

塩害劣化したプレテンション桁の解析的耐力評価手法の検討

指導教員 丸山 久一
 田中 泰司
 コンクリート研究室 武田 健太

1. はじめに

塩害は、コンクリート構造物の鋼材腐食をもたらす、耐荷性能の低下をまねく。鋼材腐食が生じたコンクリート構造物の耐荷性能を定量的に評価する研究は、RC 構造物については精力的に行われ、その耐力低下メカニズムはある程度解明されつつある。一方で、PC 構造物については少数にとどまっているのが現状である。また、高度経済成長期には多数の PC 橋梁が建設され、これらに塩害等を伴う高齢化が生じている。そのため、材料劣化した PC 橋梁の残存構造性能を精度良く評価する手法の確立が急務となっている。そこで本研究では、塩害劣化したプレテンション桁の荷重試験結果を検討対象とし、残存構造性能の評価を定量的に行う手法を確立することを目的とし、有限要素解析による耐力評価を行った。

2. 検討対象実橋梁の概要と PC 鋼材の腐食状況

本研究の検討対象とした実橋梁は、新潟県糸魚川市能生で供用されていた鱗崎橋である。鱗崎橋は、橋長 10.4m、支間 9.8m のプレテンション PC 四主桁橋である。海岸から約 15m に位置していたため、塩害による鋼材腐食が進行し、腐食ひび割れが確認された。図-1 に試験体の断面図を示す。図のように、試験体には細径の PC 鋼材が多数配筋されていた。

図-2 に、鱗崎橋主桁の位置図と試験の対象区間を示す。海側の 2 本(A, B 桁)で曲げ試験、山側の 2 本(C, D 桁)の中央部で疲労試験、両端部で曲げせん断試験がそれぞれ実施された。本研究では、A, B 桁で実施された曲げ試験と、C, D 桁で実施された曲げせん断試験の荷重試験結果を検討対象とし、有限要素解析による耐力評価を行った。

荷重試験終了後、試験体の下フランジを部材軸方向に切断し、さらに下フランジを断面方向に約 50cm のブロックに切断した後、PC 鋼材をはつり出した。

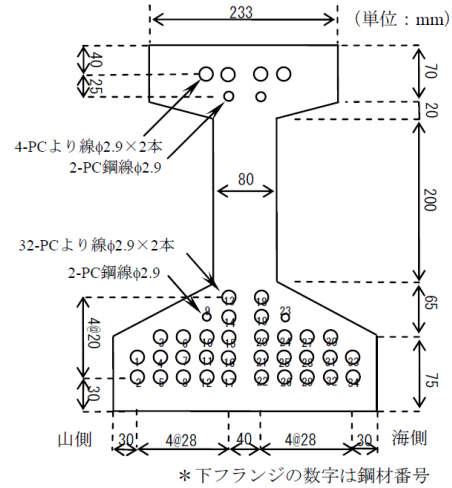


図-1 試験体の断面図

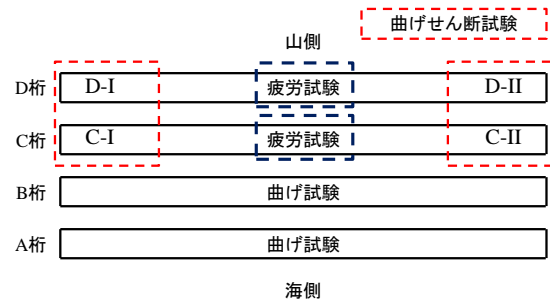
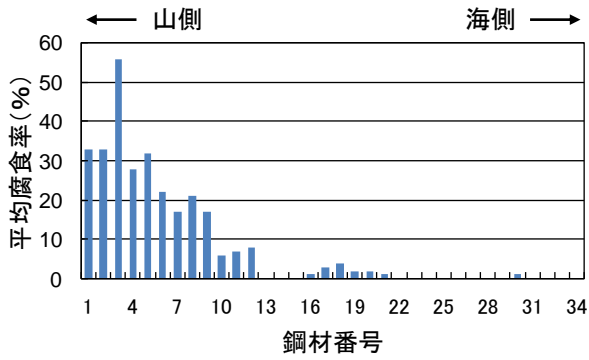


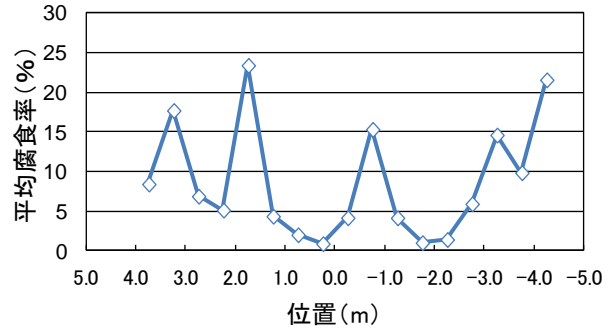
図-2 鱗崎橋主桁の位置図と試験の対象区間

その後、PC 鋼材の重量と長さを計測し、元の PC 鋼材に対する重量比として、鋼材腐食率を求めた。図-3 に、A 桁における PC 鋼材ごとの平均腐食率(図-3 (a))と、下フランジの領域(ブロック)ごとの平均腐食率(図-3 (b))を示す。ここで、平均腐食率は、腐食により消失していた箇所を考慮して求めた。図のように、PC 鋼材の配筋箇所や試験体の位置によっても腐食率のばらつきが大きいことがわかる。

図-4 に、PC 鋼材の腐食による破断・消失箇所を示す。図中の線の無い箇所は、PC 鋼材が腐食により破断していたことを示す。図のように、多数の破断・消失箇所が見られたことから、厳しい塩害環境下に曝されていたことによって、塩害劣化が極度に進行していたことがわかる。



(a) 各PC鋼材における平均腐食率



(b) 試験体の各位置における平均腐食率

図-3 各PC鋼材と試験体の各位置における平均腐食率(A桁)

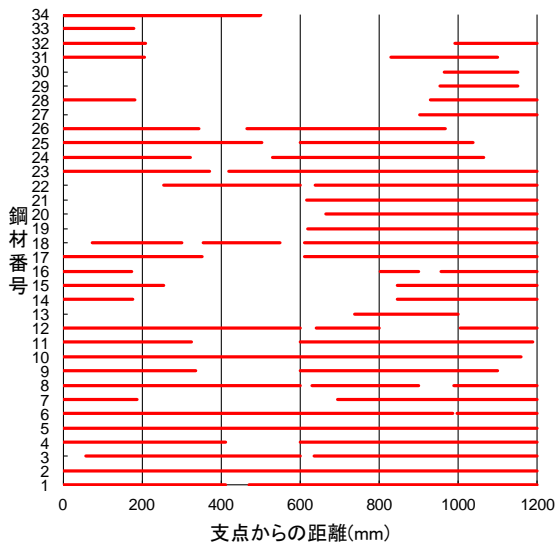


図-4 PC鋼材の破断・消失箇所(D-I)

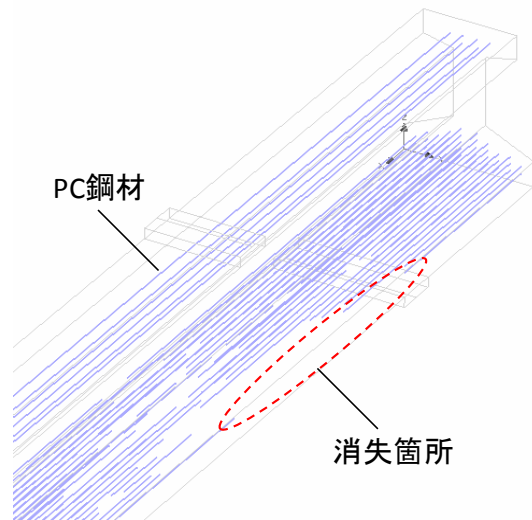


図-5 離散鉄筋要素設定例(D-I)

3. 有限要素解析による再現解析

3.1 解析方法

上述した実橋梁の曲げ試験と曲げせん断試験の荷重試験結果を検討対象とし、有限要素解析による再現解析を実施した。検討対象とした実橋梁は、図-4に示すように、塩害による鋼材腐食が進行し、破断・消失していた箇所が多数見られた。そこで、解析中でもこの影響を再現するために、図-5に示すようにPC鋼材を離散鉄筋要素で直接表現した。またコンクリートとPC鋼材は基本的に完全付着とした。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側の上昇曲線はCEB-FIP Model codeに準拠し、圧縮軟化を直線、引張軟化を指数関数とした。コンクリートの引張強度と破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書に準拠し、圧縮強度から求めた。せん断に対する軟化則として、せん断剛性とひび割れ幅の関係で

ある山田・青柳モデルを用いた。

PC鋼材の応力-ひずみ関係には、式(1)と式(2)に示す陸らが提案した機械的性質と鋼材腐食率の関係を用いた。なお、陸らのモデルは、腐食したφ2.9のPCより線の引張試験結果を回帰した式であり、腐食率0%における応力-ひずみ関係の形状は、トリリニア型とした。

$$\sigma = \begin{cases} E_p \cdot \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ \frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \cdot (f_{pu} - f_{py}) + f_{py} & (\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u) \\ f_{pu} & (\varepsilon_u \leq \varepsilon \leq (\varepsilon_u + \varepsilon_{ps})) \end{cases} \quad (1)$$

$$E_p = R_{EA} \cdot E_{p,0}$$

$$f_{pu} = R_{pu} \cdot f_{pu,0}, \quad f_{py} = R_{py} \cdot f_{py,0}$$

$$\varepsilon_u = R_{\varepsilon_s} \cdot \varepsilon_{u,0}, \quad \varepsilon_y = \frac{R_{py} \cdot f_{py,0}}{R_{EA} \cdot E_{p,0}} = \frac{R_{py}}{R_{EA}} \cdot \varepsilon_{y,0}$$

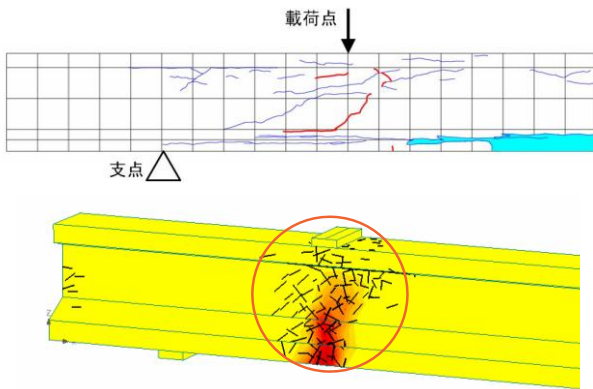
$$\begin{aligned}
 R_{pu} &= e^{-6.467C}, & R_{EA} &= e^{-1.274C} \\
 R_{py} &= e^{-5.968C}, & R_{\infty} &= e^{-12.57C}
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

また本解析では、PC 鋼材の応力-ひずみ関係に、式(3)に示す平均腐食率分だけ降伏強度を低下させた場合の解析も実施した。

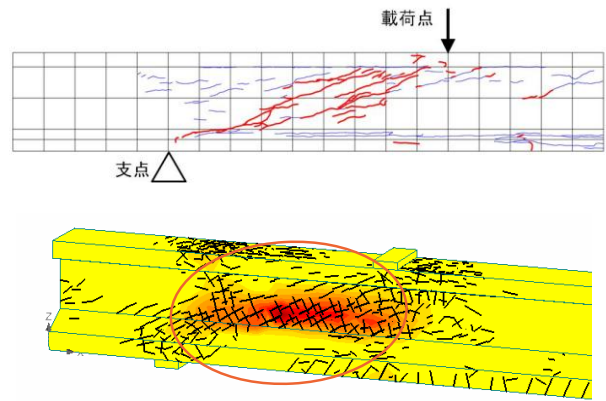
$$\sigma = \begin{cases} E_p \cdot \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_{py} & (\varepsilon_y < \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{py} = R_{py} \cdot f_{py,0}, \quad R_{py} = 1 - C$$

鋼材のプレストレスは、使用状態の許容値である 1170 N/mm^2 とした。通常の解析では、鋼材要素の端部を引張ってプレストレス力を与えるが、その方法では、腐食により破断した PC 鋼材のプレストレスが表現できない。そこで、PC 鋼材にプレストレインを導入することで、プレストレスの導入と、破断・消失部周辺のプレストレスロスを表現した。

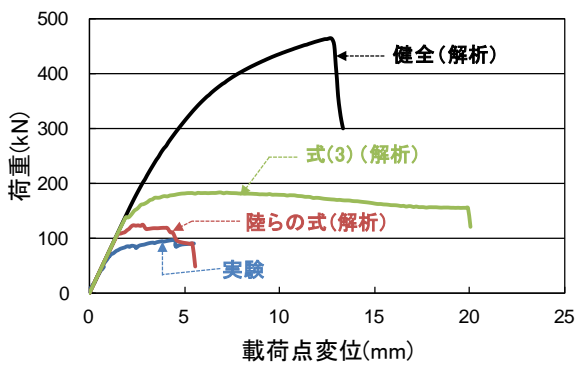


(a) D-I

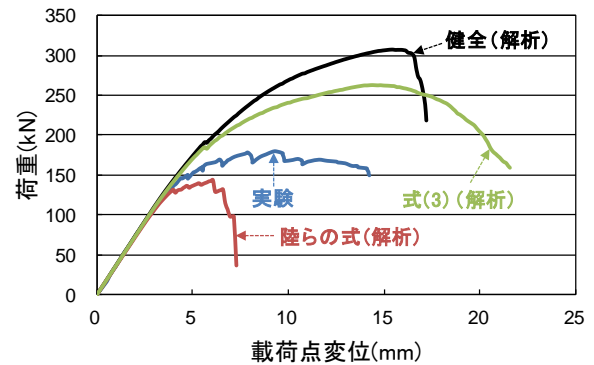


(b) D-II

図-6 実際の荷重によるひび割れ図と解析上の主ひずみおよびひび割れ分布図



(a) D-I



(b) D-II

図-7 荷重-変位関係における実験値と解析値の比較

3.2 解析結果

図-6に、D桁(D-I, D-II)における実際の荷重で生じたひび割れ図と、有限要素解析により得られた主ひずみおよび、ひび割れ分布図を示す。ここでは、PC 鋼材の応力-ひずみ関係に陸らの式を用いた場合のものを示す。図のように、有限要素解析により得られた破壊状況は、実際の破壊状況と概ね一致する結果となった。

図-7に、D桁における荷重-変位関係の実験値と解析値の比較を示す。図中には比較として、PC 鋼材の応力-ひずみ関係に式(3)を用いた場合の解析値と、試験体を健全とした場合の解析値も示している。PC 鋼材の応力-ひずみ関係に陸らの式を用いた場合、初期剛性やひび割れ発生荷重、最大荷重は、健全の解析値から見ると、解析値と実験値は概ね一致した。一方、式(3)を用いた場合、ひび割れ発生荷重

と最大荷重は、解析値が実験値を過大評価する傾向が見られた。したがって、破壊状況や構造性能を高精度で再現するためには、PC 鋼材の破断・消失箇所を忠実に再現し、かつ PC 鋼材の応力-ひずみ関係に、陸らの式のような腐食による機械的性質の低下を適切に考慮したモデルを用いる必要があることが明らかとなった。

4. 橋桁内部のひび割れ進展状況に着目した有限要素解析

4.1 PC 鋼材の残存箇所の推定

3章では、実際に橋桁からは取り出された PC 鋼材の長さや重量をもとに腐食率を算定し、PC 鋼材の機械的性質の低下を考慮したうえで構造性能を解析的に評価した。しかし現在の技術では、実際に供用されている橋桁の PC 鋼材の腐食分布を、非破壊検査などで精緻に計測することは困難である。そこで本検討では、橋桁内部のひび割れ状況から PC 鋼材の残存箇所を間接的に推定し、有限要素解析により構造性能を評価することとした。

ひび割れ状況から、鋼材の腐食状況を推定する方法としては、コンクリート表面のひび割れ幅と鋼材腐食率の関係をモデル化する方法がある。図-8は、B 桁におけるコンクリート表面のひび割れ幅と PC 鋼材の平均腐食率の関係を示したものである。検討対象とした橋桁に用いられていた PC 鋼材は、φ2.9 の 2 本より線と細径であることもあり、同じひび割れ幅でも腐食率は大きくばらついていることから、ひび割れ幅により腐食率をモデル化することは困難であることがわかる。

そこで本検討では、安全側の評価となるように、図-9 に示す試験体の切断面の写真を用いて、鋼材位置にひび割れが到達している場合、PC 鋼材は腐食しきって完全に消失し、ひび割れが到達していない場合、PC 鋼材は全く腐食せずに残存すると仮定した。また、ひび割れ面は少なくとも骨材寸法分の凹凸を有すると考えて、ひび割れ箇所から粗骨材の最大寸法 (d_{max}) 分の範囲内にある PC 鋼材を消失させた場合の解析も実施した。なお、これ以降は、ひび割れが到達している PC 鋼材のみを消失させた場合を

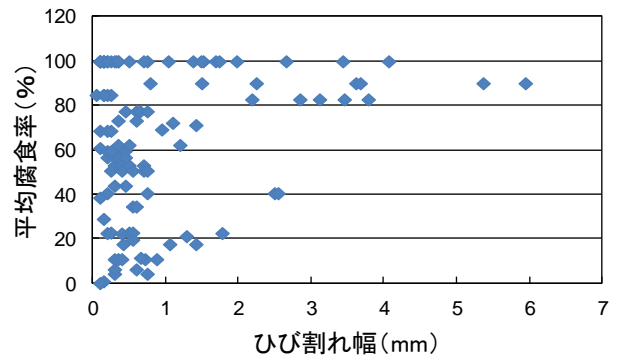


図-8 平均腐食率-ひび割れ幅関係 (B 桁)



図-9 試験体の切断面写真

d_{max} 未考慮、ひび割れ箇所から d_{max} の範囲内にある PC 鋼材も腐食が生じると仮定した場合を d_{max} 考慮と称する。

4.2 有限要素解析による耐力評価

(1) 解析方法

以上のように、断面のひび割れ状況から PC 鋼材の残存箇所を推定し、有限要素解析による耐力評価を試みた。解析は基本的に 3.1 節に記述した方法にしたがった。残存箇所の PC 鋼材は非腐食 (腐食率 0%) と仮定し、PC 鋼材の応力-ひずみ関係はトリリニア型とした。

(2) 解析結果

図-10 に、B 桁と C-I における荷重-変位関係の実験値と解析値の比較を示す。ここでは、3 章にて実施した、試験体を健全とした場合の解析値も示しており、はり理論から求めた曲げ破壊荷重も示した。ここで曲げ破壊荷重は、 d_{max} を考慮した場合の解析上の破壊断面を計算対象として求めた。荷重-変位関係において、 d_{max} 未考慮の場合の解析値は、実験

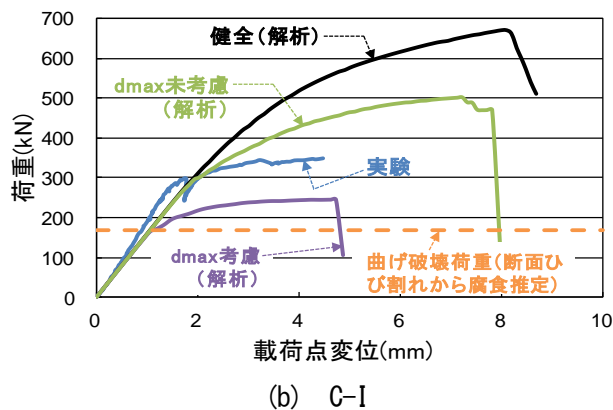
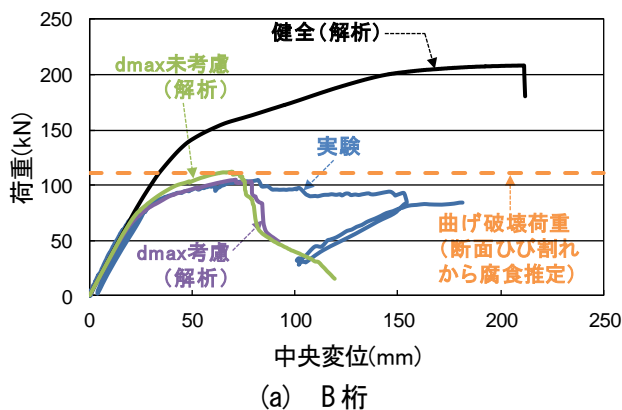


図-10 荷重－変位関係における実験値と解析値の比較および曲げ破壊荷重(断面ひび割れから腐食推定)

値と概ね一致する場合(B桁)や、過大評価する場合(C-I)もあった。一方、 d_{max} を考慮した場合の解析値は、実験値と概ね一致する場合(B桁)や安全側に評価する(C-I)結果となり、過大評価する傾向が解消され、曲げ破壊荷重の計算値でも解析値と同様な傾向が見られた。このことより、内部のひび割れ進展状況からPC鋼材の腐食分布を推定することによって、有限要素解析により比較的高精度で耐力評価を行うことは可能であるといえる。また、破壊断面とPC鋼材の腐食状況が適切に推定されれば、有限要素解析によらずとも、曲げ計算によってもある程度の精度で耐力評価が可能であることが示された。

5. 橋桁外観のひび割れに着目した有限要素解析による耐力評価

5.1 内部ひび割れパターンの決定とPC鋼材の残存箇所推定

4章で得られた知見を実造物に適用するためには、外観のひび割れ状況から内部のひび割れ進展状況を推定する技術確立が必要がある。そこで、ここでは試験体内部に生じていたひび割れをパターン化し、図-11に示すような内部ひび割れパターン図を作成することとした。内部ひび割れパターン図は、試験体最外縁に配筋されていたPC鋼材の腐食が起点となって内部にひび割れが進展する場合のひび割れパターンを、試験体の切断面写真との比較から作成した。PC鋼材の残存箇所は、橋桁外観の写真から、PC鋼材位置にひび割れが生じている場合、それに対応するひび割れパターン図を用いて推定した。

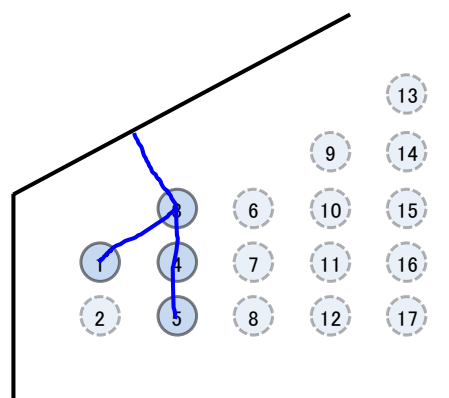


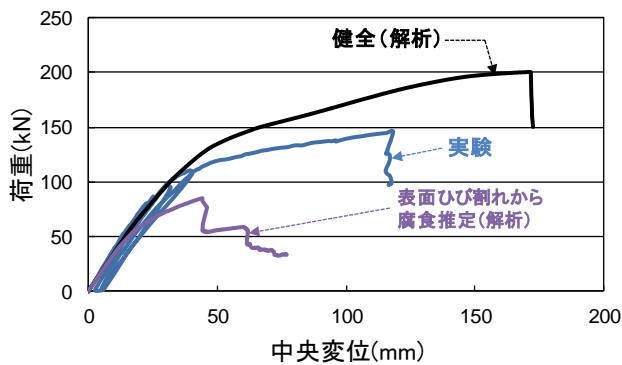
図-11 内部ひび割れパターン図(No. 3)

また、4章と同様にひび割れから d_{max} の範囲内にあるPC鋼材には腐食が生じて消失すると仮定した。

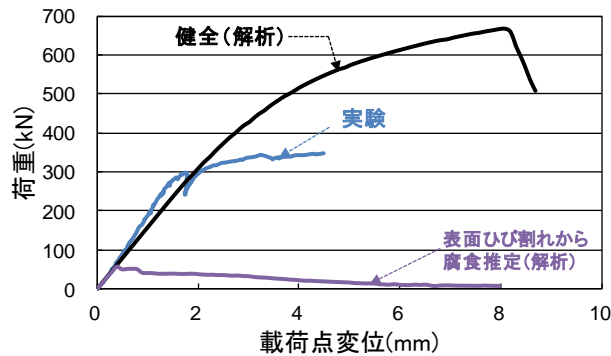
5.2 有限要素解析による耐力評価

以上のように、橋桁外観のひび割れ状況から内部のひび割れ状況を推定したうえで、PC鋼材の残存箇所を推定し、有限要素解析による耐力評価を試みた。解析は4.2節の(1)に記述した方法にしたがった。

図-12に、A桁とC-Iにおける荷重－変位関係の実験値と解析値の比較を示す。図のように、解析値は実験値を過小評価する結果となった。その原因のひとつとして、PC鋼材の腐食判定方法が厳しいため、過度に安全側に評価していることが挙げられる。橋桁外観のひび割れ状況からPC鋼材の残存箇所を推定した場合の耐力評価の推定精度を向上させるためには、内部のひび割れ進展状況の推定をより高精度化する必要があるが、外観のひび割れだけから、これ以上の精度向上を達成することは困難であると考えられる。そのため、外観のひび割れ状況から構造



(a) A 桁



(b) C-I

図-12 荷重-変位関係における実験値と解析値の比較(表面ひび割れから腐食推定)

性能を判断する場合は、安全側の評価となるように、内部のひび割れ進展状況を厳しめに推定し、解析等により耐力を評価せざるを得ないといえる。また、鋼材の腐食状況をより高精度に推定したい場合には、非破壊検査等により、内部のひび割れ進展状況を直接把握すれば良い。そのための技術開発は、今後の課題である。

6. 最大荷重の比較

図-13 は、最大荷重の実験値を縦軸に、解析値を横軸にプロットしたものである。図中の黒の実線は、実験値=解析値となる補助線を示している。再現解析における PC 鋼材の応力-ひずみ関係に陸らの式を用いた場合と、橋桁の断面ひび割れから腐食推定した場合の解析結果は、実線と概ね一致する結果となった。一方、表面ひび割れから腐食推定した場合、解析値が実験値を過小評価していることがわかる。したがって、PC 鋼材の腐食量や橋桁内部のひび割れ進展状況が詳細に把握できれば、有限要素解析により耐力評価が可能であることが示された。

7. まとめ

本研究では、塩害により鋼材腐食が生じたプレテンション桁の荷重試験結果を検討対象とし、有限要素解析による耐力評価を実施した。その結果、PC 鋼材の腐食量や橋桁内部のひび割れ進展状況が精密に把握できること、かつ適切な材料モデルを適用することで、有限要素解析により比較的高精度に耐力評価が可能であることが示された。一方で、橋桁の

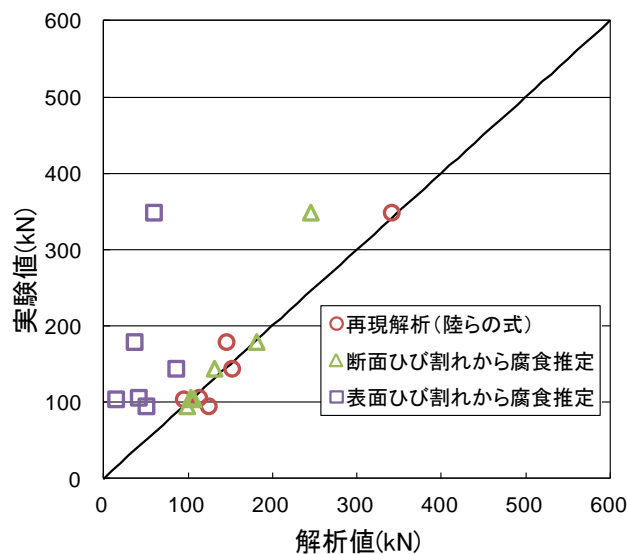


図-13 最大荷重の比較

外観ひび割れから内部のひび割れ状況を推定し、PC 鋼材の腐食状況を推定した場合、解析値が実験値を過小評価する傾向が見られた。外観のひび割れ状況だけから構造性能を推定すると、精度的に限界があるため、安全側に評価せざるを得ないことが改めて確認された。

ただし、本研究で得られた知見の適用範囲は、細径のプレテンション桁に限定されると考えられる。本研究における「ひび割れ箇所の PC 鋼材は腐食して消失する」という仮定は、径が大きな PC 鋼材を有する橋桁に適用すると、過度に安全側の評価を与える可能性が高い。また、ポストテンション桁の場合には、シース内のグラウト充填状況によっては、ひび割れを伴わずに鋼材腐食が生じる場合がある。そのため、これらに対する別途の検討が必要である。