

# PC構造物の復元設計研究委員会報告

## —復元設計の体系化と各種計測技術の活用—

魚本 健人\*1・加藤 佳孝\*2・牧 剛史\*3・出雲 淳一\*4・勝木 太\*5

キーワード：復元設計，PC 道路橋，維持管理，計測技術，ノウハウの継承

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

わが国の社会資本整備は、戦後急速に展開し、高度経済成長期を経て着実にそのストックを増加させてきた。とくにコンクリート構造物は、道路、鉄道、港湾、建築構造物などの重要なインフラの構築に多用され、膨大な量のストックとなっている。道路橋を例にあげると、2002年の道路統計年報によれば、橋長15m以上の橋梁数は14万橋以上であり、そのうちプレストレストコンクリート（以下、PC）橋は約37%、鉄筋コンクリート橋は約18%と、半数以上がコンクリート構造物である。高度経済成長期を経た大量のコンクリート構造物の中であって、PC技術は比較的新しい技術でありながら、構造特性と合理性から急速に普及し、橋梁構造物を中心に多くのPC構造物が構築されてきた。

PC構造物は、高強度コンクリートの使用とプレストレスによるひび割れ発生の制御によって、一般には構造物としての耐久性が高いため、維持管理コストは抑制できる。その一方で、プレストレスを担保するPC鋼材は腐食に敏感で、一度損傷を受けると本来の性能の回復は難しい。PC鋼材が破断した場合には、プレストレスの急激な損失が生じ、点検・診断が不十分な場合には、最悪のケースとして構造物の崩壊を招く場合もある。PC構造物を適切に維持管理し継続的に使用するためには、構造物が現在保有している構造性能を的確に評価・判定し、必要に応じて補修・補強などの対策を施していくことが肝要である。

構造物に要求される性能は多岐に渡るが、そのうち構造物あるいは構造部材の力学的特性に関連する性能を一般には構造性能と呼ぶ。一般の橋梁上部工に通常要求される性能として安全性と使用性があげられ、土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、これらの性能に対する性能照査の原則が記述されている。既設構造物の構造性能評価においては、点検に基づく劣化予測によって、予定供用期間中の構造物の安全性および使用性の変化を評価することが基本となる。構造物が現在保有している性能を直接評価する手法が発展途上である現状では、点検によって構造物あるい

は構造部材を構成する材料の劣化を判定し、それに基づいて構造性能の低下の有無あるいはその程度を類推する。

既設PC構造物の構造性能を評価するに先立ち、構造物の主要な構造諸元や使用材料、鋼材配置、プレストレス導入量などの設計諸元は既知であることが原則であり、通常、構造物建設当時の設計図書や工事記録を調査することによって得られる。これらは、対象構造物が現在保有する性能水準を評価する際の初期値となる重要な情報である。しかし、既設構造物の一部あるいは多くは、建設時の設計図書が残されていないことも事実であり、このような場合は現地調査から得た調査結果をもとに構造諸元を設定し、復元設計を実施して当初設計時の構造性能をまず明らかにする必要がある。すなわち、既設構造物の構造性能評価のために、対象構造物の詳細構造図を復元するとともに、PC鋼材の初期緊張力などを明確にしなければならない。建設時の設計図書あるいは復元設計によって復元された詳細構造図に基づき、既設構造物の構造性能評価および構造物の健全度評価を行い、性能が水準以下と判定された場合には、補修あるいは補強を実施して、性能を回復もしくは向上させる必要がある。

一方、少子高齢化社会の到来により、労働力人口の継続的な減少、団塊の世代の退職（2007年問題）にともない、高齢者から若手への技術移転、ノウハウの継承、暗黙知の形式知化を行う必要があり、建設産業もまた例外ではない。とくに、本研究委員会で対象としている支間50m以上の特殊PC橋梁などの場合、設計者の個性によってその結果が異なることが想定され、既設構造物を設計した当初の情報、暗黙知のノウハウを伝承することはきわめて重要である。

#### 1.2 委員会の活動概要

復元設計は、既存構造物の構造性能を評価する際に、建設時の設計図書および工事記録などが保管されていない場合に実施される。ここで、総務省行政評価局による「社会資本の維持管理及び更新に関する行政評価・監視—道路橋の保全等を中心として—」の調査によると、とくに、市町村管理の構造物で保存されていないことが記載されている。

このような現状を鑑み、検討対象を道路橋に限定し、復元設計を行った場合にどのような問題が発生する可能性が

\*1 Taketo UOMOTO：芝浦工業大学 教授  
 \*2 Yoshitaka KATO：東京大学生産技術研究所 准教授  
 \*3 Takeshi MAKI：埼玉大学大学院 准教授  
 \*4 Junichi IZUMO：関東学院大学 教授  
 \*5 Futoshi KATSUKI：芝浦工業大学 教授

あるか、またその対策はどのようにすればよいかについて、試設計を実施することで検討した。検討にあたり、JIS、建設省やメーカー各社の標準設計などで規定される一般的なPC橋梁と、支間50m以上の特殊橋梁では、検討のアプローチが異なることが想定されたことから、図-1に示すように、個別のWG(WG1, WG2)で検討を行った。さらに、復元設計は通常の設計とは異なり、対象とする構造物が存在するため、現場にて設計に必要な情報を収集することが可能である。そのため、WG1およびWG2で復元設計に必要な情報を抽出し、WG3で現場計測による情報収集の可能性を検討した。報告書の構成と委員会メンバーを図-2に示す。詳細は報告書を参照されたい<sup>2)</sup>。

## 2. 復元設計概論

復元設計は、既設構造物の構造性能を評価するための事前調査を行った結果、建設時の設計図書や工事記録などが残されていない場合、現地調査した構造諸元に基づき、当初設計時の構造性能を明らかにすることを目的としている。つまり、復元設計は、既設構造物の構造性能を評価するために、対象構造物の詳細構造図やPC鋼材配置図などを復元するとともにPC鋼材の初期緊張力などを明確にし、対象構造物が現在保有する性能水準を評価する際の初期値となる重要なデータを提供するために行われる。

既設構造物の構造性能評価にあたっては、対象構造物の調査を実施して当初設計で適用されていた規準(設計荷重)を明らかにして詳細構造図を復元し、設計計算書を復元することが推奨される。既設構造物の構造性能を評価する場合、対象構造物の各材料に現在作用している応力度などを明らかにしておくことが重要であり、復元設計はその基本データを提供するものである。

したがって、施工された年代などから当初設計で適用されていた規準、架設工法および使用材料を推定するとともに、当時の類似橋梁の詳細設計図などを参考にして詳細構造図、PC鋼材配置図および配筋図などを復元し、設計計算書を復元することが目的となる。PC鋼材配置図、配筋図および設計計算書をどのレベルまで復元するかは、構造性能評価を行う目的が何か、必要な情報は何であるかに関わっている。たとえば、近年、交通量の増大および車両の大型化に起因すると思われる損傷事例が報告されており、補強が必要となる例が増加してきている。このような活荷重増加に対する評価を行うために必要な情報であれば、詳細な配筋図までは要求されないが、現行規準を満足する耐震性能を確保するために既設構造物の耐震補強を行うような場合には、詳細なPC鋼材配置図や配筋図の情報が要求されるものと予想される。

復元設計においては、推定に基づいた復元を行うため、復元した結果と実構造物の状態とに大きな差異が生じる可能性もある。このように復元設計の精度が不明確ななかで、復元設計結果に基づいた構造性能評価と、設計計算書と設計図面と実構造物が明確にリンクしている既往の設計と同様の評価を行うことについては、注意が必要である。たとえば、復元設計で構造性能を過小に評価することにより、

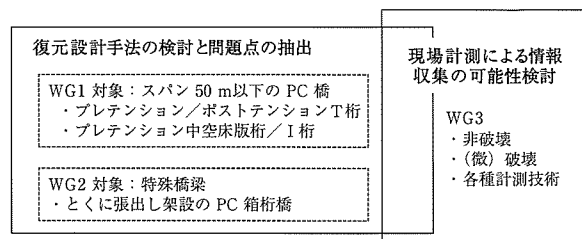


図-1 本研究委員会のWG構成とその目的

第I編 復元設計の目的とその概要
1. はじめに
2. 復元設計概論
第II編 一般PC橋梁を対象とした復元設計法
1. 適用の範囲
2. 復元設計の手順と留意点
3. 復元設計事例
第III編 特集PC橋梁を対象とした復元設計法
1. 適用の範囲
2. 復元設計の手順と留意点
3. 復元設計事例
第IV編 復元設計に必要な調査・検査手法
1. まえがき
2. 各WGからの調査依頼内容
3. 調査手法の提案とその概要
4. 検査可能な範囲と検査精度
5. 模擬試験体によるPCダクトの検出精度の実証実験
6. 今後の課題

委員会メンバー	
委員長:	魚本健人(芝浦工業大学)、幹事長:加藤佳孝(東京大学)
WG1 主査:	牧 剛史(埼玉大学)、幹事:手塚正道(オリエンタル白石(株))
副主査:	篠原輝之(新構造技術(株))、三矢 寿(株)オリエンタルコンサルタンツ
委員:	秋山清志(オリエンタル白石(株))、笠井真吾(株)安部日鋼工業、左東有次(株)富士ビー・エス、田中政章(株)富士ビー・エス、中井聖棋(株)ピーエス三菱、堀内達斗(株)ピーエス三菱
WG2 主査:	出雲淳一(関東学院大学)、幹事:大塚一雄(鹿島建設(株))
副主査:	小原淳一(八千代エンジニアリング(株))、土田一輝(清水建設(株))
委員:	稲原英彦(大成建設(株))、内田誠二郎(三井住友建設(株))、水野克彦(三井住友建設(株))、大木 篤(株)日本構造橋梁研究所、橋本 学(株)大林組、山崎啓治(鹿島建設(株))
WG3 主査:	勝木 太(芝浦工業大学)、副主査:中崎明行(株)KSK
委員:	佐藤 登(三協(株))、土橋 勉(株)アマック、広野 進(株)ダイム

図-2 報告書の構成と委員会メンバー

復元設計に基づいて行われる補強設計に対して安全側に対処する方法が考えられる。車両大型化に対する照査においては、部材厚設定において部材厚を小さく設定するなどの対応が必要となる。また、耐震照査においては、部材厚設定において部材厚を大きく推定し地震荷重を大きく設定するといったことが安全側の評価が必要となる。目的とする補強方法によって、安全側の考え方も変化するので注意が必要である。

## 3. 一般PC橋梁を対象とした復元設計法

### 3.1 適用の範囲

本章は、支間50m以下の一般PC橋梁(道路橋)を対象としている。支間50m以下の一般PC橋梁としては、主にJISで規定されるプレテンション方式T桁橋、プレテンション方式床版桁橋(古くは、PC専業各社が独自に標準的な桁断面を設定していた)、さらに旧建設省標準設計と

して規定されるポストテンション方式T桁橋などがあげられる。支間 50 m 以下という分類を行う場合には、以上のような標準設計に基づく桁橋以外に、固定支保工や大型移動支保工によって施工されるPC箱桁橋や中空床版橋、あるいは押し工法によって施工される現場製作のPC連続箱桁橋などがあげられるが、本章で述べる復元設計法は、ごく一般的なPC橋梁として、プレテンション方式T桁橋、I桁橋、床版桁橋およびポストテンション方式T桁橋を対象とするものである。

対象とした一般PC桁を用いた橋梁は、かなり古くから設計・施工されてきた実績がある。したがって、設計当時の基準は現在と大きく異なるのみならず、その一般図・詳細図などの設計図書もすでに存在していない可能性が高い。また、当時の高度な知識と経験を有した技術者による多様な設計・施工上の配慮がなされている可能性もあり、複雑な構造計算が可能な計算機の使用と高度な施工技術を前提とした現在の設計とは異なることもある。したがって、まずはこれらの既設一般PC橋梁の詳細構造図を復元することを目的とした復元設計フローを作成した。さらに、作成した復元設計フローに基づいて、復元設計の手順と留意点について述べるとともに、プレテンション方式T桁橋、ポストテンション方式T桁橋、プレテンション方式I桁橋、プレテンション方式床版桁橋の4種について、実際に復元設計を行った結果を報告書では取りまとめている。

### 3.2 復元設計の手順

復元設計フローの概要版を図-3に示す(詳細は報告書参照)。既設PC桁橋の復元設計を実施する際には、最初に事前調査を行い、対象橋梁の構造諸元、使用材料強度、適用規準、PC鋼材配置などを明らかにする必要がある。建設時の設計図書(詳細構造図、設計計算書)が保管されている場合は、これらの項目を把握できるが、多くの場合は設計図書が保管されていないことが想定される(詳細構造図がある場合:Case-1、設計計算書がある場合:Case-2)。このような場合でも橋歴板や橋梁台帳などがあれば(Case-3)、竣工年月、適用示方書は特定することができ、現地調査の結果と合わせて、復元設計することが可能である。また、橋歴板などの情報がなく、竣工年月が特定できない場合(Case-4)でも、現地の詳細な調査や非破壊試験を実施することで設計条件を仮定できれば、復元設計が可能となる場合もある。

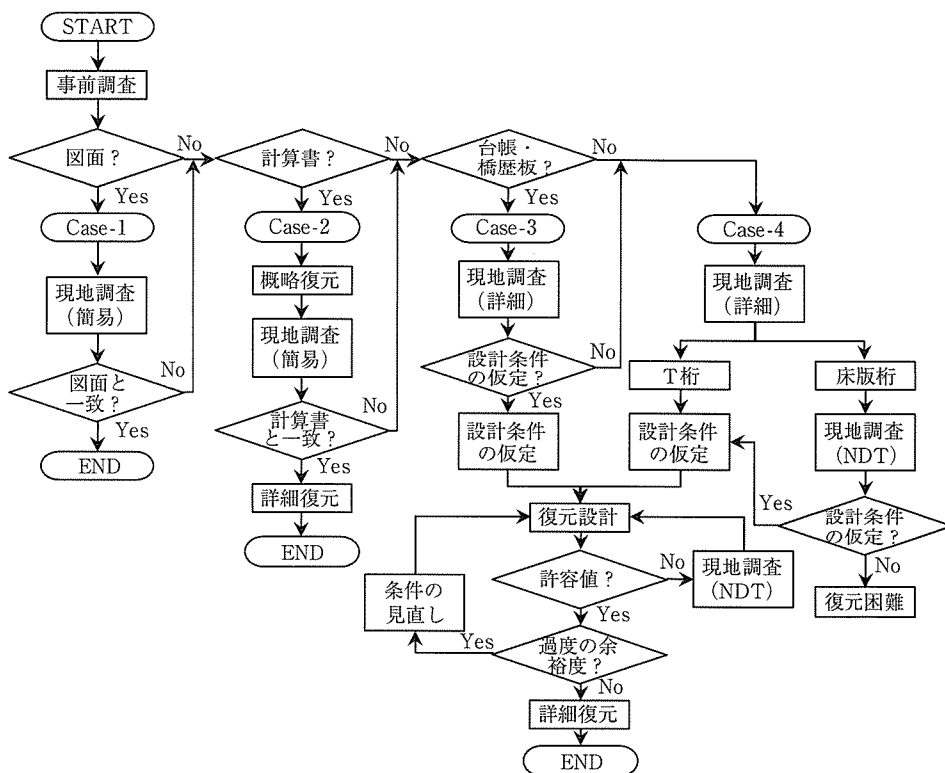


図-3 復元設計フローの概要版

### 3.3 復元設計の留意点

#### (1) 設計条件の仮定

T桁の見分け方は、JIS規格(プレテンション方式)および標準設計(ポストテンション方式)の変遷ごとに主桁断面形状が変更されており、外観調査により施工年代、適用示方書を特定することは可能である。ただし、次の点に留意が必要である。①支間と桁断面形状の関係は各規格・標準設計の設定によるが、実際の断面形状と規格・標準設計による断面形状で差異を生じる場合がある。とくに、規格・標準設計における適用支間に対する桁断面の変化点付近では、1ランク下の断面形状を採用している場合がある。②標準設計より1ランク下の断面形状が採用されている場合、配置上の制約などにより標準設計と鋼材配置が一致しないことがある。③ポストテンション方式のPC鋼材配置において、上縁定着を行っている場合は定着の位置・間隔が鉄筋の配筋状況により標準設計どおりになっていないことが多い。

床版桁の見分け方として、一般的なプレテンション方式の中空床版橋について、各社のカタログを基にその特徴を調べてとりまとめた(詳細は報告書参照)。留意点として、①支間長と桁高は標準設計を使用しているが、設計条件によっては下のランクの桁高を採用している場合があり、外観調査は必須である。②ボンドコントロール工法は一般的には支点部の曲げモーメントの低減に伴いプレストレスを調整するために用いられるが、支間中央上縁部のPC鋼材をボンドレスとした特殊な例がある。③各社の標準設計の制定年については明確ではないものがある。また改定などが実施された場合でもいつから使用開始したかは不

明である。④ 断面寸法は 5 mm 単位で設定しているため計測時には 1 mm 単位で測定する必要がある。⑤ 中空床版橋の場合は工場製品であるものの設計者の判断により、設計条件に合わせコンクリート強度や断面形状・PC 鋼材の本数および配置を変える場合があるので、非破壊試験が必要と思われる。

#### (2) 設計条件の見直し

復元設計により得られる結果には、ある程度の誤差があることを認識したうえで利用することが重要である。復元設計事例によれば、設計者に同じ条件を与えた場合でも設計者が仮定する導入プレストレスなど設計条件の設定方法の違いより結果に差が生じている。

復元設計フロー（図 - 3）において、調査により建設年・適用方書を確認し設計条件の仮定が可能となり、復元設計の結果、許容値を満足しない判定結果となった場合は、外観調査結果、規格・標準設計などを用いた設計条件の設定方法に問題があると判断できる。このような場合は、非破壊試験などにより詳細な桁高や PC 鋼材配置・本数を確認する必要がある。

復元設計の結果、許容値に対して大きく余裕がある場合もあり得る。これは標準設計による部材設定（桁高、PC 鋼材配置）に対して、対象橋梁が比較的緩い条件下にある場合と推定することもできる。このような場合は、地覆・水切り設置により正確な桁高の寸法が計測できていない可能性があるため、外観調査結果と規格・標準設計の整合性を精査し、非破壊試験などにより詳細な調査を行ったうえで、1 ランク下の規格断面形状への変更、PC 鋼材種類の変更などを検討することも必要である。

## 4. 特殊 PC 橋梁を対象とした復元設計法

### 4.1 適用の範囲

本章で扱う復元設計は、支間 50 m 以上の特殊橋梁を対象としている。支間 50 m 以上の特殊橋梁の構造形式としては単純桁橋、連続桁橋、ラーメン橋、斜張橋、トラス橋などがあり、架設方法としては固定支保工、押し出し工法、張出し架設工法などさまざまなものがあることから、施工事例が多く復元設計の対象となる可能性が高い張出し架設工法で施工された PC 連続箱桁橋（道路橋）を検討の対象とした。したがって、本章で述べられている復元設計の流れ、手順については、ほかの構造形式や架設工法には適用できない場合もあるので注意が必要である。とくに、架設工法によって PC 鋼材配置は大きく異なるので、復元設計の対象となる橋梁の架設工法については慎重に確認し、適用の可否を判断する必要がある。

また、本章で対象とする張出し架設工法で施工された PC 連続箱桁橋の場合、小規模な橋梁に比べて、建設時の設計図書や工事記録が保存されている可能性が高く、構造性能の評価にあたっては、事前調査の段階で道路管理者、設計会社および施工会社などから設計図書などを入手することが重要である。これらが入手できれば構造性能評価に必要な情報の多くが入手でき、復元設計は不要な場合が多いと考えられる。本章では、このような点を踏まえつつ、

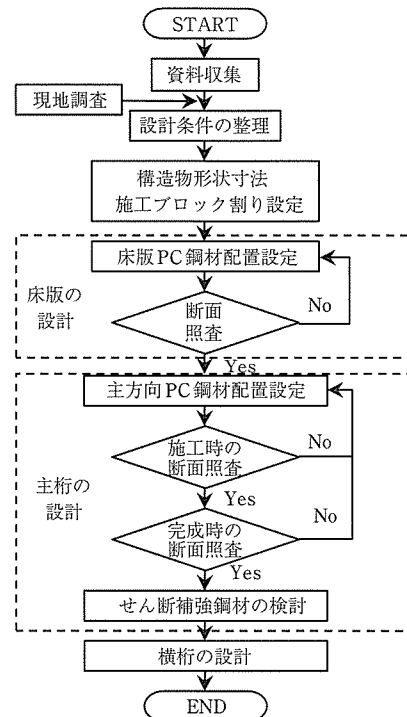


図 - 4 復元設計フロー

張出し架設工法で施工された PC 連続箱桁橋の場合であっても建設時の設計図書が入手できない、あるいは入手できる情報が限定される状況が起り得るものとして、そのような場合における復元設計の手法について検討した。

### 4.2 復元設計の手順

復元設計の手順は、基本的に新設橋の設計と同じであるが、すでに決定された構造に対して行うため、設計当時の設計思想を踏まえる必要がある。これら、設計当時の規準や設計思想を十分理解するには、竣工図面や設計計算書を入手することが確実であるが、実施には資料の紛失などにより、すべての資料がそろえられない場合もある。この場合には、設計当時の規準や同年代の類似橋梁の資料による設計条件を推定する必要がある。

図 - 4 に復元設計の作業手順を示す。この手順は、橋梁台帳程度の資料のみが現存し、鋼材配置までを推定する場合を想定した手順である。ここで、部分的に資料が入手できた場合は、作業の一部を省略することは可能であるが、入手資料が既存の構造物と一致しているかを確認するためにも、復元設計を行い検証することが望ましい。

#### (1) 資料収集および現地調査

収集する資料には、対象橋梁に関するもののほか、同年代に架設された同形式の竣工図書などの資料も、材料や鋼材配置を推定するうえで貴重な資料となる。また、補修・補強履歴も含めて収集する。資料の入手方法は、管理者だけでなく、橋歴板から施工会社を特定し、施工会社から入手する方法も考えられる。また、張出し架設 PC 箱桁橋に関しては、各種協会誌で報告されている場合もある。

現地調査の目的は、収集資料では得られなかった情報を得ること、および収集資料が構造物と一致しているかを確

認することである。

#### (2) 設計条件の整理

収集資料や現地調査結果を踏まえて、適用規準なども含めて復元設計するうえで必要な条件をとりまとめる。設計条件の基本となる適用規準は、車両の大型化や技術の進歩に合わせて改訂が繰り返されている。適用規準が明記されていない場合には、架設年度から適用規準を推定することとなるが、規準改訂を見据えて新しい規準を採用している場合や、設計時期が古く適用規準も古いままの場合もあるため、前後の規準も念頭に設定する必要がある。

#### (3) 構造形状寸法および施工ブロック割り

竣工図が現存しない場合では、橋梁台帳に記載された支点部と径間中央などの主要断面形状しか分からない場合もある。この場合は、桁高やウェブ厚、下床版厚の据付け形状を推定する必要があるが、断面力に大きく影響することから、同年代の類似橋梁の形状などを参考にして設定することが望ましい。耐震補強設計などの死荷重反力が重要な場合では、部材厚の据付け形状のほかに横桁厚も影響を与えることから、正確に設定する必要がある。

施工ブロック割りは、鋼材配置を推定するうえで非常に重要な情報となる。竣工図が現存しない場合には、現地調査により施工目地を確認するなどして推定する必要がある。

#### (4) 床版の設計

床版は、一般的に橋軸直角方向に比較的小容量の床版横締めPC鋼材が配置され、橋軸直角方向はPC床版として設計されている。床版に作用する荷重が発生させる曲げ引張応力度を打ち消すプレストレスを導入できるようにPC鋼材が配置される。橋軸方向の設計はPC構造として設計されるが、自動車の輪荷重が直接作用する床版としての設計はRC床版として行われる。

道路橋の床版厚は、力学的な必要厚からだけでなく、安全性、耐久性および施工性を有するように決定されている。しかし、床版には主方向PC鋼材も配置されており、これらの配置取合いを考慮すると一般的にはこの最小厚を大きく上回っている。また、張出し床版先端厚はPC鋼材定着具の最小縁辺距離より決定される。張出し架設される支間長の大きい長大橋において、負の曲げモーメントが卓越する柱頭部付近断面では、床版内に主方向PC鋼材が多数本配置され、これにより床版厚が決定されることもある。この場合、柱頭部断面から支間中央側に離れるにしたがってPC鋼材本数が減少し、これに伴い床版厚を変化させている事例もあり、復元設計にあたって外観だけでなく、床版厚の事前調査が必要となってくる。

床版の設計曲げモーメントは、支持形式、床版支間方向と車両進行方向、PC鋼材の配置方向および床版の形式を考慮して算出されるが、道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編（平成14年3月）<sup>3)</sup>では、T荷重による床版の単位幅（1m）あたりの設計曲げモーメントが示されている。設計曲げモーメント式には、床版支間長の適用範囲が示されており、復元設計の対象構造物がこの適用範囲外にある場合、当初設計の設計方針を確認、場合によっては類推および検証を行う必要がある。

床版は、一般的に橋軸直角方向に比較的小容量の床版横締めPC鋼材が500mmから750mm程度の間隔で配置されている。床版横締めとしてはφ26またはφ32のPC鋼棒の使用実績が多い。床版横締めPC鋼材は、張出し床版先端で定着具により固定され、地覆または壁高欄コンクリートにより被覆されており、通常目にすることは不可能である。供用中のPC箱桁橋の床版を精度良く復元設計する場合、目視による現地調査では床版横締めPC鋼材の配置間隔を特定することは困難であり、べつの方法で調査する必要がある。プレストレス導入力の設定は、基本的には主桁の設計と同様であるが、道路管理者ごとの同年代の設計実績や各種工法ごとのマニュアル・技術資料を参照するのがよい。

床版は、橋軸直角方向および橋軸方向に格子状に鉄筋が配置されている。箱桁橋の床版橋軸直角方向はPC床版として設計されており、最小鋼材量のD13ctc250程度の鉄筋が配置されている事例が多い。一方、床版橋軸方向の配置鉄筋は、床版としての設計がRC床版として行われているため、それによる必要鉄筋量に加え、主桁主方向の設計で必要となる鉄筋量が配置される。復元設計において、①必要鉄筋量算出のためにどう鉄筋の許容応力度を設定したか、②余裕を考慮した鉄筋の許容応力度の低減を行ったか、③主桁主方向の設計で必要となる鉄筋量との組合せをどのように行ったか、④かぶりをどう設定したか、などを知ることが重要である。また塩害地域では、独自のかぶりの設定を行っている場合もあり、道路管理者ごとの設計実績などを参照するとよい。

#### (5) 主桁の設計

主桁の設計にあたって、主方向PC鋼材の種類を設定する必要がある。使用されるPC鋼材の種類は、PC鋼材の発展にとまない、高強度化、大容量化している。対象とする橋梁の設計資料などに使用PC鋼材の種類が記載されていない場合は、建設年次を考慮し、その時代に使用されていたPC鋼材から選定する必要がある。橋歴板などから工法の種類が限定される場合は、その工法で架設年度に使用されていたPC鋼材の種類を確認する必要がある。PC定着工法や使用鋼材の種類を選定する際には、「定着工法の変遷」や「PC鋼材規格の変遷」、同年代に建設された同規模の例なども参考になる。また、PC橋の建設が始まった昭和40年代には、各種工法の設計施工指針が土木学会からコンクリートライブラリーとして出版されており、PC鋼材の種類を設定する際の参考になる。

張出し架設の場合、一般的には張出し架設支点部で主方向PC鋼材量が最大となる。PC鋼材の配置を検討する際には、張出し架設支点部での配置を設定する必要があるが、その際には、床版の設計で設定した床版横締めPC鋼材の配置も考慮する必要がある。PC鋼材の配置間隔や、配置の基本的な方針などは、各種工法の設計施工指針や同時代に建設された橋梁の図面などが参考になる。

PC鋼材1本あたりの導入力は、適用規準に示されている許容引張力を考慮して設定する必要がある。また、プレストレスが有効になる範囲の考え方も年代により変化して

いる。PC 鋼材の許容引張力はプレストレスング中、プレストレスング直後、設計荷重時に分かれて設定されているが、導入時の緊張力、有効緊張力などの設定方法は、各種工法の設計施工指針の参考資料などに示されている設計例、各種工法で出版している技術資料などが参考になる。

張出し架設においては、施工ブロック長を設定するとともに、閉合順序を設定する必要がある。これらの条件に関する記載が復元設計の対象とする橋梁の設計資料などない場合は、施工ブロック長に関しては、現地を調査して施工目地などから確認する必要がある。閉合順序に関しては、考えられる複数の施工順序について検討するなどして、最終的な鋼材量を決定する必要がある。また、橋梁によっては特殊な施工手順を採用しており、既存の資料を十分確認する必要がある。本委員会では実施した復元設計の事例研究では、張出し架設後の反力調整を復元設計で考慮できなかったために、算出された鋼材量が実際の鋼材量と異なる結果となった。復元設計において、構造一般図に記載がないような反力調整などの施工情報は復元設計の結果に影響をおよぼすことがあるので、事前に調査しておくことが望まれる。張出し架設工法では、一般的に移動式作業車が使用される。その重量の設定には、各種工法の設計施工指針や、各種工法で出版している技術資料などが参考になる。

主方向の PC 鋼材量を復元設計する際に重要となるのは、コンクリートの許容曲げ引張応力度の設定であり、その値は適用規準にしたがって設定される必要がある。許容値は荷重の組合せごとに異なるが、PC 道路橋の建設が始まった時代の規準には、現在の道路橋示方書に比べると、荷重の組合せの種類が少ない。現在の道路橋示方書は、主荷重だけでなく従荷重および従荷重に相当する特殊荷重などの許容値が規定されている。一方、国内において PC 道路橋の設計示方書として初めて編纂された「プレレストコンクリート道路橋示方書解説 昭和 43 年 3 月」で設定されている許容曲げ引張応力度は、全死荷重が作用する前、全死荷重が作用した後、設計荷重が作用した後、の 3 種類の荷重状態について規定されているだけである。したがって、温度変化の影響を考慮した場合の許容値などをどのように設定するか決める必要がある。また、許容値に対してある程度余裕を見込むなど、発注者ごとに独自に許容値を設定している場合がある。復元設計事例においても、設計条件では、活荷重作用時の上縁側の曲げ引張応力度の許容値としては  $0 \text{ kg/cm}^2$  が設定されていたが、温度変化の影響により  $15 \text{ kg/cm}^2$  程度の引張応力度が発生するため、前述の許容値に対して  $10 \text{ kg/cm}^2$  程度の余裕を設定していた。そのような考え方で考慮するためには、事前に、発注者の内部規準などがなかったかを確認する必要がある。また、同年代に建設されたべつ橋梁の設計計算書がある場合には、その資料を参考にする方法もある。

せん断に対する照査は、許容値だけでなく斜引張鉄筋量の算出方法も変化しているため、架設年度を考慮して適用示方書を設定する必要がある。道路橋示方書には、昭和 39 年版より PC 部材の斜引張鉄筋量の算出方法が記載されているが、昭和 53 年版よりコンクリートが負担するせん

断力を考慮するなどの点に変更されている。また、許容斜引張応力度については、平成 14 年版より活荷重時の許容値が大きく変更されている。せん断 PC 鋼材の基本的な配置方針などは、各種工法の設計施工指針や同時代に建設された橋梁の図面などが参考になる。

#### (6) 横桁の設計

横桁の設計にあたり、横桁の構造寸法および支承配置に関する情報が必要となる。設計図書からこれらの情報を確認できない場合には、現地調査にて測定する必要がある。横桁厚は点検用のマンホールがあれば、直接、横桁厚を測定可能であるが、端支点横桁などでは箱桁内部の寸法と桁長との比較から厚さを復元することになる。支承配置は現地にて実測できるが、実測可能な距離まで近づけない場合には、写真などからスケールアップする方法などにより支承配置を復元する必要がある。

横桁が PC 構造として設計されている場合には、PC 鋼材の種類および配置の情報が復元設計に必要となる。これらの情報が設計図書などから確認できない場合、PC 鋼材の種類については、床版の設計や主桁の設計と同様に建設年代が近い同種橋梁の設計図面などから推測する方法が考えられる。PC 鋼材の配置は外観調査を行うことで、PC 鋼材のあと埋め処理の痕跡を確認できる可能性があり、その痕跡から配置および本数を推定することが可能である。

設計反力が設計図書などで確認できない場合には、主方向の復元設計結果から得られた設計反力を用いることになる。また、現地調査により支承の種類・メーカー、寸法が確認できれば、支承の性能やその許容値などから概略の設計反力を推定できる可能性がある。

## 5. 復元設計に必要な調査・検査手法

建設時の設計図書（設計計算書、詳細構造図）が残っていないか、あるいは一般構造図程度のものしか残っていないなど、建設時の構造性能評価や、補修・補強を行うにあたり情報が不足している場合には、構造物の調査・検査を行う必要がある。とくに、復元設計における調査・検査では、建設時の構造性能評価の精度向上を目的に行われる場合が多く、部材寸法、鋼材の配筋状況、鋼材径、鋼材のかぶりなどに必要に応じて外観調査あるいは微・非破壊試験によって行われる。しかし、非破壊試験による構造物内部の調査では、部材厚や鋼材の配置状況などがその測定精度に影響を与えることが分かっており、定量的に非破壊試験の精度を明確にできないのが現状である。

本章では、復元設計法の精度向上のために必要とされる情報のみに絞り、現状で分かりえる調査・検査手法の精度、および留意点についてとりまとめた。

### 5.1 必要情報の整理

プレテンション T 桁橋の場合、ほとんどの橋梁が JIS 桁で製作されており、橋歴板や主桁形状が分かれば、復元設計に必要な設計用値は把握できる。したがって、橋歴板や主桁形状が分からない場合の対応として、とくに外観調査で分からない次の項目についての調査方法、測定精度、および調査の留意点などをまとめた。① 桁高（フランジ厚、

間詰め床版厚), ② PC 鋼材・せん断補強筋の配置, ③ PC 鋼材・せん断補強筋の径, ④ 舗装厚。なお, フランジ厚は水切り部があるために外観調査では直接計測することができない。

ポストテンション箱桁橋の場合, ほとんどの橋梁が特殊橋梁であるため, 1) 特殊橋梁のため標準的な規格がなく外観調査のみでは主桁形状(ウェブ厚, フランジ厚)が推定不可能, 2) 架設工法の違いにより PC 鋼材の配置が異なる, 3) 曲上げ, 曲下げ角度は, 設計者によってさまざまであることから次の項目についての調査方法, 測定精度, および調査の留意点などをまとめた。① 主桁形状(ウェブ厚, 上下フランジ厚), ② PC ダクトの配置, ③ PC 鋼材の緊張力, ④ せん断補強筋の配置と径。

### 5.2 検出可能な範囲と項目

図-5にプレテンション T 桁およびホロースラブにおいて検出可能な鋼材の範囲を示す。鋼材の場合, 部材表面にある鋼材については比較的検出可能ではあるが, 鋼材が重なる場合やハンチ部に位置する鋼材は検出不可能あるいは検出精度が低下する場合が多い。

なお, 水切り部がある場合の上フランジ厚, 間詰め床版厚, およびホロースラブの内寸空法については, 電磁波レーダ法, 衝撃弾性波法, 超音波法を用いることにより, 検出することは可能である。

図-6に, ポストテンション箱桁(連続桁)の検出可能な鋼材の範囲を示す。プレテンション T 桁およびホロースラブの場合と同様, 部材表面にある鋼材については比較的検出可能ではあるが, 鋼材が重なる場合やハンチ部に位置する鋼材は検出不可能あるいは検出精度が低下する場合が多い。ただし, PC ダクトの配置情報の検出のみであり, PC ダクト内部の PC 鋼材情報については, 検出不可能である。なお, 部材厚においては, 磁波レーダ法, 衝撃弾性波法, 超音波法を用いることにより, 検出することは可能である。

### 5.3 調査項目に対する各種試験の精度

プレテンション T 桁の調査項目に対する各種試験の精度について, 経験および機器の仕様書を参考にまとめたものを, 表-1~3に示す。なお, 機器の仕様あるいは試験条件によっては, その精度が異なることを付記する。ポストテンション箱桁橋の断面形状の調査については, プレテンション T 桁の場合と同様で, レーダ法, 超音波法, コア採取による調査が一般的で, 箱桁表面からの試験となる。また, 主 PC 鋼材, 横締め PC 鋼材, せん断補強筋の調査においてもプレテンション T 桁の場合と同様な調査手法が考えられる。

PC 鋼材の緊張力の調査では, PC 鋼材に生じている実応力を計測することになる。表-4に実応力計測法として代表的な磁歪法(EM センサ, M リングセンサなど)による測定精度について示す。

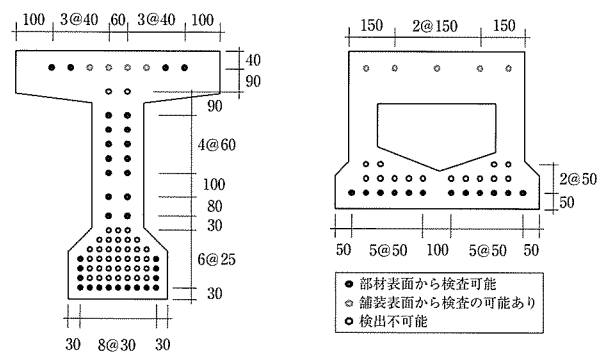
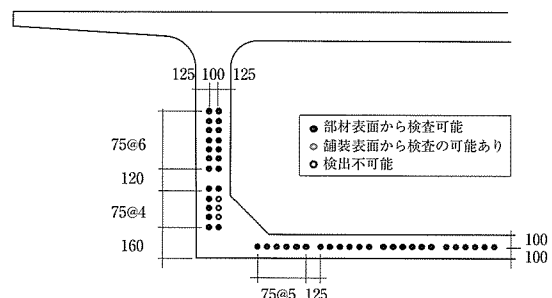
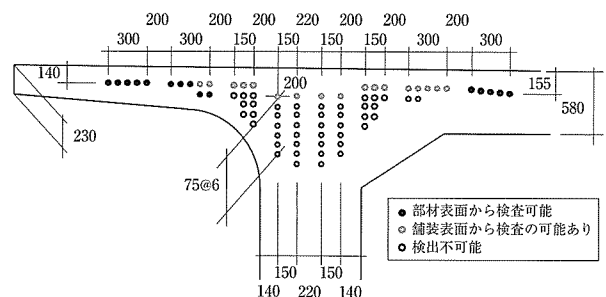


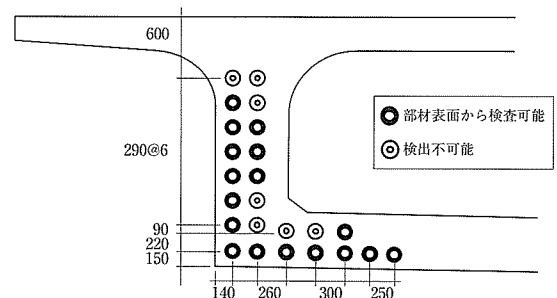
図-5 検出可能な鋼材の範囲



(a) 支間中央断面



(b) 橋脚上部(負曲げ部)



(c) 上部工端部

図-6 検出可能な鋼材の範囲



表 - 1 主桁断面形状に対する各種試験の精度

内容	調査部位	調査面	調査方向	調査方法	精度	備 考
主桁断面形状調査	上フランジ厚	水切り部	上面	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合、± 5 mm 程度の精度。
					△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。
				超音波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。
					△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。
				衝撃弾性波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。なるべく「広い面」で計測するのが望ましい。
					△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。
		部材の表面部	上フランジ下面	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合、± 5 mm 程度の精度。
					△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。
				超音波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。
					△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。
				衝撃弾性波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。なるべく「広い面」で計測するのが望ましい。
					△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。
	コア採取	◎	上フランジの上下面を正しく採取し確認できること。			
	舗装部	舗装をはがす	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合、± 5 mm 程度の精度。	
				△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。	
			超音波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。	
				△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。	
			衝撃弾性波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。なるべく「広い面」で計測するのが望ましい。	
				△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。	
	コア採取	◎	上フランジ下面からの採取なので、作業が困難。			
	舗装をはがさない	舗装をはがさない	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合、± 5 mm 程度の精度。	
				△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。	
			超音波法	○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。	
				△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。	
衝撃弾性波法			○	音速による補正が可能な場合、± 2～3 %程度の精度。なるべく「広い面」で計測するのが望ましい。		
			△	音速による補正ができない場合、± 10 %程度の精度。		
コア採取	◎	鉄筋切断を避けるための鉄筋探査が必要。				
間詰め床版厚	表面部（下面）	上フランジ厚調査における表面部と同じ。				
	舗装面	上フランジ厚調査における舗装部と同じ。				

表 - 2 PC 鋼材およびせん断補強筋調査に対する各種試験の精度

内容	調査部位	調査面	調査方向	調査方法	精度	備 考
主PC鋼材の調査	下フランジ部の配置（かぶりも含める）	表面部	下面側面	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合、鉄筋位置：移動距離 600 mm の範囲内で± 10 mm の精度。かぶり：かぶりが 50～200 mm 以内で± 5 mm の精度。ただし、用心鉄筋などの影響が不明。
					△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。
				コア採取	◎	PC 鋼材の本数分採取しなければならない。
				電磁誘導法	△	PC 鋼材が用心鉄筋などに囲まれているため、その内部にある PC 鋼材の位置情報の取得が可能か不明。
	下フランジ部鋼材径	表面部	下面側面	X線法	◎	測定精度は高いが、X線の出力の強さや、フィルムの性能によって、差が生じる。
					◎	測定精度は高いが、X線の出力の強さや、フィルムの性能によって、差が生じる。
				コア採取	◎	PC 鋼材の本数分採取しなければならない。
				電磁誘導法	◎	PC 鋼材が用心鉄筋などに囲まれているため、その内部にある PC 鋼材の径情報の取得が可能か不明。
せん断補強筋	ウェブ部配置	表面部	側面	レーダ法	○	移動走査距離 600 mm の範囲内で± 10 mm の精度。かぶり：かぶりが 50～200 mm 以内で± 5 mm の精度。
					△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。
				コア採取	◎	複数本の採取が必要。
				電磁誘導法	○	鉄筋位置：± 10 mm 以下の精度。かぶり：かぶりが 20 mm 以上、100 mm 未満で± 1～2 mm 程度の精度。
	ウェブ部鉄筋径	表面部	側面	X線法	◎	測定精度は高いが、X線の出力の強さや、フィルムの性能によって、差が生じる。
					◎	測定精度は高いが、X線の出力の強さや、フィルムの性能によって、差が生じる。
				コア採取	◎	PC 鋼材の本数分採取しなければならない。
				電磁誘導法	○	60 mm 以下の範囲で、± 4 mm 以下の精度。
X線法	◎	測定精度は高いが、X線の出力の強さや、フィルムの性能によって、差が生じる。				

表 - 3 舗装厚調査に対する各種試験の精度

内容	調査部位	調査面	調査方向	調査方法	精度	備 考
舗装厚	舗装面	表面部	上面	レーダ法	○	誘電率による補正が可能な場合は、比較的精度良く評価可能である。
					△	誘電率による補正ができない場合、± 30 mm 程度の精度。
				コア採取	◎	複数本のコア採取が必要。

表 - 4 磁歪法による PC 鋼材緊張力の測定精度

内容	調査部位	調査位置	調査方法	精度	備 考
PC 鋼材の緊張力	外ケーブルコンクリート内部の PC 鋼材	桁端部・桁中間部・桁中央部	磁歪法	○	計測対象物と同じ材料を用いて透磁率と応力度および温度の関係をキャリブレーションする必要がある。計測精度は、± 3 %程度である。

## 6. おわりに

本報告は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「PC 構造物の復元設計研究委員会」の平成 20 年度から 2 年間の活動成果としてまとめた報告書の概要版である。報告書では、一般 PC 橋梁および特殊 PC 橋梁ともに、復元設計事例を掲載しており、復元設計を実施する際の問題点を事例を通して分かりやすく考察している。また、調査手法に関しても、模擬試験体による PC ダクトの検出精度の実証実験を行っており、具体的な測定精度の考察を行っている。加えて、復元設計実施時に参考とすべき過去の資料を

CD-ROM にまとめており、実務に役立つ資料も提供している。是非、報告書を一読いただければ幸いである。

最後に、本研究委員会の活動を支援していただいた幹事委員、および事務局の皆様へ感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 設計編、土木学会、2007
- 2) PC 構造物の復元設計研究委員会成果報告書、プレストレストコンクリート技術協会、2010
- 3) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋、日本道路協会、2002

【2010 年 7 月 15 日受付】