

論文 床版部材の ASR 膨張挙動と FRP シート貼付けによる膨張抑制

久保 善司^{*1} 佐古 崇^{*2} 川崎 文義^{*3} 横山 広^{*4}

要旨: これまで比較的劣化事例の少なかった床版部材においてもアルカリ骨材反応による劣化事例が報告されている。床版部材においては、主筋・配力筋方向以外の鉄筋拘束がないため、ASR 膨張が生じた場合には、床版の厚さ方向に大きな膨張が生じ、それらが床版の性能に与える影響が懸念される。そこで、床版を模擬した供試体を作製し、その膨張挙動およびシート貼付けによる膨張抑制効果について検討を行った。その結果、厚さ方向の大きな膨張によって、大きな材料劣化が生じ、水平方向と厚さ方向に大きな異方性が生じること、シート貼付けによる貼付け面近傍の材料劣化の抑制が期待できることが明らかとなった。

キーワード: アルカリ骨材反応, 凍結防止剤, FRP シート, ASR 膨張, 床版劣化

1. はじめに

近年、アルカリ骨材反応 (ASR) による過大な膨張を生じて著しく劣化した構造物が報告されている。アルカリ骨材反応により劣化した構造物の耐荷性能については、内部に配置された鉄筋によって適切に拘束されている場合には、健全なものに比べて顕著な低下はないものとされてきた。しかし、過大な膨張を生じて鉄筋破断、内部コンクリートの強度低下などを生じた構造物も報告されるようになり、これらの構造物の補強対策が実施された事例も報告されている¹⁾。

一方、寒冷積雪地域においては、スパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の使用は、コンクリート構造物の劣化を深刻なものとしている。アルカリ骨材反応においても凍結防止剤によって劣化が促進されることが知られている。これまで劣化事例の比較的少なかった床版構造物においてもアルカリ骨材反応による劣化事例が報告されている (写真-1)²⁾。海外の事例では、1995 年以来 Walloon 地方において、原因不明とされた床版部材における劣化が 70 橋以上が発見され、調査の後、ASR によるものと判明し、その特徴として、床版上部のコンクリートの脆弱化や水平ひび割れを挙げている³⁾。

ASR により劣化した竣工後 25 年経過したラーメン高架橋のスラブより切出した梁試験体の材料強度試験および RC 梁試験体に関する報告では、層状の水平ひび割れが確認され、採取コアの強度低下は認められたものの、ASR の部材耐力への影響は小さいと報告している⁴⁾。しかし、この場合には、切出し後の梁試験体の結果であるため、床版部材としての力学的性能を十分に把握していない点が指摘される。

一般的にアルカリ骨材反応による膨張がコンクリート



写真-1 劣化床版²⁾

部材の力学的性能に与える影響に関して、鉄筋拘束の寄与は大きい。きわめて鉄筋拘束が小さいものでは、拘束の大きなものより強度低下が大きいとされている⁵⁾。一方、横拘束筋を配置した柱部材を想定した検討においては、実構造物程度の拘束量を有するものでは、最大耐力の大きな低下はないとされている⁶⁾。また、帯筋を配置したものでは、コンクリート強度が同一の場合には、10~20%程度耐力が大きくなるとされている⁷⁾。また、鉄筋拘束が与える影響について、内部コンクリートの力学的性能について検討した結果では、拘束条件下においては、膨張によって顕著な強度低下はないものの、静弾性係数は膨張に伴い低下することが報告されている⁸⁾。

床版部材の場合には、梁・柱部材と比較して鉄筋比は小さい。さらに、主筋方向および配力筋方向以外の鉄筋拘束がなく、アルカリ骨材膨張が生じた場合には、床版の厚さ方向に大きな膨張が生じ、それらが床版部材の性能に影響を与えることが懸念される。

本研究では、床版部材を模擬した供試体を作製し、アルカリ骨材反応が生じた場合の床版部材の膨張挙動を詳

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻准教授 工博 (正会員)

*2 金沢大学 工学部土木建設工学科 (非会員)

*3 鹿島建設 (株) 北陸支店 工修 (正会員)

*4 ショーボンド建設 (株) 北陸支店 工修 (正会員)

細に把握するとともに、アルカリ骨材反応が生じた場合の膨張抑制対策としてFRPシート貼付けを実施した場合の膨張抑制効果についても検討を行うこととした。さらに、膨張後の床版を模擬した供試体からコンクリートを切り出し、コンクリートの強度特性についても検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

セメントには普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）を用いた。細骨材として非反応性骨材の手取川産骨材（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率 2.88% ）を用いた。粗骨材には、反応性骨材として安山岩碎石（表乾密度 2.66g/cm^3 、吸水率 2.65% 、 $G_{\text{max}}: 20\text{mm}$ ）を用いた。添加アルカリとしてNaOHを用い、短期間に大きな膨張が得られるよう等価アルカリ量を 10.5kg/m^3 とした。なお、NaOH（試薬特級）は練混ぜ水に添加した。コンクリートの配合を表-1に示す。

(2) 鋼材

鋼材として、端部に $\phi 20\text{mm}$ 程度の座金の付いたD6の異形鉄筋を用いた。座金は、床版部材中における主筋および配力筋の定着を確保するために設けた。また、ASR促進環境暴露中の鋼材の鉄筋腐食の影響を避けるため、エポキシ樹脂塗装鉄筋とした。

(3) FRPシート

床版部材は面部材であるため、2方向の炭素繊維シートを用いた。FRPシートの機械的性質を表-2に示す。シート貼付けには、エポキシ樹脂系のプライマおよび含浸樹脂を用いた。

2.2 供試体

(1) 寸法および形状

ASRが発生した床版部材の膨張挙動とその影響を把握できる最小限度の大きさとし、縦 450mm ×横 450mm ×厚さ 110mm の板状供試体とした。供試体の外観を図-1に示す。

(2) 鉄筋比および配筋

実部材での拘束を模擬し、鉄筋比を主筋方向で約 0.05% （上段 0.02% 、下段 0.03% ）とし、配力筋方向で約 0.04% （上段 0.02% 、下段 0.02% ）とした。主筋および配力筋方向それぞれに、上下2段に鉄筋を配置した。主筋方向では、上段3本、下段5本とし、配力筋方向では、上段および下段3本とした。なお、上面・下面のかぶり厚は、主筋で約 25mm を確保し、4つの側面からのかぶり厚は約 50mm を確保した。

(3) 供試体作製

コンクリート打設・脱型後、2週間の湿布養生を行っ

表-1 示方配合

| W/C | s/a | 単位量 (kg/m^3) | | | |
|-----|------|-------------------------|-----|-----|-----|
| | | W | C | S | G |
| (%) | (%) | | | | |
| 55 | 49.0 | 190 | 345 | 834 | 882 |

表-2 シートの物理的・機械的性質

| 繊維目付 (g/m^2) | 設計厚さ (mm) | 引張強度 (N/mm^2) | ヤング係数 (kN/mm^2) |
|-------------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| 150 | 0.083 | 2900 | 245 |

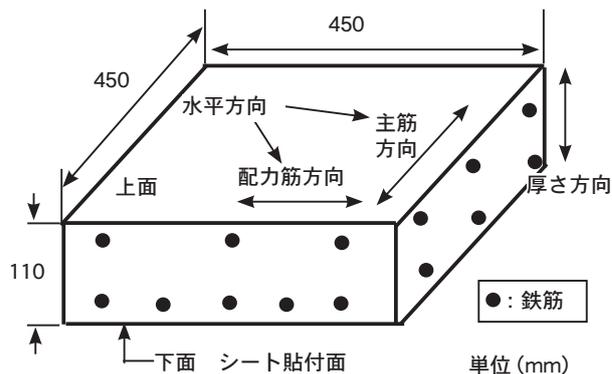


図-1 供試体概要

た。ASR膨張を促進するため、 40°C の飽和NaCl溶液浸漬環境（全浸漬）に暴露した。なお、FRPシート貼付け（2方向シート、供試体下面）を行うものについては、適用時期が与える影響についても検討を行うため、初期（養生後、暴露開始前）にFRPシートを貼付けるものと、膨張促進後（供試体の上面の膨張量 1500μ 程度、促進暴露期間26日）にシート貼付けを行うものの2種類を用意した。FRPシート貼付けのものは、室内1週間のFRP層の養生期間を確保した。供試体は促進環境暴露後、経時的に膨張ひずみおよび超音波伝播速度の測定を実施した。また、膨張が概ね収束した後に、FRPシート貼付けを行わない無補修供試体および初期にFRPシートを貼り付けた供試体から、大型のコンクリートカッターを用いて、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 110\text{mm}$ の立方体状の供試体をそれぞれ4体採取した。採取後の供試体を強度特性把握用供試体とした。

2.3 測定項目

(1) 外観観察

ASR膨張によるひび割れの目視観察を行った。

(2) 表面ひずみ

供試体上面および下面の水平方向ひずみ（主筋および配力筋方向）、側面における水平方向のひずみ（上段、中段、下段）および厚さ方向のひずみ（各側面4箇所）を供試体表面にコンタクトゲージ用チップを貼り付け、測定した（厚さ方向：基長 10mm 、水平方向：基長 300mm ）。コンタクトゲージチップ貼り付け位置を

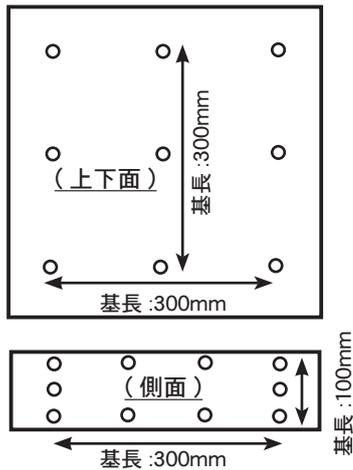


図-2 コンタクトゲージ貼付位置



写真-2 層状ひび割れ

図-2 に示す。

(3) 内部ひずみ

供試体中心付近に埋込み型ゲージを埋設し、水平方向および厚さ方向の内部ひずみを測定した。

(4) 超音波パルス伝播速度

ASR 膨張に伴うコンクリート劣化をモニタリングするため、水平方向および厚さ方向の超音波パルス伝播速度を測定した。

(5) 切出し供試体の材料劣化の把握

供試体より採取した立方体状の供試体の圧縮強度試験および静弾性測定試験を実施し、膨張後のコンクリートの強度特性を把握した。圧縮強度試験は、厚さ方向に2体載荷し、残り2体を水平方向に載荷した。

3. 結果および考察

3.1 外観観察

膨張後の供試体の外観を写真-2 に示す。既往の研究で報告されていると同様に、側面には層状の水平ひび割れが確認された。

3.2 膨張挙動 (表面ひずみ)

(1) 水平方向の膨張

上面および下面の水平方向の膨張ひずみの経時変化を図-3 に示す。シートの貼付の有無にかかわらず、上面の水平方向の膨張量は下面よりも大きくなった。また、

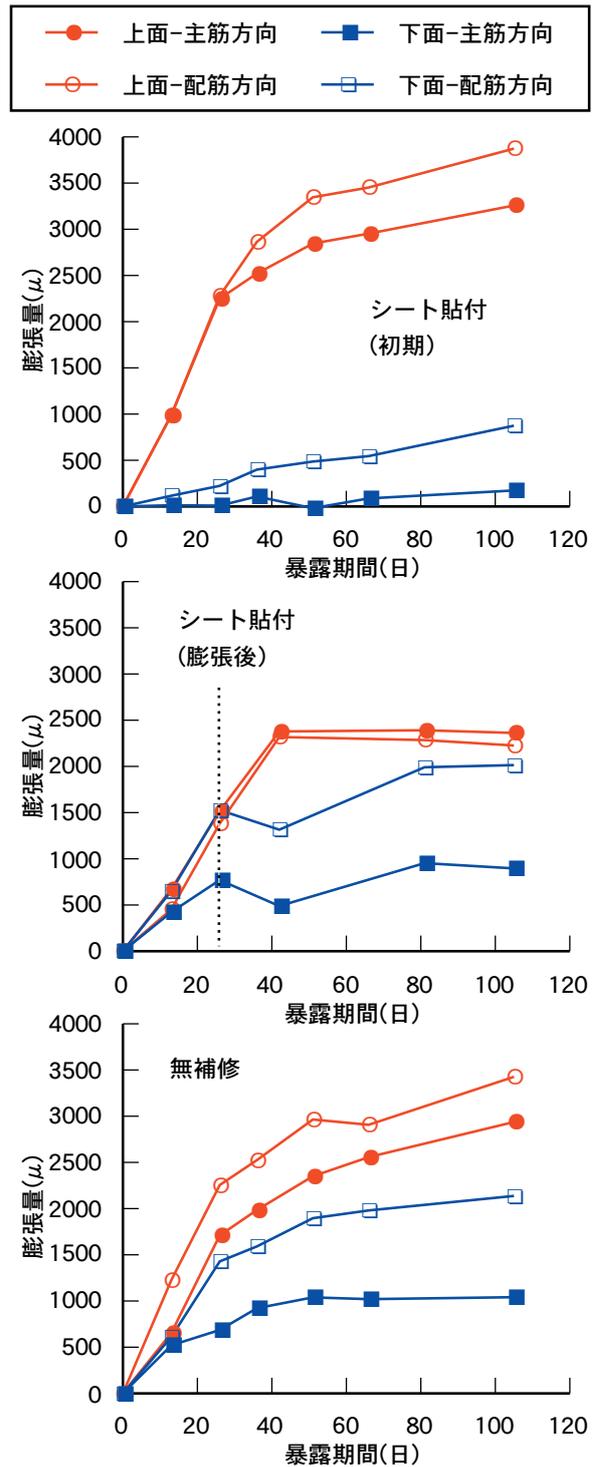


図-3 上面・下面の膨張ひずみ

シート貼付の有無にかかわらず、上面および下面のいずれにおいても、主筋方向より配力筋方向の膨張が大きくなった。床版部材では、上段の鉄筋量は下段よりも小さく、また、配力筋方向の鉄筋量は主筋方向よりも小さい。鉄筋拘束の小さい方向の膨張が大きくなったものと考えられる。したがって、床版では上部側のコンクリートほど大きな膨張が発生しやすいものと考えられる。さらに、実環境では、床版上面の方が水や凍結防止剤の影響を受

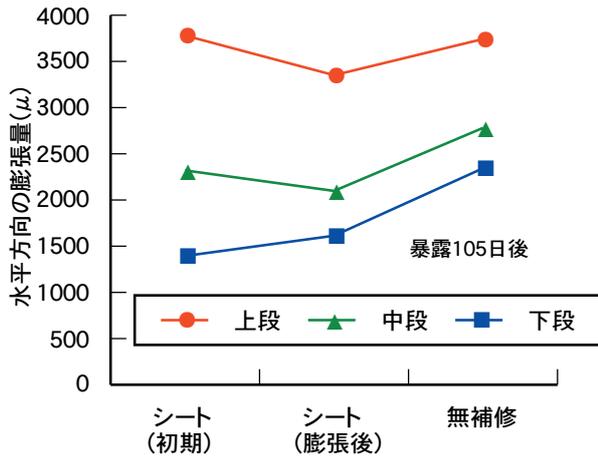


図-4 水平方向の膨張ひずみの分布

けやすく、この傾向はより助長されるものと考えられる。なお、既往の検討において、上部コンクリートの脆弱化が報告されていることは、上記の理由によるものと考えられる。

一方、シート貼付けによる影響については、いずれのものも上面におけるひずみは概ね同程度であるのに対して、初期にシートを貼り付けたものでは、無補修のものより下面の膨張が小さくなっている。一方、膨張後に貼り付けたものでは、貼付け後の無補修の膨張が小さかったことも影響し、若干小さいか、同程度となった。したがって、シートの貼付けによって、下面側の膨張は若干低減されるものの、貼付時の残存膨張がそれほど大きくない場合には、大きな膨張抑制効果は期待できないものと考えられる。なお、上記の膨張抑制効果においては下面からの水分供給をシートによって遮断した効果も含まれているものと考えられる。

水平方向の膨張量の分布（供試体側面の upper・中段・下段で測定された膨張量、暴露 105 日後）を図-4 に示す。いずれのものも上部における膨張量が大きく、下部ほど小さくなる分布となった。シートを貼り付けたものでは、中段および下段の膨張が無補修のものより抑制されており、初期に貼付けたものの方がその傾向は顕著となった。上面側の膨張を拘束できないものの、貼付け面近傍の膨張を抑制することが可能であるものと考えられる。

(2) 厚さ方向の膨張

厚さ方向の膨張ひずみの経時変化を図-5 に示す。シート貼付けの有無にかかわらず、暴露日数の経過とともに膨張は大きくなり、暴露 100 日後においては、8000 ~ 12000 μ 程度の膨張を示した。水平方向のひずみが最大で 4000 μ 程度であったのに対して、きわめて大きな膨張を示した。すでに述べたとおり、床版部材においては厚さ方向の拘束はなく、拘束のない厚さ方向に膨張力

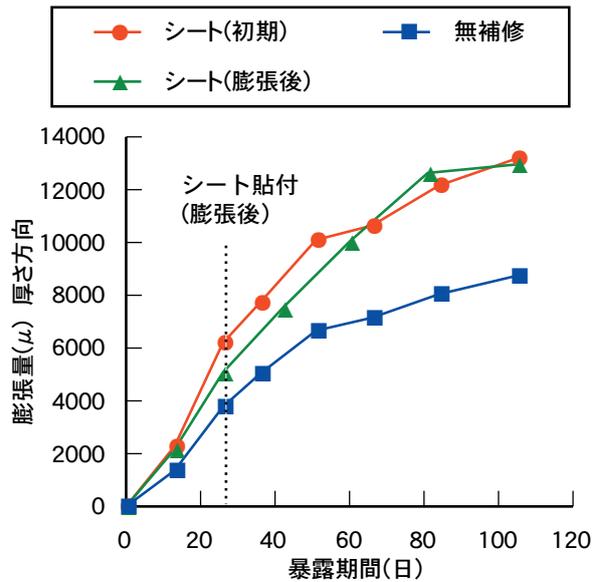


図-5 厚さ方向の膨張ひずみ

が作用し、きわめて大きな膨張を生じたものと考えられる。外観観察で確認された水平方向のひび割れは、厚さ方向の膨張によって生じたものと考えられる。また、厚さ方向には拘束がないため、この方向における大きな膨張は、顕著な材料劣化を引き起こす可能性があるものと考えられる。

シートを貼付けたものの厚さ方向の膨張は無補修のものよりも大きくなったが、厚さ方向の基長が 100mm であったため、測定箇所のひび割れ発生位置などの影響により生じたものと考えられる（後述の内部ひずみの厚さ方向では、無補修のもの膨張が大きい）。したがって、厚さ方向の膨張量には、シート貼付けによる影響はなかったものと考えられる。シート貼り付けを実施した場合には、厚さ方向の材料劣化の抑制を期待することは膨張挙動の観点からは難しいものと考えられる。

(3) 内部ひずみ

供試体中心部で測定された内部コンクリートの膨張ひずみの経時変化を図-6 に示す。水平方向については、シート貼付けの有無にかかわらず、同程度の膨張を示し、中心付近の膨張は同程度となった。また、中心部付近の膨張量はコンクリート表面よりも小さく抑制されていた。かぶり近傍よりも中心部の膨張は抑制されているものと考えられる。しかし、表面ひずみの結果からは上部には大きな膨張が生じていることから、床版上部の膨張は中心部と同様には抑制されておらず、大きな膨張が生じているものと考えられる。

一方、シート貼付けによる抑制効果は、中心付近の水平方向の膨張量には現れていないことから、貼付け面近傍に留まるものと考えられる。シートに期待する効果としては、貼付け面近傍のコンク

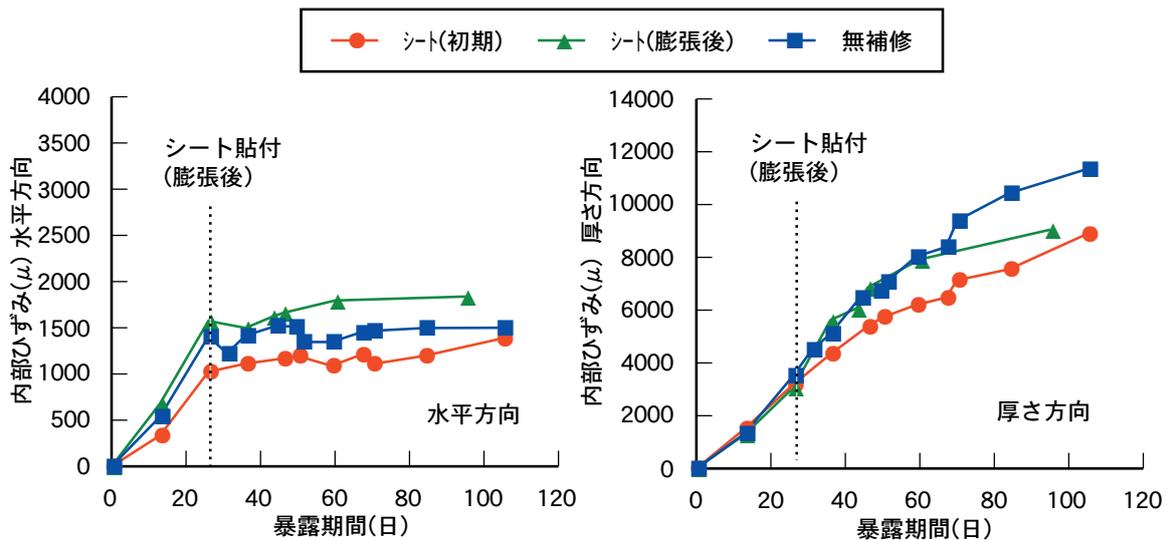


図-6 内部ひずみ

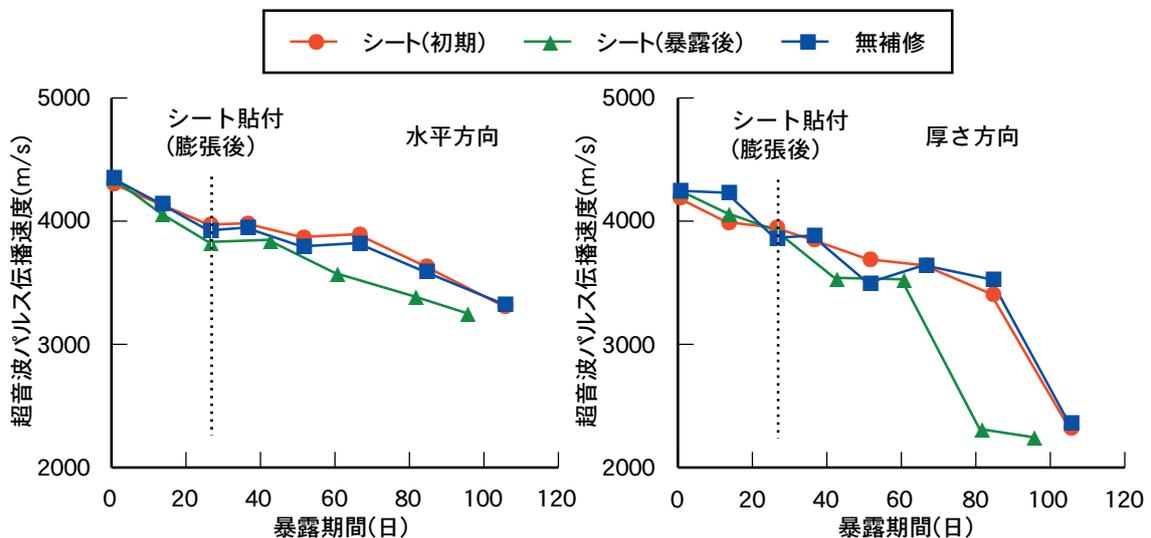


図-7 超音波パルス伝播速度

リートの膨張を抑制することで、シートとかぶりコンクリートとの一体性が確保されことによって、膨張を生じた場合にも耐荷力への寄与を期待できる可能性がある。

厚さ方向については、シート貼付けの有無にかかわらず、大きな膨張を示した。3.2(2)の表面ひずみ（厚さ方向）ではシート貼付けのものの方が大きな膨張を示し、これに対して内部ひずみでは、無補修のものの方が大きな膨張を示した。両者の結果が異なること、測定精度の問題を考慮すると、中心部における厚さ方向の膨張量は概ね同程度であるものと考えられる。厚さ方向については、表面ひずみおよび内部ひずみともに、8000 μを越えるきわめて大きな膨張量を示しており、床版部材においては、厚さ方向による膨張によって生じる材料の劣化が顕著であるものと考えられる。また、これらの部材性能に与える影響については今後の検討が必要である。

(4) 超音波パルス伝播速度

超音波パルス伝播速度の経時変化を図-7に示す。水平方向および厚さ方向いずれにおいても、シートの貼付けの有無にかかわらず、暴露期間とともに伝播速度は小さくなった。また、厚さ方向の減少は、水平方向に比べて顕著であった。これらの結果は、表面ひずみおよび内部ひずみの結果と一致しており、膨張に伴い内部コンクリートの材料劣化が進行しているものと考えられる。シート貼付けのものでも無補修のものと同様の傾向を示していることから、シート貼付けによる内部コンクリートの劣化抑制は十分でない可能性が高いものと考えられる。

(5) 切出し供試体の材料劣化

切出し供試体の圧縮試験結果および静弾性係数測定結果を図-8に示す。厚さ方向に載荷したものの圧縮強度

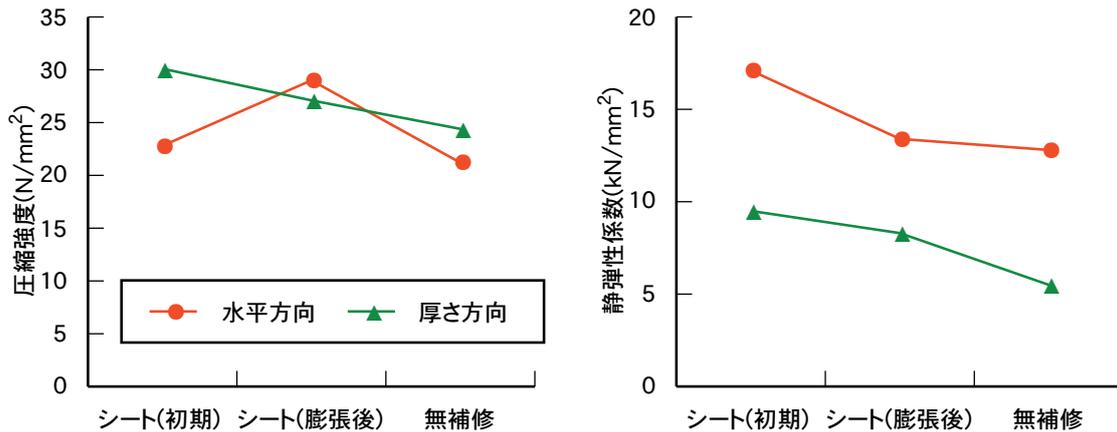


図-8 切り出し供試体の圧縮強度・静弾性係数

については、シート貼付けのものの方が大きい傾向にあり、シート貼付面近傍のコンクリートの材料劣化が抑制されたことによるものと考えられる。一方、水平方向に载荷したものの圧縮強度については、一定の傾向は認められなかった。シート貼付けの有無にかかわらず、目視で確認できる層状の水平ひび割れが発生しており、これらの方向性のあるひび割れの影響が顕著に現れたためと考えられる。

静弾性係数については、载荷方向による顕著な違いが認められ、シートの有無にかかわらず、厚さ方向に载荷したものの静弾性係数は、水平方向に载荷したものの半分程度となった。厚さ方向に大きな膨張を生じたため、その方向の材料劣化の影響が静弾性係数に顕著に現れたものと考えられる。一方、シート貼付けのものは、いずれのものも無補修のもの静弾性係数より大きくなった。シート貼付けにより貼付面近傍のコンクリートの材料劣化が抑制されたことによるものと考えられる。しかし、いずれの場合においても、水平方向と厚さ方向では材料の性質に大きな異方性が生じるため、これらが実際の床版部材の力学的性能に与える影響については、今後の課題であると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 床版部材の厚さ方向には、拘束がないため、きわめて大きな膨張が生じる。層状の水平方向のひび割れは厚さ方向の膨張によって引き起こされる。
- (2) 水平方向の膨張については、上部側のコンクリートほど大きな膨張が発生しやすく、実環境では、床版上面の方が水や凍結防止剤の影響を受け、この傾向が助長される。
- (3) 床版部材において ASR 膨張が生じた場合には、水平方向と厚さ方向では材料の性質に大きな異方性が生じる。

- (3) シート貼付けによる効果は、貼付面近傍に限定され、シート貼付けによる内部コンクリートの劣化抑制は十分でない可能性が高い。
- (4) シートを貼り付けたものでは、かぶりコンクリートとシートの一体性が確保されることによって、膨張を生じた場合にも耐荷力への寄与を期待できる可能性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.8
- 2) 横山広ら：凍結防止剤の影響を受けた構造物の実態調査，平成 19 年度土木学会中部支部研究発表会概要週，pp.423-424，2008.3
- 3) Philippe, Demars et.al : The degradation of the bridge deck slab in Belgium mainly involves alkali-silica reactions, Proc. of 13th Int. conference on alkali-aggregate reaction in concrete, pp.964-972, 2008.6
- 4) 田附伸一ら：ASR 膨張により劣化した RC 部材の耐荷特性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.1765-1770, 2004.6
- 5) 小柳治ら：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，No.52, pp.786-791, 1998.12
- 6) 棚橋和夫ら：ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.843-849, 1996.6
- 7) 竹村和夫ら：アルカリ骨材反応を生じた帯鉄筋柱の一軸圧縮特性：セメント・コンクリート論文集，No.44, pp.684-689, 1990.12
- 8) 久保善司ら：ASR 膨張が内部コンクリートの強度特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.1071-1075, 2008.7