

## シース腐食が生じたPCはりの曲げ耐荷性能に関する数値解析的検討

西日本旅客鉄道(株)	正会員	博士(工学)	○近藤 拓也
京都大学大学院	正会員	博士(工学)	山本 貴士
(株)国際建設技術研究所	正会員	博士(工学)	真鍋 英規
京都大学大学院	正会員	工学博士	宮川 豊章

Abstract : The flexural loading test on the specimens, which had been subjected to the corrosive environment for around 10 years and had the cracks due to the sheath corrosion, was carried out. 2-dimensional FEM analysis on the load-carrying performance of cracked PC members was also performed. Especially, the load-carrying behavior was discussed from the point of view of load-displacement relationship. As a result, the differences between the corroded and not corroded PC members were able to be found in the flexural behavior after the occurrence of the flexural cracks and the properties of the flexural cracks, while the difference was not significant in the maximum load and displacement at the time.

Key words : PC beam, Sheath corrosion, FEM analysis, Load-displacement relationship

## 1. はじめに

腐食によりポストテンション方式PCはり表面に発生するひび割れは、鈴木ら<sup>1)</sup>が述べているように、塩害や中性化等により鋼製シースが腐食することによる膨張圧に起因している可能性が高い。この現象はPC鋼材の腐食発生原因および腐食促進要因となり、またPC鋼材腐食そのものとは無関係にコンクリート表面にひび割れを発生させる一因となる。

PC鋼材腐食と曲げ耐荷性能の関係については様々な研究結果が報告されており、PC鋼材の腐食進行と耐荷力の低下に関する関係や破壊形式の変化など、一定の見解が得られている<sup>2)</sup>が、鋼製シースの腐食が曲げ耐荷性能に与える影響についての研究事例はほとんど見られない。シース腐食による腐食ひび割れの発生は、コンクリートにおける見かけの弾性係数の低下や、シースとコンクリート間の付着力低下、さらにはPC鋼材とコンクリート間の付着力低下を招き、プレストレスの減少や曲げ剛性の低下につながるものと考えられる。また局所的に膨張圧が作用することにより、はり全体の力学挙動を変化させること等が考えられる。

シース腐食によりひび割れが生じた場合、PC鋼材の腐食が軽微な段階では、ひびわれ注入やその他の措置を行うことにより、PC鋼材の腐食防止に関する措置は完了する。しかし、今後の継続した供用に対しては、処置完了前の部材特性を把握することが非常に重要である。

本論文では、鋼製シースの腐食が原因で生じた腐食ひび割れを有するPCはりの曲げ特性を把握することを目的として、コンクリート中にNaClを混入した状態で約10年間暴露を行い、PC鋼材は腐食していないものの、シース腐食によりコンクリートに腐食ひび割れが生じたポストテンション方式PCはりを対象として、曲げ載荷試験および2次元FEM解析を実施した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験パラメータ

本論文ではシース腐食による軸方向ひび割れの影響を検討するため、載荷材齢を30日と10年の2種類とした。

## 2.2 供試体概要

供試体形状は、図-1に示すように100×200×1600mmの矩形断面はり供試体とし、曲げ破壊が先行するようにスターラップ (SD295A D6を使用) を60mm間隔で配置した。プレストレスは、コンクリートが目標圧縮強度である50N/mm<sup>2</sup>に到達したことを確認し、PC鋼材に引張強度の50%に相当する緊張力を与えることにより導入した。

使用したコンクリートの水セメント比は40%、グラウトの水セメント比は35%とした。また使用したグラウトは、ナフタリンスルホン酸系化合物を主成分とした混和剤を添加した。なお、内的塩害を模擬するため、コンクリートにはNaClを細骨材重量の5%程度混入し、細骨材の一部として配合した。

## 2.3 載荷方法および測定項目

曲げ載荷試験概要図を図-2に示す。スパン1400mm に対して、等曲げ区間300mm、せん断スパン550mm の対称2点一方向漸増載荷を行った。また、最大荷重P<sub>m</sub> 到達まで5kN毎の漸増載荷を行った。支間中央および両支点には変位計 (中央: 容量100mm, 支点: 容量50mm) を設置した。ひび割れ発生荷重を特定するため、図-3(a)に示すように、等曲げ区間底面にひずみゲージ (60mm) を50mm 間隔で千鳥状に貼り付けた。等曲げ区間内における高さ方向の発生ひずみを測定するため、図-3(b)に示すように曲げひび割れの影響を避けるため、支間中央から50mm 離れた位置ではり高さ方向25mm 間隔にひずみゲージ (60mm) を貼り付けた。また、供試体側面に50mm×50mm 間隔でメッシュを描き、最大荷重に達するまでひび割れ観察を行った。

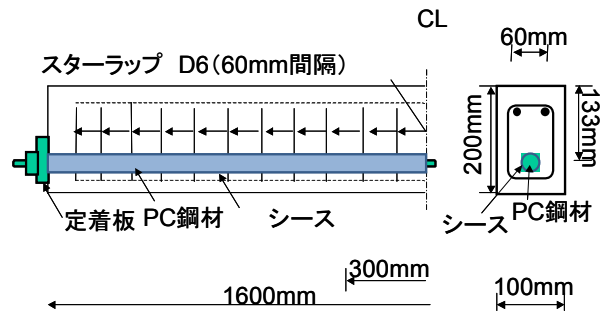


図-1 供試体概要図

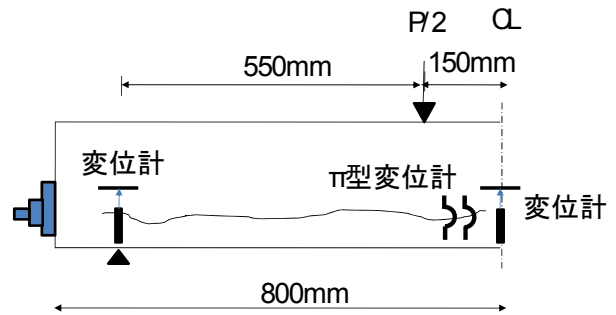


図-2 測定機器取付状況

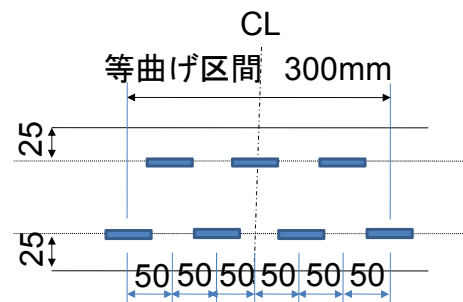
## 3. 解析方法

### 3.1 解析モデルおよび境界条件

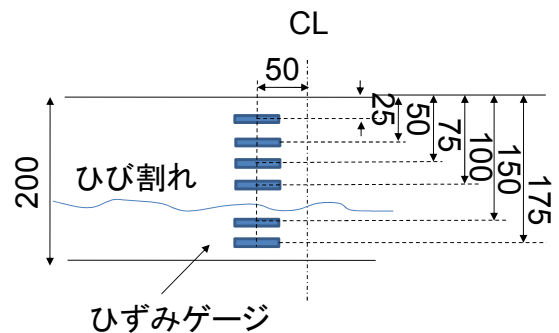
要素の概要および要素分割図を図-4に示す。解析は対称性を考慮してはり左側半分について行い、支点の鉛直方向およびスパン中央部の軸方向を固定した。また、支点部から550mmの位置のはり上縁の接点に、鉛直下向き増分変位を与えた。

### 3.3.2 要素特性

健全部コンクリートは1次のアイソパラメトリック四辺形要素、シース腐食によるひび割れ部分には、後述するひび割れ要素を導入した。またPC鋼材の付着については、Ngoらが提案した付着リンク要素<sup>3)</sup>を用いた。腐食ひび割れ要素を挟むコンクリート要素、PC鋼より線要素および付着リンク要素の関係を図-5に示す。腐食ひび割れ要素上下の節点から2本の補間要素を設け、それらの格点とPC鋼より線格点をz方向に距離0の付着リンク要素



(a) 底面の状況



(b) 側面の状況

図-3 ひずみ分布測定概要 (単位: mm)

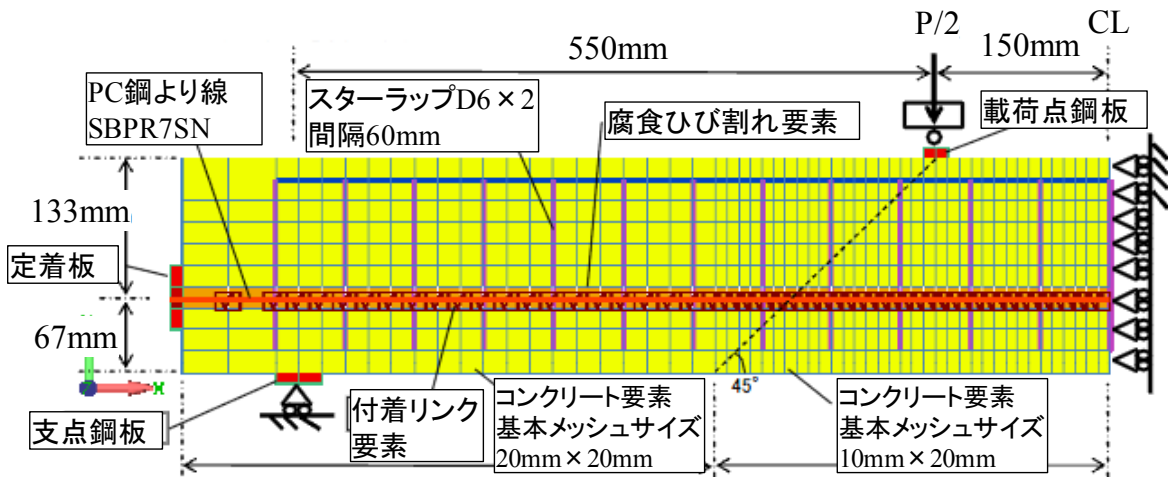


図-4 要素概要および要素分割図

で接合するものである。なお、解析は2次元モデルであり、図-5は便宜上z方向に距離があるように示している。

またスターラップとして使用している鉄筋は付着を考慮しない1次の線要素とした。圧縮側の応力-ひずみ関係については、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいた。また、解析時の導入プレストレスは、経年によるプレストレス損失を20%と仮定し設定した。コンクリート引張側の応力-変位関係については、後述する腐食ひび割れ要素部での応力伝達を考慮し、軟化域を指数関数とするモデルを用いた。

### 3.3.3 腐食ひび割れ要素

今回の検討では、荷重前の腐食ひび割れをモデル化して解析を行う。腐食箇所のコンクリート要素には、コンクリートが引張強度 $f_t$ に達していると仮定した分布ひび割れ要素を用いる。

腐食ひび割れが存在しているシース位置のコンクリート要素にひび割れ幅に相当するy方向の初期ひずみ $\epsilon'_{cr}$ を導入して解析を行う。また、初期ひずみを有するコンクリート要素の構成側を式(1)に示すように仮定する。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 \\ 0 & 0 & \beta \cdot G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{式(1)}$$

ここで  $\sigma_i$ : i方向の垂直応力,  $\tau$ : せん断応力,  $E_i$ : i方向の弾性係数,  $G$ : せん断弾性係数,  $\beta$ : ひび割れを考慮した低減係数,  $\epsilon_i$ : i方向の垂直ひずみ,  $\gamma$ : せん断ひずみ

このとき、y方向の引張剛性は、初期ひずみ $\epsilon'_{cr}$ が与えられていることを考慮して図-6に従うことと仮定した。なお、x方向の引張剛性は、健全なコンクリートの応力-ひずみ関係に従うこととした。

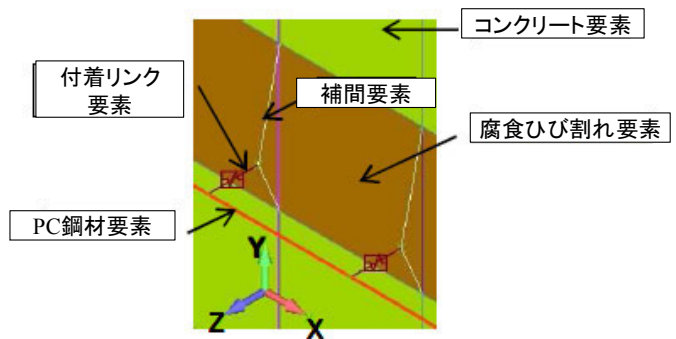
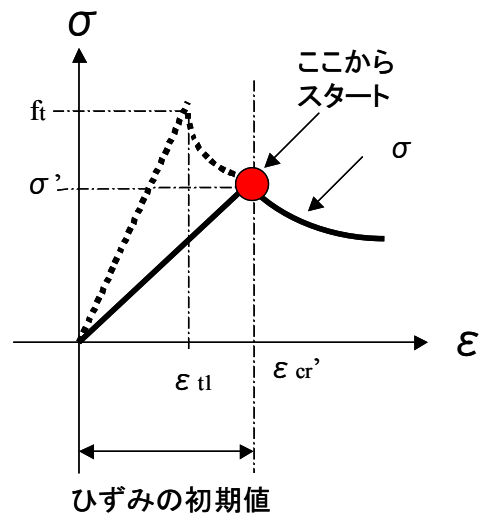


図-5 附着リンク要素の構成概要  
(x方向: はり軸方向, y方向: はり高さ方向)



ひずみの初期値  
図-6 腐食ひび割れ要素部の引張応力-ひずみ関係

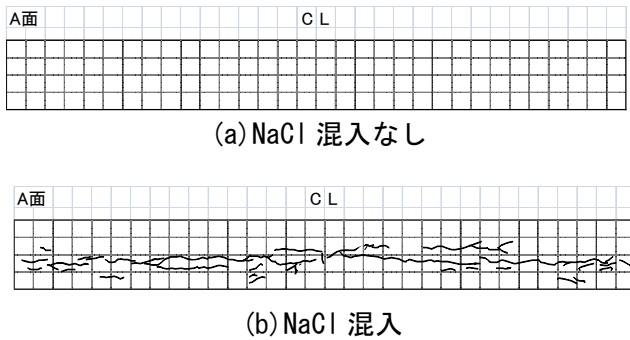


図-7 10年後供試体側面の外観状況

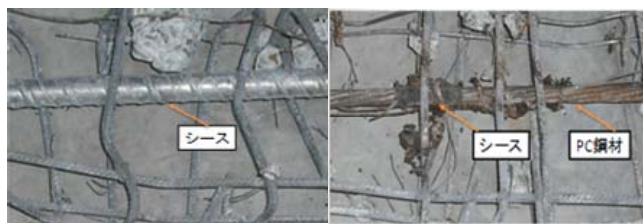


図-8 解体後のコンクリート内部状況

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 供試体の外観状況

10年後の供試体外観状況(側面)を図-7に示す。NaClを混入している供試体では、シースに沿ったひび割れが発生しているが、NaCl無混入供試体にはコンクリートにひび割れが発生していない状況が分かる。なお腐食ひび割れ幅は0.1~0.5mm程度であり、供試体上面および底面にはひび割れは発生していなかった。

供試体コンクリート除去後の内部状況を図-8に示す。NaCl混入供試体はシースが腐食により大部分が消失し、内部のPC鋼材表面が腐食している状況を確認できた。一方、NaCl無混入供試体ではシースに腐食は確認できなかった。これらより本供試体に発生しているひび割れの主原因は、シース腐食によるものと考えられる。

##### 4.2 曲げ挙動の検討

ここでは、最大荷重到達までの曲げ変形性能に与える腐食ひび割れ有無の影響を、実験および解析の比較により検討した。解析については、実構造物の供用状態における検証とするため、支間中央変位5mmまでの解析とした。なお、腐食ひび割れが生じたPCはりには、0.3mm程度の腐食ひび割れが発生していた。この腐食ひび割れ幅を腐食ひび割れ要素の初期ひずみに換算するにあたって、腐食ひび割れ幅をシース幅(20mm)に対するひずみ(case1:  $\epsilon'_{cr} = 0.015$ )としたもの、およびはり高(200mm)に対するひずみ(case2:  $\epsilon'_{cr} = 0.0015$ )としたものを変数として設定し、これらについて解析を実施した。

荷重-変位曲線を図-9に示す。健全モデルでは、初期および曲げひび割れ発生後の剛性において解析値と実測値はほぼ一致した。曲げひび割れ発生で、実測値が解析値より小さくなっているが、載荷時の定着具の食い込み等により実験時の曲げ剛性が低下したことが原因と考えられる。

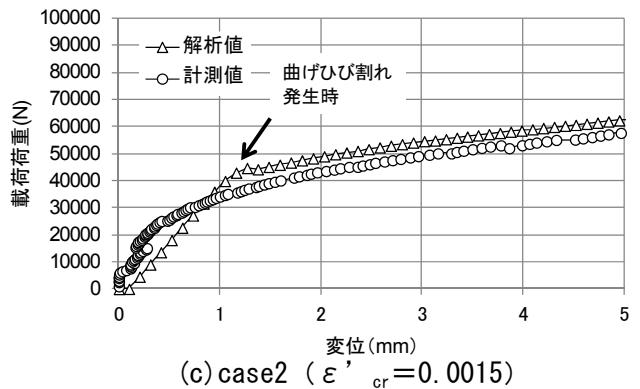
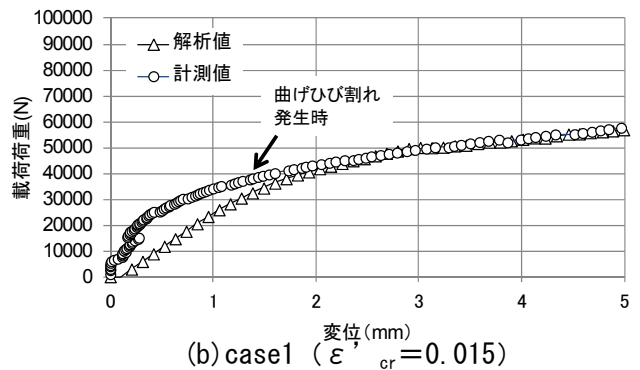
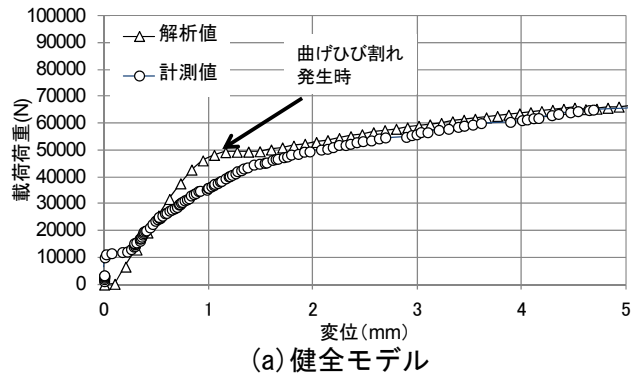


図-9 荷重-変位関係



腐食ひび割れが生じた供試体では、case1およびcase2ともに曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性においては、解析値は実験値をほぼ表現できている。一方で、両ケースともに曲げひび割れ発生以前については、実測値より解析値の曲げ剛性が小さい傾向にある。これは解析において、腐食ひび割れ発生要素におけるコンクリートの引張応力を図-6に示すよう軟化域から開始する影響が表れたものと考えられる。実験における初期剛性は、腐食ひび割れの有無に関わらずほぼ同じ値を示すことから、腐食ひび割れの影響は、曲げひび割れ発生以降から表れるものと考えられる。

はり高さ方向におけるひずみ分布の実測値と解析値の比較を図-10に示す。健全モデルでは、曲げひび割れ発生以前では実測値および解析値ともに直線分布を示していることが確認できる。一方で、腐食ひび割れが発生しているcase1およびcase2では、実測値が直線分布を示すのに対して、解析値は腐食要素(=140mm地点付近)を境として、はり上下で挙動が異なっており、腐食要素を挟んで重ねばりのような挙動を示していることが分かる。これは、解析では断面水平方向に一樣に腐食ひび割れによって軟化した要素を設定しているが、実験ではひび割れは断面内で一樣に発生していないため、全断面がほぼ一体となり外力に抵抗したことにより生じた差であると考えられる。また、この現象により、図-9における初期剛性が低下する一因になったものと考えられる。これらのことから、腐食ひび割れが生じたPCはり部材における初期の曲げ変形を算定するためには、腐食ひび割れの発生範囲とその部分の軟化挙動をさらに検討する必要があると考えられる。

解析で得られた、各腐食要素における鉛直変位5mm時点における、付着リンク要素の要素反力分布を図-11に示す。健全モデルでは、曲げひび割れが生じている箇所での反力差が大きく、ひび割れ箇所におけるPC鋼材-腐食要素間の応力伝達が大きいことを確認できる。一方で、腐食ひび割れが生じているcase1およびcase2では、反力が小さい状況を確認できる。特に初期腐食ひずみが多いcase1では、曲げひび割れを挟んでも反力の変化が小さい状況を確認できる。これらより、シース腐食が生じるこ

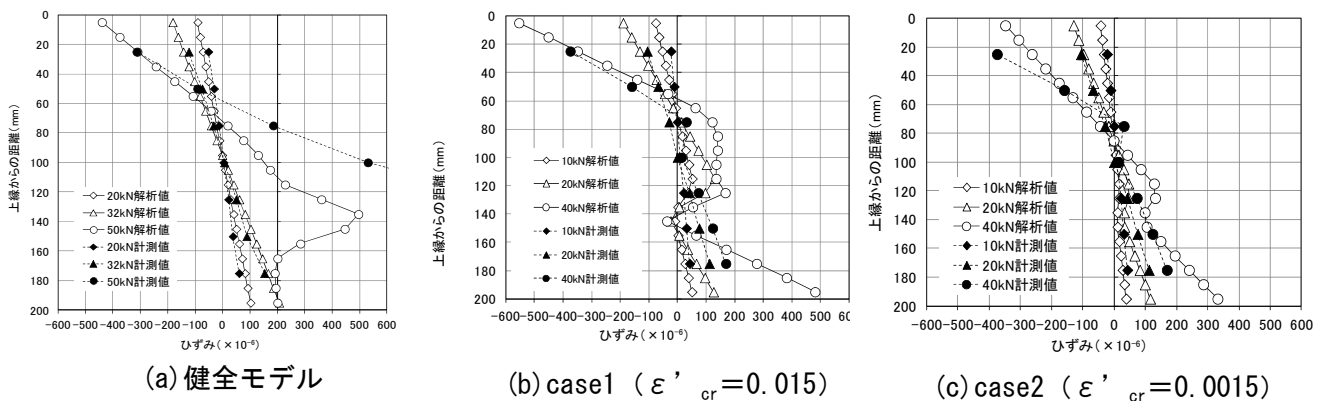


図-10 はり高さ方向のひずみ分布の比較

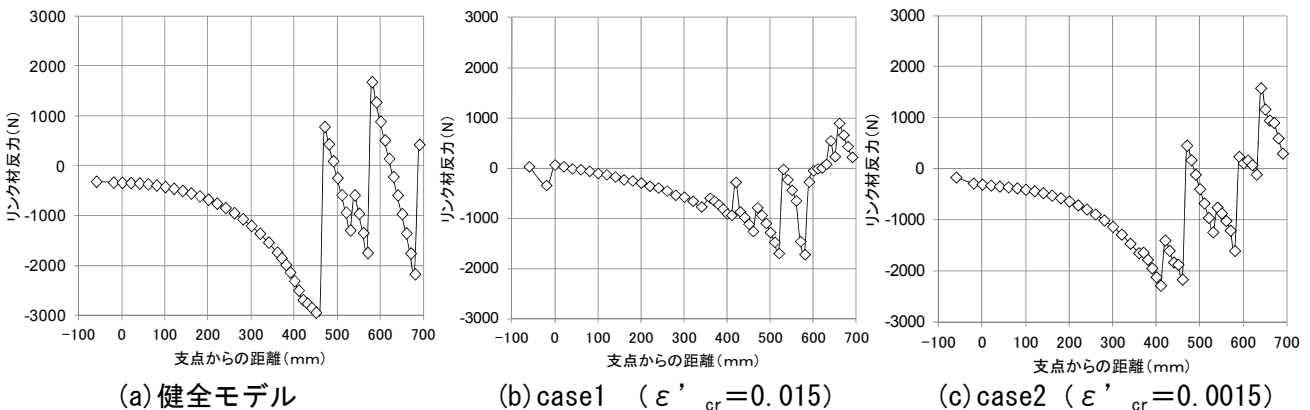


図-11 付着リンク要素の反力分布図

とにより、PC鋼材とコンクリート間の付着作用が小さくなることを示していると考えられる。

はりの曲げひび割れ分布状況を図-12に示す。腐食ひび割れが発生していない健全モデルでは、実験のひび割れ発生状況が表現できていると考えられる。腐食ひび割れが発生しているcase1およびcase2では、腐食要素より上部のひび割れの挙動が再現できていると考えられる。これは、重ねはりの性質が表れ、腐食要素部分が上部はりの底面となり、曲げひび割れが腐食要素から発生したものと考えられる。

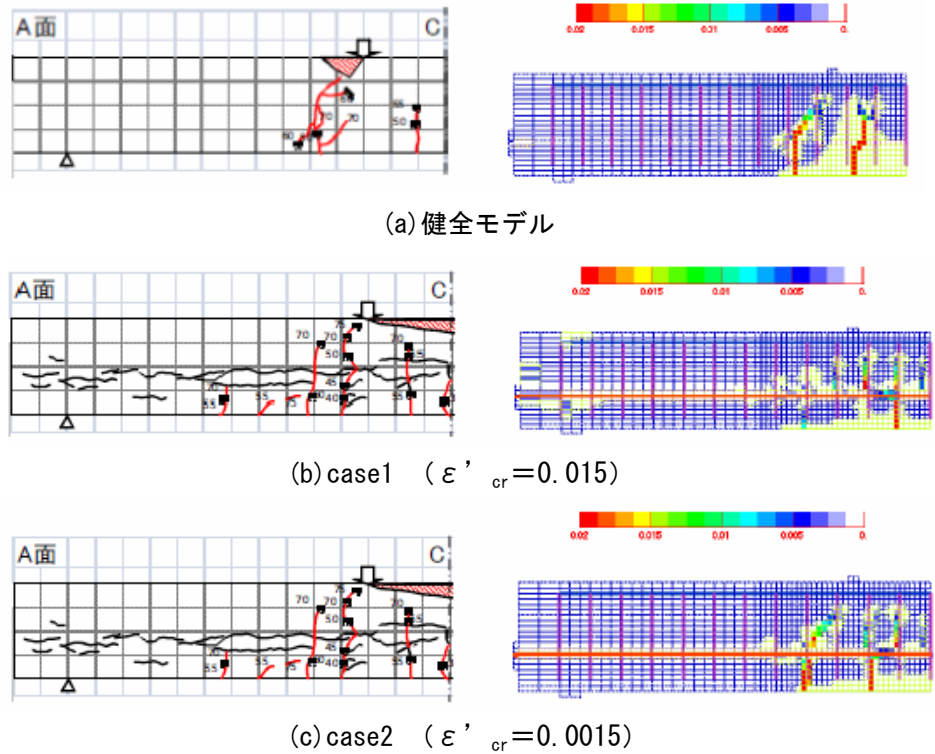


図-12 曲げひび割れ発生状況 (左：実験，右：解析)

これらの結果から、本解析モデルは、特に曲げひび割れ発生以降の曲げ変形挙動を模擬できていると考えられる。そのため、シース腐食によりひび割れが生じたPCはりでは、特に曲げひび割れ発生以降で重ねはりの影響が現れる可能性があるといえる。ただし、通常の供用状態では曲げひび割れの発生を考慮することはないが、曲げひび割れ発生荷重の低下を指摘する報告もある<sup>4)</sup>ため、シース腐食による腐食ひび割れの発生を防止することが重要であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、塩害等によりPC 鋼材には腐食が生じていないもののシースが腐食することによりコンクリートにひび割れが生じたポストテンション方式PC はりの曲げ耐荷性能について、2次元FEM 解析で検討を行った。これらから得られた結果について下記に示す。

- 1) 付着リンク要素および腐食ひび割れ要素を用いたはりモデルで数値解析による検討を行った結果、曲げひび割れ発生以降の荷重-変位関係、および曲げひび割れ発生傾向が実験を比較的模擬する状況が確認できた。
- 2) はりモデルによる数値解析から、シース腐食が生じたPC はりの曲げひび割れ発生以降では、シース腐食面を境として重ねはり的な挙動が生じる可能性を示した。

参考文献

1) 鈴木佑典ら：PC 部材中のシース腐食とコンクリート表面のひび割れに関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 1, pp. 1091-1096, 2011. 7, 2) Ha Minh, et, al. : Chloride-induced Corrosion in insufficiently Grouted Posttensioned Concrete Beams, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 85-91, 2008. 1, 3) D. Ngo, et, al. : Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Vol. 64, No. 3, pp. 152-163, 1967. 3, 4) 近藤拓也ら：シース腐食がPCはりの曲げ耐荷性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34, No. 2, pp. 1429-pp. 1434, 2012. 7