

アルカリ骨材反応による劣化の進行した RC 床版の押し抜きせん断試験

コンクリート研究室 小林 孝元

指導教員 下村 匠

1.はじめに

近年、道路橋の RC 床版において ASR に起因すると思われる”土砂化”の劣化事例が報告されている。RC 床版の土砂化は、床版上縁に発生したひび割れに雨水等の水分が供給され、さらに輪荷重が作用することで生じると考えられており、この土砂化を伴う床版の疲労寿命は、著しく低下することが実験的に確かめられている¹⁾。ASR ひび割れを有する RC 床版に疲労荷重が作用すると疲労寿命は著しく低下すると予想されるが、ASR が進行した床版部材の研究はごく少数^{2) 3)}であり、十分な知見がまともまっているとはいいがたい。そこで本研究では、ASR が床版部材に及ぼす影響を検討することを目的として、ASR 反応性骨材を用いた RC 床版を作製し、ASR を促進させたうえで荷重試験を行った。

試験体作製から荷重試験に至るまでの工程を水準毎にまとめたものを表 - 3 に示す。ASR 膨張の促進は、コンクリートを 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬する「デンマーク法」により行った。コンクリートが十分に硬化するまで ASR

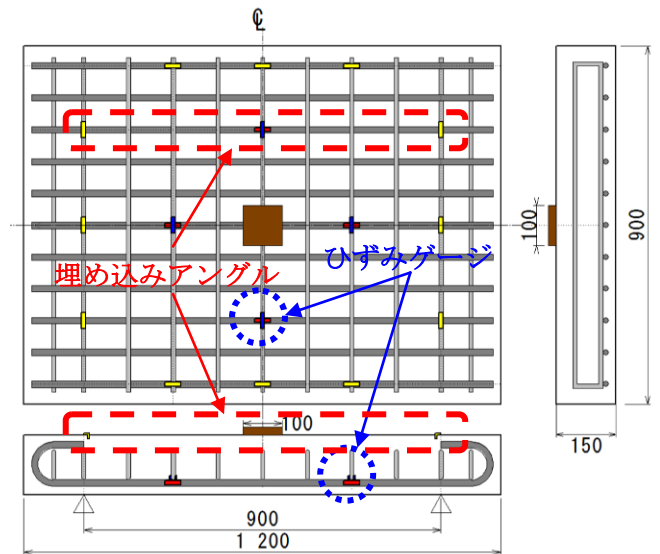


図-1 試験体寸法・配筋

2.試験体概要

試験水準を表 - 1 に示す。ASR を促進させた RC 床版と健全なものを作製し、荷重試験を行った。荷重方法は、静的荷重と疲労荷重の 2 種類とし、疲労試験においては、水中と気中の 2 水準で試験を行った。

試験体寸法・配筋を図 - 1 に示す。ひび割れによる定着性能の低下の影響を排除するために、鉄

表 - 1 試験水準

	健全床版	ASR促進床版
静的試験	N-S	A-S
疲労試験(水中)	N-F-W	A-F-W
疲労試験(気中)	N-F-A	A-F-A

筋端部に半円フックを設けて定着を確実なものとした。コンクリートの配合を表 - 2 に示す。粗骨材に反応性骨材(新潟県姫川産)を用い、食塩 (NaCl) をコンクリートに練り混ぜることで ASR の促進を促した。

表 - 2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)					アルカリ量 (kg/m ³)
			W	C	S	G	Ad ₁	
25	55	41	170	309	738	1095	0.77	18

表 - 3 試験体養生・荷重工程

年	2011				2012								2013		
月	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9~11	12	1
A-S	試験体 作製	封緘 養生 (28日)	[Red shaded area]										●		
A-F-W													●		
A-F-A													●		
N-S	試験体 作製	封緘 養生 (28日)	[Blue shaded area]										●		
N-F-W													●		
N-F-A													●		

■ : デンマーク法による ASR 促進

■ : 気中養生

● : 荷重試験

が生じないように、打設後に封緘養生を28日間施し、その後気中養生を行った。ASRの促進は、材齢43日から開始した。

膨張量を測定する位置及び方向の呼称を表-5に示す。床版上面の膨張量は、コンクリート表面に埋め込んだステンレス製アングルの間隔をノギスで測定して求めた(図-2)。アングルの間隔は主鉄筋方向で約1000mm、配力筋方向で約800mmとした。鉄筋位置における膨張量は、主鉄筋及び配力筋に貼り付けたひずみゲージにより測定した。埋め込みアングル及びひずみゲージの設置位置は図-1に示したとおりである。

3. 膨張量測定結果

膨張量の測定結果を図-3に示す。各試験体の膨張量は概ね一致している。主鉄筋による拘束を受ける鉄筋位置においては500 μ 程度の膨張量であるのに対し、主鉄筋による拘束度の小さい床版上縁では、10000 μ 以上膨張した。この上縁と下縁での膨張量の差から、試験体には“反る”変形が生じた。配力筋方向では、鉄筋配置が断面对象であるため、断面内での膨張量分布に傾きは生じないはずであるが、実際には上縁と鉄筋位置では膨張量に差が生じた。これは鉄筋位置での膨張が、主鉄筋により拘束を受ける「負のポアソン効果⁴⁾」によるものと思われる。

4. コア抜き供試体

ASRによるコンクリートの膨張は、コンクリート中の組織の破壊を伴うため、膨張量とコンクリート強度の低下量とは密接な関係にあると考えられる。そのため、鉄筋による拘束度が断面一様でない場合、ASRの進行とともに試験体断面内の材料物性は一様でなくなると考えられる。床版の耐力評価の際には、このような物性の変化を考慮する必要がある。

拘束度と圧縮強度の関係を検討するため、図-4のような一軸拘束試験体を作製し、この試験体から採取したコアよりコンクリートの圧縮強度と弾性係数を計測した。膨張量の変化に対して支配的なパラメータである拘束鋼材比は、「膨張コンクリートのエネルギー一定則」に基づいた計算方法⁵⁾を参考に決定した。

表-4 品質試験結果

	スラブ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)	AT (°C)
Aシリーズ (2011/09/27打設)	21.5	6.5	23.6	22.4
Nシリーズ (2012/03/01打設)	4.5	1.8	20.8	20.8



図-2 ノギスによる膨張量測定状況

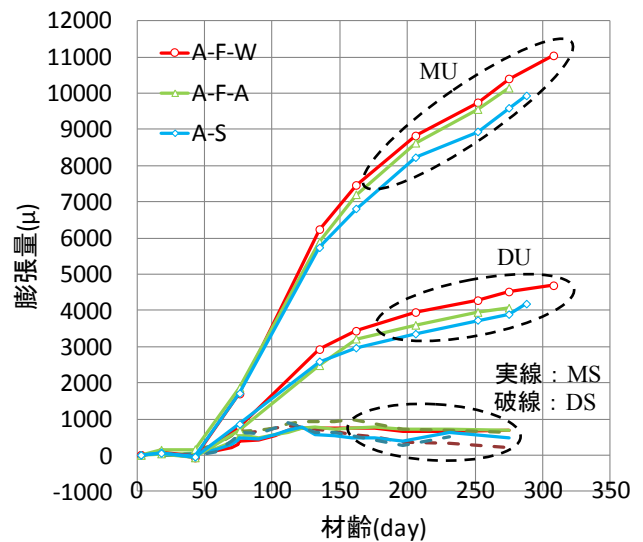


図-3 膨張量測定結果

表-5 膨張量測定位置・方向の呼称

	主鉄筋方向	配力筋方向
床版上面	MU	DU
鉄筋位置	MS	DS

採取したコアの圧縮強度試験の結果を図-5に、コア抜き用とは別に作製した膨張量測定用の一軸拘束供試体による膨張量の経時変化を図-6のグラフに示す。圧縮強度の低下よりも弾性係数の低下が顕著に表れている。水準毎の差は若干であるが、鋼材比が小さい水準ほど圧縮強度や弾性係数の低下量が大きくなることが確認された。一方、拘束方向の膨張量は拘束比によって大きく異なることから、強度や弾性係数の低下率は拘束方向の膨張量との相関性は低いことがわかる。

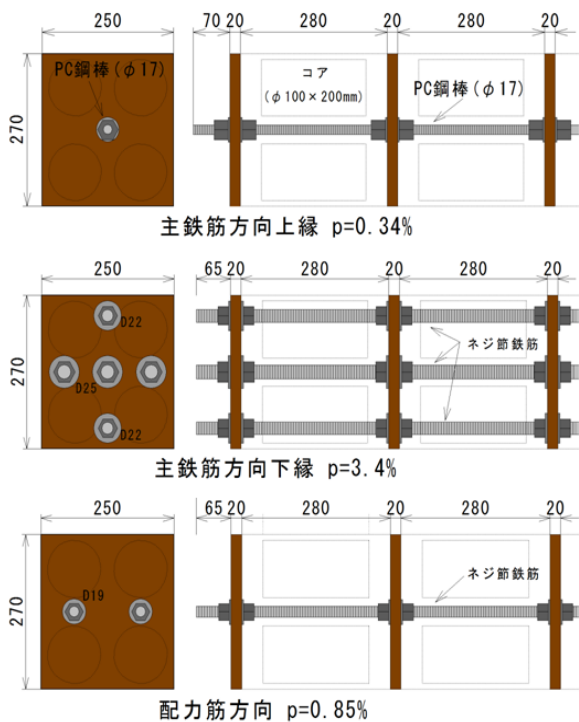
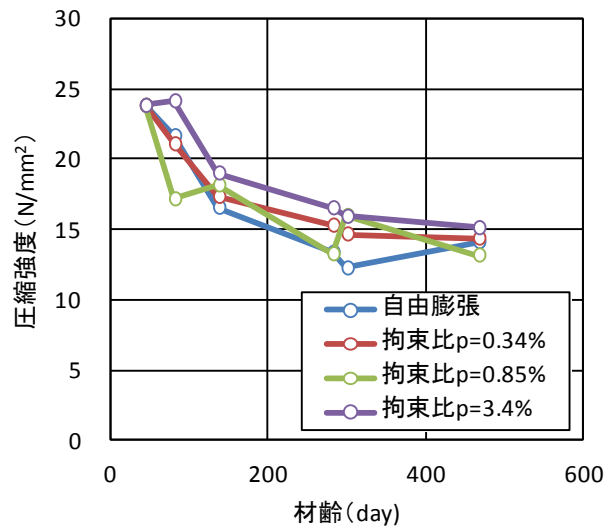


図 - 4 コア抜き供試体とその鋼材

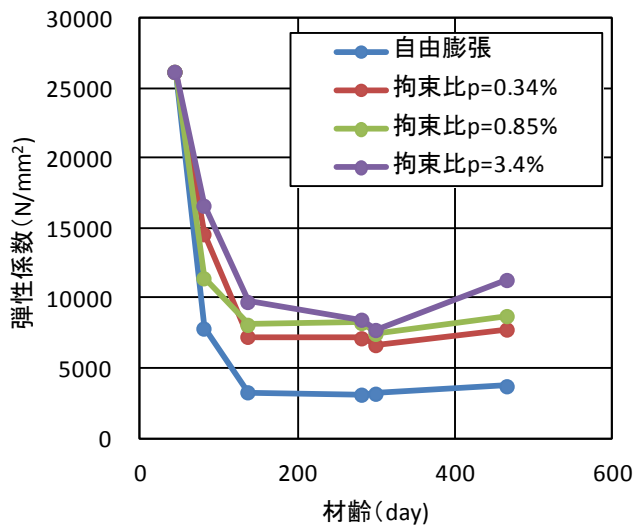
5. 静的載荷試験

支持条件は、2辺単純支持で、支間は900mmとした。載荷板には100×100mmの鋼板を使用し、試験体中央を一点集中載荷した。計測項目は支間中央変位と荷重及び支点の変位である。載荷は試験体が破壊し且つ支間中央変位が20mmに達するまで続した。

静的載荷試験の結果を、図-4の荷重-載荷点変位関係に示す。耐力評価に用いた式は、式(1)に示す前田・松井式である。A-Sの耐力の計算値(ASR促進後)は、床版試験体と同環境下でASR促進を行ったシリンダー供試体の圧縮強度($f_c' = 15.3 \text{ N/mm}^2$, 材齢282日)より求めた。なお、N-S試験体の圧縮強度は 41.3 N/mm^2 であり、促進前のA-S試験体の圧縮強度は 23.8 N/mm^2 とコンクリート強度にかなり差があった。シリーズ間のコンクリート強度の差を考慮するため、式(2)によりN-Sの最大荷重を補正した。N-Sにおいては計算値と実測値は概ね一致している。A-Sは促進前の圧縮強度で計算した値より実測値が3割ほど低くなる結果となった。また、ASRによるコンクリートの強度低下を考慮しても、計算値は実測値を若干大きく見積るので、ASR床版の耐力低下の原因は、コンクリートの強度低下のみではないことが示唆される。



(a) 圧縮強度



(b) 弾性係数

図 - 5 採取コアの圧縮強度試験結果

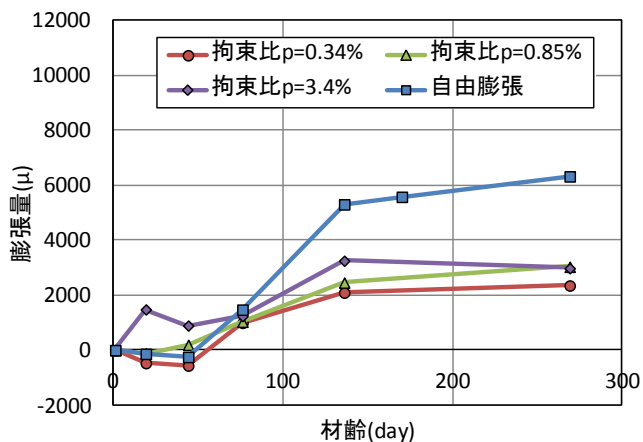


図 - 6 膨張量の経時変化

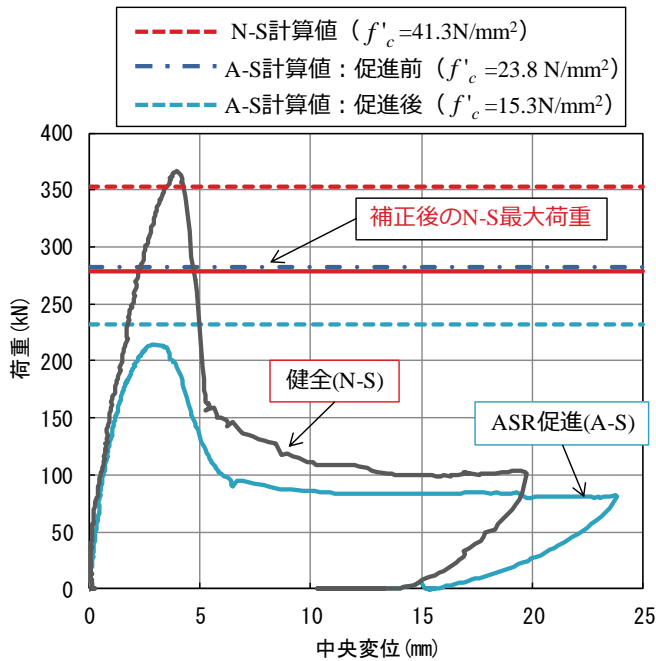


図 - 7 静的荷重試験結果

$$P = \tau_{s\max} \cdot A_S + (1/2) \cdot \sigma_{t\max} \cdot A_d \quad (1)$$

$$\tau_{s\max} = 0.252f'_c - 0.00024(f'_c)^2$$

$$\sigma_{t\max} = 0.583(f'_c)^{2/3}$$

$$A_S = 2(a + 2X_m)X_d + 2(b + 2X_d)X_m$$

$$A_d = 2(4C_d + 2d_d + b)2C_m + 2(a + 2d_m)2C_d$$

$$E_c = 210000 + 900(f'_c - 300)$$

$\tau_{s\max}$: コンクリートの最大せん断応力(kgf/cm²)

$\sigma_{t\max}$: コンクリートの最大引張応力(kgf/cm²)

a, b : 荷重版辺長(cm)

X_m, X_d : 主筋, 配力筋に直交断面に引張側コンクリートを無視した断面の中立軸深さ(cm)

d_m, d_d : 主鉄筋, 配力筋の効高さ(cm)

C_m, C_d : 主筋・配力筋からの効り厚さ(cm)

$$P'_N = \sqrt{\frac{f'_{ca}}{f'_{cn}}} \cdot P_N \quad (2)$$

P'_N : 補正した N-S の最大荷重

P_N : 補正前の N-S の最大荷重

f'_{ca} : ASR 促進前の A シリーズのシリンダー供試体の圧縮強度

f'_{cn} : N シリーズのシリンダー供試体の圧縮強度

6. 疲労試験

支持条件, 荷重版辺長, 計測項目は静的荷重と同様とした。N-F-W 及び A-F-W への水の供給方法は, 図-7 に示すように試験体上面にスタイロフォームで堤を設け, N-F-W は荷重直前に, A-F-W は試験の前日に水を張った。

試験時の荷重振幅は, 事前実験の結果を参考に, また試験体のコンクリート強度の違いを考慮して, N-S 及び A-S の静的耐力の 70% を振幅の最大値, 4% を振幅の最小値に設定して試験を行った。

疲労試験結果を図-8 に示す。S-N 線図の計算値は, コンクリート標準示方書設計編⁶⁾より求めた。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{pcd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{14} \right) \quad (3)$$

V_{rpd} : 設計押抜きせん断疲労耐力

V_{pcd} : 設計押し抜きせん断耐力

V_{pd} : 永久荷重作用時の設計押し抜きせん断力

N : 繰返し回数

N シリーズの結果については, 前述したシリーズ間の圧縮強度差を考慮し結果の補正を行ったデータを示している。静的強度と同様に, シリーズ間の強度差の影響を差し引いても, ASR 床版の疲労寿命は健全床版を下回る結果となった。ASR 床版の疲労寿命は, 実測値と計算値 (A-S の実測静的耐力を式(3)に代入して算出) とが概ね一致していることから, ASR 床版の疲労寿命は, 静的耐力が適切に評価出来れば示方書式により推定可能であるといえる。

水分が侵入することによる疲労寿命の低下については, 健全床版においてはやや見られるが, その低下量は, 床版



図 - 8 疲労試験状況(水中)

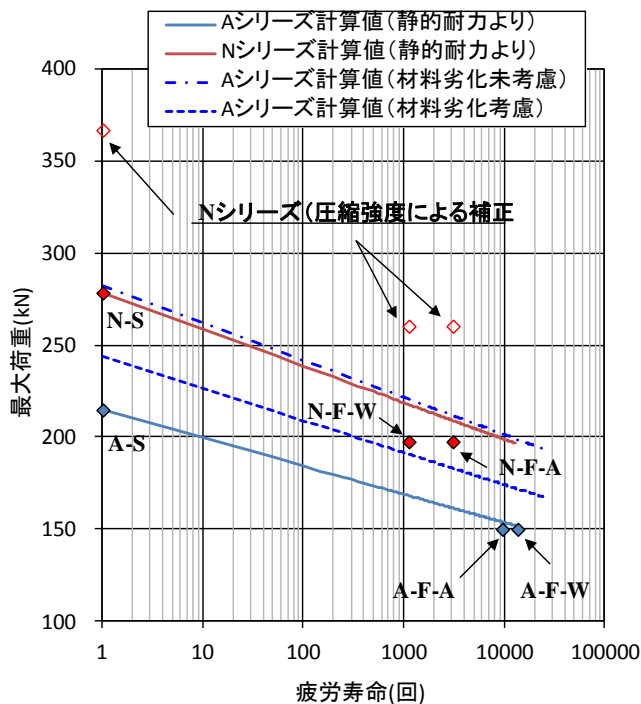


図 - 9 疲労試験結果

に輪荷重を作用させた既往の実験¹⁾におけるものと比較して小さい。また、ASR 床版では水中疲労が気中疲労の疲労寿命と同程度となる結果となった。本研究で実施した定点点繰返し荷重では、輪荷重とは異なり、ひび割れ面相互のすり磨き効果は現れにくいため、水分供給の影響が表れにくかったものと思われる。

7. ひび割れ観察

ASR ひび割れの観察は、荷重試験の直前に目視によるスケッチとマイクロスコープによるひび割れ幅の測定を行った。Aシリーズの例として、A-Sのひび割れ図を図 - 10 に示す。床版上面（荷重面）には細かい亀甲状のひび割れが、裏面においては主鉄筋に沿う形でひび割れが発生していた。上面に生じたひび割れの幅はおおよそ 0.02mm～2.0mm であったのに対し、裏面に発生したひび割れの幅は 0.01mm～0.8mm であった。これらの表面に見えるひび割れは、その深さが概ね 10mm 以内であったことが、後述する断面観察により確認できた。

破壊形式や破壊領域などの確認を目的として、荷重終了後に試験体を切断して内部ひび割れの観察を行った。切断時の試験体の分裂を防ぎ、かつひび割れが観察しやすくなるように、切断作業に先立って、ひび割れに蛍光剤を混ぜたエポキシ樹脂を注入した。樹脂の硬化後、試験体を軸方

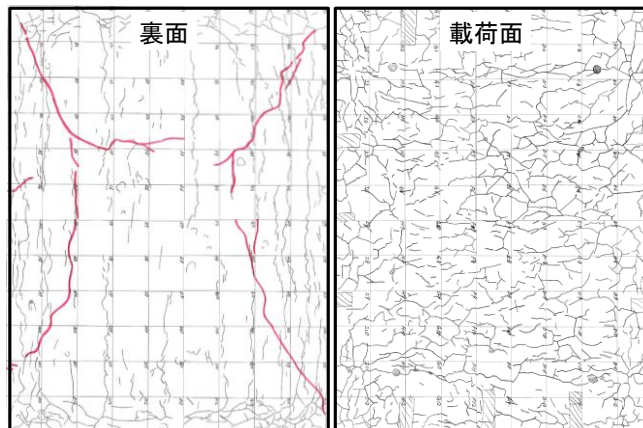


図 - 10 ひび割れ観察図(A-S)

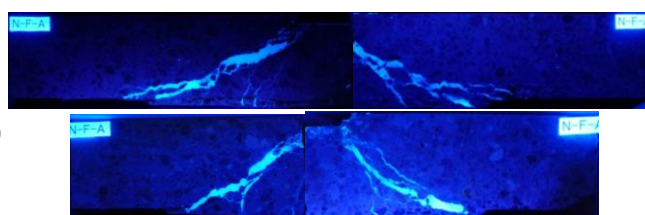


図 - 11 健全床版の荷重ひび割れ(N-F-A)
(上：主筋方向，下：配力筋方向)

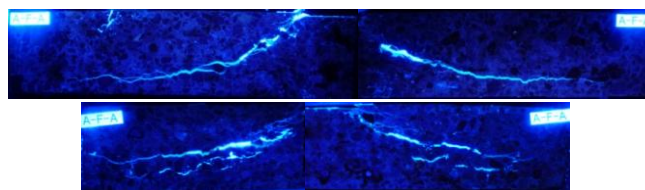


図 - 12 ASR 床版の荷重ひび割れ(A-F-A)
(上：主筋方向，下：配力筋方向)

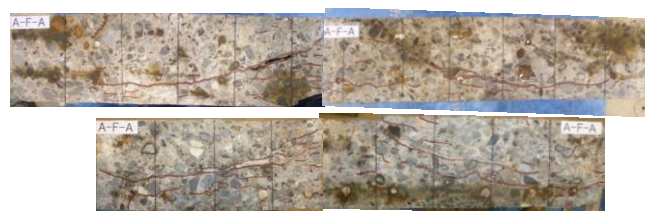


図 - 13 ASR 床版の荷重ひび割れ(A-F-A)
(上：主筋方向，下：配力筋方向)

向及び軸直交方向に切断し、ブラックライトを用いて断面観察を行った。N-F-A 及び A-F-A の断面写真をそれぞれ図 - 11 及び図 - 12 に示す。

N-F-A では、荷重ひび割れはおよそ 45°で発生した後、主鉄筋及びかぶりコンクリートに到達して試験体底面に抜けていることが分かる。一方、A-F-A における荷重ひび割れは、およそ 45°で発生した後、ひび割れの進展に伴っ

てその角度は浅くなり、最終的に主鉄筋に沿う形で試験体側面に到達していた。疲労試験を行った試験体でも上記の傾向は同様であった。通常照明の下で ASR 床版の断面を観察した結果(図 - 13), ASR 膨張の過程で発生したと思われる水平方向の層状ひび割れが、多数発生していることが確認された。ASR 床版における載荷ひび割れの進行は、この層状ひび割れによって水平方向へ誘導されていた可能性がある。

8.まとめ

- 1) 一軸拘束供試体より採取したコアの圧縮強度試験の結果、ASR 促進後の圧縮強度は、促進前と比較して 60%程度、弾性係数は最大 25%程度まで低下した。拘束度の影響は比較的小さかった。
 - 2) ASR 床版の静的押し抜きせん断耐力は、健全な床版よりも低下する結果となった。材料強度の低下を考慮した ASR 床版の静的耐力の計算値と実測値の間には幾分乖離が見られることから、コンクリートの強度低下の他にも、ASR 床版の耐力低下には原因があるものと思われる。
 - 3) 定点疲労試験により、ASR 床版の疲労強度は健全な床版よりも小さくなることが明らかとなった。また、ASR 劣化した床版においても、静的押し抜きせん断耐力を適切に評価出来れば、疲労寿命の予測は土木学会式で概ね可能である。
 - 4) 定点繰り返し載荷では、水分の侵入による疲労寿命の顕著な低下は、確認されなかった。輪荷重による疲労を受ける場合には、水分の侵入による疲労寿命の低下が起こる可能性があるため、今後、検討が必要である。
- により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63 No.1,166-177,2007.3
 - 4) 日本コンクリート工学協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久荷に関するシンポジウム, 委員会報告書, pp83,2003.9
 - 5) 辻 幸和, 前山 光宏：膨張コンクリートを用いた部材における膨張分布の推定方法, セメント技術年報 31, pp.231-233, 1977.12
 - 6) 土木学会, コンクリート標準示方書 第 9 章安全に関する照査, p141 及び p159, 2007
 - 7) 須藤 卓哉：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷機構, 長岡技術科学大学修士論文, 2011.3

参考文献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol9, 第二号, pp627-632, 1987.6
- 2) 内田裕市, 斎藤保則, 六郷恵哲, 小柳治：アルカリ骨材反応により損傷を受けた RC スラブの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp841-844, 1990.
- 3) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉：ASR