

# 論文 ASR 劣化した PC 梁構造の曲げ耐荷力に与えるプレストレスの影響

廣井 幸夫\*1・高木 祐介\*2・山本 貴士\*3・戸田 圭彦\*4

**要旨** : ASR 劣化した PC 梁構造において, プレストレスの低下が構造物の保有性能に与える影響, また, ケミカルプレストレスが構造物の保有性能, 曲げひび割れ進展抵抗性に与える影響について, ファイバーモデルを用いた解析による検討を行った。その結果, プレストレスの低下は, 曲げひび割れ発生荷重, 曲げひび割れ発生後の変位に大きく影響することを確認した。一方, ケミカルプレストレスは, 曲げひび割れ発生荷重, 曲げひび割れ発生後の変位とともに曲げひび割れ進展抵抗性に影響していることを確認した。

**キーワード** : ASR, PC 梁構造, ファイバーモデル, プレストレス, ケミカルプレストレス

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下, ASR) により劣化を受けた構造物は日本全国の広い地域にて報告されており<sup>1)</sup>, また, ASR 劣化と判断されずに放置されている構造物も少なくない。この理由として, 維持管理費の制約に起因するものもあるが, ASR に関する診断, 解析等による耐荷力評価および対策技術は, 高度な知識や専門技術が必要とされることも原因の一つと考えられる。

ASR による劣化は, 構造物あるいは部材, 部位毎に異なり, また, 温湿度, 水分供給などの構造物がおかれる環境や, 形状, 配筋などの拘束条件により大きくばらつくことが多い。一方, コンクリート構造物の力学性能は, 構成要素であるコンクリート, 鉄筋, PC 鋼材およびこれらの付着に関する力学性能に依存している。したがって, 構成要素の力学性能の低下を伴う ASR 劣化では, 構造物の劣化程度を的確に把握し, その情報を活用した上で耐荷力を適切かつ定量的に評価することが望まれる。しかし, 前述の劣化のばらつきや部材内部の劣化情報の把握が困難なこともあり, ASR 劣化した構造物の耐荷力を推定する技術は未だ確立されていない。

ASR 劣化した構造物の性能に関する研究の多くは, 鉄筋破断等の影響による構造物の破壊に着目したものであった。そのため, ASR 劣化した PC 梁構造においても, 鉄筋破断等の特別な事例を除き耐荷力は顕著に低下しないと報告されている<sup>2)</sup>。しかし, ASR 劣化した PC 梁構造において, 膨張に伴うコンクリートのひび割れや PC 鋼材の腐食等によりプレストレスの低下が生じた場合, 耐荷力や変位にどのような影響を与えるかは明らかにされていない。

また, ASR 劣化した PC 梁構造では, ASR による膨張

を拘束することによりケミカルプレストレスが生じると報告<sup>3) 4)</sup>されている。ASR 劣化した PC 梁構造の耐荷力が低下しない一要因として, このケミカルプレストレスの影響が考えられるが, ケミカルプレストレスと耐荷力の関係は明確にされていない。ASR 劣化した PC 梁構造において, プレストレスの低下やケミカルプレストレスが保有性能 (耐荷力や変位等) に与える影響を定量化できれば, ASR 劣化した PC 梁構造の性能評価法の構築に寄与すると考えられる。

そこで, 本研究においては, ASR 劣化した PC 梁構造において, プレストレスの低下が PC 梁構造の保有性能に与える影響について, ファイバーモデルを用いた解析による検討を行った。さらに, 健全試験体のプレストレスとの比較によるケミカルプレストレスの挙動, ケミカルプレストレスが保有性能, 曲げひび割れ進展抵抗性に与える影響についての検討を行った。

## 2. 検討方法

### 2.1 検討概要

ASR 劣化した PC 梁構造の保有性能算定において, 筆者らは試験体より採取したコアから推察するコンクリートの物性値を汎用 3 次元非線形 FEM 解析 (以下ソリッドモデル) の入力値とし, 保有性能を算定する手法を提案している<sup>5)</sup>。また, その後, 同様の解析条件にて, ファイバーモデルでの対応も試み, 初期剛性, 最大荷重等が載荷試験結果とほぼ一致することを確認している<sup>6)</sup>。載荷試験結果, ソリッドモデルおよびファイバーモデルの解析結果を図-1 に記す。なお, 載荷試験時, 最大荷重直前にて変位計を取り外したため, 最大荷重での変位は計測できていない。

\*1 (株)JHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部 (正会員)

\*2 (株)JHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部 工修 (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 JIP テクノサイエンス(株) 工修

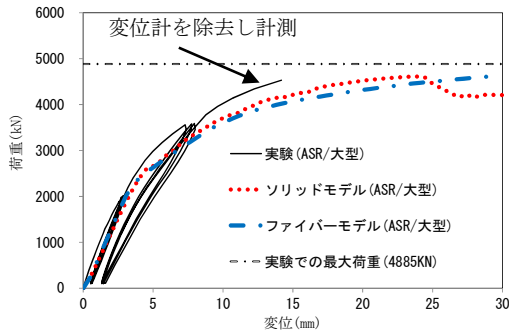


図-1 荷重—変位曲線

## 2.2 ファイバーモデルによる解析方法

ファイバーモデルの要素図を図-2 に記す。PC 鋼材、軸方向鉄筋は、埋め込み鉄筋要素にてモデル化した。

コンクリートの応力—ひずみ曲線は、圧縮側は二次曲線と線形圧縮軟化を組み合わせたモデル<sup>7)</sup>とし、引張側は、引張強度までは線形弾性にて、ひび割れ後は線形軟化するものとした(図-3)。また、コンクリートの圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$  (N/mm)は、山谷<sup>8)</sup>らの報告を参考に(1)式にて算出し、引張破壊エネルギー $G_{ft}$  (N/mm)は、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に従って(2)式にて算出した。ここで、等価長さは要素長さとした。鉄筋の応力—ひずみ関係はバイリニアモデル、PC 鋼材の応力—ひずみ関係はトリリニアモデルとした。

コンクリートの物性値は、劣化の程度の異なる表面、内部にて相違させる表面内部物性値分離法を用いた。表面は、劣化が顕著な部位とし、軸方向鉄筋かぶりの2倍の領域にて軸方向コアの値(以下TP)を用いた。内部の物性値は、プレストレス等の拘束を解放されたTP値よりも高い値と推察し、採取した内部TP値を基に、感度解析を行い最大荷重等が載荷試験結果に合致する値を検討し決定した。解析に用いたコンクリートの物性値を表-1、表面、内部の分割法を図-4、断面詳細図を図-5に記す。なお、本試験体の最大膨張量は直角方向ひずみにて $6500\mu$ 程度である。解析条件、解析方法等の詳細は、参考文献<sup>5), 6)</sup>を参照されたい。

表-1 解析に用いたコンクリート物性値

	健全値 (kN)	ASR			
		表面値(kN)	表面健全 比率(%)	内部値(kN)	内部健全 比率(%)
圧縮強度	61.6	36.6	59%	55.4	90
引張強度	3.45	1.50	43%	3.11	90
弾性係数	34400	18800	55%	27520	80

$$G_{fc} = 8.77\sqrt{f_c} \quad (1)$$

$$G_{ft} = d_{\max} \frac{1}{3} f_c \frac{1}{3} / 100 \quad (2)$$

$G_{fc}$  : 圧縮破壊エネルギー (N/mm)

$G_{ft}$  : 引張破壊エネルギー (N/mm)

$d_{\max}$  : 粗骨材の最大寸法 (mm) = 20mm

$h$  : 等価長さ (要素長)

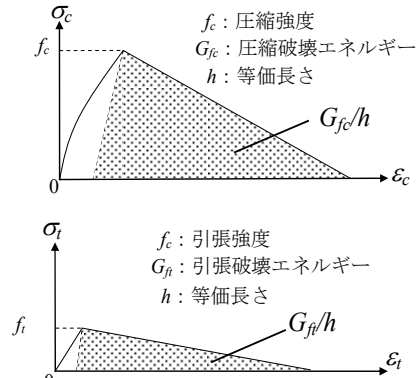


図-3 コンクリートの応力—ひずみ曲線

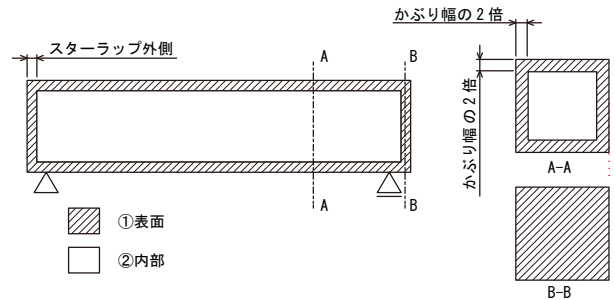


図-4 表面、内部の分割法

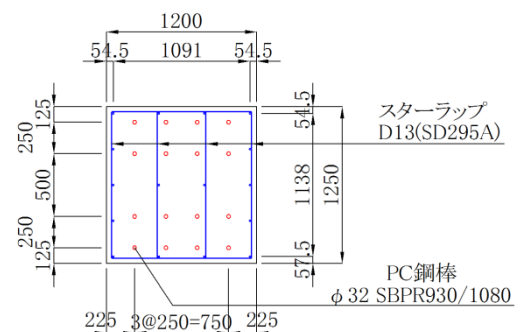


図-5 断面詳細図

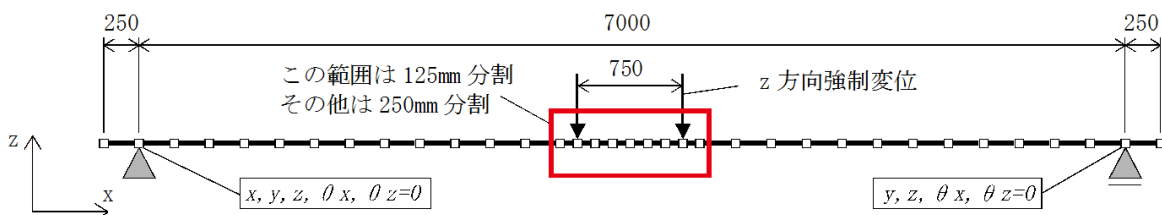


図-2 ファイバーモデル要素図 図-1 荷重—変位曲線

### 3. プレストレス低下の影響

#### 3.1 検討概要

PC 梁構造において、プレストレスが低下すると、曲げひび割れの早期発生、変位の増大等、保有性能の低下が懸念される。そこで、定着部の劣化もしくは PC 鋼材腐食等によるプレストレスの低下を想定し、前述のファイバーモデルにより、プレストレス低下に伴う曲げ耐力（曲げひび割れ発生荷重、PC 鋼材降伏荷重、最大荷重）、変位への影響を検討した。ここで、解析に用いたプレストレスは計測結果<sup>4), 5)</sup>より、PC 鋼材応力度にて健全試験体 631N/mm<sup>2</sup>、ASR 試験体 691N/mm<sup>2</sup>を用いた。なお、ASR の方がプレストレスが大きいのはケミカルプレストレスの影響である。プレストレスの低下は相関性を確認するため 3 点以上とし、健全試験体の値に対し、低下率 30%、50%、70%とした。

#### 3.2 ASR 劣化した PC 梁構造でのプレストレス低下の影響

プレストレス低下に伴う解析結果を表-2、プレストレス低下による曲げ耐力、荷重変位曲線、変位を図-6、図-7、図-8 に記す。曲げひび割れ発生荷重は、プレストレスの低下に伴って線形的に低下した。また、プレストレスの低下が、最大荷重、PC 鋼材降伏荷重に与える影響は小さいことが分かる。これは、プレストレス低下の影響により早期に曲げひび割れは発生するが、曲げ引張破壊に至る PC 梁構造の最大荷重は、上縁コンクリートの物性値が最も支配的となるためである。

曲げひび割れ発生（荷重試験時 1300kN にてひび割れ発生）荷重の前後において、プレストレスを低下させ変位の算定を行った。曲げひび割れ発生前荷重（1000kN）の変位は、健全値の約 1.5 倍程度（変位差約 0.5mm）で、プレストレス低下の影響は小さい。これに対し、曲げひび割れ発生後の荷重（2000kN）では顕著に変位が増大し、プレストレス低下率 70%では、健全値の約 4.2 倍（変位差約 6.5mm）となった。この要因として、プレストレスの低下に伴い曲げひび割れ発生荷重は低下する。さらに、内部の物性値は表-1 の値を変えせず用いたが、プレストレスによる圧縮応力が減少し、曲げひび割れが進展しやすくなり、プレストレスの低下に伴うひび割れ発生後の剛性が低下することにより、曲げひび割れ発生後の変位が増大していると推察される。具体的には、静弾性係

数 ( $E_c$ )、断面二次モーメント ( $I$ ) と変位は非線形関係（図-9）にある。曲げひび割れは、プレストレスの低下が大きい方が進展しやすく、また、 $I$  は高さの 3 乗にて算定されるため、曲げひび割れ進展時、 $I$  は顕著に低下する（図-10）。曲げひび割れ発生後の変位の増大は、これらの条件が相乗し顕著となっている。

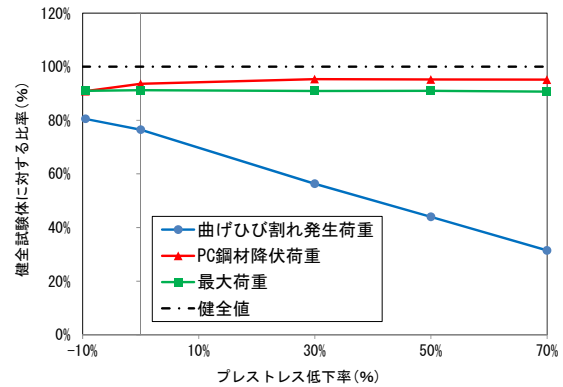


図-6 プレストレス低下による曲げ耐力（健全試験体比）

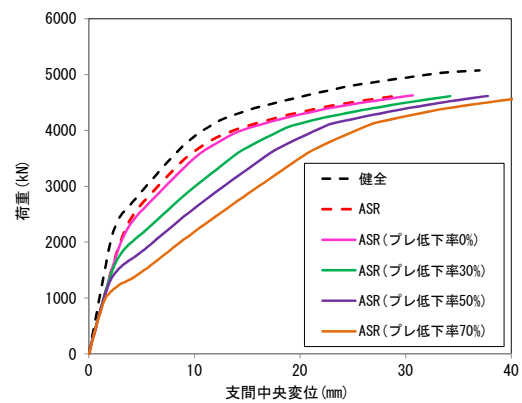


図-7 プレストレス低下時の荷重変位曲線

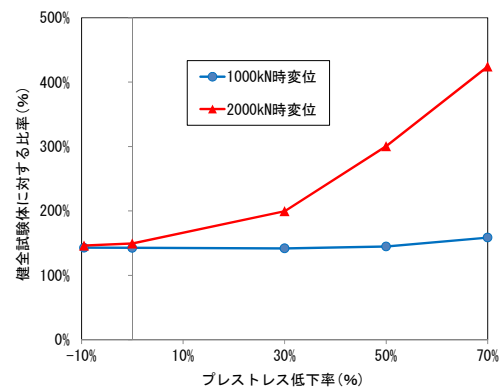


図-8 プレストレス低下時の変位（健全試験体比）

表-2 プレストレスを変化させた解析結果

	プレストレス (N/mm <sup>2</sup> )	プレストレス 低下率	曲げひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重 (kN)	1000kN時 変位(mm)	2000kN時 変位(mm)	曲げひび割れ発生荷重比率	最大荷重 比率	1000kN時 変位比率	2000kN時 変位比率
健全	631	0	1710	5074	1.00	2.04	1.00	1.00	1.00	1.00
ASR	691	-0.10	1377	4618	1.43	2.98	0.81	0.91	1.43	1.46
ASR(健全プレ低下率0%)	631	0.00	1308	4628	1.43	3.05	0.76	0.91	1.43	1.49
ASR(健全プレ低下率30%)	442	0.30	963	4614	1.42	4.07	0.56	0.91	1.42	2.00
ASR(健全プレ低下率50%)	316	0.50	752	4616	1.45	6.13	0.44	0.91	1.45	3.01
ASR(健全プレ低下率70%)	189	0.70	538	4604	1.59	8.66	0.31	0.91	1.59	4.24

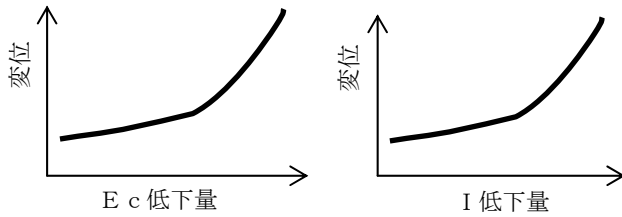


図-9 Ec, I と変位の関係

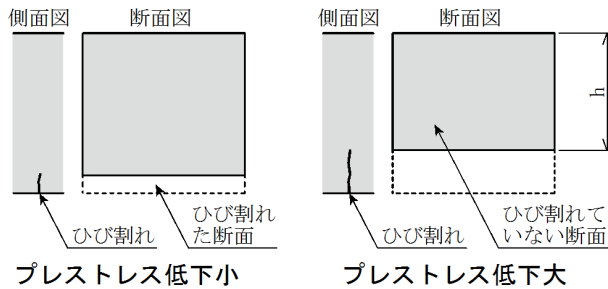


図-10 ひび割れによる剛性低下

### 3.3 健全 PC 梁構造でのプレストレス低下の影響との比較

前項にて比較した健全試験体は、プレストレス低下無しのものであり、本項では、健全試験体においても定着部の劣化等にてプレストレスが低下したケース（低下率は ASR 同様）を考え、ASR 試験体結果と比較した。健全、ASR 試験体のプレストレス低下に伴う曲げ耐力力の比較を図-11、変位の比較を図-12 に記す。さらに、同一プレストレス低下時（例：健全プレ低下率 50%）における健全、ASR 試験体の比較結果を表-3 に記す。表-3、図-11 より、ASR 試験体の結果は、同一プレストレス低下時の健全試験体結果より低下している。最大荷重は健全比約 10%、曲げひび割れ発生荷重は約 20~40%低下している。また、表-3、図-12 より、変位の値は同一プレストレス低下時の健全試験体より約 17%~58%増加している。これは ASR によるコンクリートの物性値（主には静弾性係数）低下の影響と考えられ、ASR 劣化した PC 梁構造でプレストレスが低下する事象が発生すると、曲げ耐力力の低下、変位の増大が顕著となる可能性が示された。このため、ASR 劣化した PC 梁構造では、プレストレス低下についての確認が必要である。

表-3 プレストレス低下による影響比較

	プレストレス低下率	曲げひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重(kN)	1000kN時変位(mm)	2000kN時変位(mm)	曲げひび割れ発生荷重比率	最大荷重比率	1000kN時変位比率	2000kN時変位比率
健全	0	1710	5074	1.00	2.04				
ASR	-0.10	1377	4618	1.43	2.98	0.81	0.91	1.43	1.46
健全(健全プレ低下率30%)	0.30	1313	5070	1.00	2.59				
ASR(健全プレ低下率30%)	0.30	963	4614	1.42	4.07	0.73	0.91	1.42	1.57
健全(健全プレ低下率50%)	0.50	1111	5050	1.00	4.89				
ASR(健全プレ低下率50%)	0.50	752	4616	1.45	6.13	0.68	0.91	1.46	1.26
健全(健全プレ低下率70%)	0.70	908	5024	1.00	7.43				
ASR(健全プレ低下率70%)	0.70	538	4604	1.59	8.66	0.59	0.92	1.58	1.17

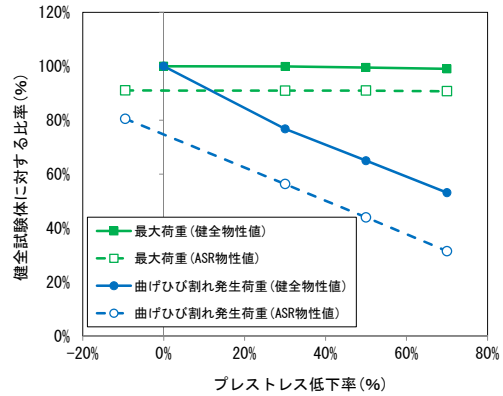


図-11 プレストレス低下による曲げ耐力力比較

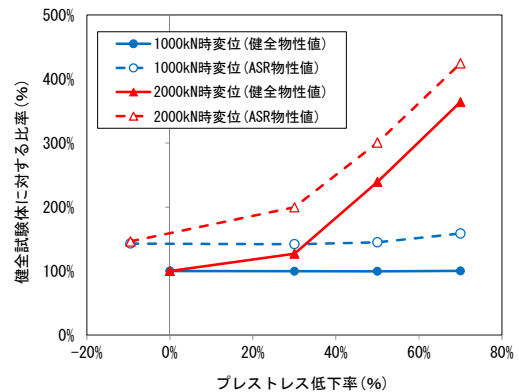


図-12 プレストレス低下による変位比較

## 4. ケミカルプレストレスの影響

### 4.1 PC 梁試験体でのケミカルプレストレスの挙動

健全試験体と ASR 試験体のロードセルにより計測した緊張力の差を図-13 に、支間中央部にて計測した PC 鋼材ひずみの計測値を図-14 に示す。ロードセルは試験体移設前にグラウト充填したため、材齢約 1300 日までの結果となっている。図-14 より、ひび割れ密度や膨張量が増加し始めた材齢 500 日前後より、健全試験体のプレストレスと ASR 試験体のプレストレスの差、所謂ケミカルプレストレス量が増加している。なお、緊張力については、PC 鋼材ひずみ結果を用い、既存式<sup>10)</sup>との比較を行った(図-15)。その結果、健全値は既存式とほぼ同様な傾向を示しており、ASR 値は多少のばらつきはあるものの、健全値に比べ約 10%程度緊張力が増加していた。

#### 4.2 ASR 劣化 PC 梁構造でのケミカルプレストレスの影響

本解析における PC 鋼材初期応力度は、健全試験体  $631\text{N/mm}^2$ 、ASR 試験体  $691\text{N/mm}^2$  にて、約 10% のケミカルプレストレスによる増分を考慮している。このケミカルプレストレスが保有性能に与える影響を確認するため、ASR 劣化したコンクリートの物性値を用いたファイバーモデルにて、プレストレス 100% (ケミカルプレストレス無)、110% (ケミカルプレストレス有) にて検討を行った。解析結果を表-4 に記す。表-4 より、ケミカルプレストレスの有無が、最大荷重に与える影響は小さい。しかし、プレストレスが増減する分、曲げひび割れ発生荷重には影響し、それに伴い、曲げひび割れ発生荷重後の変位にも影響している。

#### 4.3 ケミカルプレストレスが曲げひび割れ進展抵抗性に与える影響

載荷試験結果より、ASR 試験体の曲げひび割れは健全試験体に比べ上方への進展が緩やかにて、曲げひび割れ高さが低い位置に留まっていた<sup>1)</sup>。そこで、コンクリート物性値、ケミカルプレストレスが曲げひび割れ進展性にどのように影響するかの検討を行った。その際、曲げひび割れ高さを可視化する方法を用いた。断面内の各ひずみ算定位置にて、曲げひび割れ発生ひずみに達した際、その位置ではひび割れが発生したとみなした。曲げひび割れの発生地点の下面からの高さが曲げひび割れ高さである。断面詳細図を図-16、曲げひび割れ進展図を図-17 に記す。なお、コンクリート物性値は ASR 試験体の物性値を用いた。図-17 より、曲げひび割れの発生は、ケミカルプレストレス無が最も早く、ケミカルプレストレス有、健全試験体の順となっている。また、曲げひび割れ高さの進展は、荷重変位曲線 (図-7) にて変位が増大する 2000kN 付近より急激に上昇し、その後、上昇挙動が緩やかになっている。曲げひび割れ発生は、ASR 試験体の表面コンクリート物性値の低下が要因となっているため、健全試験体、ケミカルプレストレス有無にて差が生じているが、その後の 2500kN 付近以降の曲げひび割れ高さの進展は、内部物性値が健全試験体と大差がないことより、健全試験体とケミカルプレストレス無はほぼ同様な挙動を呈している。最終の曲げひび割れ高さは、健全試験体 961mm、ケミカルプレストレス有 893mm と、ケミカルプレストレス有の方が健全試験体に比べ約 8% 低い結果となっている。

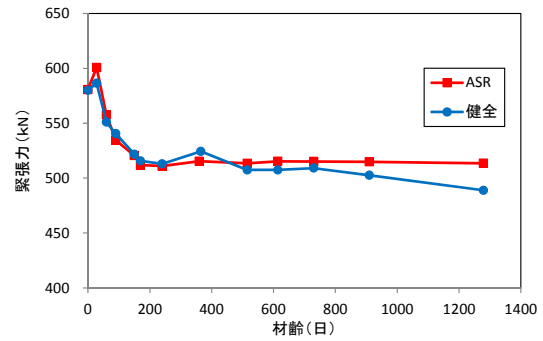


図-13 ロードセルによる緊張力の差

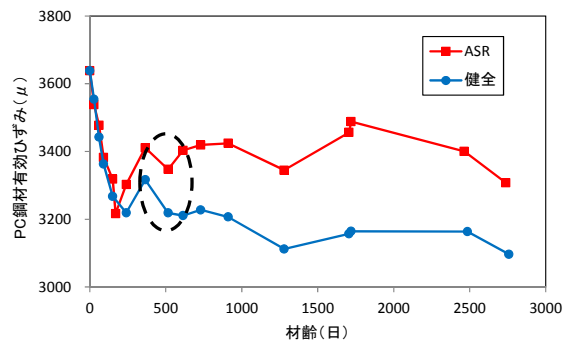


図-14 PC 鋼材ひずみの差

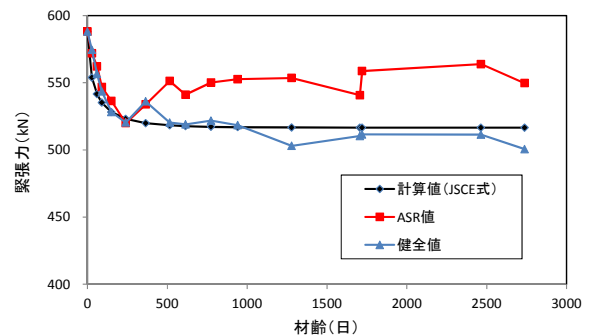


図-15 PC 鋼材ひずみによる緊張力の差

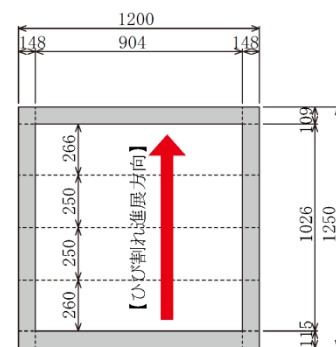


図-16 断面詳細図

表-4 ケミカルプレストレス有無による結果

	プレストレス ( $\text{N/mm}^2$ )	曲げひび割れ発生 荷重(kN)	最大荷重 (kN)	1000kN時 変位(mm)	2000kN時 変位(mm)
ケミカルプレストレス有	691	1377	4618	1.43	2.98
ケミカルプレストレス無	631	1308	4628	1.43	3.05

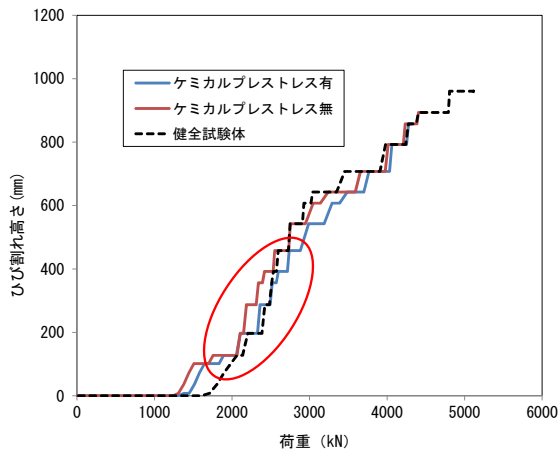


図-17 曲げひび割れ進展図

ケミカルプレストレス有無にて、同一荷重作用時の曲げひび割れ高さに差異が生じていることより、ASR試験体の曲げひび割れ進展抵抗性(ひび割れ上昇のしにくさ)には、ASR劣化による水平ひび割れのみでなく、ケミカルプレストレスも影響していると推察される。

## 5. まとめ

ASR劣化したPC梁構造においてプレストレスが低下した場合、構造物の保有性能に与える影響、また、ケミカルプレストレスがASR劣化したPC梁構造の保有性能、曲げひび割れ進展抵抗性に与える影響についての検討を行った。本研究にて得られた知見を以下に記す。

- (1) ASR劣化試験体にてプレストレスを低下させた場合の曲げひび割れ発生荷重は、プレストレスの低下に伴って線形的に低下する。また、プレストレスの低下が最大荷重、PC鋼材降伏荷重に与える影響は小さい。
- (2) プレストレス低下による変位への影響は、曲げひび割れ発生前荷重よりも、曲げひび割れ発生後荷重の方が大きい。
- (3) 健全試験体、ASR試験体にて同一プレストレス低下時(例：健全プレ低下率50%)、最大荷重、曲げひび割れ発生荷重、変位への影響はASR試験体の方が大きい。
- (4) ケミカルプレストレスは、曲げひび割れ発生荷重の増大に寄与しており、それに伴い曲げひび割れ発生後の変位は減少する。
- (5) ケミカルプレストレスを考慮した場合、曲げひび割れ高さは低い位置で留まっていたことから、ASR劣化したPC梁構造において、ケミカルプレストレスは、曲げひび割れ進展抵抗性を増加させている可能性を示した。

## 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) 例えば上田尚氏，中村光，国枝稔，前野裕文，森下宣明，浅井洋：コンクリート構造物におけるASR損傷と損傷後の構造性能の評価，土木学会論文集E2，vol.67，No.1，pp.28-47，2011.
- 3) 小林和夫，井上晋，山崎鷹生，中野綿一：アルカリ骨材反応を受けたPCはり部材の耐荷性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，9-1，pp.615-620，1987.
- 4) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR対策検討委員会報告書，2009.
- 5) 戸田圭彦，佐藤知明，山本貴士，廣井幸夫：ASRを生じたPC梁試験体の耐荷性能評価に用いるFEM解析モデルの検討，プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集，pp.95-100，2014.
- 6) 廣井幸夫，戸田圭彦，山本貴士，高木祐介：ASR劣化したPC梁試験体における耐荷性能推定技術に関する研究，プレストレストコンクリート工学会第24回シンポジウム論文集，pp.257-262，2015.
- 7) 日本コンクリート工学協会：構造技術者のための非線形有限要素法の基礎と応用と実例，2008.
- 8) 山谷敦，中村光，檜貝勇：回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析，土木学会論文集NO.620/v-43，pp.187-199，1999.
- 9) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編：本編]，p.38
- 10) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編：本編]，pp.45-51
- 11) 廣井幸夫，大久保孝，桐川潔，宮川豊章：ASR劣化したPC大型試験体の載荷試験報告，プレストレストコンクリート工学会第22回シンポジウム論文集，pp.195-198，2013.