

京都大学	博士 (工学)	氏名	吉 田 英 二
------	---------	----	---------

論文題目	ケーブル破断を想定した既設 PC 上部構造の破壊過程と耐荷性能評価に関する研究
------	---

(論文内容の要旨)

現在、高度経済成長期に建設された多くのプレストレストコンクリート橋（以下、PC 橋）が高齢化を迎えており、今後重大な損傷を抱える PC 橋が増えていくものと想定される。既に膨大な数の PC 橋が供用されているなか、PC 橋を適切かつ効率的に維持管理していくためには、危険性の高い PC 橋を早期に見つけ、その耐荷性能を適切に把握した上で、必要に応じて対策を行うことが不可欠である。過去に建設されたポストテンション方式の PC 橋では、グラウトの充填不足により、PC シース内に水や塩分が侵入し PC 鋼材（以下、ケーブル）が腐食して破断に至った事例が散見される。ケーブル破断は PC 橋の耐荷性能の低下に大きく影響を及ぼすことが既往の研究からも明らかになっている。しかし、本来、上部構造としての PC 桁は主桁単体で挙動するのではなく、複数の桁が連結されて立体的な挙動をする。桁単体で考えた場合も箱桁橋のように断面方向に立体的な広がりをもつ部材についても、一次元的な挙動ではなく、実際には立体的な挙動を示す。このような PC 上部構造にケーブル破断が生じた場合において、ケーブル破断が耐荷性能をはじめ、破壊性状や立体的挙動に与える影響については明らかでない。以上の背景を踏まえ、本研究ではケーブル破断を想定した PC 上部構造の破壊過程および耐荷性能評価に関する検討を行った。具体には、せん断耐力の低下が想定される定着部付近にてケーブル破断した PC 箱桁橋を想定した供試体の載荷試験および数値解析を実施し、耐荷性能評価に関する検討を行っている。また、実在の PC 橋を対象とした上部構造の破壊試験の実施とその結果を活用し、PC 桁橋の上部構造全体評価のための耐荷力評価モデルの構築と破壊安全性を合理的に評価する手法について検討している。

本論文は全 7 章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。

第 1 章は序論であり、本研究の背景・目的、本論文の内容及び構成を示している。特に先行研究における PC 橋に関する耐荷性能評価は、部材レベルでの定量的評価が中心であり、ケーブル破断が主桁部材の主には曲げ耐荷性能に与える影響について明らかにしたものであることを示し、本研究の重要性について言及している。

第 2 章では、ケーブル破断の主要因であるグラウト充填不足に起因した損傷の実態と調査分析、グラウト充填不足に起因した損傷に対する PC 橋の維持管理手法、またグラウト充填不足やケーブル破断に関する調査を合理化するための非破壊検査の適用性、さらにケーブルが破断した PC 主桁部材の耐荷性能評価および PC 上部構造の破壊試験に関する既往の知見をとりまとめ、本研究で明らかにすべき課題を示している。

第 3 章では、定着部付近におけるケーブル破断が PC 箱桁の耐荷性能に及ぼす影響について検討している。具体には、桁端部の片側または両側の定着部付近のウェブにおけるケーブル破断を模擬した 1/2 スケールの PC 箱桁供試体を製作し、静的載荷試験を実施するとともに数値解析を用いた立体挙動の分析により耐荷性能の評価や破壊性状の検討を行った。片側の定着部付近の片側のウェブでケーブルを破断させた片側破断供試体および両側の定着部付近の対角位置のウェブでケーブルを破断させた両側破断供試体に対する実験において、片側破断供試体ではせん断付着破壊が生じたのに対し、

京都大学	博士 (工学)	氏名	吉 田 英 二
<p>両側破断供試体では、破壊がせん断スパンの片側側面に集中することなくバランスが保持され、桁としてのせん断抵抗機構が維持されることにより曲げ破壊が生じることが明らかとなった。片側破断供試体と両側破断供試体の破壊モードが異なる要因について、数値解析を用いて立体的挙動の観点から分析した結果、いずれもケーブル破断側において、断面方向の鉛直変位差や面外変形が生じており、それらはねじりの変形が要因と必ずしも断定はできないものの、両側破断供試体の場合には、そのような立体的効果に対角に生じることで断面方向の変形が平均化され、応力集中が緩和される傾向にあり、その結果、安定した変形が維持され、片側破断供試体とは異なる破壊モードになることを明らかにした。</p> <p>第4章では、実在のPC橋を対象として、終局付近での主桁の挙動・破壊性状の確認のために上部構造の破壊までの静的載荷試験を行い、破壊過程について考察している。載荷試験の結果、実測された上部構造の最大荷重は、推定耐力を大きく上回ることが確認された。また、推定耐力以降は、間詰部の分離やねじり抵抗の低下によって、最大耐力時には荷重分配の効果が限定的になるが、上部構造に配置された主桁がせん断耐力に達した場合でも、上部構造としては横桁や間詰部を介して荷重が再分配され、変形性能が保たれることが明らかとした。</p> <p>第5章では、第4章における実橋PC桁の破壊試験の結果を踏まえ、設計実務で一般に使用される線形骨組みモデルに部分的な拡張を行った簡易解析モデルを構築し、既設PC上部構造の耐荷性能を評価する手法の検討を試みている。解析の結果、最大耐力は実験値に対し、1割程度の差で推定できるなど、提案した拡張骨組みモデルは実験よりも荷重分配の効果を比較的大きく見積もる傾向にある点を踏まえても、従来の骨組みモデルよりも上部構造全体の挙動を正確に推定できることを示した。</p> <p>第6章では、第5章で構築した拡張骨組みモデルを用い、各主桁の損傷が進行し複数本のケーブルが破断した場合における活荷重載荷に対する安全余裕度や各主桁の荷重分配の変化などを把握している。結果、劣化状態としてPC鋼材が外桁中桁それぞれで4本破断した状態を想定した場合でも、対象としたPC橋の破壊に対する安全余裕度は活荷重に対し3倍程度は確保されており、破壊プロセスについては、外桁あるいは中桁など損傷が一カ所に集中する場合には、断面力はそれに最も近い隣接桁（健全桁）に再分配され、健全桁が最初に最大耐力を迎える傾向にあることなどが明らかになった。以上の結果から、第5章で構築した拡張骨組み格子モデルがPC桁橋の破壊安全性を評価する検証モデルとして有効であることを示した。</p> <p>第7章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、PC 橋桁の大型模型載荷実験、実在 PC 橋上部構造の破壊実験により、PC 桁橋の上部構造全体評価のための耐荷力評価モデルの構築と破壊安全性を合理的に評価する手法を開発することを目的としている。得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 桁端部の片側の定着部ならびに両側の定着対角位置でケーブルを破断させた模型実験を実施し、片側破断供試体はせん断破壊した一方、両側定着対角位置でケーブルを破断させた実験では、両せん断スパンの両側面の変形、抵抗機構が平均化され、桁としてのせん断抵抗機構が維持され曲げ破壊に至ったことから、定着部付近におけるケーブル破断が PC 箱桁の耐荷性能に与える影響を評価するためには、立体的な耐荷機構を考慮することが重要であることを示した。
- 2) 国外を含めて事例が少ない PC 実橋を対象とした破壊試験に基づき、推定耐力に達した時点においても上部構造としては高い復元性を維持することを示すとともに、間詰部の分離やねじり抵抗の低下によって、最大耐力時には荷重分配の効果が限定的になるものの、桁がせん断耐力に達した場合でも、スターラップの効果と他の部材との拘束効果によって、主桁の荷重支持能力が急激に失われることなく、主桁間での分配効果が失われないことを明らかにした。
- 3) 設計実務で一般に使用される骨組みモデルによる解析結果では、実験よりも PC 桁橋の上部構造の最大荷重や荷重分配が極端に小さく評価される傾向があること、またその要因が床板の間詰部が荷重の分配効果に寄与していることを明らかにし、骨組みモデルに間詰部をシェル要素として付加した拡張骨組みモデルを提案した。その結果、実験よりも荷重分配の効果を比較的大きく見積もる傾向にある点を踏まえても、上部構造全体の挙動を従来モデルよりも正確に推定できることを示した。
- 4) 各主桁の損傷が進行して複数本のケーブルが破断した場合における活荷重載荷に対する安全余裕度や各主桁の荷重分配の変化などを提案手法により評価し、鋼材の破断量に対する耐荷性能の照査に利用可能な指標を整理した。また破壊プロセスに関し、外桁あるいは中桁など損傷が一カ所に集中する場合には、断面力はそれに最も近い健全な隣接桁に再分配され、結果その健全桁が最初に最大耐力を迎える傾向にある一方で、外中桁損傷のように損傷箇所が点在するような場合には、損傷桁どうしで断面力が再分配されて負担割合が大きく低下しないため、損傷桁が健全桁より早く最大耐力を迎える場合があることを明らかにした。また既設橋の耐荷性能を評価する検証に本提案手法を用いる際の考え方についても整理している。

以上より本論文は、PC 橋梁上部構造の破壊過程の把握と耐荷性能評価法に関する重要な知見を示しており、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 10 月 25 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。