した。また、膨張量の測定は、測定の前日に供試体を実験室へ移動し、1 日程度静置してから行った。最終的な膨張量の測定は、材齢 443 日目に行った。

(2) 超音波伝播速度

膨張試験終了後から載荷試験までの期間において、RC はりならびに円柱供試体の超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度の測定には、市販の超音波測定装置（時間測定基準 10MHz、標準振動子 50kHz、送信パルス電圧 Max. 1.2kV、読取精度 $\pm 0.1\mu\text{sec}$ ）を用いた。測定方法は透過法とし、計測された超音波速度を測定長さで除すことにより超音波伝播速度を算出した。測定位置は、RC はりでは、供試体の側面に対して 25mm 間隔の格子の交点である計 155 か所（長手方向 31 点 \times 高さ方向 5 点）とした。円柱供試体では、供試体の長さ方向に対して 1 か所とした。

2.3 載荷試験

ASR 劣化した円柱供試体の圧縮特性を把握するために、圧縮載荷試験を行った。載荷には、アムスラー型の万能試験機を用いた。また、ゲージ長 60mm のポリエステルひずみゲージを用いてひずみを測定した。なお、供試体の両端にテフロンシートを挿入し、載荷面の摩擦を除去した。

また、ASR 劣化した RC はりのせん断挙動を把握するために、せん断スパン長 200mm、等曲げ区間 200mm の、単純支持による 4 点曲げ試験を行った。このとき、せん

断スパン比は 1.64 となる。また、載荷点ならびに支点には幅 50mm の載荷板を挿入した。

3. ASR 膨張の違いが円柱供試体の超音波伝播速度と力学特性に及ぼす影響

3.1 膨張挙動

図-3 に円柱供試体 9 体の材齢と膨張ひずみの関係を示す。図中の赤線は 9 体の平均値である。図より、いずれの供試体も、材齢 100 日程度までは膨張せず、材齢 150 日以降に膨張していることがわかる。また、同一の養生条件においても膨張ひずみの大きさは大きく異なる結果となった。また、いずれの供試体も材齢 372 日に膨張ひずみは最大となった。以降、本研究ではこのときの膨張ひずみを最大膨張ひずみと呼ぶ。このとき、9 体の平均値は 1300μ 、標準偏差は 534μ （変動係数 41.2%）であった。また、最大値は 2050μ 、最小値は 272μ であった。なお、材齢 372 日以降は、いずれの供試体も収縮が生じる結果となった。これは、養生方法を湿布養生から気中養生へと変更したためである。なお、ASR による材料劣化は膨張量と関係づけられることが一般的であるため、以降の議論では最大膨張ひずみを指標とすることとした。

3.2 最大膨張ひずみと超音波伝播速度の関係

図-4 に、それぞれの供試体における最大膨張ひずみと超音波伝播速度の関係を示す。図より、測定結果にばらつきは見られるものの、最大膨張ひずみが 500μ 程度の供試体では、超音波伝播速度は 3800m/sec を超えているのに対して、最大膨張ひずみが大きくなると超音波伝播速度は低下する傾向が確認できる。本実験では、最大膨張ひずみ 2000μ 程度では、超音波伝播速度は 3500m/sec 程度まで低下した。

3.3 最大膨張ひずみと力学特性の関係

図-5 に、それぞれの供試体における最大膨張ひずみと静弾性係数ならびに圧縮強度の関係を示す。図より、最大膨張ひずみが増加することで、静弾性係数、圧縮強度ともに低下する傾向が確認できる。また、静弾性係数

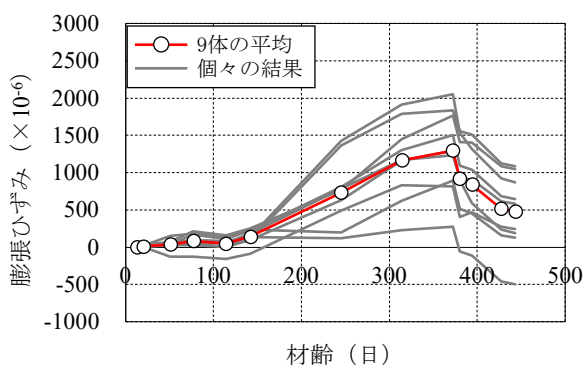


図-3 円柱供試体の膨張挙動

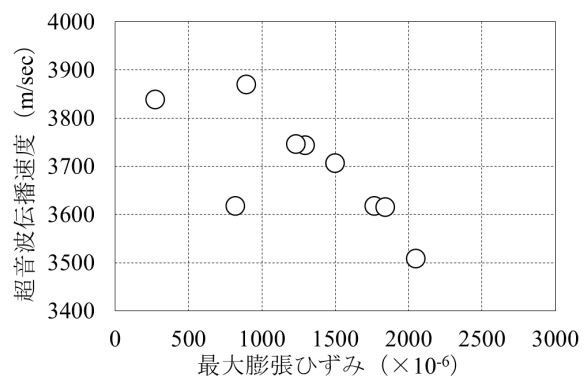
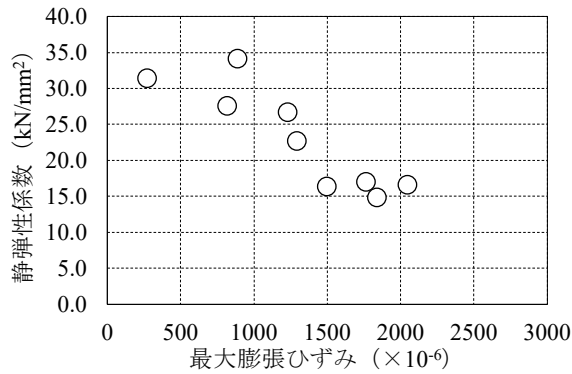
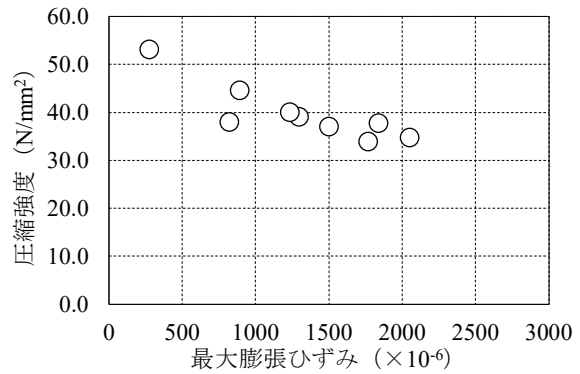


図-4 円柱供試体の最大膨張ひずみと超音波伝播速度の関係

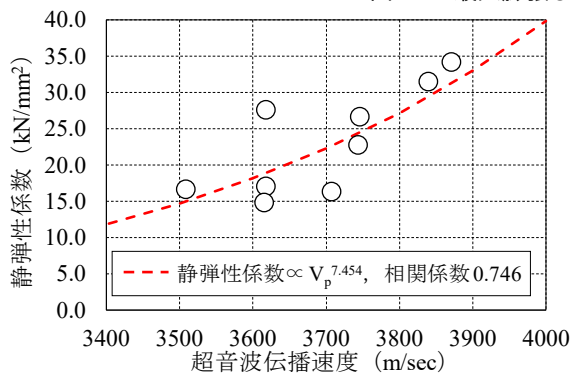


(a) 静弾性係数

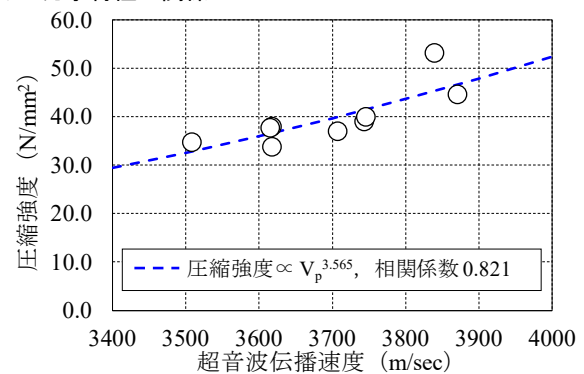


(b) 圧縮強度

図-5 最大膨張ひずみと力学特性の関係



(a) 静弾性係数



(b) 圧縮強度

図-6 超音波伝播速度と力学特性の関係

は5割程度まで低下しているのに対して、圧縮強度は7割程度の低下にとどまった。これらの結果は、既往の研究りと同様であった。

3.4 超音波伝播速度と力学特性の関係

図-6は、超音波伝播速度と静弾性係数ならびに圧縮強度の関係をまとめたものである。図には、静弾性係数ならびに圧縮強度が弾性波速度のべき乗の関数である³⁾と仮定して求めた、次式の回帰式を示している。

$$E_c = 5.63 \times 10^{-26} \times V_p^{7.454} \quad (1)$$

$$f'_c = 7.56 \times 10^{-12} \times V_p^{3.565} \quad (2)$$

ここに、 E_c は静弾性係数(kN/mm²)、 f'_c は圧縮強度(N/mm²)、 V_p は超音波伝播速度(m/sec)である。限られた供試体数ではあるものの、相関係数はそれぞれ0.746、0.820であり、ある程度相関が強い結果であった。

ASRが生じた実構造物においては、膨張ひずみを推定することは困難であることから、非破壊試験により劣化状態を把握することが求められる。本研究の結果から、ASR劣化したコンクリートの静弾性係数や圧縮強度を円柱供試体の超音波伝播速度により評価できる可能性が示された。

4. RCはりにおけるASR劣化のばらつき

4.1 膨張挙動のばらつき

図-7にRCはりの鉛直方向の膨張ひずみの経時変化を示す。図中の赤線は9体の平均値である。図より、鉛

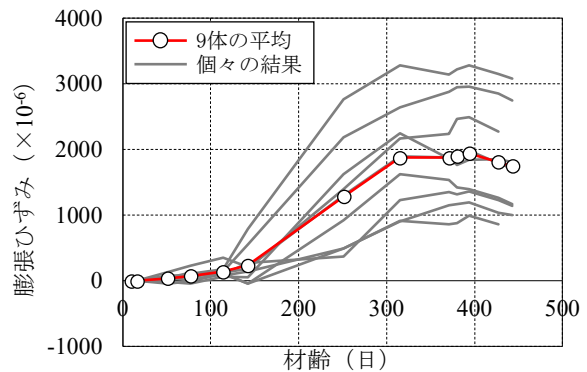


図-7 鉛直方向の膨張ひずみ (RCはり)

直方向の膨張挙動は、図-3で示した円柱供試体と同様の傾向を示していることが確認できる。鉛直方向には膨張を拘束するものがないためであると考えられる。ただし、膨張ひずみの大きさは円柱供試体よりも若干大きくなっていると同時に、湿布養生から気中養生へ養生方法を変更した以降においても、円柱供試体ほど収縮ひずみが生じない結果となった。気中養生前の時点の膨張ひずみの平均値は1880 μ であり、標準偏差は722 μ (変動係数38.5%)であった。このとき、膨張ひずみの最大値および最小値は、それぞれ3140 μ および857 μ であった。

図-8に水平方向の膨張ひずみの経時変化を示す。図中の赤線は9体の平均値であり、それぞれ測定点の高さ(下から140、75、10mm)ごとに示している。図より、材齢に伴う膨張ひずみの変化は円柱供試体や鉛直方向ひ

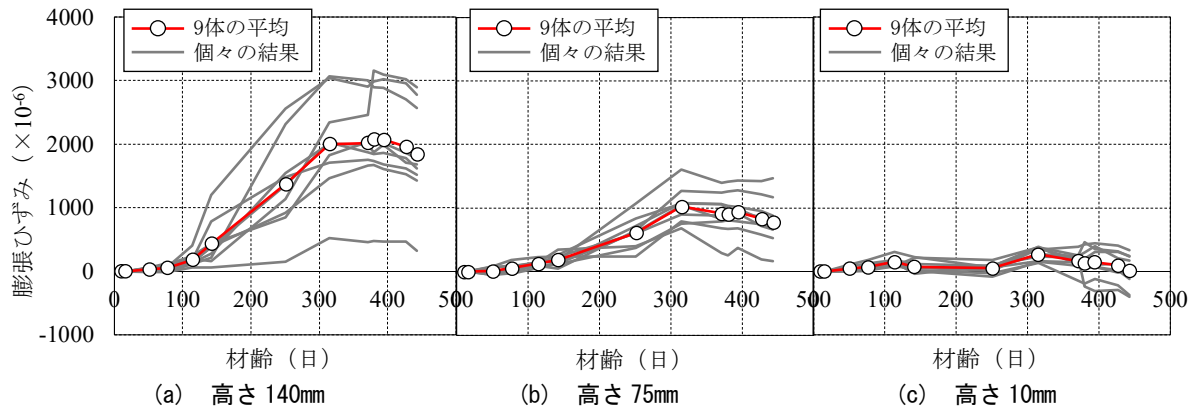


図-8 水平方向の膨張ひずみ (RCはり)

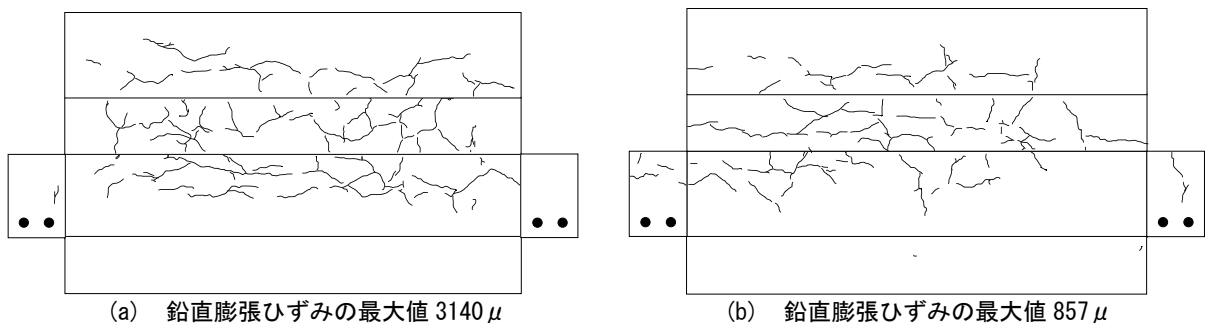


図-9 荷重直前のひび割れ図

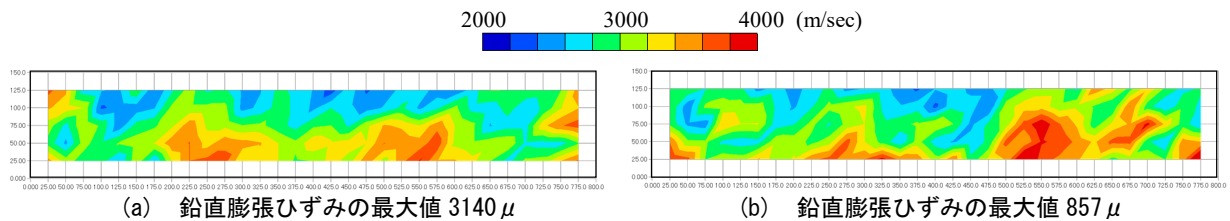


図-10 超音波伝播速度の分布

ずみと同様であることがわかる。ただし、膨張ひずみの大きさは、高さ 140mm では鉛直方向の膨張ひずみと同程度であるのに対して、高さ 75mm ではおよそ半分程度となり、高さ 10mm では膨張ひずみはほとんど生じない結果となった。これは、軸方向鉄筋により膨張が拘束されたためである。なお、高さ 140mm における気中養生前の時点の膨張ひずみの平均値は、 2020μ であり、標準偏差は 724μ (変動係数 35.4%) であった。また、このときの膨張ひずみの最大値および最小値は、それぞれ 3000μ および 459μ であった。鉛直方向ひずみと同様に、ばらつきの大きな結果であった。

図-9 に、一例として鉛直方向の膨張ひずみが最大ならびに最小の供試体の荷重直前のひび割れ図を示す。膨張ひずみが小さい断面の下部にはひび割れが生じていないのに対して、膨張ひずみが大きい断面の上部には、多くのひび割れが観察された。このような傾向は、他の供試体でも同様であった。なお、図に示すように鉛直膨張ひずみが 3.67 倍程度異なったものであってもひび割れ

状態の差異は明確ではなかった。そのため、本研究で対象とした程度の ASR 劣化は、目視により劣化状態を定量的に把握することは困難であるといえる。

4.2 超音波伝播速度のばらつき

図-10 は、RC はりの側面で計測された超音波伝播速度の分布の一例である。それぞれ、鉛直方向の膨張ひずみが最大ならびに最小の供試体から得られたものである。図より、測定位置によりばらつきはあるものの、膨張ひずみが大きい供試体上部の方が供試体下部よりも超音波伝播速度が小さくなる傾向が得られた。

図-11 は、それぞれの供試体の各高さで計測された超音波伝播速度の平均値を示す。この図でも赤線は 9 体の平均値を表している。図より、超音波伝播速度は、断面高さ 25mm では平均値は 3250m/sec 、標準偏差は 115m/sec (変動係数 3.54%) であり、断面高さ 125mm では平均値は 2820m/sec 、標準偏差は 88m/sec (変動係数 3.11%) であった。超音波伝播速度のばらつきは、断面高さによらず変動係数で 3.11~4.41% 程度であり、前節の膨張ひず

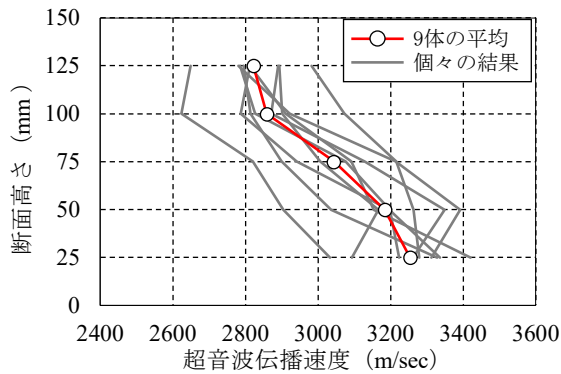


図-11 断面高さ方向の超音波伝播速度の分布

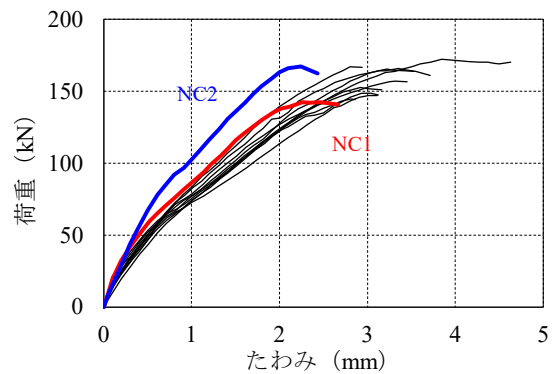


図-12 荷重-たわみ関係

みと比較してばらつきは小さい結果となった。

なお、健全なコンクリートを対象とした結果では、RC はりの超音波伝播速度は円柱供試体と比較しておよそ 450m/sec 程度小さく評価された。その点を考慮しても、ASR 劣化した RC はりの超音波伝播速度は、前章で示した円柱供試体の超音波伝播速度よりも小さい値であった。この理由としては、RC はりの内部における微細なひび割れの方向性が影響していると考えられる。すなわち、円柱供試体は拘束がないため、ひび割れはランダムな方向に生じるのに対して、RC はりでは、断面下部では鉄筋により膨張が拘束されるため、部材軸に平行なひび割れ（水平ひび割れと面外方向に直交するひび割れ）が、断面上部では面外方向に直交するひび割れと負曲げの影響によりひび割れ幅の大きな鉛直方向のひび割れが生じていると考えられる。面外方向に直交するひび割れは、超音波の透過軸に対して直交することを勘案すると、上下部ともに超音波が伝播する経路は長くなり、超音波伝播速度が低下したものと推察される。

4.3 RC はりにおけるコンクリートの力学特性の推定

ASR 劣化したコンクリートの力学特性は、これまで主に膨張ひずみと関係づけられて論じられてきている。そこで、円柱供試体の結果ではあるものの図-5 の関係を用いて、RC はりにおけるコンクリートの圧縮強度を推定することを試みる。前述したように高さ 140mm のコンクリートの膨張ひずみの最大値と最小値はそれぞれ 3000μ 、 459μ である。図-5 によれば、膨張ひずみ 500μ に対しては、圧縮強度は概ね $40\sim 50\text{N/mm}^2$ 程度となり、膨張ひずみ 3000μ に対しては概ね $20\sim 30\text{N/mm}^2$ 程度となり、当該位置のコンクリート強度を推定することができる。

一方、式(1)および(2)の回帰式を用いると、超音波伝播速度から力学特性を推定することができる。例えば、超音波伝播速度 2800、3000 および 3200m/sec に対しては、静弾性係数は、2.79、4.67 および 7.55kN/mm^2 、圧縮強度は、14.7、18.8 および 23.7N/mm^2 と推定される。これらの結果は、コンクリートの力学特性としては非常に小さ

表-1 健全供試体の圧縮強度と最大荷重

	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	最大荷重 (kN)
NC1	52.4	未測定	142
NC2	60.6	37.4	167

表-2 ASR 劣化のばらつきと最大荷重

供試体	膨張ひずみ*1 ($\times 10^{-6}$)	超音波伝播速度*2 (m/sec)	最大荷重 (kN)
1	1870	2890	165
2	459	2810	145
3	2900	2790	149
4	2460	2890	152
5	3000	2810	147
6	1670	2650	172
7	1760	2800	167
8	2040	2980	166
9	1990	2780	157
平均値	2020	2820	158
標準偏差	714	88	9.46
変動係数	35.4%	3.11%	5.99%

*1 高さ 140mm の水平方向の膨張ひずみの平均値

*2 断面高さ 125mm で計測された超音波伝播速度の平均値

い値である。ただし、ここで議論している超音波伝播速度は、RC はりの部材軸に対して直交方向に対するものであることに注意が必要である。

圧縮強度の推定値が、膨張ひずみからの推定されるものと超音波伝播速度から推定されるもので大きく異なった点については、詳細な検討を要するがある。本研究では、これらの結果を踏まえた上で、ASR の違いが RC はりのせん断圧縮挙動に対してどのように影響するのかを次章にて検討する。

5. ASR 劣化の違いがせん断挙動に及ぼす影響

図-12 に、RC はりの荷重-たわみ関係を示す。図中には、非反応性骨材のみを使用した同一の配合条件（ただし、NaOH は未添加）のコンクリートで作製した供試体の結果（以下、健全供試体 NC1 および NC2）を示している。表-1 に示すように健全供試体の圧縮強度は 52.4 および 60.6N/mm^2 である。

表-3 各圧縮強度に対する斜めひび割れ発生荷重とせん断圧縮破壊荷重の算定値

圧縮強度 (N/mm ²)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	せん断圧縮破壊荷重 (kN)
10	42.3	49.7
20	53.3	78.9
30	61.0	103
40	67.1	125
50	72.3	145
60	76.8	164

図より、全ての供試体が斜めひび割れ発生後に荷重が増加した後、斜めひび割れ上部のコンクリートが圧壊することで終局に至る典型的なせん断圧縮破壊を呈した。また、曲げ剛性に着目すると、ASR劣化した供試体は健全供試体と比較して小さくなっていることがわかる。これは、コンクリートの静弾性係数が低下したことによる影響であると考えられる。一方、最大荷重に着目すると、ASR劣化した供試体9体にある程度ばらつきはあるものの、最小値はNC1供試体と同程度であり、最大値はNC2供試体と同程度であった。表-2に載荷試験の結果から得られたASR劣化した供試体の最大荷重を示す。先述のようにASR膨張に伴いコンクリートの強度特性は低下していると考えられるため、最大荷重は低下すると推察される。しかし、表-2に示すように、最大荷重は147~172kNとなり、健全供試体の結果と比較して大きく低下することはなかった。ここで、最大荷重の平均値は158kN、標準偏差は9.46kN(変動係数5.99%)であり、膨張ひずみと比較して、ばらつきは小さい結果となった。この結果から、材料劣化の程度を定量的に評価はできていないものの、材料劣化のばらつきがせん断圧縮挙動に及ぼす影響は小さいことが示唆される。

ここで、前章で推定した圧縮強度の確からしさを確認するために、有効高さ122mm、鉄筋比3.25%、せん断スパン比1.61のRCはりに対して、圧縮強度を10~60N/mm²まで変化させた際の斜めひび割れ発生荷重とせん断圧縮破壊荷重を算定した。なお、斜めひび割れ発生とせん断圧縮破壊荷重の算定には、それぞれ二羽らの棒部材式^{4,5)}を用いた。表-3に結果の一覧を示す。斜めひび割れ発生荷重がせん断圧縮破壊荷重よりも小さいことから、いずれの圧縮強度においても斜めひび割れ発生後にせん断破壊が生じることが予測された。また、圧縮強度が小さくなるに従って、算定されるせん断圧縮破壊荷重も小さくなることからわかる。この結果から、膨張ひずみと超音波伝播速度のいずれの方法からであっても、推定した圧縮強度から予測されるせん断耐力は、実際のせん断耐力を過小評価する結果となった。一般に、ASR劣化したRCはりでは、軸方向鉄筋が膨張を拘束すること

でケミカルプレストレスが導入されることが知られている。そのため、本研究においても、ケミカルプレストレスの影響によりせん断耐力が増加したことも考えられる。

今後は、材料の劣化ばらつきやケミカルプレストレスの影響について解析的な検討を進めていくことで、本実験に関する詳細な検討を進めるとともに、非破壊試験の結果を非線形解析へ導入する際の適切かつ合理的な方法について検討を進めていく予定である。

6. まとめ

本研究では、複数の同一諸元のRCはりを用いて、ASRのばらつきを検討するとともに、ASR劣化の違いがRCはりのせん断圧縮破壊に及ぼす影響について検討した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) ASRによるRCはりの膨張挙動には、ある程度ばらつきがあることを示した。一方、計測された超音波伝播速度のばらつきは膨張と比較して小さいことが確認された。
- (2) RCはり中の材料劣化の程度を定量的に評価はできなかったものの、ASR劣化したRCはりのせん断圧縮耐力のばらつきは小さく、材料劣化のばらつきがせん断圧縮挙動に及ぼす影響は小さいことが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費(19H02226)の助成を受けて実施した。また、本実験の一部は、中部主暁氏(元関西大学学部生)により行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー124, アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, 2005
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編], 2018
- 3) 岩野聡史, 森濱和正, 渡部正：衝撃弾性波法と微破壊試験の併用による構造体コンクリートの圧縮強度推定方法の提案, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.138-153, 2013
- 4) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986
- 5) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディーブビームのせん断耐力算定式, 日本コンクリート工学協会, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983