PC 鋼棒の腐食による桁の曲げ耐力の変化について

豊田高専　正会員　○川西直樹
名古屋工業大学　フェロー会員　後藤芳顯
豊田高専専攻科　学生会員　伊藤桂子

１．はじめに：　近年，ポストテンション方式の PC 桁について施工時におけるグラウトの充填不良などを原因とした PC 鋼棒の腐食による劣化事例がしばしば報告されている．桁内に配置される PC 鋼棒が腐食すると，鋼棒自身の断面積の減少に加え，プレストレス力も同時に減少するため桁全体の力学性能は大きく低下する可能性があり，維持管理の現場において，PC 鋼棒の腐食劣化時における桁の力学性能変化を適切に評価するための手法を確立しておくことが重要であるといえる．これに関して既に著者らは文献 1)において，文献 2)の手法を利用した数値解析によるさまざまな検討を行っており，この成果として PC 鋼棒の腐食欠損履歴による棒鋼応力の変化は小さく，腐食欠損した棒鋼の軸力は初期導入軸力から欠損部分の軸力を除いたものにほぼ等しくなるという知見を得ている．これを受けて本研究では，擬似的に PC 鋼棒が一様腐食し断面欠損した状態を再現するため，建設当初を想定した PC 鋼棒の設計プレストレス力に対して，腐食欠損を想定した小径の PC 鋼棒に断面積比に応じて低減した張力を導入した桁試験体を製作して曲げ耐力試験を実施し，文献 1)において得られたいくつかの知見について確認する．また，文献 1)に示した数値解析法により曲げ耐力実験を模擬した耐荷力解析を実施し，数値解析による力学性能の予測精度について検証する．さらに，これらの結果と維持管理の実務において利用される簡易な PC 桁の曲げ耐力の設計計算法による耐力予測値との比較を行うことにより，現行の PC 桁の曲げ耐力算定法の妥当性を評価する．

２．研究方法　　**(1) PC 鋼棒の断面欠損による桁の曲げ耐力に関する実験**：**図 1** に示すように単純支持状態の PC 桁に２点曲げ載荷し，曲げ耐力試験を行う．桁試験体の寸法は**図 1** に示すように支間 2m，断面 30cm×30cm である．PC 鋼棒は 2 段 2 列の 4 本の PC 鋼棒（基準直径 φ17mm）を配置し，腐食欠損状態を模擬するため下段側の PC 鋼棒の径の組み合わせを数パターン変更し，これらを**図 2** にまとめる．ケース 1 は劣化前の建設初期の段階における PC 桁の曲げ耐力を調査するための基本となる検討ケースであり，ケース 2 はケース 1 と比較することによりグラウトによる力学性能への影響を検討するためのものである．また，ケース３～６は下段側の PC 鋼棒の径を変化させることにより PC 鋼棒の腐食時を模擬的に再現している．ケース４，６については断面に対して非対称な位置の PC 鋼棒に腐食欠損が生じた場合を想定している．なお，ケース３～６の φ13mm および φ9mm の PC 鋼棒の導入張力は，腐食時のプレストレス力の減少に対応させるため φ17mm との断面積の比率に合わせて減少させた値とする．ここで，PC 鋼棒の断面積の欠損量を表す指標として，次のような断面欠損率 β を定義する．

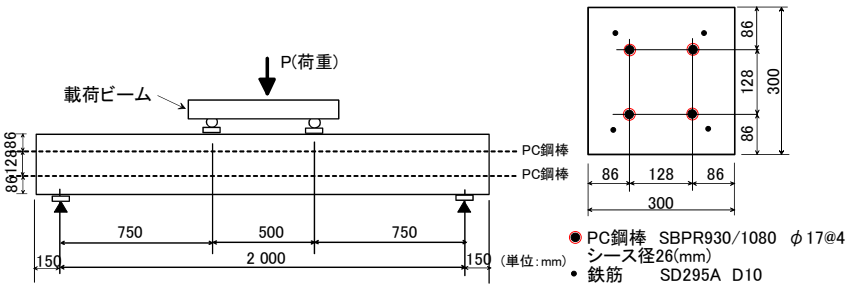
$$\beta = 1 - \frac{\text{各ケースの下側のPC鋼棒の断面積の合計}}{\text{ケース1の下側のPC鋼棒の断面積の合計}} \qquad (1)$$

使用した材料の定数の主要諸元を**表 1** にまとめて示す．

表 1　各使用材料の定数と諸元

		単位	
コンクリート（曲げ試験時）	圧縮強度（圧縮強度試験結果）	N/mm²	66.2
	引張強度（割裂試験結果）	N/mm²	4.2
	ヤング係数	N/mm²	30700
	最大粗骨材寸法	mm	20
	圧縮強度発生時の縦ひずみ		0.0035
	ポアソン比		0.20
鉄筋 SD295A	ヤング係数	N/mm²	2.0×10⁵
	降伏応力度	N/mm²	357
	最大引張応力度（引張強度）	N/mm²	492
	最大伸びひずみ		0.27
PC 鋼棒 SWPR9 30/1080	直径	mm	17.63
	ヤング係数	N/mm²	2.0×10⁵
	降伏応力度	N/mm²	1086
	最大引張応力度（引張強度）	N/mm²	1204
	最大伸びひずみ		0.11

(2) PC 鋼棒の断面欠損による桁の曲げ耐力に関する数値解析：　汎用構造解析ソフト ABAQUS Ver.6.7 を用いた数値解析により PC 桁の力学挙動をできるだけ正確に追跡するため三次元モデルにより検討を行う．ここでは，コンクリート躯体を８節点固体要素（C3D8），内部に配置される PC 鋼棒および鉄筋を 3 次元はり要素（B31）によりモデル化する．コンクリート部のサイズは一辺 50mm の立方体とする．PC 鋼棒の変位はシースの配置方向に限定されるものと考え，**図 3** のような幾何学的な拘束を与える．グラウトの付着効果についてケース２以外はこれを考慮し，プレストレス力導入後



(a) 側面図　　(b) 断面図

図 1　PC 桁の試験体（ケース１）概要

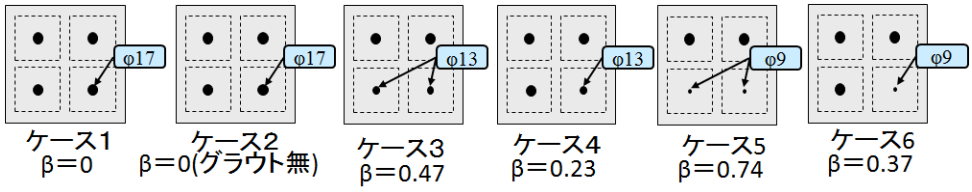


図 2　検討ケースのまとめ

キーワード：PC桁，曲げ耐力，腐食，維持管理，有限要素法
連絡先：　〒471-8525 豊田市栄生町2－1　豊田工業高等専門学校 TEL:0565-36-5883

にグラウトせん断剛性を考慮したばね要素を追加することにより再現する．

PC 鋼棒および鉄筋の材料構成則についてはいずれも Tri-linear 型の等方硬化則とし，材料試験結果から得られるヤング率 E，初期降伏応力 σ_y，最大応力 σ_u，最大ひずみを用い，最大応力 σ_u 以降の接線勾配 $d\sigma/d\varepsilon$ は 0 となるよう入力する．

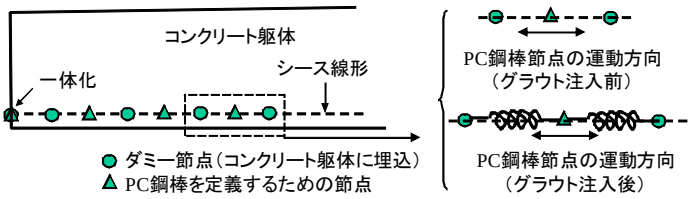


図 3　PC 鋼棒のモデル化詳細

コンクリートの材料構成則については文献 3)で提唱され ABAQUS にも準備されている Concrete Damaged Plasticity Model を用いる．この構成則は金属などに用いられる塑性論をコンクリート材料に拡張して適用したものであり，非線形挙動を示す領域における収束性が高いという特徴がある．コンクリートの引張軟化特性については要素寸法に起因した局所化の問題 [4]を回避するため破壊エネルギー G_f =240 (N/m)として応力－変位関係を定義して計算を実行する．圧縮挙動については文献 4)の方法に準じて一軸圧縮応力－一軸圧縮ひずみ関係を定める．

(3)　破壊抵抗曲げモーメントによる予想耐力：一般の PC 桁の設計において耐力評価として用いられる PC 断面の破壊抵抗曲げモーメントから試験体の設計上の予想曲げ耐力を算定する．なお，破壊抵抗曲げモーメントの算定は，土木学会により提唱される方法に従って求める．

３．検討結果

(1) グラウトの付着効果の影響：ケース１，２を比較することによりグラウトの付着効果について考察する．**図 4** にグラウトの有無について，実験結果と解析結果を合わせて記す．この結果より，実験および解析の両者ともグラウトの有無による最大荷重の差はほとんどなく，グラウトが最大荷重に与える影響は小さいといえる．一方，荷重－変位曲線より，ピーク点までの挙動に関して，実験ではグラウトの有無の差はないが，解析では差が生じている．この原因としては，実験では全体の曲げ変形の影響により PC 鋼棒の表面とシースが接触して摩擦力が生じ，グラウトの付着効果と同様な効果をもたらしたと考えられる．ピーク以降では実験ではグラウトが無い場合の荷重低下についてグラウト有に比べて大きくなっている．一方，解析でもグラウトが無い場合の荷重低下はやや大きくなっているが，実験ほど極端ではない．

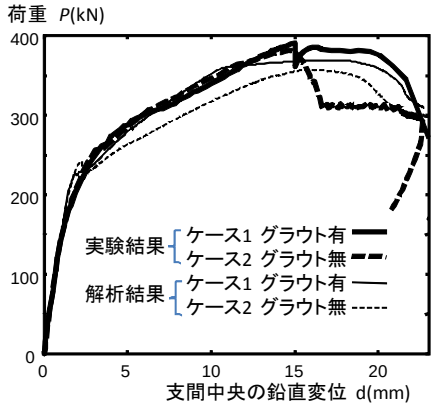


図 4 グラウトの付着効果の影響

(2) PC 鋼棒の断面欠損率 β の影響：腐食欠損のないケース１と断面の対称な位置の PC 鋼棒に断面欠損が生じるケース３，５について実験と解析による荷重－変位曲線を**図 5** に示す．ここで，いずれのケースにおいてもグラウトを考慮している．**図 5** より，断面欠損率 β の増加にともない最大荷重が低下することが分かる．また，実験と解析における最大荷重を比較するとすべてのケースにおいて解析が実験のそれを下回っており，この傾向は断面減少率が増加するほど顕著となる．実験，解析および設計上の最大荷重を断面欠損率 β により整理した結果を**図 6** に示す．この図中には非対称に断面欠損したケース４，６も示している．この図のより，ケース１，３，５を比較すると最大荷重は実験値＞解析値＞設計値という関係にあるが β と最大荷重の関係はいずれの場合も同様な傾向にあり，設計値や解析値は安全側の耐力予測値である．

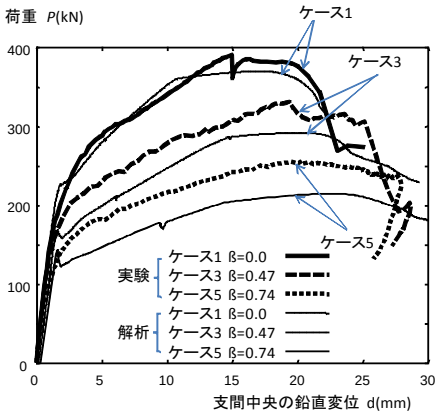


図 5　PC 鋼棒の断面欠損率 β の影響

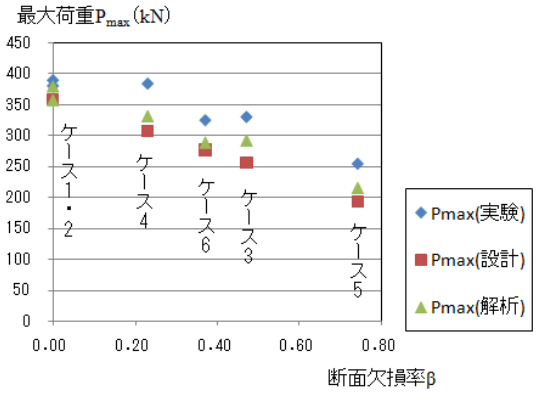


図 6　断面欠損率 β と最大荷重のまとめ

(3) 桁断面での PC 鋼棒の断面欠損が非対称であることの影響：

PC 鋼棒の断面欠損が桁断面に対して非対称に生じる場合の影響を対称に生じる場合と比較して検討する．すなわち，**図 6** のケース４と１およびケース６と３をそれぞれ比較して検討する．　欠損率 β の小さいケース４と１では実験値と解析値の傾向は必ずしも整合しないが，β が比較的大きなケース６と３に関して，非対称に断面欠損しているケース６では断面欠損率が対称に断面欠損したケース３より欠損率 β が小さいにもかかわらず最大荷重が低下している．この傾向は実験，解析とも明瞭に認めることができる．この挙動は欠損率 β の増加にともない単調に減少する設計値とは異なるので十分注意する必要がある．

参考文献：1)名古屋高速道路公社(2007):構造物の劣化分析と力学性能に関する業務報告書，2)後藤ら(2003): 腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法，土木学会論文集，No.738/I-64, pp.233-244，　3)Jeeho Lee et al.(1998), ”Plastic-damaged model for cyclic loading of concrete structures” J. Engrg. Mech, ASCE, Vol.124, No.8, August, pp.892-900　4) 土木学会コンクリート委員会（2002）：コンクリート標準示方書［耐震性能照査編］