第Ⅴ部門　　カローラ橋を対象とした PC 鋼材破断が構造性能に及ぼす影響の評価

神戸大学　　学生会員　○糸井　聡志
神戸大学　　正会員　　三木　朋広

１．はじめに

PC 橋の内部鋼材破断は構造系の安定性に致命的な影響を及ぼすが，破断進行を目視で把握するのは困難で，内部損傷の影響を定量的に評価する手法は確立されていない．本研究は，2024 年にドイツで発生したカローラ橋（Carola Bridge）の崩落事案を対象に 3 次元非線形有限要素解析モデルを構築し，PC 鋼材破断が橋梁全体の耐力・変形性能に及ぼす影響を明らかにする．

２．カローラ橋の崩壊事例

ドイツ・ドレスデンのカローラ橋（1971 年建設，全長 374m の 3 径間連続箱桁橋）の一部が 2024 年 9 月に予兆なく崩落した（写真-1，図-1）．本橋は 3 つの単室箱桁（桁 A～C）を横連結材で接合した構造を有する．建設時のグラウト充填遅延に伴う結露が PC 鋼材の水素誘起型応力腐食割れを誘発し，供用開始前から鋼材破断が進行していたと推察される．最終的に気温急低下で鋼材が連鎖破断し崩壊した．図-2 に示すように損傷は不均一であった．

３．解析モデルおよび解析手法

汎用非線形有限要素解析ソフトを用い，2024 年に崩壊した桁 C のうち崩壊起点の支柱 D 軸を含むヒンジ 2～ヒンジ 3 間を 3 次元でモデル化した（図-3）．図-4 に崩壊要因と考えられている D 軸のモデル断面図を示す．PC 鋼材は埋め込み鉄筋，1 シース内 24 本は集合断面として設定した．材料特性は事故調査報告書 [1]の値を参考に設定した．解析には，コンクリートの圧縮強度 35N/mm^2，弾性係数 33,000N/mm^2，PC 鋼材の降伏強度 1420N/mm^2，弾性係数 210,000N/mm^2，鉄筋の降伏強度 500N/mm^2，弾性係数 210,000N/mm^2 を物性としてそれぞれ使用した．

解析は図-5 に示す 3 段階（①自重および緊張力の載荷，②コンクリートと PC 鋼材を完全付着させたプレストレス導入，③要素の部分削除による PC 鋼材破断の再現）の順に実施した．

４．上床版部 PC 鋼材の破断が構造性能に与える影響

支柱 D 軸直上の上床版部 PC 鋼材を対象に，破断率を 10～100%まで 10%刻みで増加させ（断面中央部から外縁部に進行すると仮定），コンクリートのひずみ分布と桁端部の鉛直変位を評価した．

図-6 に x=0(D 軸)地点のコンクリートひずみと破断率の関係を示す．破断率 20%を超え，ひずみがひび割れ発生ひずみを上回り，3 割以上の破断で健全性が著しく損なわれた．破断率 40～60%を境にウェブ部の橋軸方向ひずみも急増し，負の曲げモーメントがウェブ部に作用していることがわかる．



写真-1　カローラ橋崩壊直後の状態 [1]



図-1　カローラ橋一般図 [1]

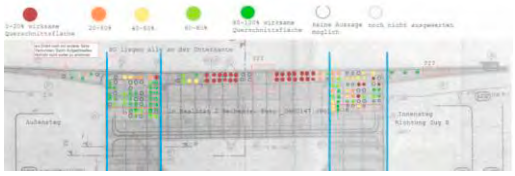


図-2　D 軸断面の PC 鋼材状態 [1]

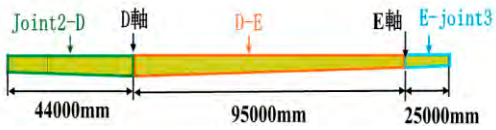


図-3　解析モデル側面図

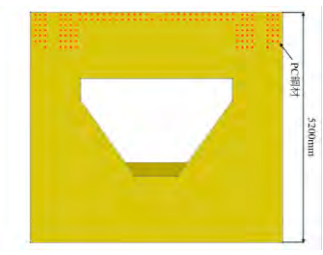


図-4　解析モデルの D 軸断面図

Satoshi ITOI and Tomohiro MIKI
e-mail：268t104t@cloud.kobe-u.jp



図-5　解析手順（①自重・緊張力，②プレストレス導入，③PC 鋼材破断）

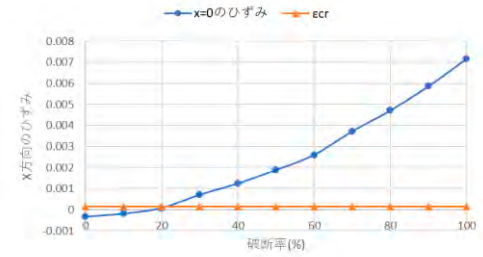


図-6　上床版部 PC 鋼材破断率と x=0 地点のコンクリートひずみの関係（εcr はひび割れ発生時のひずみ）

５．ウェブ部 PC 鋼材の破断が構造性能に与える影響

５．１　解析ケース

支柱 D 軸のウェブ部 PC 鋼材を対象に，断面中央側から外縁側（列 1～列 7）へ向かって 1 列ずつ順次破断させた．損傷が桁の変形に及ぼす影響を多角的に把握するため，D 軸，桁端部（joint 2），メインスパン中央の 3 断面において，コンクリート断面四隅の変位を抽出し，単純な沈み込みだけでなく，片側ウェブ破断に伴う不釣り合いな変形や断面のねじれ挙動を検証した．

５．２　解析結果

図-7 に D 軸におけるコンクリートの鉛直変位の推移を示す．破断列数 4 列までは顕著な変化を示さなかったが，5 列目（約 70%）の破断を境に変位が急増した．同時に橋軸直角方向の変位も急増し，その変化量は鉛直変位を上回ったことから，鋼材破断に伴う断面内の応力バランスの崩壊が局所的なねじれ変形を増大させたことが示唆される．

図-8 に桁端部とメインスパン中央部の鉛直変位を示す．桁端部下縁は 1 列目で約 180mm，7 列目で約 300mm に達し，局所的なウェブの耐力喪失が，破断面から離れた断面位置の変位を増加させたことがわかる．

図-9 に統合したモデル全体の変形概略図を示す．ウェブ破断列数の増加に伴い，D 軸付近の沈み込みがメインスパン中央部の跳ね上がりや桁端部の回転へ波及する非対称な変形が確認でき，ウェブの耐力喪失が構造系を不安定化させた．

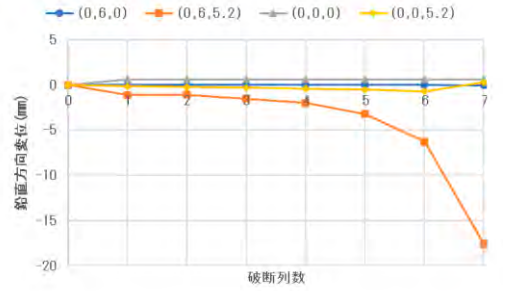


図-7　破断列数を増やした場合の D 軸におけるコンクリート断面の鉛直変位

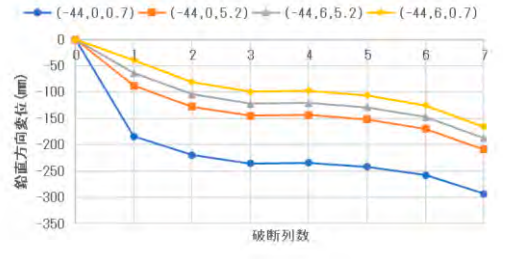


図-8　破断列数を増やした場合の桁端部(joint2)におけるコンクリート断面の鉛直変位

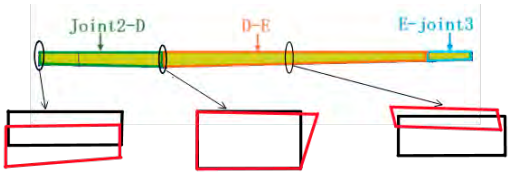


図-9　モデル全体の変形概略図

６．まとめ

本研究では 3 次元非線形有限要素解析により，PC 鋼材破断が PC 橋の構造性能に及ぼす影響を検討し，以下の知見を得た．

1) 上床版部 PC 鋼材は，破断率 20%を超え，ひび割れ発生ひずみを超過し，3 割以上の破断で健全性が著しく低下する．
2) ウェブ部 PC 鋼材は，破断が 5 列（約 70%）を超えた段階で応力バランスが崩壊し，変位が急増する閾値が存在する．
3) 片側ウェブの損傷は断面のねじれを伴う変形を引き起こし，耐力喪失が桁端部や他スパンへ波及する．

参考文献

1) Silke Scheerer, Gregor Schacht, Max Fiedler, Robert Ritter, Steffen Marx, Gino Ebell, Gero Marzahn：Die wechselvolle Geschichte der Carolabrücke in Dresden, 34. Dresdner Brückenbausymposium, pp.11-42, 2025.5