論文　ひび割れ密度を考慮したASR劣化PC梁構造の曲げ耐荷性能評価

廣井　幸夫[*1]・戸田　圭彦[*2]・高木　祐介[*3]・山本　貴士[*4]

要旨：ASR劣化したPC梁構造の曲げ耐荷性能評価法の確立を目的とし，事前に行った大型試験体の計測結果，載荷試験結果を活用し，目視点検時に計測されるひび割れ密度より，ASR劣化コンクリートの物性値を推定する手法を構築した。その推定値を部材の表面，内部にてコンクリートの物性値を相違させる表面内部物性値分離法を用いたファイバーモデルの入力値とし，曲げ耐荷性能を算定した。その結果，ASR劣化したPC梁構造の曲げ耐荷性能を概ね算定することが可能であることを確認した。

キーワード：ASR，PC梁構造，ファイバーモデル，ひび割れ密度，曲げ耐荷性能

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[1)]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，解析などによる耐荷性能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要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劣化構造物の健全性の判定基準は，現在，道路管理者において定められた指標[2), 3)]を用い対応しているものの，ASR劣化か否かの判定や補修などによるASR抑制対策が主だった内容にて，外観のひび割れ状況や，コンクリートの物性値低下率などによる性能評価指標は構築されていない。ASR劣化した構造物の耐荷性能に関する多くの研究[4)]は，鉄筋破断などの影響による構造物の破壊に着目したものであり，ASR劣化したPC梁構造物においても鉄筋破断などの特別な事例を除き耐荷性能は顕著に低下しないと報告されている[5)]。しかし，ASRにより劣化したコンクリートの物性値が耐荷性能に与える影響は明確にされていない。また，ASR劣化したPC梁構造の耐荷性能を算定する際，膨張量をASR劣化の指標とした研究が多数報告されている[6)]。しかし，ASR劣化した既存のPC梁構造物において，建設時からの膨張量を評価することは困難であり，点検時の計測結果を解析の入力値として活用できれば，ASR劣化したPC梁構造の曲げ耐荷性能評価に非常に有益であると考えられる。

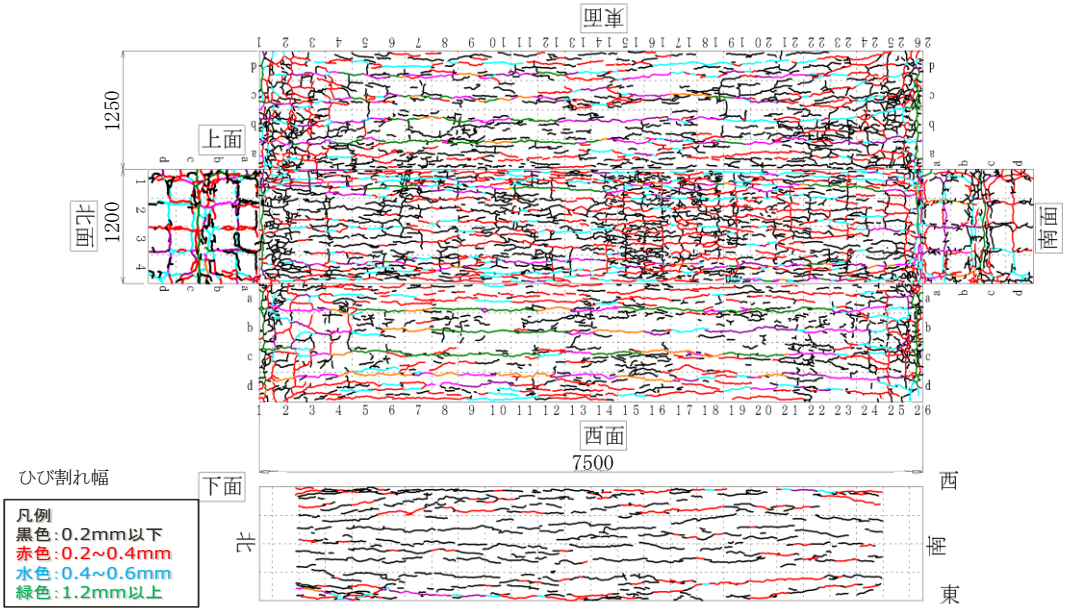
そこで，本研究ではASR劣化したPC梁構造の曲げ耐荷性能評価法の確立を目的とし，事前の大型PC梁試験体の計測結果（1200×1250×7500mm **図－1**）[7)]，載荷試験結果[8)]を活用し，目視点検時に計測されるひび割れ密度より，ASR劣化したコンクリートの物性値を推定する手法を検討すると共に，その推定値を用いた曲げ耐荷性能の算定を行った。

2. ファイバーモデルによる曲げ耐荷性能評価

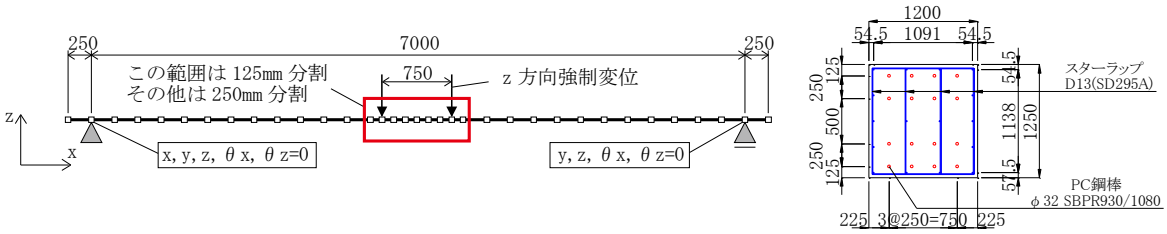
2.1 検討概要

筆者らは，ASR劣化したPC梁構造の膨張量，あるいは試験体より採取したコアから推定するコンクリートの物性値をファイバーモデルの入力値とし，曲げ耐荷性能を評価する手法を提案している[9)]。ファイバーモデルにおける要素支持点，荷重載荷位置を**図－2**に記す。その際，ASR劣化によるコンクリートの物性値低下を表面，内部にて相違させる表面内部物性値分離法を適用した（**図－3**）。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－ひずみ関係は，ソリッドモデル同様，圧縮側は二次曲線と線形圧縮軟化を組合せたモデルとし[10)]，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モデルとした（**図－4**）。

*1　(株)IHIインフラ建設　PC事業部PC技術部　(正会員)
*2　JIPテクノサイエンス(株)　工修
*3　(株)IHIインフラ建設　開発部　工修　(正会員)
*4　京都大学大学院　工学研究科　准教授　博士(工学)　(正会員)



図－1　約 7.5 年における ASR 試験体のひび割れ状況



図－2　ファイバーモデル要素図および断面詳細図 [8)]

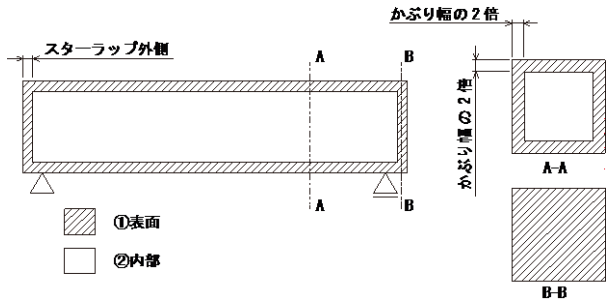
また，コンクリートの圧縮破壊エネルギー$G_{f'c}$ (N/mm)は，山谷[11)]らの報告を参考に(1)式にて算出し，引張破壊エネルギーG_{ft} (N/mm)は，コンクリート標準示方書[12)]に従い(2)式にて算出した。ここで，d_{max}は，粗骨材の最大寸法20mm，hは等価長さにて，部材軸方向の要素長（125，250mm）とした。また，ファイバー要素は，鉛直方向（Z方向）24分割，直角方向（Y方向）12分割の計288分割とした。鉄筋の応力－ひずみ関係はバイリニアモデル，PC鋼材の応力－ひずみ関係はトリリニアモデルとした。解析方法は，自重，プレストレスによる初期応力解析を実施し，その後，載荷位置にて鉛直方向強制変位を漸増載荷させた。本解析ではASRによる劣化の指標をコンクリートの物性値の低下により考慮し，表面部は劣化の顕著な部位としコアによる物性値を，内部は健全値に対する比率（圧縮，引張強度90%，弾性係数80%）の値を用いた。解析内容の詳細は，文献[9),13)]を参照されたい。解析結果を**図－5**，最大荷重の比較を**表－3**に記す。解析結果より，ファイバーモデルによる初期剛性，最大荷重とも，実験値と概ね合致している。一方，曲げひび割れ発生後の剛性は，解析結果と実験値に乖離が確認された。ASR試験体の載荷試験時，曲げひび割れは，ASRによる水平ひび割れに抑制され，上方への進展が緩慢となり，曲げひび割れ発生後の剛性低下が緩やかとなった[8)]。本解析ではこのような特有の曲げひび割れ挙動を考慮していないため，ひび割れ発生後の剛性に乖離が生じたと推察される。

以上より，本試験体のような曲げ挙動が卓越するPC梁構造においては，採取コアの特性からASR劣化コンクリートの物性値を推定し，その物性値を表面内部物性値分離法を用いたファイバーモデルに適用することにより，ASR劣化したPC梁構造の初期剛性，最大荷重などを概ね評価することは可能であることが確認できた。

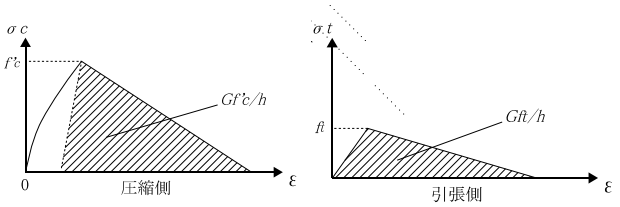
$$G_{f'c} = 8.77\sqrt{f'_c} \tag{1}$$

$$G_{ft} = d_{max}^{\frac{1}{3}} f'^{\frac{1}{3}}_c \Big/ 100 \tag{2}$$

$G_{f'c}$ ：圧縮破壊エネルギー（N/mm）
G_{ft} ：引張破壊エネルギー（N/mm）
$f'c$ ：圧縮強度（N/mm²）
d_{max} ：粗骨材の最大寸法（mm）＝20mm
h ：等価長さ（要素長）

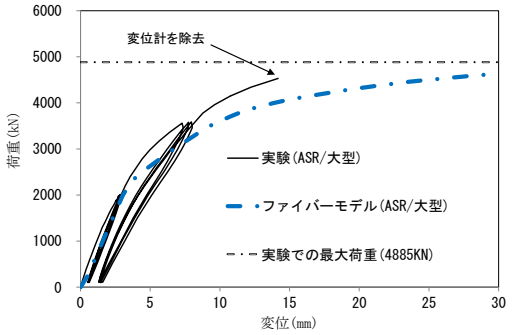


図－3　表面，内部の分割法 [9]



Gf'c，*Gft*，*h* は，前頁参照

図－4　コンクリートの応力－ひずみ曲線



図－5　解析結果 [9]

表－3　最大荷重の比較 [9]

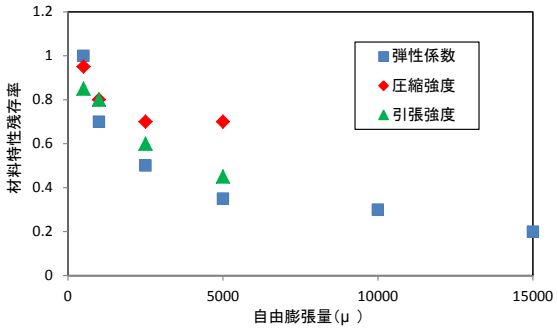
大型健全(kN)		大型ASR(kN)	
実験	ﾌｧｲﾊﾞｰﾓﾃﾞﾙ	実験	ﾌｧｲﾊﾞｰﾓﾃﾞﾙ
4908	5090	4885	4616
実験比	104%	実験比	94%

3. ひび割れ密度を活用した解析入力値

3.1 膨張量と材料特性残存率

ASR 劣化による膨張量とコンクリートの材料特性残存率の関係として，**図－6**[1]が報告されている。ASR 劣化したコンクリート構造物の耐荷性能を評価する際，劣化の指標として膨張量がよく用いられる。しかし，ASR 劣化した実構造物において，新設時からの膨張量を評価することは困難である。

そこで，次項以後，長期暴露試験体の計測結果を活用し，膨張量を直接用いることなく，外観劣化指標であるひび割れ密度と材料特性残存率の関係を構築することを検討した。



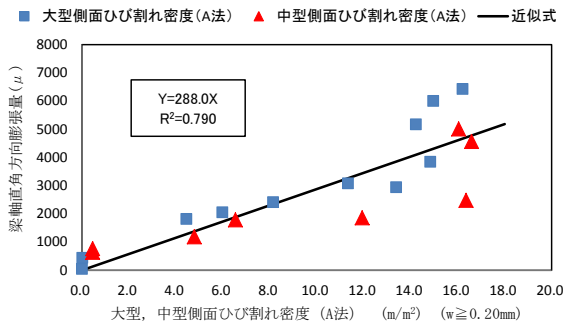
図－6　膨張量と材料特性残存率 [1]

3.2 ひび割れ密度と膨張量

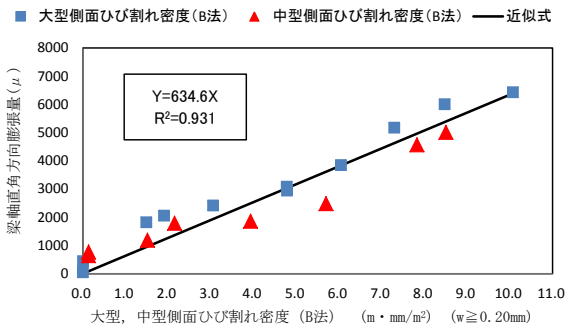
ひび割れ密度と膨張量の近似式は，約 7．5 年間屋外にて暴露計測した大型試験体のひび割れ状況を用い評価した（**図－1**）。また，ここでの膨張量は，最大膨張方向である梁軸直角方向の膨張量を用いた。ひび割れ密度の算定において，ASR 劣化した PC 梁実構造物では，上面の測定は困難である。また，下面は降雨などの影響が小さくひび割れの発生が少ない場合が多い。そこで，ひび割れ密度は，実構造物での対応を勘案し，上下面の値を排除し側面のみのひび割れ幅 w≧0.2mm にて算定した。また，ASR 劣化した PC 梁構造においては，ある一定時期より，新規のひび割れ発生よりも既存のひび割れ幅が拡大し，これによりひび割れ密度は収束する傾向にある [7]。そこで，ひび割れ密度はひび割れ幅も考慮できる算定法を用いた。ここで，ひび割れ密度（A 法）（m/m^2）とは当該面積辺りのひび割れ長さとし，ひび割れ密度（B 法）（$m \cdot mm/m^2$）とは当該面積辺りのひび割れ長さ×幅とした。なお，ひび割れ密度と膨張量の近似式は切片を 0 とし，ひび割れ密度 A，B 両法にて算定した。**図－7** に側面ひび割れ密度（A 法）と膨張量の関係，**図－8** に側面ひび割れ密度（B 法）と膨張量の関係を記す。**図－7**，**図－8** より，側面ひび割れ密度と膨張量の関係は，ひび割れ幅を考慮できるひび割れ密度（B 法）の方が高い相関性（R^2=0.931）を確認した。これは，本試験体においても，新規ひび割れの減少傾向が確認された材齢約 900 日（ひび割れ密度（A 法）15m/m^2 程度）頃より，新規のひび割れ発生が停滞し，ひび割れ密度（A 法）の値が収束したような現象が生じたことが要因と推察される。本研究においては，**図－7**，**図－8** の比較により，安全性の評価が必要となる大きな膨張量にておいても，高い相関性を有するひび割れ密度（B 法）を採用した。

3.3 ひび割れ密度と材料特性残存率

膨張量と材料特性残存率，また，膨張量とひび割れ密度（B 法）には各々相関性を有していることが確認できた。そこで，**図－8** の膨張量と側面ひび割れ密度（B 法）の近似式（Y=634.6X）を用い，膨張量と側面ひび割れ密度（B 法）を置換（ひび割れ密度（B 法）=膨張量/634.6）



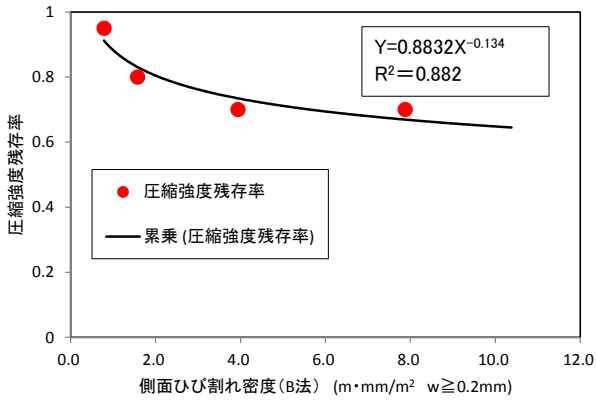
図－7　膨張量と側面ひび割れ密度（A 法）



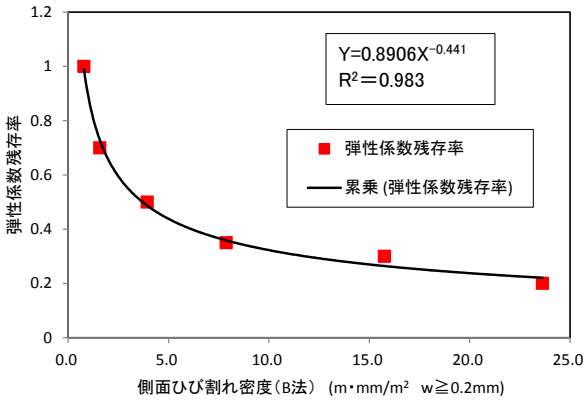
図－8　膨張量と側面ひび割れ密度（B 法）

表－4　材料特性残存率，膨張量，ひび割れ密度（B 法）の関係

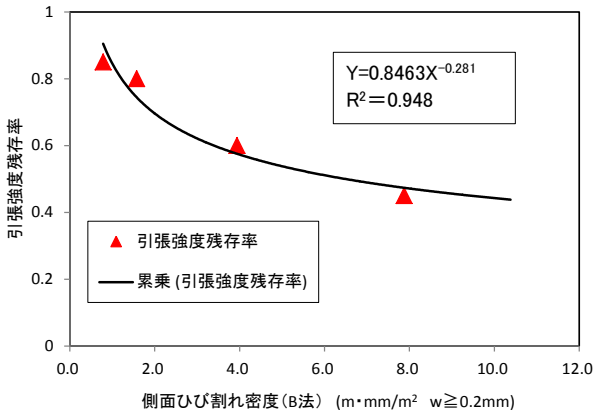
膨張量　（μ）	500	1000	2500	5000		
圧縮強度残存率	0.95	0.80	0.70	0.70		
ひび割れ密度（B法）　(m・mm/m²)	0.79	1.6	3.9	7.9		
膨張量　（μ）	500	1000	2500	5000		
引張強度残存率	0.85	0.80	0.60	0.45		
ひび割れ密度（B法）　(m・mm/m²)	0.79	1.6	3.9	7.9		
膨張量　（μ）	500	1000	2500	5000	10000	15000
弾性係数残存率	1.00	0.70	0.50	0.35	0.30	0.20
ひび割れ密度（B法）　(m・mm/m²)	0.79	1.6	3.9	7.9	15.8	23.6



図－9　ひび割れ密度（B 法）と圧縮強度残存率



図－11　ひび割れ密度（B 法）と弾性係数残存率



図－10　ひび割れ密度（B 法）と引張強度残存率

することにより，側面ひび割れ密度（B 法）と材料特性残存率の関係を構築した。（表－4 参照），図－9～図-11 に各材料特性残存率とひび割れ密度（B 法）の関係を記す。各材料特性残存率と側面ひび割れ密度（B 法）には高い相関性（R^2=0.882 以上）を確認できた。

以上の結果，ひび割れ長さ，幅より側面ひび割れ密度（B 法）を求め，その値を側面ひび割れ密度（B 法）と材料特性残存率の関係に用い，材料特性残存率を算定することにより，解析の入力値として活用可能であることが確認できた。

4. ひび割れ密度（B 法）推定法による曲げ耐荷性能評価

4.1 ひび割れ密度 A，B 法の関係

はじめに，ひび割れ密度 A，B 法の関係を大型試験体の計測結果を用いて検討した。図－12 にひび割れ密度 A，

B 法の関係を記す。その結果，ひび割れ密度（A 法），（B 法）には一定の相関性が確認できた。例えば，ひび割れ密度（A 法）2m/m^2 におけるひび割れ密度（B 法）は，B＝0.457×2≒0.914 となる。(**図－12** 赤丸参照) これより，ひび割れ密度(A 法)のみしか得られていない場合でも，ひび割れ密度（B 法）が推定可能となる。

4.2 ひび割れ密度（B 法）による曲げ耐荷性能評価

大型試験体のひび割れ密度（B 法）よりコンクリートの物性値を推定した。その物性値を**図－3** の表面値に，内部は健全値比率として，**図－2** のモデルより大型試験体の耐荷性能を算定した。ひび割れ密度（B 法）を用いた推定法（以下，B 法推定法）にて，材齢 2718 日の側面ひび割れ密度（B 法）10.078m・mm/m^2（w≧0.2mm）より式(3)～(6)を用いて膨張量，材料特性残存率を算定した。**表－5** に B 法推定法による材料特性残存率，**表－6** に曲げ耐荷性能の解析に用いた物性値を記す。**表－6** には，大型試験体より採取した軸方向 TP 表面値との比率も記載している。

膨張量　：$Y=634.6X$　(3)

圧縮強度残存率　：$Y=0.8832X^{-0.1340}$　(4)

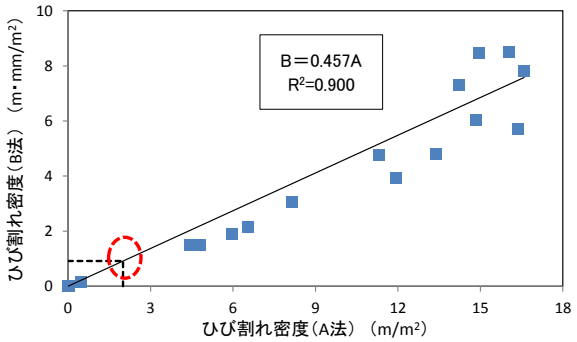
引張強度残存率　：$Y=0.8463X^{-0.281}$　(5)

弾性係数残存率　：$Y=0.8906X^{-0.4410}$　(6)

ここに，X：ひび割れ密度（B 法）

4.3 解析結果

B 法推定法を用いた解析結果の比較を**表－7**，個別の解析結果を**図－13**，**図—14** に記す。**表－7** に記す軸 TP の結果は，大型試験体の表面，内部より採取した軸方向コアの値を**図－2** のモデルの入力値として解析した結果である。**図－13** などの枠内の値は，軸 TP 解析結果に対する比率である。なお，変位算出時の荷重は，ASR 試験体の曲げひび割れ発生荷重（解析値）が 1308kN であったことより，曲げひび割れ発生前荷重(線形領域)で 1000kN，曲げひび割れ発生後荷重（非線形領域）で 2000kN とした。



図－12　ひび割れ密度 A, B 法の関係

表－5　B 法推定法による材料特性残存率

ひび割れ密度 (B法) X (m・mm/mm^2)	膨張量 (μ)	算定式	ひび割れ密度 (B法) X (m・mm/mm^2)	圧縮強度残存率	算定式
10.078	6395	(3)	10.078	0.65	(4)

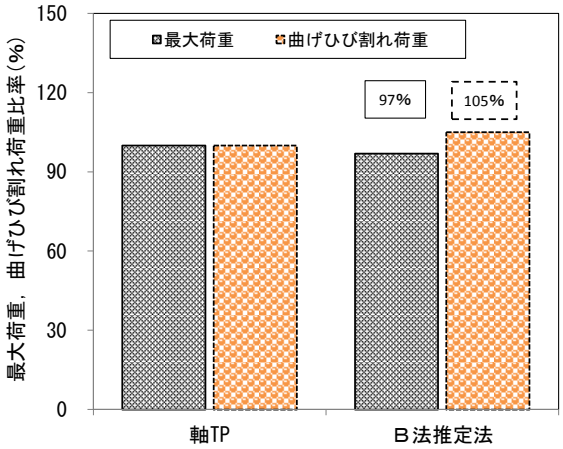
ひび割れ密度 (B法) X (m・mm/mm^2)	引張強度残存率	算定式	ひび割れ密度 (B法) X (m・mm/mm^2)	弾性係数残存率	算定式
10.078	0.44	(5)	10.078	0.32	(6)

表－6　解析に用いた B 法推定法による物性値

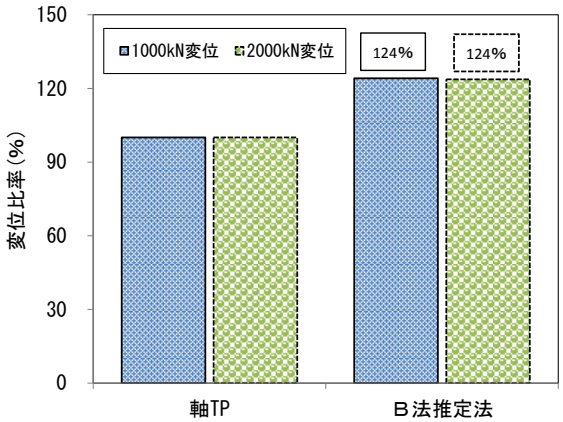
	残存率	健全値 N/mm^2	推定物性値 N/mm^2 ①	軸TP表面値 N/mm^2 ②	比率 ①/②
f'c	0.65	61.3	39.8	36.6	1.09
ft	0.44	3.6	1.6	1.6	0.99
Ec	0.32	34100	10963	18800	0.58

表－7　解析結果の比較

	No.	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)
軸TP	1	1308	4628	1.43	3.05
B 法推定法	2	1374	4488	1.78	3.77



図－13　最大荷重，曲げひび割れ荷重結果比較



図－14　変位の結果比較

4.4 解析結果のまとめ

最大荷重については，ASR 試験体にて軸方向 TP 値を用いた結果（軸 TP 結果）に対し，B 法推定法にて 97%と高い整合性を確認できた。これは，B 法推定法により算定した圧縮強度が軸 TP と大きく変わらないことが要因である。ASR 劣化した PC 梁構造の最大荷重を精緻に評価するためには，ASR 劣化したコンクリートの軸方向の圧縮強度を精度よく推定することが必要である。

曲げひび割れ発生荷重については，軸 TP 結果に対し B 法推定法にて 105%と最大荷重同様，高い精度での結果が得られており，本推定法にて曲げひび割れ発生荷重の評価は可能であると考えられる。

変位については，軸 TP 結果に対し，ひび割れ発生前荷重，ひび割れ発生後荷重とも 124%と，比較的大きめの傾向を示している。しかし，実構造物を想定した場合，現在供用しているポストテンション T 桁橋の最大支間 45m の橋梁における活荷重変位は最大 3～4mm 程度 [14] であり，上記 30%程度の乖離があっても走行に問題となる値ではないと考えられる。これより，本推定法での変位の評価は可能であると考えられる。

上記結果より，ASR 劣化した PC 梁構造において，ひび割れ密度（B 法）を用いた推定法により，曲げ耐荷性能の評価は可能であると考えられる。

5. まとめ

計測時のひび割れ密度より，ASR 劣化したコンクリートの物性値を推定する手法を検討し，その値を活用し ASR 劣化した PC 梁構造の耐荷性能の算定を行った。本研究にて得られた知見を以下に記す。

(1) 長期計測結果より，膨張量とひび割れ密度（B 法）には高い相関性があることを確認した。

(2) 膨張量と材料特性残存率，膨張量とひび割れ密度（B 法）には各々相関性があり，その相関性を用いることにより，ひび割れ密度（B 法）より材料特性残存率を推定することが可能であることを確認した。

(3) ひび割れ密度 A，B 法には高い相関性があることを確認した。

(4) ASR 劣化したコンクリートの物性値を，ひび割れ密度（B 法）を用いた推定法により算定し，その値を表面内部物性値分離法を活用したファイバーモデルに活用することにより，ASR 劣化した PC 梁構造の曲げ耐荷性能を概ね算定することが可能であることを確認した。

上述した内容は本研究内での結果であり，今後，実構造物への対応を踏まえ，材料特性残存率，ひび割れ密度（B 法）を用いた推定法などの精度向上が必要であると考える。

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) 国土交通省道路局：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案），2003.3.

3) 阪神高速道路株式会社，（財）阪神高速道路管理技術センター：ASR 構造物の維持管理マニュアル，(株)電気書院，2007.2.

4) 例えば宮川豊章（2003）：アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の安全性評価（コンクリート委員会/アリカリ骨材反応小委員会中間報告），土木学会誌.

5) 例えば上田尚史，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.

6) 例えば新名勉，松本茂，佐藤彰紀，久利良夫，真鍋英規：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.

7) 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.

8) 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.

9) 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.

10) 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.

11) 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.

12) 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

13) 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.

14) 建設省制定；土木構造物標準設計第 13～16 巻数値表（ポストテンション方式 PC 単純 T げた橋），1994.