

# 道路構造物等の性能・健全度の検査及び評価システム

The evaluation system of performance and soundness of road structures

(研究期間 平成 18～20 年度)

— PC 構造物の健全性評価手法の開発 —

Development of evaluation technique for prestressed concrete structures

道路研究部 道路構造物管理研究室  
Road Department, Bridge and Structures division

室長 玉越 隆史  
Head Takashi Tamakoshi  
主任研究官 高橋 晃浩  
Senior Researcher Akihiro Takahashi  
研究官 川間 重一  
Researcher Shigeichi Kawama  
研究員 春田 健作  
Research Engineer Kensaku Haruta

In terms of maintenance of road structures, it shifts to the method of the prevention maintenance that needs detection of abnormality early and countermeasures at the early stage. As for prestress of PC structure, it is essential to measure degree of prestress decrease which might affect soundness of the structure. Therefore we have studied influence of prestress degree over soundness and applicable nondestructive methods to detect degree of prestress adequately.

## [研究目的及び経緯]

道路構造物の維持管理においては、構造物の変状を早期に発見し対策を実施する予防保全的な方法へ移行しつつある。

このために実施する点検は目視が基本となっているが、目視で点検が不可能な部位や変状の点検を行うためには非破壊検査手法の開発および活用が不可欠であり、コンクリート構造物の健全性評価技術についても、例えば配筋状態、コンクリート強度、かぶり厚、鋼材腐食の有無等の非破壊検査手法が開発されるなど各方面で研究が進められている。

プレストレストコンクリート（以下、PC 記す。）構造物は、緊張材によってコンクリートに導入されたプレストレスの状態が適正であることが構造物の性能に大きな影響を及ぼすため、既設構造物のプレストレス状態を知る技術の確立が求められてきたが、構造の状態に影響しない非破壊検査手法は十分には確立されていない。PC 鋼材に沿ったひび割れ



写真-1 PC 鋼材に沿ったひび割れ

(写真-1 参照) のように PC 鋼材付近に異常がある場合や、PC 鋼材の破断または施工時の導入量不足などが原因でプレストレスが不足した場合、有害なひび割れの発生、床版部材の抜け落ちや落橋の危険性が生じ、大規模な補修の必要性がある。

そこで、本調査では、PC 道路橋を対象に耐荷力性能の低下を疑う必要のあるレベルにプレストレスが低下したことによる変状を非破壊で検知できる手法について検討を行ったものである。

## [研究内容]

### 1) プレストレス量の減少が変状に与える影響評価

検知すべき目標設定のために、表-1 に示す採用実績の多い構造形式を選定し、支間長を各々数ケースの、残存プレストレス量に着目した試設計を実施し、活荷重時、死荷重時のコンクリート応力およびひび割れの程度の関係について検討した。

表-1 検討ケース

構造形式	支間長 (m)
ポストテンション方式 T 桁橋	20, 25, 30, 35, 40, 45
場所打床版橋	20, 30
箱桁橋	40

### 2) 非破壊検査手法の検討

ポストテンション方式 T 桁橋を模擬し、プレストレ

量を調整可能な梁供試体(供試体寸法:L=7.5×0.75×0.3m)を2体製作し、プレストレスの変化を非破壊で検知できる手法(弾性波法)の検討を行った。弾性波法は、コンクリート表面から鋼球の衝撃または、超音波振動を与えその伝搬波形を多チャンネルセンサ(AEセンサ:140kHz)により採取する手法とした。その多チャンネル計測の実施状況とセンサ配置を図-3に示す。

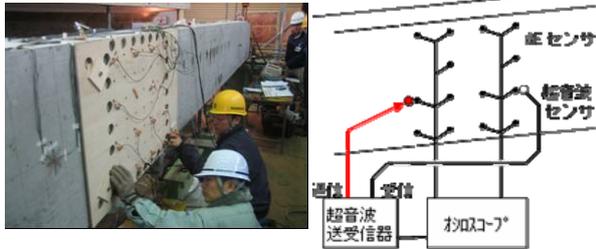


図-3 弾性波法 実験状況

また、荷重載荷による応力変動についても同様に試験を実施するとともに、アコースティックエミッション法(AE法:コンクリート部材中の損傷を内部の微破壊により生じる音(AE信号)を検知することで連続的に監視し、研究が進められつつある手法。)によりPC構造物の変状(ひび割れの発生状況)のモニタリング手法を検討した。

[研究成果]

1) プレストレス量の減少が変状に与える影響評価

プレストレス導入量とPC橋の変状の目安を示した結果を図-4に示す。

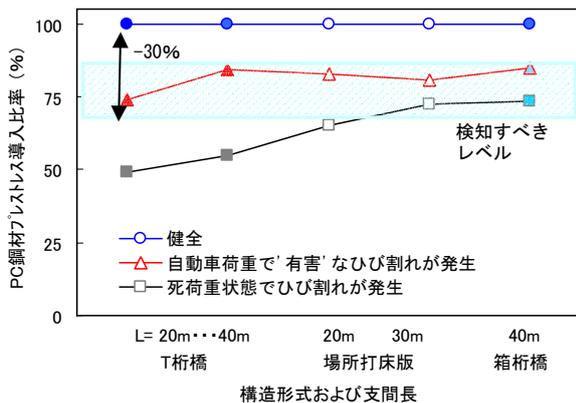


図-4 プレストレス導入量とPC桁の変状

橋梁の構造形式が異なってもプレストレス低下率の傾向として変状を検知すべきレベルには大きな差がなく、例えば、ポストテンションT桁橋で25%程度プレストレスが低下すると、自動車荷重により有害なひび割れが発生し、長期的な耐力の低下につながる危険性が高くなることが分った。

維持管理においては、実際のバラツキや実務における検査結果を踏まえ、①監視の継続、②詳細調査

の実施、③補修の実施など対応の選択肢を考えると、所定のプレストレス導入量の30%程度の低下があるかないかだけが判別できればよいことがいえる。

2) 非破壊検査

2-1) 弾性波法 (超音波、衝撃弾性波)

PC鋼材に導入している緊張力を解法してプレストレス量を低下させた前後の波形を図-5に示す。プレストレス導入前後の波形を比較(1測点当たり10回計測)してみると、波形に明確な変化が生じ、プレストレス低下の検知が可能であることが分かった。

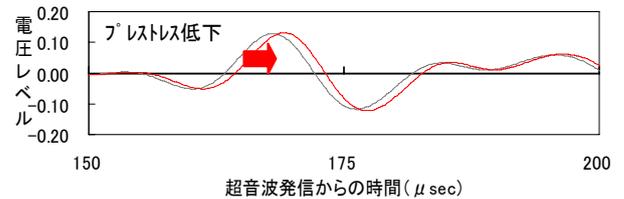


図-5 プレストレス低下(圧縮力減少)時の波形の変化

2-2) アコースティックエミッション法(AE法)

写真-2に示す供試体の載荷状態でAE計測を実施したところ、コンクリート表面のひび割れが発生する前に内部のAE信号を検知し発生位置からひび割れの位置が特定できることが確認できた。



写真-2 載荷実験状況

図-6は供試体内部の破壊に伴うAE信号の位置と数を示している。

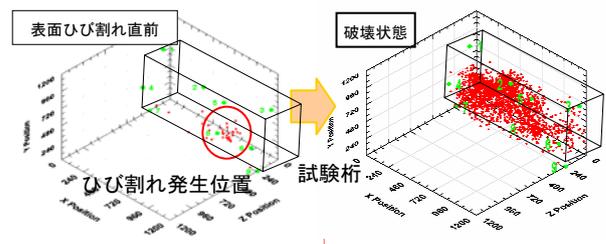


図-6 桁内部のAE信号の発生位置の推移  
今後、得られたデータを詳細に分析し、プレストレスの導入量が検知できる手法の開発を進めている。

[成果の発表]

・本研究の成果は、国土技術総合研究所報告書等で発表の予定である。

[成果の活用]

国総研資料は各地整、自治体に配布され維持管理における実務の参考資料として活用される。

# 道路構造物の合理的管理に関する試験調査

Study of strategic management of road structures

(研究期間 平成 19 年度)

—道路橋定期点検等の合理化に関する調査—

—Research on the rationalization of highway bridge inspection—

道路研究部 道路構造物管理研究室  
Road Department, Bridge and Structures Division

室長	玉越 隆史
Head	Takashi Tamakoshi
主任研究官	大久保 雅憲
Senior Researcher	Masanori Okubo
研究官	川間 重一
Researcher	Shigeichi Kawama

In order to realize scientific road asset-management appropriately, we have researched rationalization of highway bridge inspection and improvement of the Bridge Management System (BMS) which is used for road managers.

## [研究目的及び経緯]

現在、道路構造物資産の保全に関しては、少子高齢化が進む社会情勢の変化にも対応して予算や人員の制約の下で計画的かつ効率的に道路ネットワークのサービスの水準を維持できる手法の確立が強く求められている。そしてそのためには、全国に形成されている道路のネットワークとしての機能をより有効に活用するため、管理者の別にかかわらず、対象となる道路ネットワークの状態を把握し、統一的な観点で正しくその機能状態を評価できることが不可欠である。

これらを踏まえて、本研究では、自治体を含む全国の道路橋を効率的に統一的な観点で把握できるための合理的な定期点検手法の検討、将来の道路橋資産の状態を予測し、維持管理施策の立案を支援するシステム(BMS)の機能性と精度の向上に関する調査研究を実施した。

## [研究内容]

直轄の道路橋においては、昭和 63 年に、統一的な橋梁点検要領が定められ、これを元に 10 年間隔を標準とする定期点検が開始された。そして得られたデータの分析等から平成 16 年に定期点検要領の改訂を行い、現在はこれによる点検が行われている。改訂では点検頻度を 5 年間隔に短縮するとともに供用後概ね 2 年以内の初回点検の実施が規定されたことから、直轄橋梁については現在までにほとんどの橋梁について統一的な手法で把握された点検データが整備されてきている。

一方、地方自治体の中には直轄と同程度の定期点検の必要性を認識しながらも予算や人員の制約から十分な点検が行えていないケースも多い。

本研究では、将来の維持管理の合理化や高度化に資する目的もあり、点検要領に則って近接目視で網羅的に取得されてきた直轄の膨大な点検データを分析し、現行点検要領の課題の抽出とコスト縮減策について検討した。

すなわち、平成 16 年に導入された初回点検結果の分析、及びこれまで蓄積されている最大 2 回の定期点検結果を、架橋環境や地域環境の影響などの条件毎に損傷の発生時期や進展速度、部位毎の劣化パターンなどに着目して傾向や特徴の分析を実施した。

## [研究成果]

### (1) 初回点検結果の分析

対象橋梁は、供用後概ね 3 年以内に点検された 286 橋である。このうち、263 橋において何らかの損傷(対策区分別に、C:30 橋、S:16 橋、B:123 橋、M:94 橋)が認められるという結果であった。

例えば、RC 床版では、初回点検で「床版ひびわれ」や「漏水・遊離石灰」が多く発生しており、床版ひびわれでは「乾燥収縮・温度応力」が、漏水・遊離石灰では「防水・排水工不良」がそれぞれ主たる要因として挙げられた(図-1)。「乾燥収縮・温度応力」は不適切な養生など施工段階での問題が支配的と考えられ、竣工段階で既に発生していた可能性も疑われる。一方、「漏水・遊離石灰」が早期に現れたとは、床版ひびわれの存在に加えて防水・導排水機構の不良があるものと考えられる。これらの分析から、早期の初回点検が初期不良の検出による予防保全や長寿命化の観点から有効であることが示された。また、竣工時に項目によっては定期点検と同水準の調査を行いその記録を残す

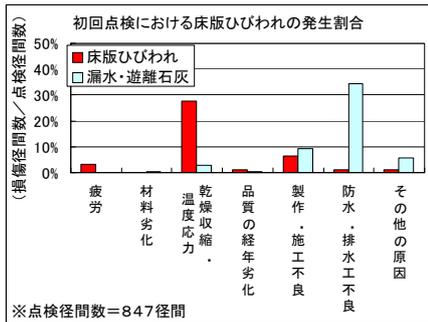


図-1 初回点検における床版ひびわれ等の損傷原因

必要があること、竣工前に床版防水システムの機能確認と乾燥収縮や温度ひび割れなど施工品質に起因する変状の確認と是正の確実な実施の必要性を強く示唆された。

(2) 点検結果の遷移の分析

同じ橋に対する2回の定期点検結果(点検間隔は概ね10年以内)を比較することにより、損傷が発生する時期、損傷の進展程度を、架設環境や地域環境との相関について分析した。

まず、損傷を生じていない点検結果がある要素を抽出し(架設後それまでは損傷が生じていないことを証明)、それより後に行われた点検での損傷の程度を、経過年別に整理した。代表例を、図-2に示す。コンクリート上部工のひびわれは発生時期にかかわらずその発生は5%以下であることが分かる。次に、ひびわれ発生後の5年以内の遷移確率を図-3に示す。ひびわれが一度確認されると次回点検(5年度)までに明確に状態が悪化している場合が多いことが分かる。

このため、例えばコンクリート上部工については条件によってはひび割れに着目した近接目視点検の頻度を他の部位に比べて少なくできる可能性がある。一方、ひびわれを一度確認した後はひびわれの原因や性状によっては着実に進行する可能性が高く、次回点検までの劣化を予測して対策時期を早めに検討・実施することが予防保全につながる可能性がある。

環境要因との相関について、「床版ひびわれ」を代表例として、旧点検の損傷が新点検でどう進展していたかの遷移確率を図-4に示す。左側は損傷原因別(主要な原因である疲労と乾燥収縮)、右側は環境別(大型車交通量)である。左の図から、損傷の悪化する割合は乾燥収縮よりも疲労の方が高いと、損傷原因により損傷の進展速度に違いがあることが読み取れる。右の図からは、床版に与える環境が厳しい(大型車1万台以上)ほど初期の損傷の進展速度は大きいものの、b程度以上の損傷にまで至った後はこの差は明確でなくなる傾向が読み取れ、ともに、損傷の初期の段階で対策

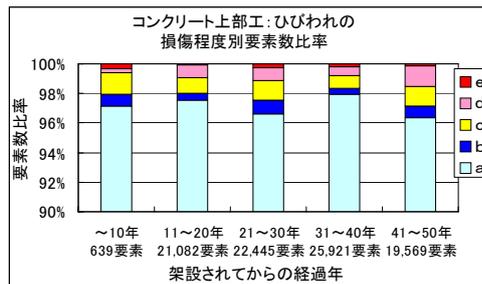


図-2 初期にひびわれがない場合の、ひびわれ発生状況

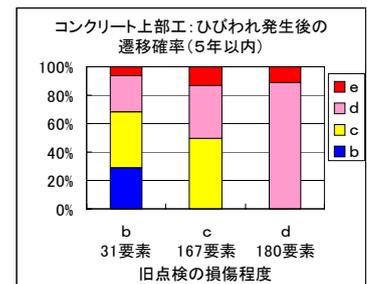


図-3 ひびわれ発生後の遷移確率

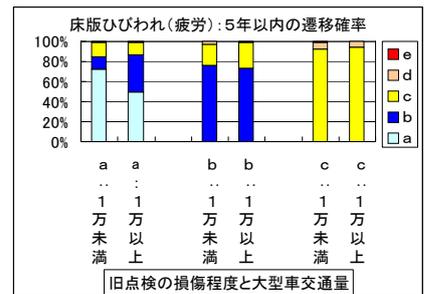
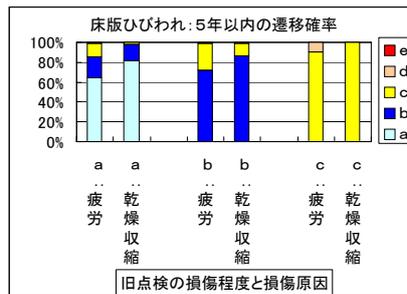


図-4 床版ひびわれの遷移確率(5年以内)

することが予防保全につながる可能性がある。以上のように、部位あるいは損傷原因や環境に応じて損傷の進展速度に差が認められ、全国ベースで蓄積してきている直轄の点検データを詳細に分析していくことで、構造や部位、

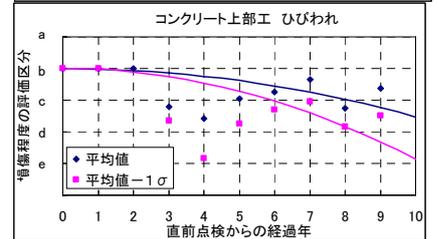
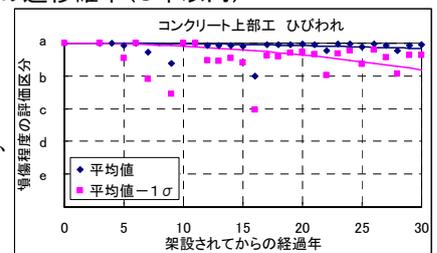


図-5 劣化予測

地域、架橋条件などを反映して点検頻度の最適化など合理化策が立案できる可能性が高いことが示された。

また、分析で得られる特徴を反映させることで劣化予測の精度向上も図られるものと考えられる。例えば、図-5に示すコンクリート上部工のひびわれ予測式ではひびわれが発生するまでは上図を、ひびわれ発生後は下図(bの場合)を使うことで予測がより信頼性の高いものとなることわかる。

今後、実務への適用に向け、さらに検討を進めていく予定である。

[成果の発表]

国総研資料及び各種論文等で発表の予定である。

[成果の活用]

研究成果は、橋梁定期点検要領(案)の見直し及びBMSの高度化検討に際して基礎データとして活用できる。

# コンクリート道路構造物の劣化・損傷評価のための試験調査

Study on durability of existing concrete structures

(研究期間 平成 19 年度)

室長 玉越 隆史  
Head Takashi Tamakoshi  
研究官 川間 重一  
Researcher Shigeichi Kawama

主任研究官 高橋 晃浩  
Senior Researcher Akihiro Takahashi  
交流研究員 畦崎 成志  
Research Engineer Seishi Unezaki

In order to rationalize maintenance of concrete structures, it is necessary to establish evaluation method for existing concrete structures which are damaged by the alkaline-aggregate reaction (ASR) or chloride action. We studied detecting method of damage by ASR for bridge foundations in the research.

## [研究目的及び経緯]

コンクリート構造物の耐久性喪失の主たる要因としてアルカリシリカ反応（以下「ASR」という）と塩害があげられる。当研究室ではこうした要因に対する道路構造物の長期耐久性の確保策を確立し、適切な維持管理を行うために必要な試験調査を実施している。

道路構造物の ASR は、全国で損傷事例が報告されているが、使用材料、各種環境条件によっても現象の発生時期や進展状況に大きな差があることが知られている。また劣化の進行程度の把握は、ひび割れ等の外観目視や部分的なはつり等の直接的手法に頼る部分が大きいため、地中部などアクセスが困難な部位の点検や劣化程度の評価は困難であり、そうした部位に対する合理的な点検手法の確立が求められている。

本研究では、ASR の発現と劣化の進行に伴い構造物に生じる変状と材料や各種環境条件の関係を明らかにすることにより、目視による直接の視認が困難な部位に対しても ASR による劣化の有無やその状況がある程度の精度で評価できる手法を確立することを目的として、調査を実施した。

## [研究内容]

ここでは、供用後は地中に位置し、状態を確認することには大きな困難が伴う橋脚基部やフーチングにおける ASR の発生を想定して、これを直接視認することなく使用材料等の情報と架橋環境や視認できる同じ構造物の地上部の状況などから地中部の ASR 劣化の有無や

進行状況を推定できる手法について、実構造物を用いて検討を行った。

具体的には、地上部のコンクリート部材に ASR 劣化が確認されている場合に、地中部ではどの程度の劣化が生じているか確認するとともに、地上部の ASR による劣化性状や日照、水掛かり、地下水水位など種々の環境要因を調査して、それら相互の関係について調査を行った。また、地上部の調査だけでは地中の劣化を評価することが困難な場合においても、構造物を掘削・暴露せず小規模のコアなど構造物に影響のない程度のコンクリート検体を採取し、その分析も組み合わせることで劣化診断が行えることは有効な手法と考えられたため、図-1 に示すような地質ボーリング手法を適用し、橋脚のフーチング等からφ69mmの小径コアを採取し、ゲルや反応環の有無等の調査を行った。小径コアの採取にあたっては、地質ボーリングにより排土した後に、コア採取用のビットを用いて、コアを採取する手法の検討を行った。本研究ではコア採取後、コア採取箇所を含む部分の状態を実際に確認して検証を行うことから、試掘を行って地上部と地中部の ASR 劣化の関係の確認を行うとともに小径コア採取後の補修が適

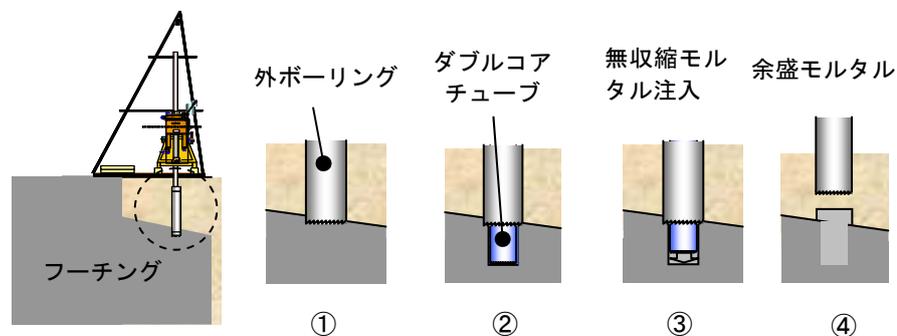


図-1 地質ボーリング手法によるコア採取の手順

切に行えているかどうかの確認を行った。現地調査は、地中部環境の相違として凍結防止剤を散布する地域の橋梁（橋脚 A）と非散布地域の橋梁（橋脚 B）から選定した。

## 〔研究成果〕

### (1) 外観性状

写真-1 に、調査した橋脚柱部の状況の例を示す。本橋脚は、上部工からの漏水も確認されるが、柱側面の表面には ASR 劣化特有の顕著な白色析出物が確認でき、梁部には亀甲状のひび割れがあるなど、ASR が原因と見られる兆候が生じている。



写真-1 柱部地表面付近の状況

### (2) 地中部の状況

#### 1) 地中部コア

写真-2 に採取した地中部にある部材

の小径コアの概観を示す。今回採取した3体のコア全てで、白色の析出物や ASR 特有の骨材周りの反応環が確認された。



写真-2 小径コア概観  
(赤丸は析出物、黄色枠は反応環)

こうした反応環は、昨年度調査したボーリングコアのうち、φ39mm のコアでは確認できないものがあったが、φ69mm の4体のコアでは全て確認できており、今回のようにφ69mm 程度の大きさのコアボーリングを行うことにより、外観の目視観察による ASR の確認が可能であることが分かった。

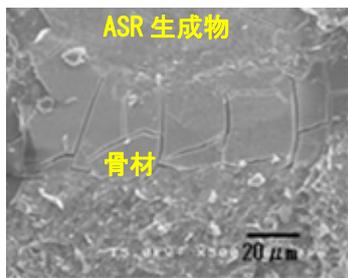


写真-3 白色析出物の電子顕微鏡写真

また、採取コアで走査型電子顕微鏡観察 (SEM-EDXA) を実施し、ASR 生成物の状況を確認した (写真-3)。

#### 2) 試掘調査

地上からのボーリングによりフーチングのコアを採取した後、試掘によりフーチングを表出させひびわれ状況等の観察を行った。地面との境界近傍にある柱部のひび割れのうち、地面に対して垂直方向で 0.75mm 以上のものについては地中部に達しており (写真-4)、

こうしたひび割れの方向や幅から地中部の損傷の有無について差別化できる可能性があることが分かった。

一方、表出させたフーチングには、柱部とは独立したひび割れも多数確認され、柱部のひび割れ状況のみからフーチングのひび割れ状況を推定することが困難であることが分かった。

今回は上部工からの水掛かりが多く、日射が少ないため湿潤状態が長い条件の構造物に対する調査であったが、今後、異なる環境条件に対する調査を実施することにより、地上部の損傷状況、環境条件と地中部の損傷状況の関係について、さらなる傾向分析を行うことが必要である。

#### (3) ボーリングによるコア採取後充填方法の適用性

過年度の試験を踏まえ、コア採取後のコア抜き部の清掃、モルタル重点方法を改良した。表出したフーチングにおける調査により、これらが適切に実施できたことが確認できた。



写真-4 柱部のひび割れ状況

## 〔今後の課題〕

今後、これまで実施した調査対象と異なる環境条件、地上部の損傷条件の構造物に対する調査等を行い、地上部の損傷状況、環境条件と地中部の損傷状況との関係や、コアボーリングの分析結果と地中部の損傷状況との関係について整理し、地中部の ASR 損傷に関する調査手法を検討していく予定である。なお、今回の調査では、実際の構造物の深さやかぶり厚等が設計図面と異なっていたため、ボーリング調査を当初の想定どおりには実施できなかった。今後ボーリングによるコア採取法を確立するにあたり、こうした設計図面との不整合への対応方法について整理する必要がある。

## 〔成果の発表〕

本研究成果は、国総研資料としての刊行や、土木学会の投稿論文等にて発表予定である。

## 〔成果の活用〕

本研究成果は、各道路管理者にて実施されている既設橋の維持管理の参考となるものである。



写真-5 フーチング上面のひび割れ状況

# PC道路橋の状態評価手法に関する試験調査

Study of soundness evaluations of PC bridges

(研究期間 平成 19 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室  
Road Department, Bridge and Structures division

室長	玉越 隆史
Head	Takashi Tamakoshi
主任研究官	高橋 晃浩
Senior Researcher	Akihiro Takahashi
研究官	川間 重一
Researcher	Shigeichi Kawama
研究員	春田 健作
Research Engineer	Kensaku Haruta

In terms of maintenance of road structures, it is important to clarify the soundness of structures. However adequate methods to detect abnormality and evaluate soundness have not been established in many kinds of damage in road structures. In the study, we researched the applicability of the impact elastic wave method and the ultrasonic wave method to detect prestress degree of PC structures.

## [研究目的及び経緯]

道路橋のおよそ4割(図-1)に適用されているプレストレストコンクリート(以下、PCと記す。)構造において、プレストレスの導入量はPC構造物の品質を確保するためには欠かせない項目である。

しかし、現状のプレストレス導入量の管理手法は施工時の品質管理のみに頼っており、工事完了後にプレストレス量を確認することは容易ではない。そのため的手法として、例えば、PC構造物完成後の健全性を把握するため実橋載荷実験(写真-1)の実施、構造物の一部破壊を伴う検査手法の実施等が挙げられるものの、精度よく容易に実施できるものとはなっていない。このようなことから残存プレストレスの計測技術は実用化されておらず、構造物完成後に簡易にプレストレスの変状正確に非破壊検で確認できる技術の開発が要請されている。

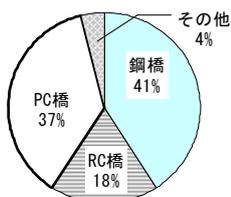


図-1 道路橋に占める橋梁構造の割合



写真-1 載荷実験により健全性を評価している事例

## [研究内容]

### 1) 概要

コンクリート構造物の劣化診断に用いられる非破壊検査手法のうち現状の技術水準で汎用性のある弾性波法(超音波、衝撃弾性波)に着目してプレストレス状態の評価への適用性について実大桁を用いて実験的に検討した。

本調査では対象桁の支間中央部で弾性波の入力と検出を様々(ウェブを貫通する弾性波の検出、コンクリート表面を伝搬する弾性波の検出など)に行い、応力状態の相違が弾性波の伝搬性状等に及ぼす影響について詳細に分析した。

### 2) 調査対象橋梁

対象はポストテンション方式T桁橋(桁長45m、桁高2.5m、コンクリートの設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>)で、PC鋼材の緊張・グラウトが完了した状態で調査を実施した(写真-2)。



写真-2 対象橋梁

[研究成果]

1) 衝撃弾性波の伝搬速度

鋼球打撃による入力波を異なる2点で受信して伝搬速度を測定した。計測状況を写真-3に、計測結果を図-2に示す。支間中央部より桁高方向に4列採取したデータからは、今後精査が必要なばらつきがあるものの、桁の下縁に近づくにつれて弾性波伝搬速度が大きくなる傾向があり、プレストレス状態の相違が反映しているものと考えられた。



写真-3 計測状況

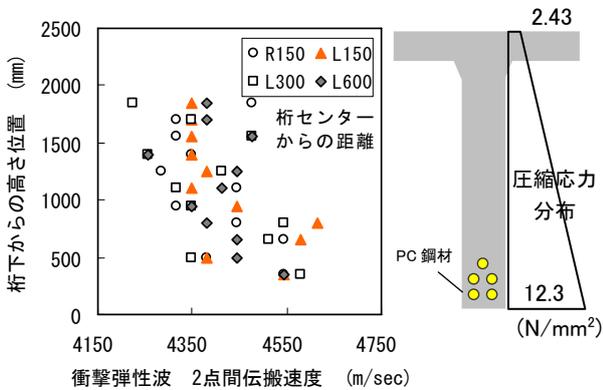


図-2 2点間伝搬速度(衝撃弾性波)

2) 超音波の透過伝搬の特性

コンクリートウェブを貫通する方向に、透過する超音波の伝搬速度に着目した計測結果の分布図を図-3に示す。

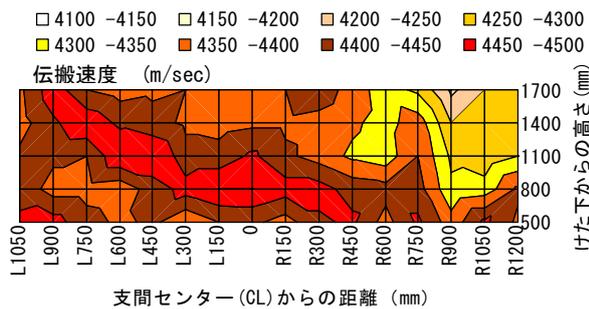


図-3 超音波 透過伝達速度分布

けた高さ方向に超音波透過速度の相違が見られ、プレストレス状態の相違が超音波透過速度に有意な差を生じさせたものと考えられる。ただし、透過法の適用に際しては、RCレーダー探査によりPC鋼材および鉄筋位置を測定して実施しており、PC鋼材が配置されている箇所など、内部に配置されている鋼材配置によって結果が影響されることに留意を要す。

3) 超音波の表面伝搬の特性

超音波端子(40kHz)を用いて一点からの超音波入力を周辺の複数点で受信し、表面伝播速度を計測(図-4:計測状況)した。図-5に桁中心から超音波入力し各受信子の到達時間から各位置での伝搬速度を示す。

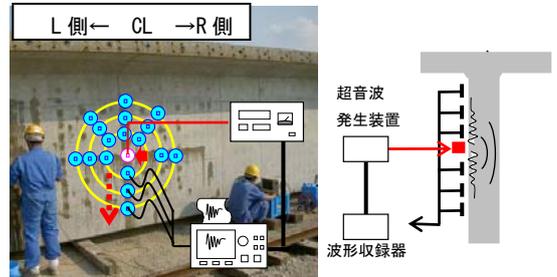


図-4 超音波伝搬速度計測イメージ図

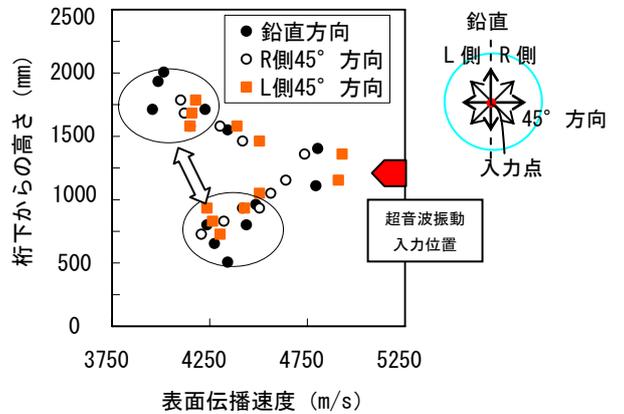


図-5 複数点計測による伝搬速度分布図

試験結果から、部材の応力状態が相違する桁上方向と桁下方向に伝搬する表面伝搬速度の減衰を比較すると、両者で異なる傾向が見られた。このことにより、プレストレスによる応力状態を表面伝搬速度との関係から評価できる可能性があることが分かった。

4) 総括

PC橋のプレストレスによる応力・分布状態の相違が、超音波や衝撃による弾性波による伝播特性を利用することにより、有意な差として検知でき、品質管理手法として適用できる可能性があることが明らかになった。

[成果の発表]

- ・本研究の成果は、国土技術総合研究所報告書や技術論文等で発表する予定である。

[成果の活用]

本調査結果は、PC道路橋の品質管理および健全度評価手法の確立のため活用される

# 道路構造物の安全係数に関する試験調査

Study on safety factors for road structures

(研究期間 平成 19 年度)

室長 玉越 隆史  
Head Takashi TAMAKOSHI  
研究官 石尾 真理  
Researcher Mari ISHIO

主任研究官 七澤 利明  
Senior Researcher Toshiaki NANAZAWA  
研究官 生田 浩一  
Researcher Koichi IKUTA

In order to standardize load factors for reliability based design that will be used for the revised specifications for highway bridges, we studied load factors by simulating probability and degree of respective loads during design service term based on measured load data in the research.

## [研究目的及び経緯]

現在、道路橋示方書の改訂作業において、規定すべき作用の規模や安全率の考え方を、より普遍的で統一的思想で評価するために「部分係数設計法」の導入について関係各機関と連携し、検討を進めている。

確率統計的手法で評価された安全率の概念を導入することで、新しい材料や構造・工法などの提案に対しても適正に性能を評価して採用できる環境が改善するなど、設計基準としての合理性が高まるものと期待されている。

本研究では、主として橋梁設計で考慮すべき作用の規定化について、実測データに基づく数値シミュレーションによって検討を行い、既往の基準の要求水準の再評価と次期示方書の改訂原案のとりまとめに必要な分析を行った。

## [研究内容及び研究成果]

### 1. 検討方針

適正な安全率を確保するために、現行基準による構造物に付与されている安全率等の性能を次期改訂原案の策定に用いる確率統計的手法と既往の自然外力等のデータによって再評価する。さらに安全率の水準など諸条件の変更が橋の性能に及ぼす影響について代表的な橋梁条件に対する数値シミュレーションにより評価し、作用の取り扱い方法や安全係数の設定方法とその値を提案する。

### 2. 自動車荷重（活荷重）の検討

#### (1) 主桁を設計する荷重(L 荷重)

設計供用期間 100 年との関係において現行 L 荷重の確率統計的評価を行うため、実測荷重列を用いた数値シミュレーションを実施した。得られた交通状態（図-1 参照）から 100 万回分載荷状態を取り出し、最大応答値分布を作成し、それを元に正規裾野近似による方

法で設計供用期間 100 年に対応する最大値分布を推定した。図-2 に得られた頻度分布の例を示す。設計供用期間中の最大級の値を非超過確率 95%の期待値とする場合、交通特性に応じて現行設計基準との関係は表-1 のとおりと評価できる。

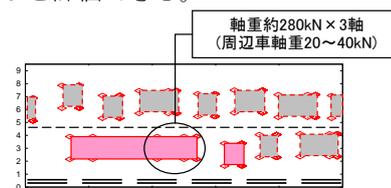


図-1 シミュレーションの最大応答値が得られた交通状態の例

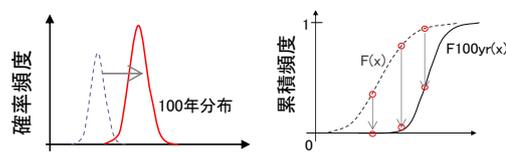


図-2 100 年最大値分布への移行

表-1 現行 L 荷重に乗じる係数 (95%非超過)

①大型車混入率の高い路線(30%以上)	: 1. 4
②大型車混入率が中程度の路線(10~30%)	: 1. 2
③大型車混入率の低い路線(10%以下)	: 1. 1

様々な車両の混入した交通流による影響を荷重として設計で考慮するためには、荷重強度だけでなく載荷方法も合理的なものとしておく必要がある。そこで車線内での車両位置の変化など様々な実交通の特性を反映させた数値シミュレーションを行い載荷方法の相違が結果に及ぼす影響について比較検討を行った。検討では路肩載荷の有無の影響、海外基準での載荷方法（レーン載荷）の影響を考慮した 8 種類の載荷パターン、支間 50m における 2,4,7,9 主桁の単純橋、橋軸方向には支間長 25,50,100,200m 単純及び連続橋の非合成鉸桁と条件を替えて試算を行った。

その結果、橋軸直角方向の載荷方法では、路肩分の重量を車線内に載荷するモデルが、部材耐荷力の安全

率のばらつきが小さくなる傾向があることが分かった。  
 橋軸方向では、大型車混入率による違いを現行基準のように載荷モデルで変えるより荷重強度で差別化の方が統一的で合理的な評価ができる可能性が高いことが明らかとなった。

表-2 検討ケース一覧（載荷方法）

項目	着目点	検討項目	模式図	
			直角方向	軸方向
①活荷重 (現行基準)	直角方向	・大型車の高載状況の調査	全幅 低減載荷	
②活荷重	5.5mの載荷方法に着目	・シミュレーション解析より推定	全幅 全載荷	
③活荷重	路肩の載荷に着目	・路肩走行の状況調査 ・路肩を考慮しない場合の断面力等の比較	路肩なし 低減載荷	
④活荷重			路肩なし 全載荷	
⑤集中+分布荷重	集中+分布荷重	・線荷重と分布荷重との比較 ・シミュレーション解析との比較	全幅 低減載荷	
⑥集中+分布荷重			路肩なし 低減載荷	
⑦活荷重	レーン (車幅) 載荷に着目	・交通状況の調査	レーン 全載荷	
⑧活荷重		・シミュレーション解析との比較	レーン 低減載荷	

(2) 床版及び床組を設計するときの荷重(T 荷重)

T 荷重に関しては、表-3 のケースで、荷重の進行方向に直角な場合 4 径間連続桁、進行方向に平行な場合の解析は単純桁となるような格子モデル (図-3 参照) を用いて試算を実施した。

大型車混入率の高い国道の交通シミュレーションの例において、橋軸方向 12m×床版支間 4.6m では、シミュレーション 5%値と、現行設計基準のとおり設計荷重(T 荷重)を最も不利な応力が生じるように載荷した場合の値との比を算出したところ、車両進行方向と主筋が直角のときは主筋方向が、車両進行方向と主筋が平行のときは配力筋方向が、現行設計基準と比較して大きい値となった。

表-3 検討ケース一覧

モデルの区分	床版支間側の辺長	相対する側の辺長			
		2m	3m	5m	12m
単純版	2m	3m	5m	12m	
2径間	3m	3m	5m	12m	
3径間	4m	3m	—	—	
	6m	3m	—	—	
	10m※	3m	—	—	

注) ※印は、3径間は実施していない

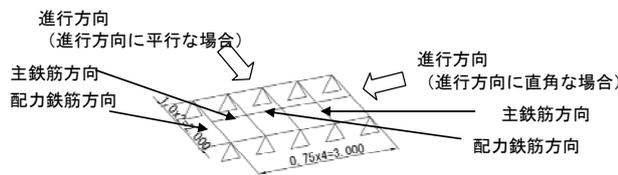


図-3 T 荷重検用格子モデル

### 3. 衝撃の影響

衝撃の影響は、橋面の凹凸、車両の動揺などの影響で車両の静的載荷より部材応答が大きくなることを考慮するものであり、現行基準同様に設計活荷重に係数

を乗じて評価する方針とした。一般には動的増分は静的荷重が大きい条件ほど、複数車両の動的変動など相互にキャンセルされる要因の影響もあって小さくなる傾向と考えられる (図-4)。

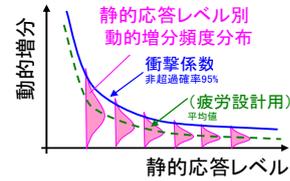


図-4 静的応答レベルと動的増分のイメージ

本研究では静的応答レベルが小さい領域は、実橋計測結果から、動的応答計測 (WIM) 結果を用いて静的ひずみとそれとの差分として動的増分を取り出して比較整理した (図-5)。複数車両の同時載荷状態は実測データが少なく、静的応答レベルが大きい領域は、(1)と同様の数値シミュレーションで載荷車両の軸に動的増分を確率的に与えて再現し、支間長等をパラメータとして検討を行う検討モデルの作成を行った。車軸の動的増分は別途実測した車両応答のデータから作成した (図-6)。

今後作成した数値モデルによる試算と実測データの比較から荷重係数の提案を行っていく予定である。

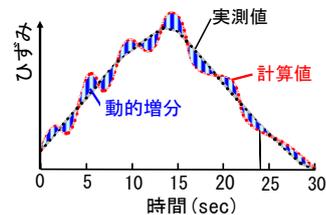


図-5 実測ひずみと計算（静的）ひずみの例

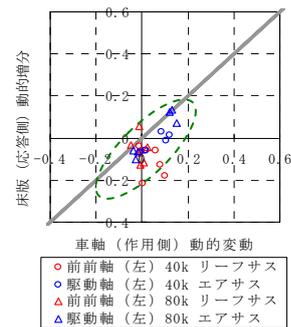


図-6 車軸の動的増分と応答側動的増分の関係例

### [研究の成果]

供用期間を考慮した確率論に基づく設計活荷重及び衝撃係数の設定方法が提案できた。

### [成果の活用]

成果は、道路橋示方書をはじめとする各種道路橋設計基準等に反映する。

# 鋼道路構造物の耐久性評価のための試験調査

Study on durability evaluation of highway steel structures

(研究期間 平成 19 年度)

—道路橋の疲労や腐食に対する耐久性に関する研究—

Study on durability to deterioration and corrosion of highway bridges

道路研究部 道路構造物管理研究室  
 Road Department Bridge and Structures Division  
 主任研究官 大久保 雅憲  
 Senior Researcher Masanori OKUBO  
 研究官 石尾 真理  
 Researcher Mari ISHIO

室長 玉越 隆史  
 Head Takashi TAMAKOSHI  
 主任研究官 市川 明広  
 Senior Researcher Akihiro ICHIKAWA  
 研究官 生田 浩一  
 Researcher Koichi IKUTA

It is important issue to evaluate prescribed durability required to highway steel structures, considering damages such as fatigue and corrosion reported in recent years. We analyzed influence on durability by difference of structural details in terms of the fatigue of steel deck and the corrosion of weathering steel in the research.

## 〔研究目的及び経緯〕

近年、橋梁をはじめとする道路構造物の重大な損傷事例が多数報告される中、鋼道路構造物については、疲労と腐食に対する耐久性の確保と適切な維持管理手法の確立が喫緊の課題となっている。例えば、鋼床版を有する橋梁においては、走行安全性への支障が懸念される疲労損傷事例が報告されており、設計・維持管理両面からの対応が急務となっている。本研究では、疲労損傷が多く報告されている縦、横リブの交差部に着目して、現行基準の妥当性の検証と疲労耐久性向上策を検討するものである。

腐食については、採用が飛躍的に増大している耐候性鋼材を用いた橋梁について、現行基準では考慮していない凍結防止剤の散布や局部環境の影響による環境不適合で異常腐食が生じる事例が報告されている。特に凍結防止剤散布の影響は、その程度や範囲が明確でなく将来深刻な劣化事例が多発する危険性も考えられるため、凍結防止剤散布を前提とした場合の耐候性鋼材の適用条件を明らかにし、新設・既設の両方に対する対策を立案する目的で現況の実測やシミュレーションとその分析による影響評価を行った。

## 〔研究内容と成果〕

### 1. 鋼床版の耐久性検討

図-1 に鋼床版の疲労設計構築に必要な検討項目を示す。19年度には定点载荷試験を実施し、鋼床版の疲労耐久性に及ぼすデッキプレート厚の影響に関する評価を行った。

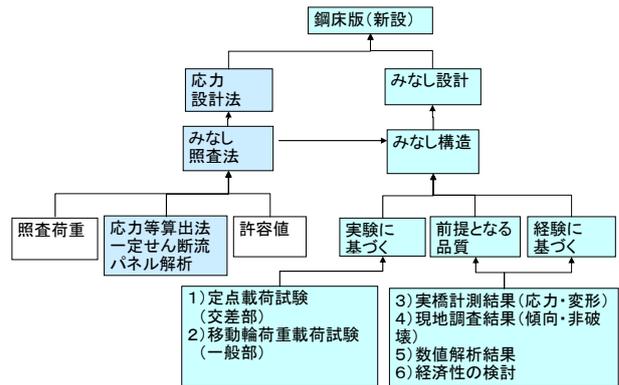


図-1 鋼床版の疲労設計構築に必要な検討項目

### (1) 試験方法

交差部に着目して定点载荷の疲労試験を行った。デッキプレート厚とUリブ厚の異なる供試体(図-2参照)にシングルタイヤを模擬した荷重を200万回まで繰返载荷した際の、応力振幅の推移をもって評価する。

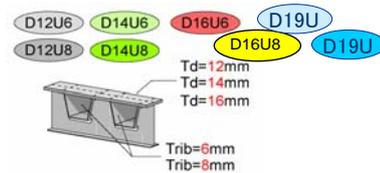


図-2 定点载荷試験供試体

### (2) 試験結果

Uリブ外側のビードから5mmに位置するデッキプレートのひずみ振幅量を図-3に示す。応力振幅はこのひずみ振幅量に比例するが、初期の振幅についてはデッキプレ

ートが厚いほど小さい傾向にあり、き裂発生回数、進展速度とも板厚との相関があるものと考えられる。またデッキプレート厚19mmは、他のケースに比べてき裂の発生回数が顕著に遅い傾向が明らかとなった。

一方、き裂は全てのケースで発生していた。き裂の発生そのものを完全に防止することは現構造では困難であり、あくまでリスク軽減策として、信頼性とき裂発生寿命の相対差による規定の設定が必要である。今後実用条件とのキャリブレーションを行って基準化を図る予定である。

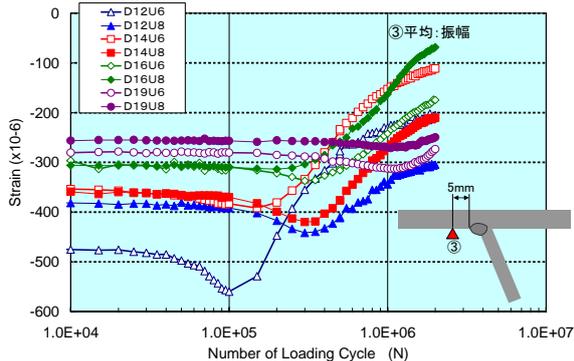


図-3 デッキプレートのひずみ振幅量

## 2.凍結防止剤の影響検討

冬季の凍結防止剤の散布では大型車両等の走行で凍結防止剤が路外相当範囲に飛散することが報告されている。橋梁では路外飛散した凍結防止剤は風の影響を受け、桁の内側に回り込むなど複雑な挙動をすることで様々な部位に付着、堆積し異常腐食の原因となる。本研究では、凍結防止剤散布地域の橋梁の付着塩分量の実測を行った。例えば鋼I桁橋梁では下フランジ上下面などで多く付着し、実際に局部腐食が生じるなど構造毎に傾向が見られた。測定結果の一例を図-4及び表-1に示す。

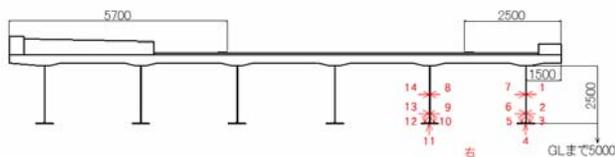


図-4 測定橋梁の断面図

なお、伸縮装置等からの漏水による影響が無い箇所においても付着塩分が確認され、車両から直接路外飛散する塩分の影響が無視できないことが実証された。

車道からの路外飛散挙動をみるため、変動風下の数値シミュレーションを行った。計算結果の例を図-5に示す。計算では凍結防止剤をある初速度で分散飛散させているが、橋梁構造周りの風況によって桁下への回り込みや床版下面への再付着など特徴的な飛散・付着

パターンが現れることが分かった。また地覆端部や床版の張出し長さによっても凍結防止剤の飛散状況が大きく影響されることが確認された。

表-1 付着塩分量の測定結果

測定位置	測点	測定部位	測定結果 [補正後] (mg/m <sup>2</sup> )
P1 付近	1	主桁ウェブ外側面中央	146.1
	2	主桁ウェブ外側面下部	107.2
	3	主桁外フランジ外側上面	130.0
	4	主桁外フランジ下面	416.0
	5	主桁下フランジ内側上面	220.6
	6	主桁ウェブ内側面下部	52.6
	7	主桁ウェブ内側面中央	61.9
	8	主桁ウェブ外側面中央	96.3
	9	主桁ウェブ外側面下部	85.8
	10	主桁外フランジ外側上面	104.7
	11	主桁外フランジ下面	57.2
	12	主桁下フランジ内側上面	159.7
	13	主桁ウェブ内側面下部	84.5
	14	主桁ウェブ内側面中央	90.7

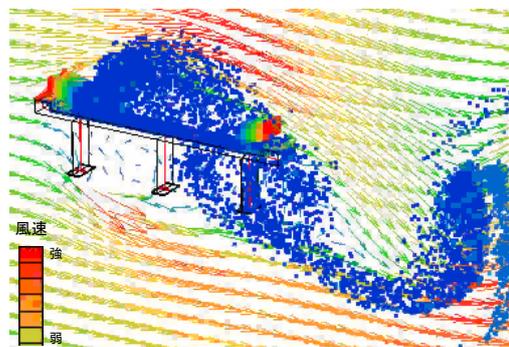


図-5 飛散挙動シミュレーション結果の例

### [今後の課題]

鋼床版の耐久性については、複雑な応力状態と疲労耐久性の関係を定量的に評価することで合理的な設計法の確立や耐久性に優れる新構造の提案が実現するものと考えられる。ひきつづき実験結果や実橋実測結果を数値解析で検証し、より耐久性に優れる構造の提案と現行基準の適用条件の適正化を図っていく必要がある。

凍結防止剤の影響に関しては、付着塩分量を測定した橋梁をモデルにシミュレーションを実施し解析結果と実測値との整合を確認するとともに、橋梁の構造仕様や地形環境（地山近接、他橋との並列）の異なる場合のシミュレーションを多数実施して定量的な適用性評価基準を確立する必要がある。

### [成果の発表]

本研究の成果は、国総研資料としての刊行や土木学会の投稿論文にて発表予定である。

### [成果の活用]

本研究成果は、道路橋示方書をはじめとする各種基準類における検討に反映される。

# 大型車通行に起因する道路構造物の振動評価に関する試験調査

Experimental study of the evaluation of vibration of road structures by heavy vehicles  
(研究期間 平成 19 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室  
Road Department, Bridge and Structures Division  
主任研究官 七澤 利明  
Senior Researcher Toshiaki NANAZAWA  
研究官 石尾 真理  
Researcher Mari ISHIO

室長 玉越 隆史  
Head Takashi TAMAKOSHI  
主任研究官 高橋 晃浩  
Senior Researcher Akihiro TAKAHASHI

In order to establish evaluation method of traffic vibration at the bridge design stage, we measured traffic vibration for existing bridges and surrounding grounds and analyzed vibration propagation tendency from bridges to grounds which depends on characteristics of grounds in the research.

## [研究目的及び経緯]

道路構造物の合理的な設計・施工を目的に、新たな構造形式や新技術の提案が増えつつあり、従来の技術基準のみでは十分に性能が評価できない問題が生じてきている。例えばコスト削減を目的とした新技術の適用に伴う橋梁の長大化や構造の合理化等により、上部構造の振動が従来構造とは異なるレベルで周辺環境に影響を及ぼすことが想定されるが、振動被害を及ぼす可能性についての事前評価の方法、判定基準は確立されておらず、こうした新技術が適切に性能を発揮できることを確実にするために重要な課題となっている。

本研究は、車両の通行に起因する道路橋の振動の影響について分析するとともに、その評価法について検討する。平成 19 年度は、道路橋に付加すべき性能を明確にし、設計時の道路橋の構造(固有の振動特性)への対応が計れるよう、橋梁・地盤の振動モードや卓越振動数に着目して振動測定を分析し、振動を低減するための要因を見極めることを目的として、以下の検討を実施した。

- ①地盤種別、橋脚形式の異なる実橋計測。
- ②橋梁・地盤をモデル化し、振動に影響のあるパラメータ(減衰・振動数など)の分析。

## [研究内容及び研究成果]

### 1. 調査概要

地盤の違いや上部構造振動特性の違いによる振動伝搬への影響を把握するため、これまで測定を実施していないⅢ種地盤の実橋である S 橋及び Y 橋において、主桁中央、橋脚下面および橋脚からの距離をパラメータとした地盤上の振動測定を実施した。従前の調査も含め、測定した振動測定箇所の諸元を表-1 に示す。測定は、周辺の交通量が少なくなる夜間において実施し、入力荷重条件を明確にするために試験車による走行を行った。測定箇

表-1 振動測定箇所の諸元

上部構造形式	鋼製桁				コンクリート桁			
	端部		連続部		端部		連続部	
下部構造形式	単柱	ラーメン	単柱	ラーメン	単柱	ラーメン	単柱	ラーメン
地盤種別	I 種			K橋P7			K橋P3	
	II 種	C橋P14		K橋P11 C橋P16		A橋P11		A橋P9
	III 種	S橋P3	S橋P6	S橋P2	○	○	Y橋P17	Y橋PN2 Y橋PF2

○ 本年度実施項目  
○ 今後の課題  
■ 測定済み

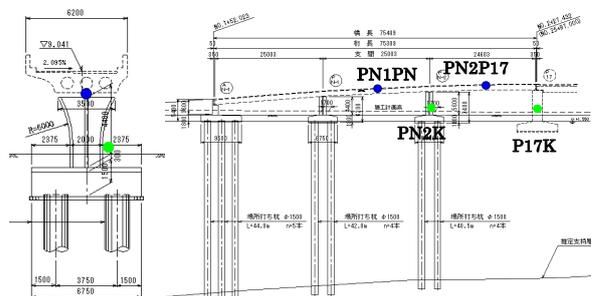


図-1 測定位置(橋梁側 Y 橋の例)

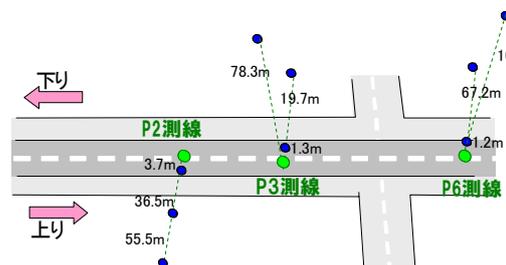


図-2 測定位置(地盤側 S 橋の例)

所は、桁中央及び橋脚下端、地盤上に配置した。測定位置を図-1,2 に示す。

### 2. 測定結果

測定結果を橋梁の条件、地盤種別ごとの距離と振動レベルとの関係で整理したものを表-2 に示す。全体的にどの成分の振動についても鋼桁よりもコンクリート桁の方が振動の減衰が小さく、そのばらつきも小さい。

こうした橋梁の条件が振動レベルを予測する上で重要なパラメータであることがわかる。

一方、地盤種別ごとにみても、鋼桁の橋軸方向、橋軸直角方向の振動レベルにバラツキが大きく、II種地盤であるC橋P16測線及びC橋P14測線は、他の測線に比べて10m以上離れた箇所で振動レベルが増幅している箇所があった。一方同じII種地盤でもK橋P11測線においては距離減衰の傾きが大きい。これまで地盤種別により距離減衰特性が区別できる可能性があると考えていたが、一様に評価できないことが確認された。

### 3. 解析

交通振動が周辺地盤の振動に影響を及ぼす度合いとパラメータとの関係を明確にするために、基礎（または橋脚）が振動して周辺地盤に伝搬する特性を解析的に評価する可能性について検討した。

#### (1) 解析方法

下部構造（橋脚、基礎）と地盤を有限要素モデルで表現し、橋脚天端などに鉛直方向の外力を与える。外力は正弦波により振動数を変化させて入力する（2Hz～5Hz）。

#### (2) 解析モデル

地盤モデルは以下の観点で作成した。

- ・ 4層目（基礎地盤）と1～3層（表層地盤）それぞれのVs（地盤のせん断弾性波速度）を考慮できるものとした。
- ・ 橋脚および基礎はK橋P7橋脚をモデル化した。

#### (3) 解析結果

車両走行時における卓越周期である3Hz正弦波加振時の水平成分加速度最大値分布を図-3に示す。

第1～3層まで均一のモデル(a)と比較して、第1,3層に共振層(3Hz)を挟んだモデル(b)の方が、振動の影響範囲が大きいことが分かった。

#### [今後の課題]

実橋の計測結果について、周波数帯ごとの分析等により、上部構造の振動特性、地盤特性と振動伝搬の関係を詳細に分析していく。また、解析においては地層条件や振動条件を変えるなどして、振動伝搬が生じやすい条件について考察していく。

これらの分析や考察を通じて、交通振動による周辺環境への影響に対する配慮が必要な構造条件、地盤条件の考え方について、引き続き検討を進めていく。

#### [成果の活用]

成果は、今後の設計基準の改訂等に当たっての参考としていく。

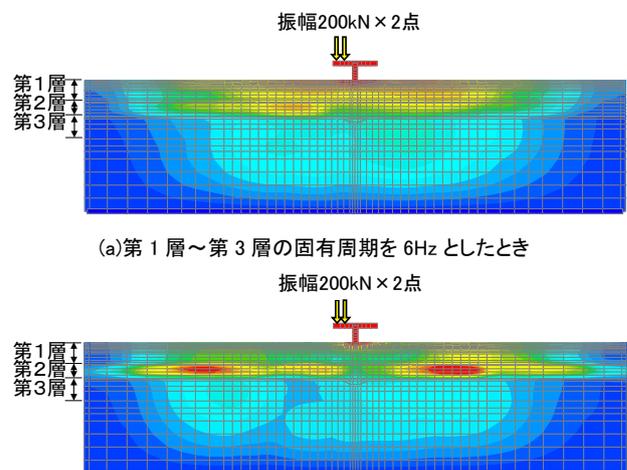


図-3 3Hz正弦波加振水平成分加速度最大値分布

表-2 地盤計測結果

