

論文 橋桁の内部ひび割れ進展状況に着目した塩害劣化したプレテンション式 PC 橋桁の解析的耐力評価手法の検討

武田 健太^{*1}・田中 泰司^{*2}

要旨：新潟県沿岸で約 35 年間供用され、塩害劣化したプレテンション式 PC 橋桁で実施された载荷試験結果を対象として、有限要素解析による塩害劣化橋梁の耐力評価手法の検討を行った。橋桁の断面内部のひび割れ進展状況から、PC 鋼材の残存箇所を推定したところ、ひび割れ面の凹凸の影響を考慮すると、実際に腐食が進行していた箇所をほぼ網羅できることがわかった。ひび割れ位置から推定された腐食分布を用いて、有限要素解析により耐荷性状を計算したところ、構造性能を比較的精度良く評価することができた。

キーワード：有限要素解析, 塩害劣化, 内部ひび割れ, 粗骨材の最大寸法, プレテンション

1. はじめに

日本海沿岸部において、高度経済成長期に建設された PC 橋梁に塩害劣化が生じており、残存耐荷性能の評価が必要なものが多くなっている。著者らはこれまでに、村上・田中らが実施した塩害劣化したプレテンション式 PC 橋桁の载荷試験を検討対象¹⁾²⁾とし、有限要素解析による再現解析を実施した。その結果、PC 鋼材の腐食・破断状況を忠実に再現し、かつ PC 鋼材の応力-ひずみ関係に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と、破壊状況や構造性能を高精度で再現可能であることを明らかにした³⁾。しかし、現在の検査技術では、構造物内部の鋼材の腐食状況を、破壊を伴わずに精緻に計測することは困難である。そのため、ひび割れなどの外観の損傷情報から間接的に鋼材の腐食状況を推定するなどの工夫が必要となる。そこで本研究では、図-1 に示すように、橋桁外観のひび割れ状況から構造物内部の鋼材の腐食状況を推定し、残存構造性能を評価する手法を確立することを最終的な目標とし、その前段として、橋桁内部の腐食ひび割れの進展状況から PC 鋼材の腐食状況を推定することで、橋桁の耐力評価を試みた。

2. 実橋梁の载荷試験結果

2.1 検討対象橋梁の概要

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、プレテンション式 PC 四主桁橋で、橋長 10.4m、支間 9.8m の単純 I 桁橋である。海岸から約 15m の場所に位置していたため、鋼材腐食が進行し、腐食ひび割れが確認された。図-2 に試験体の断面図を示す。試験体には、細径の PC 鋼材が多数配筋されていた。本検討では、海側の 2 主桁で実施された曲げ試験(以下、A, B 桁とする)と、山側の 2

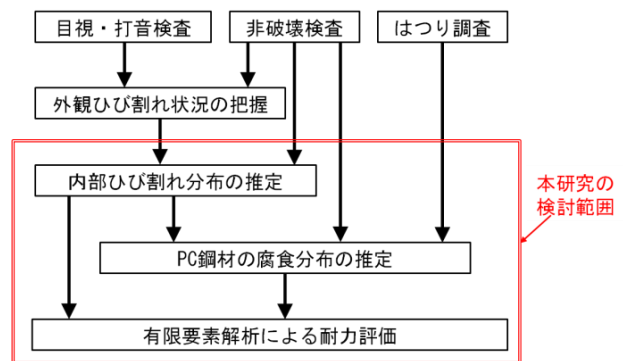


図-1 目標とする残存性能評価のフロー図と本研究の検討範囲

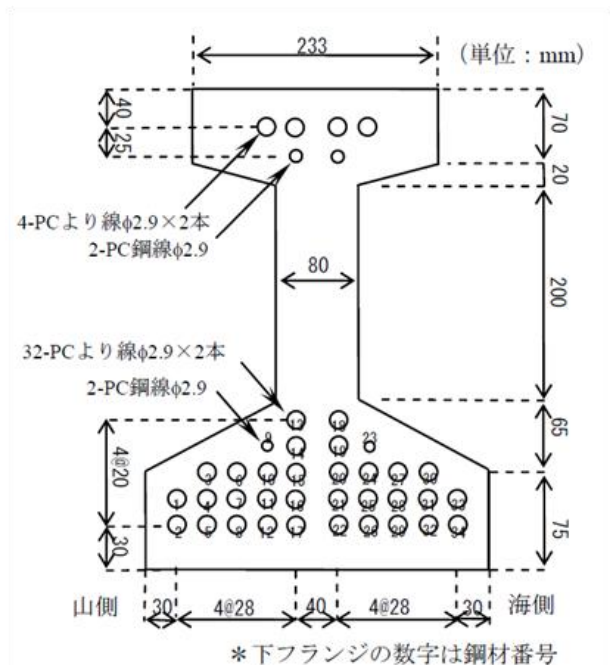


図-2 試験体断面図

主桁で実施された曲げせん断試験(以下、C, D 桁とする)を対象に、橋桁内部の腐食ひび割れから PC 鋼材の残存

*1 長岡技術科学大学大学院工学研究科 建設工学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学環境・建設系 助教 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験水準および試験結果の一覧

試験体名	a(mm)	a/d	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形式
A	2450	6.64	110	145	せん断破壊
B	2450	6.64	80	105	PC鋼材破断
C	C-I	400	1.08	250	PC鋼材降伏
	C-II	1200	3.25	102	斜め引張
D	D-I	600	1.63	85	PC鋼材破断
	D-II	900	2.44	150	せん断圧縮



図-4 試験体の切断面写真

箇所を推定した場合における橋桁の耐力評価方法の検討を行った。

2.2 荷重方法と荷重試験結果

荷重はすべての試験体において単純支持とし、A, B 桁は2点集中荷重、C, D 桁は1点集中荷重により行った。曲げせん断試験では、せん断スパン比 (a/d) を実験因子とした。表-1 に試験水準および試験結果の一覧を示す。なお、有効高さ d は 369mm とし、PC 鋼材の残存・消失箇所によらず、すべての試験体において一定値とした。表-1 より、腐食状況が試験体により異なるため、破壊状況も異なる結果となった。

3. 有限要素解析による耐力評価手法の検討

3.1 PC 鋼材の残存箇所の推定

腐食劣化が進行したコンクリート構造部材の耐荷性能を精度良く推定するためには、鋼材腐食分布を正確に把握する必要がある。しかし、現在の技術では、実際に供用されている橋桁の PC 鋼材の腐食量分布を、非破壊検査などで正確に計測することは困難である。橋梁全面にわたってはつり調査を行うことも、現実的ではない場合が多い。そこで本研究では、橋桁内部のひび割れ進展状況から PC 鋼材の腐食状況を間接的に推定したうえで、有限要素解析により構造性能を評価することが可能か検討することにした。

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腐食率の関係をモデル化する方法があり、特に RC 構造において、その適用性がある程度検証されている⁴⁾。図-3 は、B 桁に

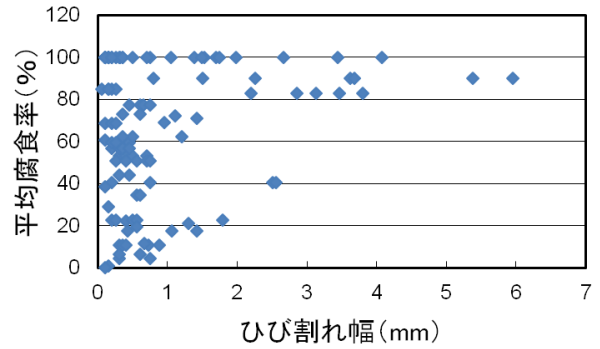
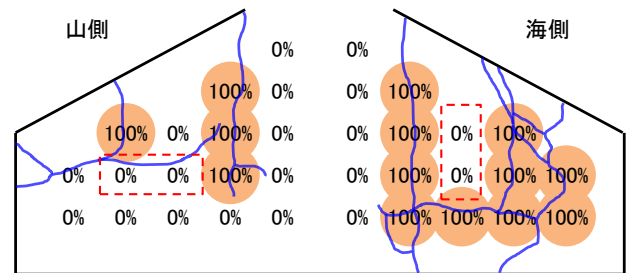


図-3 平均腐食率－ひび割れ幅関係 (B 桁)



(a) 実際にはつり出した PC 鋼材の腐食率分布



(b) 断面ひび割れから腐食推定した場合の PC 鋼材の腐食率分布

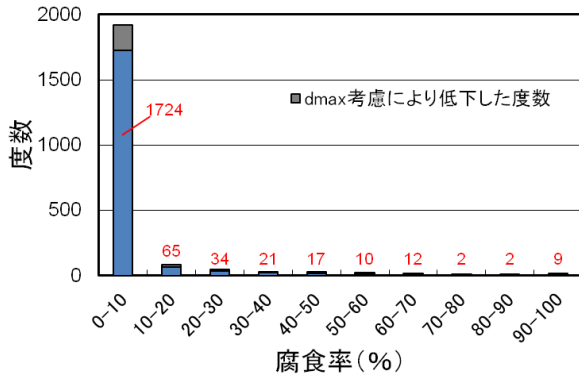
図-5 有限要素解析上の破壊断面における PC 鋼材の腐食率分布

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。図中の平均腐食率とは、試験体下面に最も近い箇所に配筋されていた PC 鋼材 10 本を対象とし、腐食して消失していた箇所を考慮して求めたものである。検討対象とした橋桁の PC 鋼材は径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。

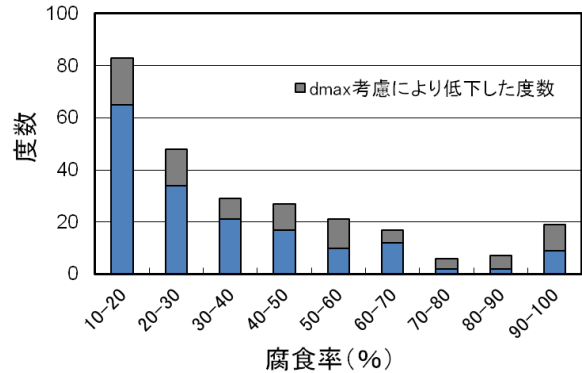
そこで本検討では、安全側の評価となるように、PC 鋼材位置にひび割れが到達している場合、ひび割れ幅によらず、PC 鋼材は完全に腐食して、消失しているものとした。また、ひび割れが到達していない場合は、PC 鋼材は全く腐食せずに残存していると仮定した。ひび割れが PC 鋼材位置に到達しているか否かの判定は、試験

表-2 各試験体における PC 鋼材の消失箇所割合

		試験体名					
		A	B	C		D	
				C-I	C-II	D-I	D-II
実際の消失部で消失が推定された割合 (%)	d_{max} 考慮	89	85	79	92	94	96
	d_{max} 未考慮	83	77	66	72	92	84
推定した消失部で実際に消失していた割合 (%)	d_{max} 考慮	13	40	36	49	48	32
	d_{max} 未考慮	35	56	60	77	58	50



(a) PC 鋼材の全腐食率におけるヒストグラム



(b) PC 鋼材の腐食率が10%以上におけるヒストグラム

図-6 ひび割れが到達していない箇所における PC 鋼材の腐食率の実測値のヒストグラム

体の切断面写真(図-4 参照)を用いて行うこととした。なお、切断面写真は約 50cm 間隔で撮影した。

上述の方法により鋼材の腐食分布を推定し、有限要素解析による耐力評価を行ったところ、解析値は実験値と概ね一致する場合もあれば、過大評価する場合もあった。過大評価する原因を分析した結果、切断面写真により、ひび割れが到達していないと判断された PC 鋼材の一部で、実際には腐食がかなり進行しているケースがあったことが主原因であることが判明した⁵⁾。図-5 は、上述の方法によって C-I に対して実施した有限要素解析上の破壊断面における PC 鋼材の腐食率分布を、実際にはつり出して測定した場合と、橋桁の切断面写真より確認されたひび割れ(以下、断面ひび割れとする)から腐食箇所を推定した場合とで比較したものである。なお、図中には断面内のひび割れ進展状況を青色で示した。また、断面ひび割れは、荷重によるひび割れと混在する可能性があるため、鋼材腐食による錆汁などの情報から判断した。図中の円は腐食率の大きさを表し、着色部は PC 鋼材が破断していたことを示す。また、図-5(b)中の腐食率100%とは、PC 鋼材が腐食して完全に消失していたことを示す。両者を比較すると、全体的には腐食状況は概ね評価できていることがわかる。しかし、中には実際の腐食率と判定結果が乖離している鋼材もあった。特に、図-5に赤の点線で示したように、断面写真ではひび割れが通過していないにも関わらず、実際には腐食率が大きな鋼材が何本か存在していた。これは、ひび割れ調査断面に限られているのに対し、実際にはひび割れは奥行き方向に

均一ではないためである。そこで、ひび割れ面は、少なくとも骨材寸法程度の凹凸を有していると考え、本検討では、切断面写真で観察されたひび割れ位置から粗骨材の最大寸法(以下、 d_{max} とする)分の範囲内では PC 鋼材が腐食すると考えた。そのうえで、再度 PC 鋼材の残存箇所を推定し、耐力評価を行った。

表-2 は、各試験体における、実際に橋桁から PC 鋼材をはつり出して確認した消失箇所と、橋桁の断面ひび割れより推定した PC 鋼材の消失箇所の比較を示しており、ひび割れから d_{max} までの範囲内にある鋼材が腐食すると考えた場合(d_{max} 考慮)と未考慮の場合の比較も示している。ここで、 d_{max} は試験体の切断面の写真から 24mm と推定した。実際の消失部に対して消失が推定された割合は、 d_{max} 未考慮の場合、いくつかのケースで 70%程度にとどまったのに対し、 d_{max} を考慮した場合には、すべての試験体において、8 割程度以上まで、推定率が向上していることがわかる。したがって、プレテンション桁の場合には、断面ひび割れの発生位置で、鋼材腐食や破断・消失が発生しているとみなして差し支えないといえる。一方、推定した PC 鋼材の消失箇所、実際に PC 鋼材をはつり出して確認された消失箇所との割合は、 d_{max} 考慮、未考慮の場合ともに低い値となった。特に d_{max} を考慮すると、その割合が 1~5 割程度と、かなり低い値となった。これは、ひび割れ発生箇所の全領域で PC 鋼材が腐食しきって消失しているという安全側の判定を行っているためである。

図-6 に、ひび割れが到達していない箇所における PC

鋼材の腐食率の実測値のヒストグラムを示す。これらの腐食率は、約50cmの長さの鋼材を除錆し、重量を計測して求められたものである。図中の青色は d_{max} を考慮した場合のヒストグラム、灰色は d_{max} 未考慮の場合から d_{max} を考慮したことにより低下した度数を表している。図-6(a)のように、腐食率が0~10%と比較的小さいものが約9割と、全体の大半を占めているので、腐食率推定の際に用いた「ひび割れ発生位置以外では腐食は発生していない」という仮定は概ね妥当であることがわかる。ただし、腐食率が10%以上のものもごく少数ながら確認された。図-6(b)は腐食率が10%以上のヒストグラムを拡大して示したものであり、 d_{max} を考慮したことにより全体的に度数が低減していることがわかる。特に、腐食率が大きいものに注目すると、度数が半減しており、この方法によって、腐食がかなり進行している箇所をほぼ網羅できているといえる。一方で、この操作により腐食率10%以下のデータは度数が1割ほど低下しているため、その分だけ耐荷性能を過小評価することになる。

3.2 解析方法

2章で述べた曲げ試験と曲げせん断試験を検討対象とし、橋桁内部のひび割れ進展状況から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行った。解析方法は、著者らが実施した塩害劣化したプレテンション式PC橋桁の再現解析と基本的に同様とした³⁾。解析プログラムにはATENA Ver. 4.3.1⁶⁾を用い、PC鋼材は図-7に示すように離散鉄筋要素で表現することで、腐食による消失の影響を直接考慮した。また、解析上は下フランジのPC鋼材の腐食のみを考慮し、上フランジのPC鋼材は非腐食とした。

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 code⁷⁾に準拠し、圧縮軟化は直線形状、引張軟化は指数関数とした。せん断に対する軟化則として、山田・青柳モデル⁸⁾を用いた。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⁹⁾、圧縮強度から求めた。さらに、コンクリートとPC鋼材は基本的に完全付着とした。

PC鋼材の応力-ひずみ関係は、式(1)に示すトリニア型とし、残存箇所のPC鋼材の腐食率は0%(非腐食)と仮定した。

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

ここに、 σ は応力、 ε はひずみ、 E_p 、 f_{pu} 、 f_{py} 、 ε_u 、 ε_y 、 ε_{ps} はそれぞれPC鋼材の弾性係数、引張強度、降伏強度、破断ひずみ、降伏ひずみ、プレストレインを表す。弾性係数、

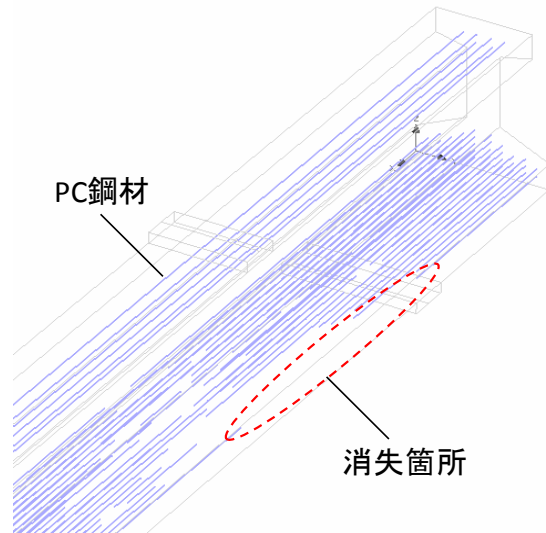


図-7 離散鉄筋要素の設定例

降伏強度、破断ひずみは道路橋示方書の規格値に準拠し、それぞれ $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 1712 N/mm^2 、 35000μ とした¹⁰⁾。引張強度は試験体からは取り出された非腐食部のPC鋼材の引張試験結果より、 1905 N/mm^2 とした。

PC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¹⁰⁾。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、破断したPC鋼材のプレストレスロスが表現できない。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。なお、プレストレインは約 6000μ 導入した。

3.3 解析結果

図-8に、各試験体の荷重-変位関係における実験値と解析値の比較を示す。図-8中の変位は、A、B桁では中央変位、C、D桁では載荷点変位とし、参考として詳細な腐食量測定結果による再現解析の解析値³⁾と健全な試験体の解析値も示している。また、図-8には、はり理論から求めた曲げ破壊荷重⁹⁾も示した。ここで曲げ破壊荷重は、有限要素解析で破壊が生じた位置を計算対象とし、橋桁の断面ひび割れ進展状況からPC鋼材の腐食状況を推定して求めた。荷重-変位関係において、断面ひび割れから腐食推定し、 d_{max} 未考慮の場合の解析値は、実験値と概ね一致するケース(A桁、B桁、D-I)もあるが、試験体によっては実験値を過大評価するケース(C-I、C-II、D-II)もあった。過大評価が生じる原因を、曲げ破壊荷重の計算値から分析した結果、ひび割れが到達していない箇所におけるPC鋼材の腐食率を0%としていることが原因であることが判明した⁵⁾。一方、 d_{max} を考慮した場合の解析値は、C-Iでは実験値を3割程度下回ったものの、それ以外の試験体では実験値と概ね一致する結果となった。

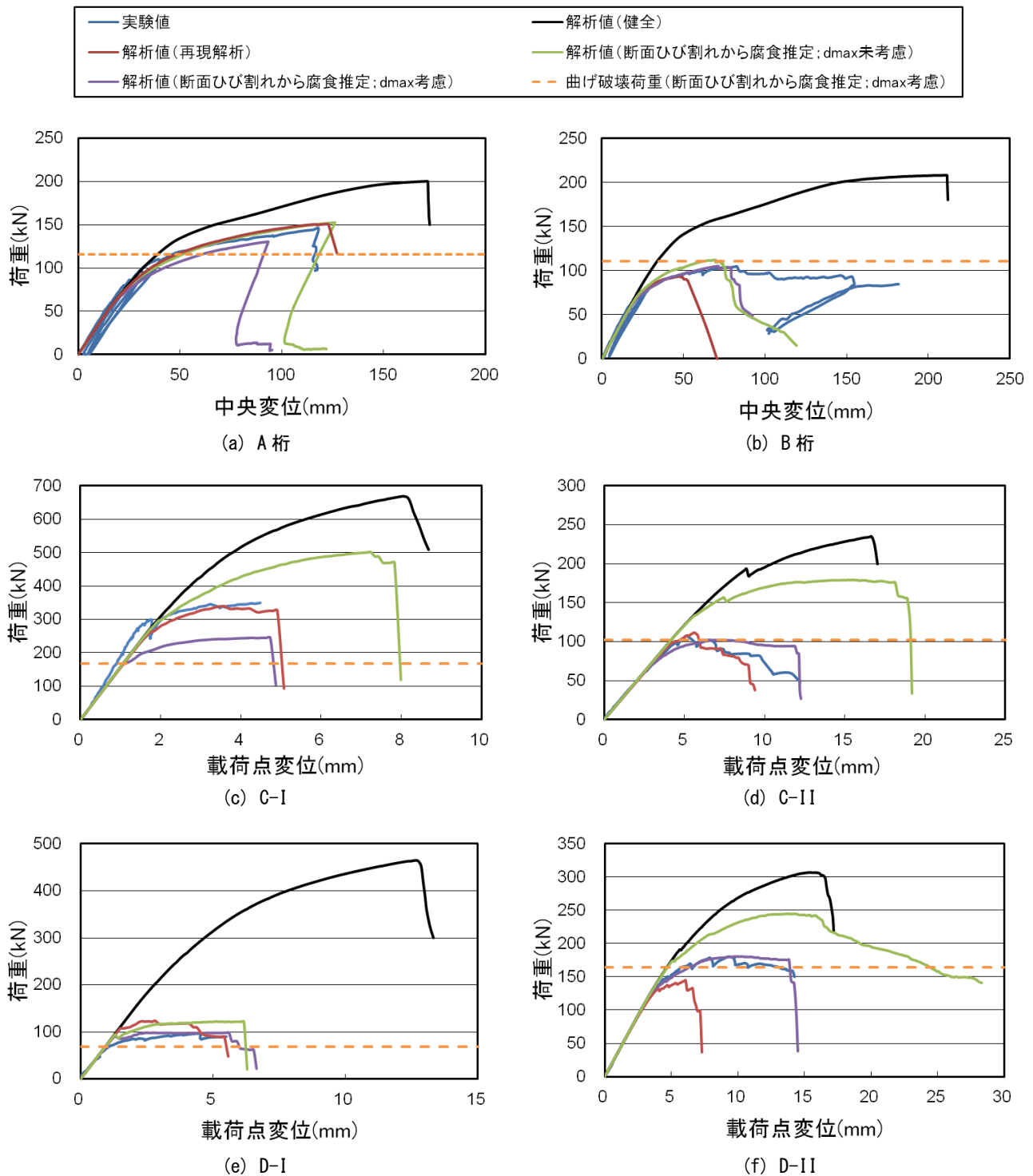


図-8 各試験体の荷重－変位関係における実験値と解析値の比較

曲げ破壊荷重の計算値も、実験値と概ね一致するか、下回る結果となった。また、変形性能に着目すると、再現解析の解析値と比較して、 d_{max} を考慮した場合の解析値は、いくつかのケース(B桁、D-II)で最大荷重などを精度良く推定していることがわかる。これは、再現解析の解析値には、PC鋼材の応力－ひずみ関係に腐食による機械的性質を適切に低減させたモデルを用いているのに対し、断面ひび割れから腐食推定した場合の解析値には、PC鋼材の応力－ひずみ関係に、PC鋼材を非腐食と

した場合のモデルを用いているため、機械的性質が低減しない分、さらに精度が向上したと考えられる。このように、プレテンション部材の場合、コンクリート内部のひび割れの進展状況から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、曲げ破壊することが事前に判明している場合、有限要素解析を用いずとも、曲げ計算によってある程度の精度で残存耐力性能が評価できる可能性があることが示された。

4. 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式 PC 橋桁の載荷試験結果を検討対象とし、橋桁内部のひび割れ進展状況から PC 鋼材の残存箇所を推定し、有限要素解析による橋桁の耐力評価を行った。その結果、ひび割れ面の凹凸の影響を考慮するために、ひび割れから d_{max} の範囲内にある鋼材には腐食が生じると考えて、PC 鋼材の残存箇所を推定すると、解析値と実験値はほぼ同程度となった。また、破壊断面と腐食分布が適切に推定されれば、有限要素法によらずとも、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。この知見を実構造物の評価に活用するためには、今後、外観のひび割れから内部のひび割れ進展状況を推測する技術を確立する必要がある。

ただし、本研究で得られた知見は細径のプレテンション部材に適用範囲が限定されることに注意を要する。鋼材径が大きい場合には、ひび割れ箇所の PC 鋼材が無いものとする本研究の仮定は、過度に安全側の評価を与える可能性が高い。また、ポストテンション部材の場合には、シーす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の腐食が発生する場合もあるので、別途の検討が必要である。

参考文献

- 1) 村上祐貴, 内山拓也, 井林康, 田中泰司: 塩害により損傷を受けた実橋プレテンション PC 桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.839-844, 2011.7
- 2) 田中泰司, 陸賢, 山口貴幸, 井林康: 鋼材腐食が生じたプレテンション PC 桁の曲げせん断性能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.1127-1132, 2011.7
- 3) 武田健太, 田中泰司: 塩害により劣化したプレテンション式 PC 橋桁の有限要素解析, 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, 日本材料学会, pp.243-250, 2013.11
- 4) 土木学会: 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 85, 2009.5
- 5) 武田健太, 田中泰司: 内部ひび割れに着目した有限要素解析によるプレテンション式 PC 橋桁の耐力評価, 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウム, 日本コンクリート工学会, pp.281-288, 2013.11
- 6) Cervenka, V., Jendele, L. and Cervenka, J.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007.12
- 7) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Thomas Telford, 1993.5
- 8) 山田一字, 青柳征夫: ひび割れ面におけるせん断伝達, 第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, 日本コンクリート工学協会, pp.19-28, 1983.9
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説/III コンクリート橋編, 2002.3