

# ASR 劣化したプレテンションホロー桁のせん断耐力に関する実験的検討

指導教員 丸山 久一

指導教員 田中 泰司

コンクリート研究室 仲澤 拓巳

## 1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート（以下、PC）橋梁においてアルカリ骨材反応（以下、ASR）を伴う劣化事例が報告されており、その損傷メカニズムの解明や損傷評価法の確立が求められている。特に、PC箱桁橋やPCホロー桁橋においては、写真-1に示すように、ASRに伴い、橋梁軸方向にひび割れが生じる劣化事例が報告されている。このような水平ひび割れの発生が進行した場合、重ね梁化によって部材の耐力や剛性が低下する恐れがある。また、引張鋼材への付着伝達力も低下するために、定着部への負担が増大し、定着破壊が生じる可能性も危惧される。そこで本研究では、ASR劣化したPC部材のひび割れの進展状況の確認を行うとともに、ASRによるコンクリートの劣化が部材耐荷性能や耐荷機構に与える影響を実験的に検討することとした。

ASRは骨材の膨張反応であるので、ASRに伴って発生するひび割れの諸特性は、骨材寸法に依存していると考えられる。その場合、供試体寸法が小さいと、実構造物の寸法の場合とは異なる結果が得られるおそれがある。



写真-1 ASRによる軸方向ひび割れ

また、付着や定着に関する性能は、構造細目の形状や寸法に大きく依存するので、なるべく実構造物に近いもので検討するのが望ましい。これらを勘案して、本研究では、比較的大型のプレテンションホロー桁を作製し、ASR促進劣化を行ったうえで、曲げせん断力を加えて、曲げせん断性状の確認を行った。

## 2. 試験体概要

試験体の寸法を図-1に示す。試験体はプレテンション方式によるホロー桁で、JIS規格（JIS A 5313）に適合した桁長15m用のプレテンション方式橋桁の断面を再現したものである。PC

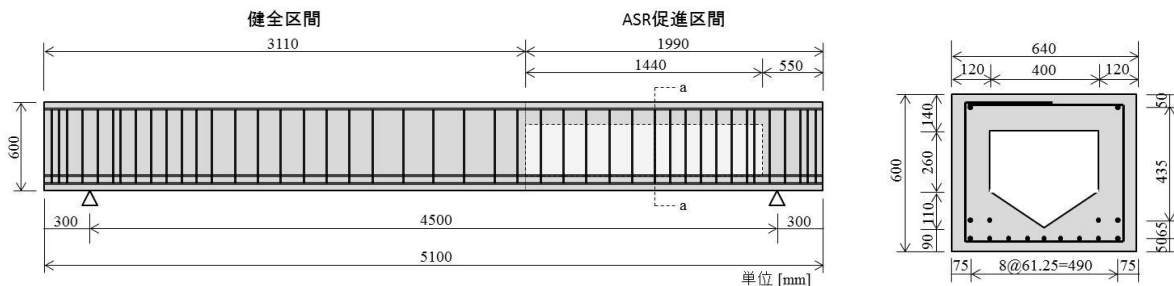


図-1 試験体寸法（左：側面図，右：a-a 断面図）

表-1 コンクリート配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	アルカリ量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	G	Ad		NaOH
ASR	40	46	9.0	185	463	756	861	13.9 (SP8HU)	3.24 (303A)	11.6
健全	39.5	35.5	0	154	390	622	1189	3.90		0

より線は7本より15.2mm (SWPR7BN), スターラップはD10 (SD295) を使用した。試験体はASRを促進させる区間(1990mm)と, ASRが生じない健全区間(3110mm)とに分けて打設を行った。ASR促進区間においては, 組み立てたコンパネをコンクリート内に埋め込むことで中空形状とした。また, 破壊領域をASR促進区間に限定するため, 健全側は中実断面としてせん断耐力を高めた。

試験体にプレストレスを導入するため, 試験体の打設後約10日間, 封緘養生を行い, 試験体打設時に採取した円柱供試体の圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>に達していることを確認した後, PCより線の緊張力解放により, 試験体にプレストレスを導入した。プレストレス力は, PCより線1本あたりの設計荷重作用時における許容引張応力度である1110N/mm<sup>2</sup>に断面積138.7mm<sup>2</sup>を乗じた154kNとし, トータルで2310kN導入した。プレテンション力の導入後は, ASR膨張を防ぎながら強度を十分に発現させる目的で気中養生を行った。全ての試験体の打設が完了した後, ASR促進養生を同時に開始した。ASR促進養生は, ASR促進区間のみで行い, 健全区間においては気中養生を継続した。試験水準を表-2に示す。載荷試験用の試験体は計3体作製した。試験因子はコンクリートの膨張量とし, 自由膨張量で0μ, 2000μ, 3500μ, 4500μを試験水準とした。自由膨張量0μの水準では, 全区間で健全なコンクリートを使用した。自由膨張量測定用の供試体には, φ100×400mmの円柱供試体を使用した。供試体数は3体とし

表-2 試験水準

No.	使用骨材	自由膨張量	名称
1	反応性骨材	2000μ	A-2000
2	反応性骨材	3500μ	A-3500
3	反応性骨材	4500μ	A-4500
4	非反応性骨材	—	H

た。供試体端部にゲージプラグを埋め込み, ダイヤルゲージ法により膨張量測定を行った。

### 3. 使用材料

ASR試験体と健全試験体のコンクリートの配合を表-1に示す。本研究では, 早期の強度発現のため, セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。ASR反応を促進させるため, コンクリートには水酸化ナトリウムをNa<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>で9.0kg/m<sup>3</sup>添加した。細骨材には非反応性骨材(信濃川産, 表乾密度2.64g/cm<sup>3</sup>)を, 粗骨材には反応性骨材(姫川産, 表乾密度2.58g/cm<sup>3</sup>)を用いた。粗骨材の化学法(JIS A 1145)の試験結果は, アルカリ濃度減少量Rsが300mmol/l, 溶解シリカ量Scが350mmol/lであり, 無害でないと判定された。一方, モルタルバー法(JIS A 1146)による材齢6か月時点での膨張量は520μであり, 無害と判定されたものの, アルカリ量をセメント重量の1.5%Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>とした場合(JISの規定値は1.2%)には, 膨張量は3300μとなり, 高い反応性を示した。また, 岩石薄片の偏光顕微鏡観察の結果, 反応性鉱物として多量のクリストバライトとトリディマイト, 少量のオパール, ガラスを含有していることが確認された。

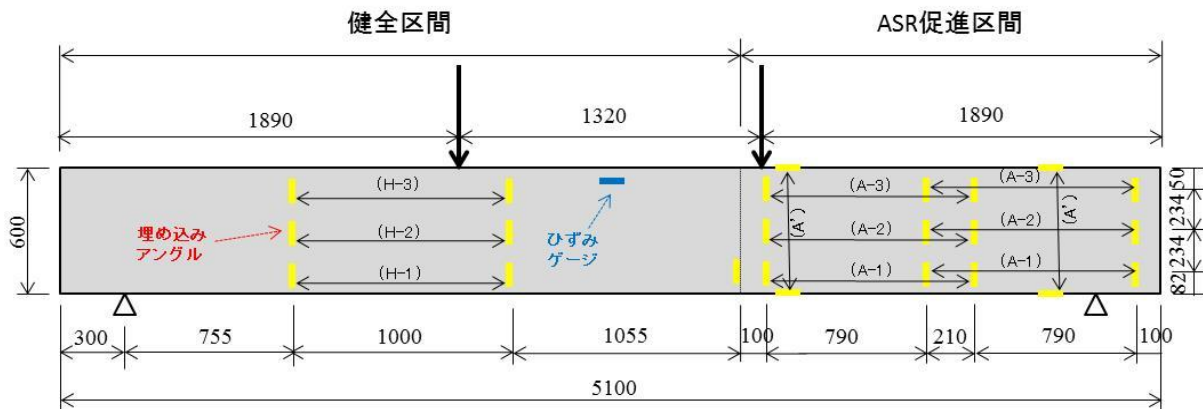


図-2 埋め込みアンゲル・ひずみゲージの取り付け位置と荷重位置

#### 4. 促進養生方法

本研究で作製した大型の試験体ではデンマーク法のように、高温の水中に試験体を浸漬する促進養生方法を用いるのは困難である。そこで本研究では、図-3 に示すように、試験体のASR 促進区間をビニールシートで覆い、水槽に溜めた水の温度を投げ込みヒーターにより上昇させ、蒸気により試験体を湿潤・高温状態を保つ方法を採用し、促進養生を行った。水温を約 55℃となるように温度調節を行うことで、ビニールシート内は 35~40℃に保たれた。

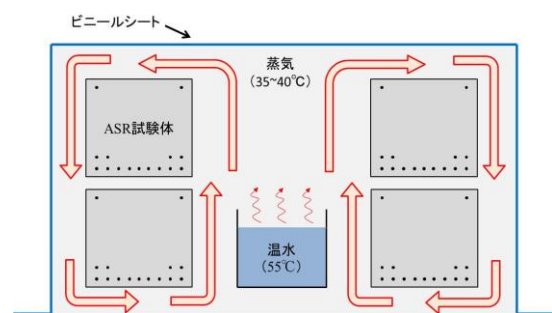


図-3 促進養生のイメージ図

#### 5. プレテンションホロー桁の膨張量測定

プレテンションホロー桁の膨張量測定は試験体側面で行い、図-2 における位置・方向で測定した。膨張量測定は、試験体表面に埋め込んだステンレス製アンゲルを約 1m のノギスで測定することで行った。アンゲルは試験体両側面に設置し、ASR 促進区間・健全区間それぞれにおける高さをパラメータとし、膨張量測定を行った。いずれの試験体においても、健全部では 600~700 $\mu$  程度の収縮が生じていた。この収縮は、乾燥収縮とプレストレスによるクリープに起因するものと考えられる。ASR 促進部分のひずみ測定結果は、試験体によって異なるものの、PC 鋼材が集中している下側 (A-1) の収縮量は大きく、鋼材による拘束が比較的少

ない上側 (A-3) の収縮量が少なくなる結果となった。試験体によるばらつきはあるものの、ASR による膨張変形は大きくないという点では共通しているといえる。これは、PC より線による部材軸方向の拘束力が大きかったためと考えられる。

#### 6. 円柱供試体の自由膨張量測定

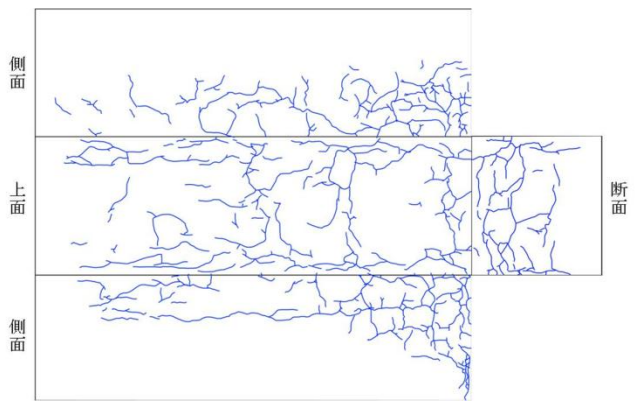
自由膨張量測定用の円柱供試体は、プレテンションホロー桁と同条件下にて促進養生を行った。促進養生開始から、円柱供試体の膨張がすぐに発生し、促進開始約 60 日で膨張量が 2000 $\mu$  を超えた。さらに、促進開始約 120 日で 3500 $\mu$ 、約 180 日で 4500 $\mu$  に到達した。円柱供試体が載荷試験水準の自由膨張量に達した時点で、載荷試験を行うプレテンションホロー桁の促進養生を終了し、載荷試験を行った。

## 7. ASR 劣化による試験体のひび割れ状況

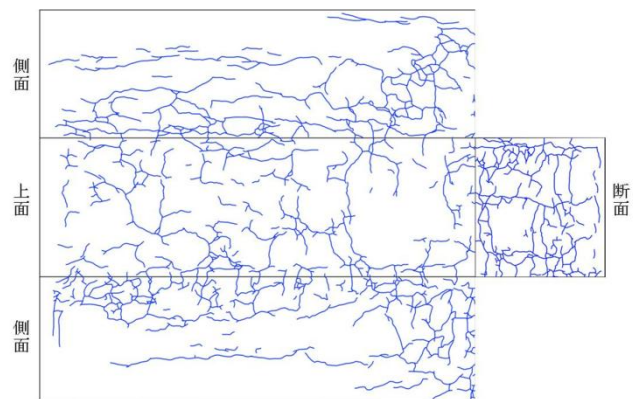
ASR の進行によりプレテンションホロー桁に生じたひび割れ状況を図-4 に示す。ひび割れ図は、試験体側面と上面の展開図で、ASR 促進区間 (1990mm) のみ示している。いずれの試験体においても、亀甲状のひび割れを確認した。また、ASR 促進期間が長くなるにつれて、ひび割れの数は増加する傾向にあった。ひび割れは PC 鋼材による拘束が少ない部材端部や上側に多く発生し、PC 鋼材が集中して配置されている下側では比較的少なかった。これは、図-4 に示すプレテンションホロー桁の膨張量の傾向と同様であり、PC より線による拘束が比較的少ない試験体上側においてひび割れが発生したものと考えられる。自由膨張量  $2000\mu$  の試験体の場合は、試験体上側に配置された PC より線に沿ったひび割れが確認された。さらに自由膨張量  $3500\mu$  の試験体の場合は、試験体下側に配置された PC より線に沿ったひび割れも発生していた。ただしこの PC より線に沿ったひび割れのひび割れ幅は  $0.06\sim 0.08\text{mm}$  と比較的小さく、写真-1 にみられるひび割れのように、部材の重ね梁化などが危惧されるレベルには至っていなかった。自由膨張量  $4500\mu$  試験体については、他の ASR 試験体にみられたような大きなひび割れは確認できなかったことから、ASR 促進養生不足であったと考えられる。

## 8. 載荷試験の概要

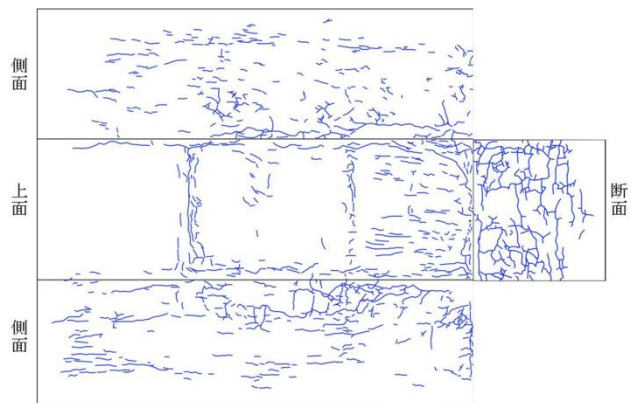
載荷試験は図-2 に示すように支間  $4500\text{mm}$  の 2 点単純支持で、幅  $100\text{mm}$ 、高さ  $30\text{mm}$  の載荷板を用いて ASR 促進区間にてせん断破壊するように行った。載荷点位置は、有効高さ  $d=530\text{mm}$  に対して、 $a/d=3$  ( $a=1590\text{mm}$ ) となるように決定した。試験項目は、試験体のせん断耐力、載荷によるひび割れの進展状況、破壊モードとした。載荷試験中に適宜、ひび割れの観察を行った。



(a) 自由膨張量  $2000\mu$



(b) 自由膨張量  $3500\mu$



(c) 自由膨張量  $4500\mu$

図-4 ASR によるひび割れ状況

## 9. 載荷試験結果

載荷試験による荷重-中央変位関係を図-5 に示す。自由膨張量  $2000\mu$  の試験体のせん断耐力は  $1369\text{kN}$ 、ピーク時の変位は  $21.1\text{mm}$  であった。自由膨張量  $3500\mu$  の試験体のせん断耐力は  $1174\text{kN}$ 、ピーク時の変位は  $20.1\text{mm}$  であった。



自由膨張量 4500 $\mu$  の試験体のせん断耐力は 1470kN, ピーク時の変位は 24.1mm であった. 健全試験体のせん断耐力は 1213kN, ピーク時の変位は 13.1mm であった.

また, 載荷試験後に試験体から抜き出したコンクリートコアによる圧縮強度, 弾性係数試験の結果を図-6, 図-7 に示す. ASR 供試体の圧縮強度は 53~65N/mm<sup>2</sup> の範囲であり, ASR の進行による低下は小さかった. 一方, 弾性係数については, ASR の進行による低下が顕著にあらわれた. ここで, 自由膨張量 4500 $\mu$  試験体については, 弾性係数測定結果より ASR 促進養生不足であったと推察される. 弾性係数の近似直線による推定の結果, 自由膨張量 4500 $\mu$  試験体の実際の膨張量は自由膨張量 600 $\mu$  程度であったと推測した. 載荷試験結果より, 試験体の圧縮強度を全て自由膨張量 2000 $\mu$  試験体のものに補正し, 最大荷重についてまとめたものを図-8 に示す. 図より, ASR の進行により試験体のせん断耐力は低下傾向にあることを確認した.

### 10. 載荷試験によるひび割れ状況

載荷試験により発生したひび割れを図-9 に示す. この図では ASR 促進区間の支点から試験体中央までのひび割れ状況を示している. 青色の線は載荷初期のひび割れ, 緑色は破壊直前までのひび割れ, 赤色は破壊後のひび割れ, 灰色は ASR によるひび割れを示す. 健全試験体については, 曲げひび割れが先行し, 曲げひび割れの数も多くみられた. 一方で, 自由膨張量 2000 $\mu$  ならびに 3500 $\mu$  試験体については, せん断ひび割れが先行し, 曲げひび割れはほとんど発生しなかった. 4500 $\mu$  試験体については, 曲げひび割れが先行したが曲げひび割れの数は少なかった. 特に, 3500 $\mu$  試験体については, 破壊に至るまでせん断区間に曲げひび割れが生じなかった. この原因のひとつとしては,

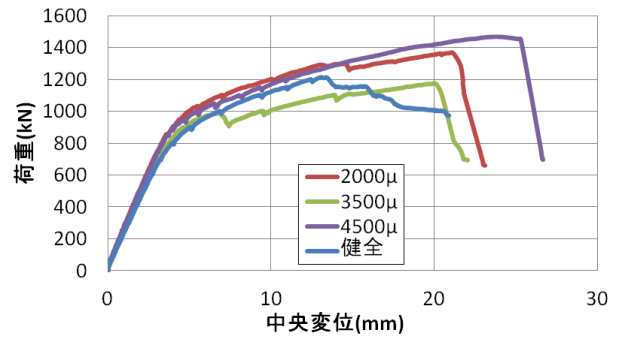


図-5 載荷試験による荷重-中央変位関係

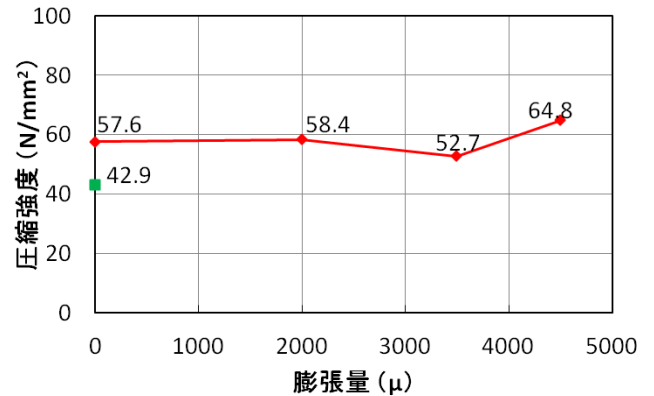


図-6 圧縮強度の試験結果

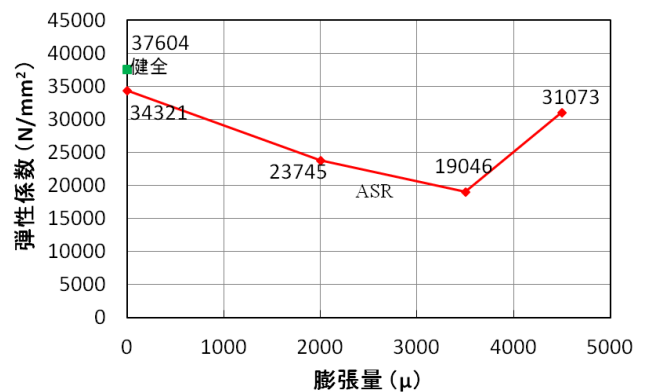


図-7 弾性係数の試験結果

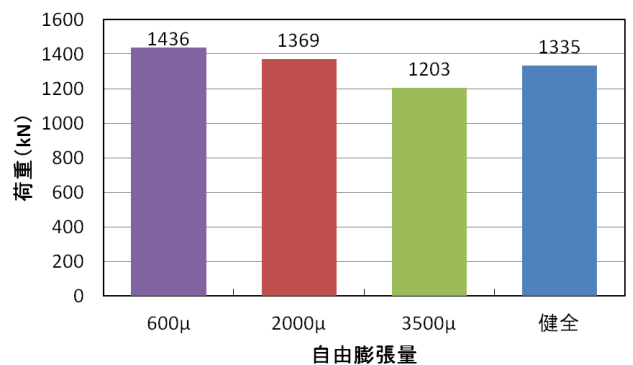


図-8 補正計算後の最大荷重

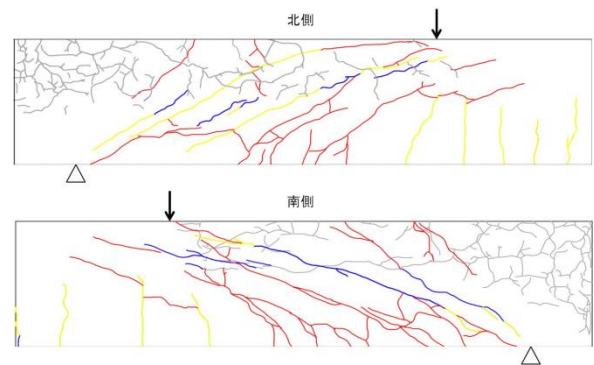
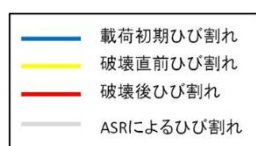
ASR 膨張によってケミカルプレストレスが追加的に試験体に導入され、その結果、曲げひび割れ荷重が増加したことが考えられる。ただし、ASR による部材軸方向の膨張が明確には計測されていないので、詳細については今後も検討を要する。

## 11. 試験体の破壊モード

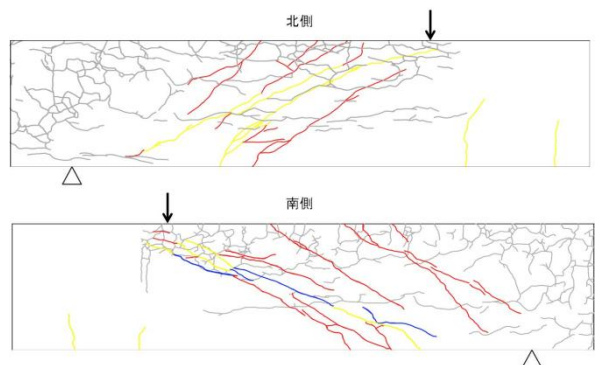
健全試験体については、斜め引張破壊が発生した。ウェブ部において、複数の斜めひび割れが進展することによりウェブのせん断伝達機構が失われ、荷重が低下したと考えられる。ASR 試験体については、いずれもせん断圧縮破壊が発生した。試験体に斜めひび割れが発生した後、載荷点近傍のひび割れが圧縮部のコンクリート強度に何らかの影響を与えたことにより、スターラップ降伏前にせん断圧縮破壊が生じたものと考えられる。

## 12. まとめ

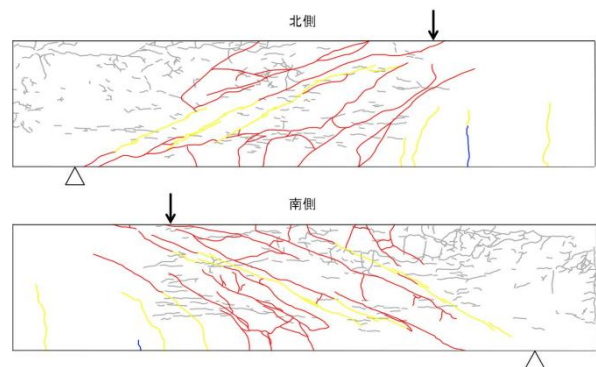
- 1) ASR により、試験体上側および下側に配置された PC より線に沿うひび割れが確認された。
- 2) ASR の進行により、試験体のせん断耐力は低下傾向を示し、自由膨張量  $3500\mu$  試験体は健全試験体に対し約 1 割低下した。
- 3) 試験体のコンクリートコアの弾性係数を測定することにより、構造物のせん断耐力を推定できる。
- 4) ASR 試験体は、いずれもせん断圧縮破壊が発生した。ASR によるひび割れが圧縮部コンクリートに影響を及ぼした可能性がある。



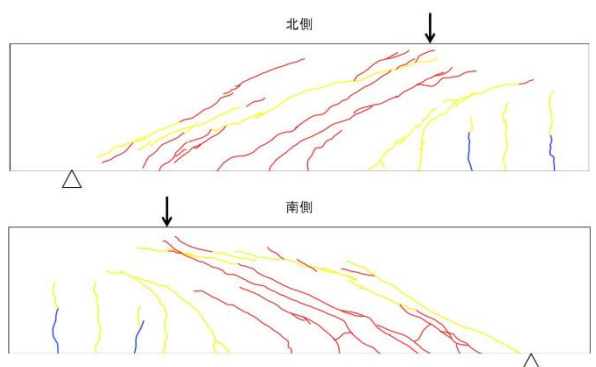
(a) 自由膨張量  $2000\mu$



(b) 自由膨張量  $3500\mu$



(c) 自由膨張量  $4500\mu$



(d) 健全

図-9 載荷によるひび割れ状況