

## 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

JIPテクノサイエンス(株)	工修	○戸田 圭彦
JIPテクノサイエンス(株)	博(工)	佐藤 知明
京都大学大学院	博(工) 正会員	山本 貴士
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会関西支部	正会員	廣井 幸夫

Abstract : In this study, FEA model was discussed to evaluate the load capacity of PC beams affected by Alkali-Silica-Reaction(ASR). The PC beam specimen has been exposed outdoors for about 7 years. Even though the beam surfaces were too cracked by ASR expansion, the load capacity was equivalent to that of a good condition beam. The input information for FEA model is estimated by the appearance of the beam, investigations of the inner property by core, and preceding studies. As a result, by estimating the ASR concrete properties inside the beam by ASR expansion ratio, a reasonable evaluation in load capacity could be performed.

Key words : Alkali-Silica-Reaction, PC beam, FEM, load capacity

## 1. はじめに

近年, ASR 劣化構造物の耐荷性能を, 数値解析を用いて推定する試みが行われている。しかし, 耐荷性能に着目した数値解析事例は少なく, 現在も耐荷性能推定技術は確立されているとは言えない。特に, どのように現時点の劣化状態を解析モデルに入力するかについて, 定まった考え方が存在せず, 耐荷性能評価における課題となっている。さらに, 供用中の実構造物の調査には制約がともなう上, 多くの労力を必要とし, 常に詳細な情報が得られるとは限らない。そこで著者らは, PC 部材の耐荷性能推定技術の確立を目的として, 非破壊検査を用いた ASR コンクリートの力学特性推定手法の開発と, FEM 解析モデルへの劣化状態の入力手法について研究を進めている<sup>1)2)</sup>。

ASR 劣化構造物の耐荷性能評価に関する研究は, 実験的研究が多く行われているのに対して, FEM 解析を実施した事例は少ない。例えば, 新名ら<sup>3)</sup>は, PC 梁部材を対象に, 載荷試験および弾塑性 FEM 解析を実施している。骨材膨張をスターラップ内側コンクリートの初期ひずみとして取り扱い, ケミカルプレストレスを考慮することで, 弾性域から曲げ抵抗領域における剛性低下挙動を再現できたとしている。さらに, 上田ら<sup>4)</sup>は, ASR が生じた PC 梁部材について ASR 膨張解析と弾塑性解析を実施している。ASR 膨張解析によって, 鋼材による拘束やクリープを考慮した膨張ひずみを再現し, さらに, 求めた膨張ひずみを考慮した弾塑性 FEM 解析によって, 曲げ載荷試験の挙動を再現することに成功している。

本研究では, ASR 劣化した PC 部材の耐荷性能の推定を目的として, 現実的に可能な範囲で得られる情報から, FEM 解析モデルの入力値を検討した。外観の変状や, コア抜きによる内部の調査, 既往の知見などを組み合わせて入力情報を推定し, 解析結果を実験結果と比較することによって, ASR 劣化 PC 部材の解析に用いるモデルの検証を試みた。

## 2. PC 梁試験体の曲げ載荷試験

本研究の対象とする試験体は, 図-1 に示すポストテンション PC 梁である。スパンが異なる 2 種の PC 梁試験体に対して暴露試験および曲げ載荷試験を実施しており, スパンが大きい順に大型, 中型と呼称する。試験体はそれぞれ健全試験体と ASR 劣化試験体の 2 体ずつ計 4 体製作し, ASR 劣化試験体には反応性骨材

を用いて7年間の屋外暴露によって ASR を生じさせた。

暴露試験後に実施した曲げ載荷試験の結果を示す。図-2 に大型、中型試験体の荷重-変位関係を、表-1 に最大荷重を示す。破壊形式は4体とも曲げ破壊(引張側 PC 鋼材が降伏したのち上縁コンクリートが圧壊)であり、ASR 劣化試験体の最大荷重は、健全試験体と同等以上であった。既往の研究においても、ASR 劣化した RC 梁、PC 梁の耐荷力は必ずしも低下しないことが報告されており、これらの ASR 劣化試験体も同様の傾向であった。一方、初期剛性は、大型、中型共に ASR 劣化試験体の方が低い傾向にあり、ASR によってコンクリートの物性値が変化していることを示している。しかし、曲げひび割れ発生後の剛性は ASR 劣化試験体の方が高い傾向にあった。これは、図-3 のように下縁かぶりコンクリートに複数生じた ASR による鉛直ひび割れが曲げひび割れを誘発することでひび割れが分散したことと、ASR による水平ひび割れによって曲げひび割れの進展が部分的に不連続となることにより、曲げひび割れの進展が結果的に緩やかになったためと考えられる<sup>5)</sup>。

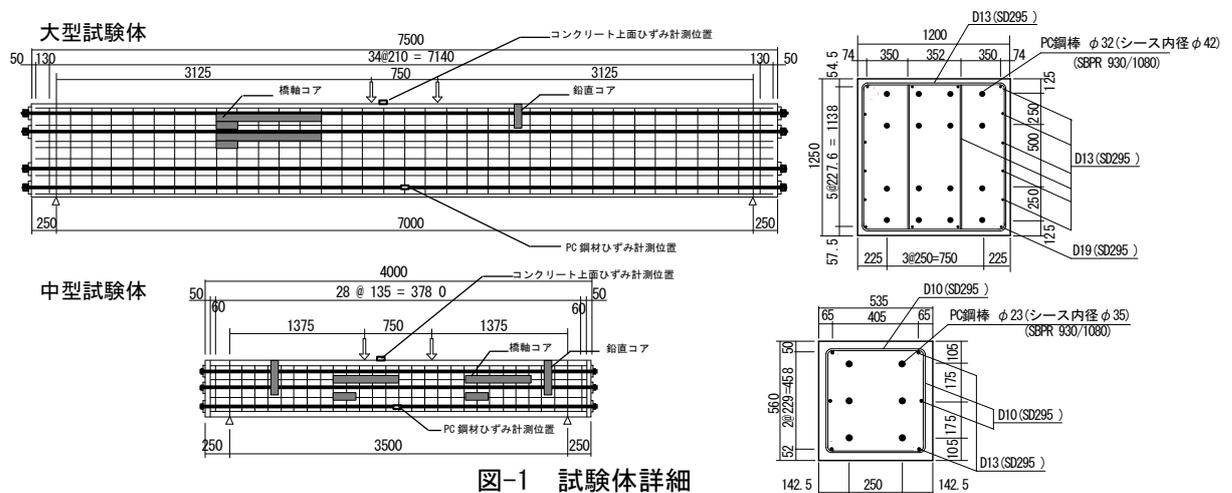
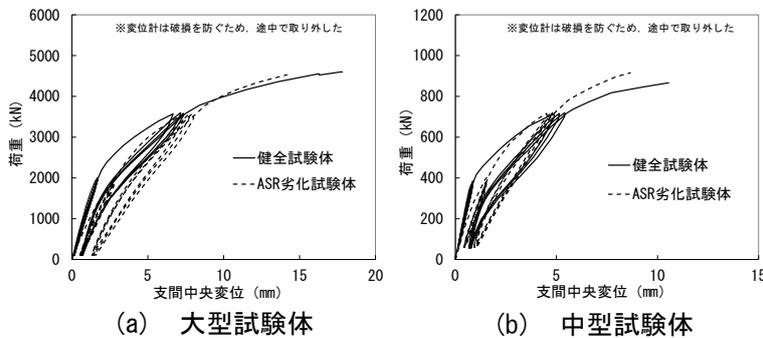


図-1 試験体詳細



(a) 大型試験体 (b) 中型試験体

図-2 荷重-支間中央鉛直変位関係

表-1 試験体の最大荷重

	健全(kN)	ASR(kN)
大型試験体	4908	4885
中型試験体	955	1020

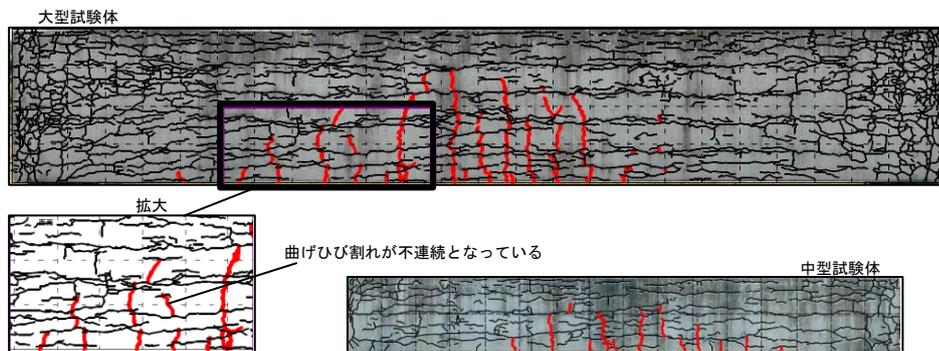


図-3 曲げ載荷試験後の ASR 試験体の側面ひび割れ状況

3. 入力物性値の検討

3.1 内部の物性値調査

図-1 に示す位置より鉛直方向と橋軸方向にコア供試体を採取し、圧縮強度、弾性係数、引張強度を測定した。コア供試体の寸法はφ100×200mmとし、目視での観察によればひび割れ等の損傷は認められなかった。表-2 にコア供試体の物性値の平均値と、PC 鋼材に貼付したひずみゲージの値より求めた試験直前の PC 鋼材応力の値を示す。ASR 劣化試験体より採取したコア供試体の物性値はいずれも低下しており、鉛直方向に採取したコア供試体の物性値が低い傾向にあった。さらに、PC 鋼材応力はケミカルプレストレスによって大型では10%、中型では17%上昇していた。

表-2 コア供試体の物性値および PC 鋼材応力

		中型試験体			大型試験体		
		健全	ASR	ASR/健全	健全	ASR	ASR/健全
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	全平均	67.7	37.7	0.56	61.3	34.9	0.57
	橋軸方向	68.6	42.7	0.62	61.6	38.9	0.63
	鉛直方向	66.7	32.6	0.49	60.8	27	0.44
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	全平均	37700	14385	0.38	34100	15100	0.44
	橋軸方向	38900	20100	0.52	34400	19650	0.57
	鉛直方向	36500	8670	0.24	33500	6100	0.18
割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		3.60	1.95	0.54	3.56	1.66	0.47
PC鋼材応力 (N/mm <sup>2</sup> )		596	697	1.17	631	691	1.10

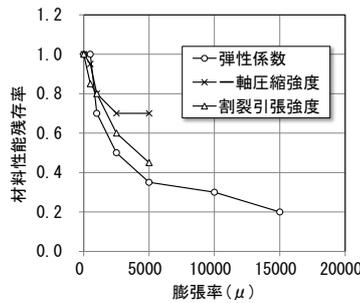


図-4 膨張率と材料性能残存率の関係<sup>6)</sup>

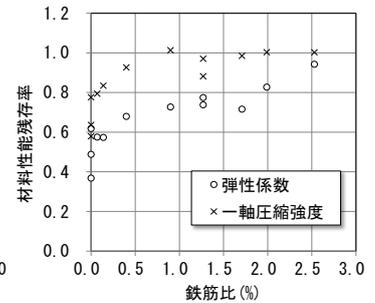


図-5 鉄筋比と材料性能残存率の関係<sup>7)</sup>

3.2 ASR 物性値に関する既往の知見

ASR 劣化試験体の最大荷重は健全試験体と同等以上であったが、コア供試体の物性値は低下しており、相反する傾向が見られた。このように、ASR 劣化コンクリートが構造物内部に存在する場合と、抜き取った場合では異なる力学的特性を示すという指摘はこれまでも存在した。新名ら<sup>3)</sup>は、PC 梁から採取したコアの物性値を FEM 解析に用いたところ、PC 梁の挙動は再現できなかったことから、曲げ剛性や最大荷重などの実験結果を参考にして物性値を推定するという手法をとっている。一方、上田ら<sup>4)</sup>は、図-4 に示される材料性能残存率と膨張率との関係<sup>6)</sup>をもとにコンクリート物性値の低下曲線を提案している。さらに、ASR 膨張解析を行った結果、プレストレスによって膨張は拘束されるため、プレストレス作用方向の圧縮強度はほとんど低下していないとしている。また、関本ら<sup>7)</sup>は、ASR コンクリートの膨張を鉄筋によって拘束し、それを解放せずに圧縮試験した結果について調査結果(図-5)をまとめている。その結果、ASR コンクリートの物性値は鉄筋比が大きいほど、すなわち拘束度が大きいほど健全なコンクリートの物性値に近づくことが分かっている。

したがって、本研究において载荷試験直前に計測された橋軸方向の膨張率は大型、中型共に0であったことから、図-4 と膨張率との関係を用いれば、物性値はほとんど低下していないと考えられる。一方、コア供試体の物性値が低下していたのは、抜き取った際に拘束が解放されたためであると考えられる。

3.3 ASR 劣化試験体の解析に用いる物性値

3.1 および 3.2 で述べたように、コア供試体と試験体内部ではコンクリート物性値は異なるとの考え方から、本研究では ASR 劣化試験体内部の物性値は膨張率と図-4 の関係に基づいて推定した。どちらの試験体も、支間中央の断面内部で膨張率が計測されており、その膨張率を試験体全体の膨張率の代表値とした。

表-3 に各方向の膨張率と、図-4 の線形補間によって推定した材料性能残存率を示す。橋軸方向に膨張率は0であるが、図-5 に示した関本らの調査結果において、膨張が拘束されたコンクリートであっても全ての場合で健全な物性値となるわけではなく、ある程度は低下しているものも存在しており、特に弾性係数は低下する傾向にあることを考慮して、圧縮強度を10%、弾性係数を20%割り引いて与えることとした。

一方、外観上の調査から ASR 劣化試験体の表面は、ASR 膨張によるひび割れが多数生じており、試験後の断面調査によって表面ひび割れはスターラップまで進展していることが分かっている。さらに、表面付近は内部に比べると膨張の拘束度が弱いと考えられ、一軸圧縮試験時のコア供試体の状況に近いと推測される。

表-3 各試験体内部の膨張率と材料性能残存率

	大型試験体				中型試験体			
	健全	ASR			健全	ASR		
		橋軸	鉛直	直角		橋軸	鉛直	直角
膨張率 ( $\mu$ )	0	0	6500	3500	0	0	5100	3800
圧縮強度 (%)	100	90	70	70	100	90	70	70
弾性係数 (%)	100	80	33	44	100	80	35	42
引張強度 (%)	100	90	45	54	100	90	45	52

(※)表-2の健全コアの全平均の物性値を100%とする

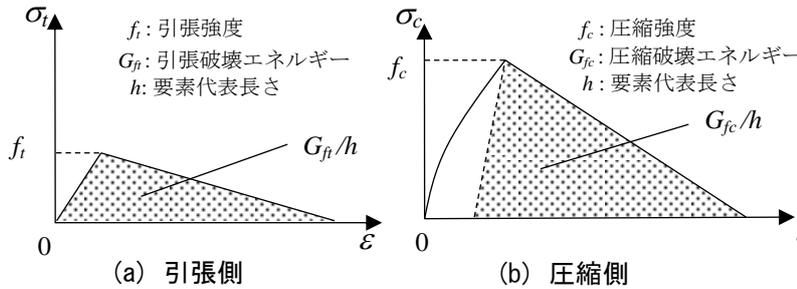


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

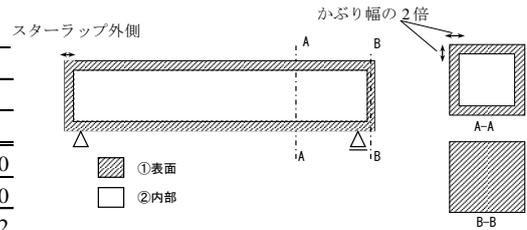


図-6 表面領域の取り方

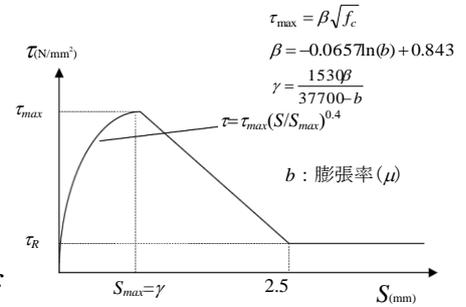


図-8 ASR コンクリートの付着応力-すべり関係<sup>10)</sup>

そこで、図-6のように試験体を内部領域と表面領域に分割し、表面領域の物性値はコア供試体の物性値と同じであると仮定した。

ところで、表-2や表-3に示したASR劣化試験体の物性値は異方性を有している。そこで、事前に直交異方性塑性を考慮した耐荷力解析を実施し、本試験においては橋軸方向の物性値が支配的であり、異方性の影響が小さいことを確認した<sup>2)</sup>。したがって、本研究では異方性は考慮せず、橋軸方向の物性値を適用した。

#### 4. FEM 解析による検証

##### 4.1 モデル化

###### (1) FEM モデルおよび境界条件

試験体は、コンクリートをソリッド要素とし、PC 鋼材は完全付着の埋め込み鉄筋要素、鉄筋は付着すべりを考慮できる埋め込み鉄筋要素でモデル化した。支点の節点に対して単純支持となるように変位固定境界条件を設け、自重と PC 鋼材応力を与えた初期状態解析を行ったのち、載荷点の節点に対して鉛直方向強制変位を与える変位増分解析を行った。FEM 解析に使用したプログラムは DIANA ver. 9.4.4 である。

###### (2) 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係は図-7のように、圧縮側は二次曲線と線形軟化の組み合わせとし、引張側は線形に軟化するモデルとした。圧縮破壊エネルギー  $G_{fc}$  (N/mm) および引張破壊エネルギー  $G_{ft}$  (N/mm) は、それぞれ圧縮強度  $f_c$  (N/mm<sup>2</sup>)、粗骨材最大寸法  $d_{max}$  (mm) を用いて式(1)<sup>8)</sup>および式(2)<sup>9)</sup>で計算した。

$$G_{fc} = 8.77\sqrt{f_c} \quad (1) \quad G_{ft} = d_{max} \frac{1}{3} f_c \frac{1}{3} / 100 \quad (2)$$

ASR がコンクリートの破壊エネルギーに及ぼす影響は不明な点が多いため、本研究では健全試験体と ASR 劣化試験体の両方に式(1)および式(2)を適用した。

鉄筋、および PC 鋼材の応力-ひずみ関係はそれぞれ、バイリニア型、トリリニア型として降伏点には材料試験値を入力した。また、ASR 劣化したコンクリートでは鉄筋の付着が低下すると考えられる<sup>10)</sup>ことから、図-8で示される付着応力-すべり関係を膨張率から求め、付着-すべりを考慮できる埋め込み鉄筋要素の特性として与えた。一方、健全試験体の鉄筋は完全付着とした。

###### (3) ケミカルプレストレス

本研究ではケミカルプレストレスは PC 鋼材応力の増分として橋軸方向のみ考慮した。増分量は、表-2に

示す計測プレストレスを参考に大型は 10%、中型は 17%とした。

## 4.2 解析結果

### (1) 曲げ剛性および最大荷重

健全試験体および ASR 劣化試験体の解析結果の荷重-変位関係を図-9 に示す。

健全試験体は、大型試験体、中型試験体共に、初期剛性から曲げひび割れによる剛性低下、最大荷重まで実験結果を再現することができており、FEM モデルや材料モデルの妥当性を確認することができた。

ASR 劣化試験体も、大型、中型共に初期剛性は実験結果とほぼ一致しており、最大荷重も実験結果に近い値が得られた。しかし、曲げひび割れ後の剛性は実験結果に比べて低く、実験結果のように健全試験体を上回ることにはなかった。

### (2) 梁上面およびPC鋼材のひずみ

梁上面のコンクリート橋軸方向ひずみと、最下段の PC 鋼材ひずみの荷重-ひずみ関係を図-10 に示す。これらは支間中央の等曲げモーメント区間で計測された値である。梁上面のコンクリート橋軸方向ひずみの解析結果は実験結果と良く一致していた。この結果は、ASR によって表面には顕著なひび割れが生じていたが、梁上面の圧縮縁コンクリートは不連続となることなく、一体的に挙動していたことを示している。PC 鋼材ひずみの解析結果は実験結果とほぼ一致しているが、中型試験体では最大荷重付近で支間中央変位と同様に差が見られた。

### 4.3 曲げひび割れ後の剛性の検討

初期剛性やひずみ、最大荷重は精度よく再現することができたのに対して、曲げひび割れ発生後の剛性は解析と実験との差が目立った。ASR 劣化試験体の物性値は、健全状態を基準に低下させており、このような手法を用いている以上、ASR 劣化試験体の剛性が健全試験体の剛性を上回ることにはないと考えられる。

実験において ASR 試験体の曲げ剛性が高い原因は、2 章で述べたように、水平ひび割れによって曲げひび割れの進捗が緩やかになったため<sup>11)</sup>であると考えられる。そこで、この効果を引張破壊エネルギーで表すことができないか検討を行った。ASR 劣化大型試験体の引張破壊エネルギーを試行的に 3 倍とした解

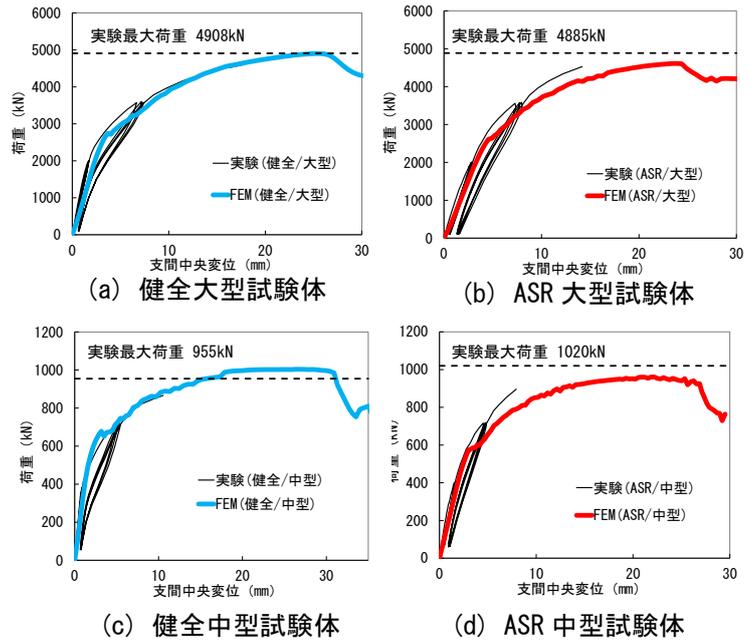


図-9 荷重-変位関係

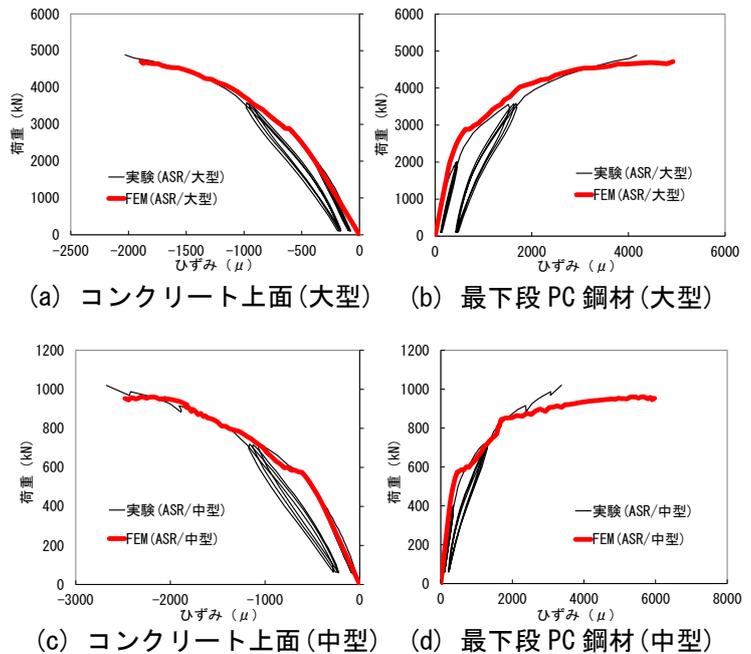


図-10 ASR 劣化試験体の荷重-ひずみ関係

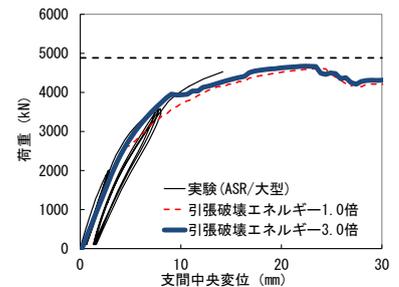


図-11 引張破壊エネルギーを増大させた荷重-変位関係

析を行った結果、図-11 のように曲げ剛性は実験結果に近づく傾向にあり、見かけ上引張破壊エネルギーが上昇していると捉えることで全体的な傾向を再現することができた。

## 5. まとめ

本研究では、ASR 劣化した PC 部材の解析入力値を調査結果から推定し、実験結果と解析結果を比較することによって解析モデルの検証を行った。得られた成果を以下に示す。

(1)内部領域の物性値には、開放を受けたコア供試体の直接の物性値ではなく、実際の計測で得られた膨張率から既往の材料性能残存率の研究成果を利用して推定したものを適用した。一方、外観上の表面ひび割れ発生領域は、コア供試体の物性値を用いた。これらの物性値と、ケミカルプレストレスによる PC 鋼材応力の増分を考慮した弾塑性 FEM 解析を実施し、実験結果と比較したところ、ASR 劣化試験体の初期剛性、最大荷重、ひずみを概ね再現できたことを示した。

(2)物性値を低下させたのみでは、ASR 劣化試験体のひび割れ後の曲げ剛性を再現することはできなかった。ただし、引張破壊エネルギーが見かけ上増大していると考えることで、水平ひび割れによって曲げひび割れの進展が妨げられて剛性が緩やかに低下するという傾向を再現できる可能性を示した。

本研究では現状の技術で可能な調査から得られた情報を用いて、耐荷性能を評価するための解析モデルを示すことができた。これらの入力情報は、トモグラフィ技術などの非破壊検査技術が向上することで、より精度が高まることが期待できる。また、本研究の成果は PC 梁試験体においてのみ妥当性を検討したものであり、他の構造形式への適用は今後の課題とする。

## 謝辞

本研究は、国土交通省建設技術研究開発費助成事業「ASR 劣化構造物の力学性能推定技術の確立（研究代表者：京都大学 宮川豊章）」の一部として行ったものであることを記し、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 葛目, 真鍋, 小椋, 山本, 宮川: 超音波トモグラフィによる ASR 劣化したコンクリート内部性状の把握に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp. 181-188, 2013.11
- 2) 戸田, 佐藤, 室田, 山本, 宮川: 曲げを受ける ASR 劣化した実物大 PC 梁試験体の力学的挙動に関する解析的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp. 271-278, 2013.11
- 3) 新名, 松本, 佐藤, 久利, 真鍋: ASR による劣化を受けた PC はり部材の力学的挙動に関する解析的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 9 巻, pp. 397-404, 2009.10
- 4) 上田, 中村, 国枝: ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 5) 室田, 井隼, 三田, 廣井, 宮川: ASR 劣化した実構造物レベル PC 梁供試体の破壊試験報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp. 265-270, 2013.11
- 6) 土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たなる対応—, 2005.8
- 7) 関本, 清水, 渡部, 石川: アルカリ骨材反応が生じたタービン発電機架台の強度評価に用いる物性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1555-1560, 2005
- 8) 山谷, 中村, 檜貝: 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, 1999.5
- 9) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 10) 中尾, 山本, 服部, 宮川: ASR 膨張ひび割れがコンクリートと鉄筋の付着応力-すべり関係に与える影響, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, V-274, 2007.9
- 11) 松谷, 三木: アルカリ骨材反応が生じたコンクリートの引張軟化挙動に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, V-5, 2011.6