

## 参考文献

### <第1章 長支間床版の設計手法>

- 1) (社)土木学会：鋼道路橋コンクリート系床版の構造と設計の現状と課題，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月

### <第2章 設計曲げモーメント>

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編・III コンクリート橋編，2002年3月
- 2) (社)土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997年6月
- 3) (社)土木学会：鋼道路橋コンクリート系床版の構造と設計の現状と課題，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月
- 4) 土木学会鋼橋床版の調査研究小委員会：第2分科会報告「床版の構造と設計」，道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000年10月
- 5) 街道浩，渡辺滉，橋吉宏，松井繁之，堀川都志雄：床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について，構造工学論文集Vol.48A，2002年3月
- 6) 玉越隆史，川端篤敬：鋼道路橋床版の設計と留意点—道路橋示方書改訂について—，土木学会第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月

### <第3章 床版の最小厚>

- 1) 国土交通省土木研究所，(財)土木研究センター，民間17社：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その4)，2001年1月
- 2) 国土交通省土木研究所，(財)土木研究センター，民間17社：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その5)，2001年3月
- 3) 横山広，堀川都志雄：道路橋床版の最小厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol.48A(2002.3)，pp.1169-1176
- 4) 松井繁之，江頭慶三，桐川潔：長支間RC床版の疲労設計法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.44A(1998.3)，pp.1117-1124

### <第4章 接合部>

- 1) プレストレストコンクリート建設業協会：PC床版設計・施工マニュアル(案)，1999.5.
- 2) (社)土木学会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，PP.219-242，2000.10.
- 3) (社)土木学会：鋼道路橋コンクリート系床版の構造と設計の現状と課題，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I：共通編，2002.3.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II：鋼橋編，2002.3.

- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III：コンクリート橋編，2002.3.
- 7) (社)土木学会：コンクリート技術の現状と示方書改訂の動向，コンクリートライブラリー79
- 8) (社)土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物〔平成9年版〕，1997.5.
- 9) (社)日本橋梁建設協会：合成床版設計・施工マニュアル，2003.2.
- 10) (財)災害科学研究所：トラス構造のずれ止めを有するハーフプレハブ鋼合成床版設計・施工マニュアル(案)，2002.10.
- 11) 深沢，須藤，小林，浜田：成型型鋼合成床版の輪荷重走行試験，第二回道路橋床版シンポジウム講演概要集，pp.231~236，2000.10.
- 12) 高須賀，末田，田中，上村，長井：突起付きT形鋼ジベル合成床版の連続合成桁への適用性検証，第三回道路橋床版シンポジウム講演概要集，pp.229~234，2003.6.
- 13) 山田，沼田，岡本，窪田，松井：縞鋼板とUボルトをずれ止めに用いた鋼板・コンクリート合成床版の構造特性，第三回道路橋床版シンポジウム講演概要集，pp.79~84，2003.6.
- 14) 藤田，江崎，土居，甲村，柘田：鋼・コンクリート合成床版を適用した長支間床版を有する小主桁橋の送り出し架設，第三回道路橋床版シンポジウム講演概要集，pp.271~276，2003.6.
- 15) 鈴木，宇野，小野部，西土：チャンネルビーム合成床版の実験，第二回道路橋床版シンポジウム講演概要集，pp.257~262，2000.10.
- 16) (社)日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)，1994.5.

### <第5章 ハンチ>

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II：鋼橋編，2002年3月
- 2) 土木学会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000年3月
- 3) (社)土木学会：鋼道路橋コンクリート系床版の構造と設計の現状と課題，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月

### <第7章 防水工>

- 1) 松井繁之：移動輪荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告書，1987年
- 2) 道路橋鉄筋コンクリート床版 防水層設計・施工資料：日本道路橋会，1987年1月
- 3) 紫桃，鹿野，大橋，室井，陸門：床版防水の性能規定型基準と模擬床版による初期性能評価，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003年6月
- 4) (社)日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生II，2003年5月

## 第4分科会報告

## RC床版の維持管理

第 1 章 はじめに	283
第 2 章 RC床版の維持管理と現状	
2.1 各道路管理機関におけるRC床版の健全度判定標準	284
2.1.1 概説	284
2.1.2 国土交通省の床版の損傷度判定標準	284
2.1.3 北海道開発局の床版の損傷度判定標準	285
2.1.4 東京都建設局の床版の損傷度判定標準	286
2.1.5 日本道路公団の床版の損傷度判定標準	287
2.1.6 首都高速道路公団の床版の損傷度判定標準	827
2.1.7 阪神高速道路公団の床版の損傷度判定標準	288
2.2 鋼板接着工法	290
2.2.1 工法概要	290
2.2.2 適用状況	291
2.2.3 補強効果	291
2.2.4 点検のポイント	291
2.2.5 維持管理の課題	294
2.3 縦桁補強工法	295
2.3.1 工法概要	295
2.3.2 適用状況	296
2.3.3 補強効果	296
2.3.4 点検のポイント	296
2.4 上面増厚工法	297
2.4.1 工法概要	297
2.4.2 適用状況	297
2.4.3 補強効果	297
2.4.4 点検のポイント	298
2.5 炭素繊維シート接着工法	299
2.5.1 工法概要	299
2.5.2 適用状況	300
2.5.3 補強効果	300
2.5.4 点検のポイント	301
2.6 下面増厚工法	303
2.6.1 工法概要	303
2.6.2 適用状況	303
2.6.3 補強効果	303
2.6.4 点検のポイント	304

第 3 章 道路橋床版の健全度評価	
3.1 道路橋床版の健全度評価手法の現状	305
3.1.1 床版のひび割れ発生状況に着目した方法	305
3.1.2 床版内のひずみに着目した方法	305
3.1.3 床版の変形に着目した方法	306
3.2 劣化度を用いた道路橋床版の健全度評価手法	306
3.3 道路橋床版の健全度評価に劣化度を用いる際の問題点	306
3.4 道路橋床版の維持管理シナリオにおける健全度評価の改善に関する提案	307
第 4 章 床版下面からの点検方法	
4.1 概説	308
4.2 目視	308
4.2.1 概要	308
4.2.2 デジタルカメラによる点検	308
4.3 赤外線	310
4.3.1 計測原理	310
4.3.2 計測方法	310
4.3.3 評価方法	313
4.4 打音	314
4.4.1 計測原理	314
4.4.2 計測方法	314
4.4.3 評価方法	314
4.5 超音波法	316
4.5.1 原理	316
4.5.2 測定	316
4.5.3 補強床版への適用事例	316
4.6 衝撃弾性波法	317
4.6.1 原理	317
4.6.2 測定	317
4.6.3 衝撃弾性波による床版点検評価適用	317
第 5 章 床版上面からの点検方法	
5.1 概説	319
5.2 FWDの構造と測定原理	319
5.2.1 FWDの構造	319
5.2.2 測定原理	320
5.2.3 測定方法	320
5.2.4 支持桁のたわみ補正方法	321
5.3 適用事例	322
5.3.1 補修効果の評価に活用した事例	322
5.3.2 たわみに基づく劣化度評価	322
5.3.3 ひび割れ密度に基づく劣化度評価	323
第 6 章 おわりに	324

## 第1章 はじめに

現在、わが国では、橋長 15m 以上の橋梁だけでも、約 13 万橋の道路橋が供用されており、こうした膨大な数の道路橋を適切に維持管理することが重要な課題となっている。一般に構造物の寿命は、「物理的寿命」、「経済的寿命」、「機能的寿命」の3つに分類されるが、その中で橋梁の架替要因の一つである損傷に着目すると、床版の損傷による要因が約半数を占めている。

橋梁の床版は、舗装を介して輪荷重などの交通荷重を支持し、この荷重を主構造に伝達させる重要な部材であるとともに、活荷重応力の繰り返し作用が床版の損傷に及ぼす影響も大きい。特に昭和 39 年道路橋示方書で設計された鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、鉄筋量の不足、床版厚の不足、また、近年の車両の大型化および交通量の増大等の影響を受け、床版コンクリートの抜け落ち等の損傷事例が報告され、それ以来、損傷機構の解明や損傷対策に関する調査研究がさかんに行われてきた。

このような経緯を踏まえ、本分科会では、既設 RC 床版の損傷状態に応じた効果的な補修・補強工法の検討について、その対象を補強済み RC 床版まで広げて議論を重ね、その結果をとりまとめた。

第2章では、各道路管理機関における RC 床版の健全度判定標準と代表的な補修・補強工法について整理した。健全度判定標準は、国土交通省、北海道開発局、東京都建設局、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団について整理した。前回の報告書と比較すると、国土交通省における健全度判定標準が大幅に改定されている。

補修・補強工法については、代表的な工法として、鋼板接着、縦桁増設、上面増厚、炭素繊維シート接着、下面増厚について整理した。本節では工法の概要、適用状況だけに留まらず、補強効果、点検のポイントについても記述した。

第3章では、道路橋床版の健全度評価について整理した。RC 床版の損傷機構の解明に関しては、輪荷重走行試験による多数の疲労実験が大きな役割を果たした。これにより疲労強度の特性を示す S-N 曲線が得られ、損傷機構の全容はほぼ解明されたと考えられている。これに伴い、各種補修・補強対策の効果についても明らかになりつつある。

RC 床版の損傷機構を端的に言えば、輪荷重が RC 床版に作用したとき、RC 床版の配力鉄筋断面に作用するせん断力とねじりモーメントにより最初に橋軸直角方向に貫通ひび割れが発生し、次に梁状化した主鉄筋断面がせん断破壊に至るものである。これらの現象は輪荷重を繰り返し受ける RC 床版の役割からも広義の疲労現象と考えることができる。

一方、RC 床版の設計は、道路橋示方書では設計の煩雑さを避ける目的から、床版を等方性の一方向版と仮定し曲げモーメント式を定めている。一方、床版の疲労に対する配慮としては、床版厚の割り増しや鉄筋の許容応力度低減

など行って対処しているにすぎないのが現状である。しかし、床版の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の曲げ剛性はそれぞれ異なるため、実際には異方性を呈すると考えられる。長支間床版になるとこの異方性の影響が無視できず、設計に考慮しなければならぬ。

このように、床版の疲労設計手法は一般に確立されているとは言えず、疲労強度の評価や荷重の考え方を明確にした合理的な設計法の確立が必要である。そこで、RC 床版の健全度評価手法として、①床版のひび割れ発生状況に着目した方法、②床版内のひずみに着目した方法、③床版の変形に着目した方法について整理し、あわせて、道路橋床版の維持管理シナリオにおける健全度の改善に関する一考察として、床版の劣化状況を示す指標としての劣化度を定義することを提案した。

第4章では床版下面からの点検方法、第5章では床版上面からの点検方法について整理した。

RC 床版は補強済みであっても、経年的な劣化により、無補強 RC 床版と同様に新たな損傷が発生する。したがって、「補強箇所は損傷が進行しない」という仮定で種々の問題を扱うことはできないと考えられる。

そこで、新たな点検手法として、「床版下面のひび割れ密度とたわみによる劣化度が使用限界内では相関性が高い」という既存の研究成果に着目して、補強床版についてもその適用性について検討した。床版下面からの点検方法としては、目視、赤外線、打音、超音波法、衝撃弾性波法について整理した。

また、床版上面からの点検では、舗装の動的たわみ測定機の FWD（フォーリングウエイトデフレクトメータ）を用いて RC 床版のたわみ量を測定することにより構造評価する新しい点検手法について記述した。

## 第2章 RC床版の維持管理と現状

### 2.1 各道路管理機関におけるRC床版の健全度判定標準

#### 2.1.1 概説

維持管理の原則は、既存橋梁を安全に利用に供するようにその機能を満足し、それを利用する人々、自動車等の通行に危険を与えないように使用性・安全性をある水準以上に確保することである。そのためには、構造物の損傷をいち早く発見し、損傷がどの程度まで進行しているかをよく把握し、損傷度に応じた対策を講じる必要がある。すなわち、点検→損傷度判定→対策が維持管理のフローであると言える。

床版の点検は、各道路管理機関とも、①日常点検、②定期点検、③詳細点検、および④臨時点検の4種類の点検を基本としている<sup>2)</sup>。

①日常点検：日常的に、路上、路下または検査通路等から床版の異常の有無を確認する点検。床版の損傷がかなり進行している場合は、路上においても舗装面の異常から確認できるが、主には、路下からのひび割れの進展、漏水・遊離石灰の発生、下面コンクリートの欠落などの損傷を確認することで、おおよその床版の安全性と落下等の第三者への影響の有無を判定することを目的として実施している。

②定期点検：定められた期間ごとに、徒歩で床版下面に接近し、目視とたたき点検などで床版の損傷状況を調査する点検で、ひび割れ状況図、ひび割れの挙動の有無、シュミットハンマー等の簡単な点検機器でコンクリート強度を調べるなどの点検方法が用いられている。定期点検では、日常点検に比べて精度の高い、床版の安全性と荷重に対する耐久性の評価を目的としている。

③詳細点検：上記の①、②で異常が発見された場合で④安全性や耐久性などの詳細が不明な場合に、床版のたわみ、ひび割れの深さ、床版鉄筋の配筋状況や腐食の状況など、安全性と耐久性についての最も精度の高い判定を行うために実施する。

④臨時点検：地震等の天災、荷物の落下事故や衝突事故などの突発事象の発生に伴い、臨時に行う点検である。点検方法は、定期点検や詳細点検と同様の手法が用いられることが多い。

床版の安全性や耐久性の判定は、定期点検および詳細点検の結果を整理して行われるが、その判定基準は、各道路管理機関で異なる。ここで取り上げた機関は、国土交通省、北海道開発局、東京都建設局、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神道路公団であるが、前回報告書と比較すると国土交通省の損傷度判定標準が大きく改定されている。以下に各道路管理機関の床版の損傷度判定標準、およびその対策方法を示す<sup>3)~10)</sup>。なお、各道路管理機関における用語の定義は原文のままとした。

### 2.1.2 国土交通省の床版の損傷度判定標準

国土交通省における床版の健全度判定に関する基本的な流れと判定区分を、図-2.1.1、表-2.1.1に示す。

床版の損傷度判定項目としては、①床版のひび割れ、②はく離・鉄筋露出、③漏水・遊離石灰、④抜け落ちを設けている。損傷程度の評価では、損傷の種類に応じて定性的な区分で評価する項目と定量的な数値データで評価する項目がある。これらの評価は、他の変状との組合せや複数の部位、部材の組合せを考慮した総合的な健全度の評価とは異なり、個々の損傷ごとに損傷程度を用いた健全度の評価であることに注意しなければならない。表-2.1.2~表-2.1.4にはコンクリート全般、表-2.1.5には床版ひび割れに関する損傷度判定標準を示す。また、床版の損傷状況を把握したうえで、健全度の判定区分は、表-2.1.1に示すA~Sの7段階に区分している。また、表-2.1.6にはコンクリート床版の損傷原因例と構造物への影響例、表-2.1.7にはコンクリート床版において特に損傷が発生しやすく、点検する上で重点的に着目する必要がある箇所を損傷種類および補修工法ごとに示す。

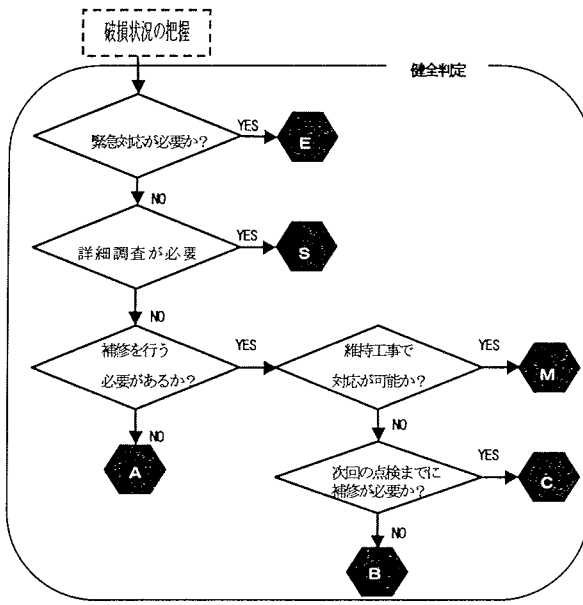


図-2.1.1 国土交通省の健全度判定の基本的な流れ

表-2.1.1 健全度の判定区分

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C	速やかに補修等を行う必要がある。
E 1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E 2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S	詳細調査の必要がある。

表-2.1.2 国土交通省のはく離・鉄筋露出に関する損傷程度区分と評価

区分	一般的状況
a	損傷なし
b	—
c	はく離のみが生じている。
d	鉄筋が露出しているが、鉄筋の腐食は軽微である。
e	鉄筋が露出しており、鉄筋が著しく腐食している。

表-2.1.3 国土交通省の漏水・遊離石灰に関する損傷程度の区分と評価

区分	一般的状況
a	損傷なし
b	—
c	ひび割れから漏水が生じているが、錆汁や遊離石灰はほとんど見られない。
d	ひび割れから漏水が生じているが、錆汁はほとんど見られない。
e	ひび割れから著しい漏水や遊離石灰が生じている。あるいは漏水に著しい錆汁の混入が認められる。

表-2.1.4 国土交通省の抜け落ちに関する損傷程度の区分と評価

区分	一般的状況
a	損傷なし
b	—
c	—
d	—
e	コンクリート塊の抜け落ちがある。

表-2.1.5 国土交通省の床版ひび割れに関する損傷程度の区分と評価

区分	ひびわれ幅に着目した程度	ひびわれ間隔に着目した程度
a	〔ひびわれ間隔と性状〕 ひびわれは主として1方向のみで、最小ひびわれ間隔が概ね1.0m以上 〔ひびわれ幅〕 最大ひびわれ幅が0.05mm以下(ヘアークラック程度)	
b	〔ひびわれ間隔と性状〕 1.0m~0.5m、1方向が主で直行方向は縦、かつ格子状でない 〔ひびわれ幅〕 0.1mm以下が主であるが、一部に0.1mm以上も存在する	
c	〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m程度、格子状直前もの 〔ひびわれ幅〕 0.2mm以下が主であるが、一部に0.2mm以上も存在する	
d	〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m~0.2m、格子状に発生 〔ひびわれ幅〕 0.2mm以上がかなり目立ち部分的な角落ちもみられる	

表-2.1.6 国土交通省におけるコンクリート床版の損傷原因例と構造物への影響例

損傷箇所	代表的な損傷原因の例	懸念される構造物への影響の例
コンクリート床版	・設計耐力不足 ・主桁作用による引張応力の作用 ・乾燥収縮 ・配力鉄筋不足 ・支持桁の不等沈下	・漏水や遊離石灰の進行等

表-2.1.7 損傷種類、補修工法と点検上重点的に着目すべき箇所との関係

損傷種類	着目箇所
漏水及び遊離石灰	滞水環境下の床版、錆汁が認められる床版
床版ひびわれ	輸荷重の通行軌跡にあたる床版、制動荷重の作用する端部床版
その他	鋼橋主桁端部の上フランジと床版界面のはく離(うき)

補修工法	着目箇所
連続繊維シート接着工法	繊維シートのはく離(うき)、漏水、遊離石灰、錆汁
下面増厚工法	ひびわれ、漏水、遊離石灰、錆汁、はく離(うき)
鋼板接着工法	鋼板端部やボルトキャップ部の錆、うき、漏水、遊離石灰、錆汁
床版上面増厚工法	伸縮装置や地覆部近傍のうき、舗装面のひびわれ、ポットホール、床版下面の漏水・遊離石灰

### 2.1.3 北海道開発局の床版の損傷度判定標準

北海道開発局においては、まず、床版の損傷状況を把握するために、床版の損傷実態が表-2.1.8のどのランクにあるかを明確にする。損傷度判定におけるひび割れは、目視できる程度の0.1mm以上を対象としている。また、単位面積(m<sup>2</sup>)当たりのひび割れ量は、調査箇所のひび割れ延長を純断面積で除した値としている。しかし、同表では侵出物やコンクリートの劣化による判定がなされていない。そのため、床版の損傷程度の判定には、表-2.1.8の調査データとこれらの要因とを組み合わせた新たな表-2.1.9の床版の損傷程度を用いており、ここで損傷度をA~Dの4段階に分類している。

床版の損傷に対する対策工法の選定に関しては、床版損傷状況以外の重要な条件、特に交通処理の問題、および対象橋梁の重要性について留意しなければならない。そして、対策を応急的(数年)に行うか、あるいは恒久的(10年以上)に行うか、また補修にするか、それとも補強にするかという基本姿勢を明確にしたうえで、表-2.1.10に示す損傷程度に応じた各種対策工法の適用規準に従って決定するものとしている。なお、表-2.1.10に示した対策工法は、単独で施工されることが少ない。

表一2.1.8 北海道開発局の床版損傷度の判定標準

損傷ランク	一般的なクラックの進行外観状況	クラック程度		ランク (0) に対する床版耐久性	対策の要・不要	備考	
		幅	間隔				
(0)	クラック無し				不要		
初期状態	(1) 一方のクラック (主鉄筋方向または配力鉄筋方向) が散在する。	0.1mm以上	主桁間隔以上	0.5m/m <sup>2</sup> 以下	ほぼ1	不要	
	(2) 一方のクラック (主鉄筋方向または配力鉄筋方向) が散在する。クラック幅の大きいところには遊離石灰、泥状物質が見える。	0.1mm以上	主桁間隔以内	2.0m/m <sup>2</sup> 以下	ほぼ1	場合によっては要	遊離石灰が見えるときは舗装面に注意
中期状態	(3) 二方向のクラック (主鉄筋方向または配力鉄筋方向) が発生する。	0.1mm以上	主桁間隔以内部分的に0.5m程度	2.0m/m <sup>2</sup> 以上3.0m/m <sup>2</sup> 以下	1~1/2程度	場合によっては要	
	(4) クラックが繋がり、亀甲状クラックへと近づく。	0.1mm以上	全体的に0.3~0.5m程度	3.0~5.0m/m <sup>2</sup>	1/2~1/4程度	要	この程度から床版耐久性が著しく低下して行くので注意深い観察が必要。
末期状態	(5) クラックが亀甲状となり、間隔が狭くなる。	0.1mm以上	鉄筋ピッチ程度	5.0m/m <sup>2</sup> 以上	1/4以下	要	
	(6) クラック幅が比較的大きな箇所が多くなり、クラック部コンクリートのすり減り角落ち、そしてコンクリートの小剥離などが見られるようになる。	0.1mm以上	鉄筋ピッチ程度	5.0m/m <sup>2</sup> 以上	1/4以下	要	なんらかの交通規制が必要。
破壊状態	(7) かぶりコンクリートが部分的に落下、床版の変形が非常に大きくなる。路面の陥没があり、床版が崩落寸前の状態となる。	0.1mm以上	鉄筋ピッチ程度	5.0m/m <sup>2</sup> 以上	1/4以下	要	交通上きわめて危険な状態である。
	(8) 完全に床版コンクリートが脱落した状態。	0.1mm以上	鉄筋ピッチ程度	5.0m/m <sup>2</sup> 以上	1/4以下	要	交通止めをし、緊急に応急処置を行う。

表一2.1.9 北海道開発局の床版の損傷程度 (なんらかの対策緊急度)

クラック幅	損傷程度	A	B	C	D	
e	ほとんどがかなり大きめのクラック (0.3~0.4mm程度) であり、ところどころすりへり、角落ちも見受けられる。	D	B	A	A	
d	ほとんどがかなり大きめのクラック (0.3~0.4mm程度) である。	D	C	B	A	
c	ほとんど多少大きめのクラック (0.2mm程度) であるが部分的にかなり大きめのクラック (0.2mm程度) が見受けられる。	D	C	B	A	
b	ヘアークラックの他に、部分的に多少大きめのクラック (0.3~0.4mm程度) が見受けられる。	D	D	C	B	
a	すべて0.1mm以下のヘアークラックである。	D	D	C	B	
ひび割れ密度 (m/m <sup>2</sup> )	0.5以下	0.5~2	2~3	3~5	5以上	
浸出物の有無	a	ひび割れ部に遊離石灰、泥状物質、浸透物などの浸出物が見受けられない。	D	D	C	B
	b	ひび割れ部全体に対し、部分的にうすく (少量の) 浸出物が見受けられる。	D	D	C	B
	c	ひび割れ部全体に対し、部分的に濃く (多量の) 浸出物が見受けられる。	D	C	B	A
	d	ひび割れ部全体にうすく (少量の) 浸出物が見受けられる。	D	C	B	A
	e	ひび割れ部全体に濃く (多量の) 浸出物が見受けられる。	D	B	A	A

A: 緊急に対策が必要, B: できるだけ早期に対策が必要, C: 定期的に観測が必要, D: 対策必要なし

表一2.1.10 北海道開発局の床版の損傷程度に応じた対策工法の適用規準

工法	対策	損傷程度			
		A	B	C	D
打ち換え	床版打ち換え				
補強工法	鋼床版変更				
	鋼板接着				
	縦筋増設				
補修工法	鉄筋増設モルタル吹き付け				
	上面増厚				
	荷重分配横筋増設				
	FRP層接着				
補修工法	グラウト注入				
	防水				

縦線: 恒久的対策, 斜線: 応急的対策

2.1.4 東京都建設局の床版の損傷度判定標準

東京都建設局におけるコンクリート床版全体の総合評価は、式一2.1.1に示すように、①ひび割れ、②コンクリートの品質、③交通条件、④交通環境、⑤施工難易度、および⑥気象条件の各要素の判定ランクとそれぞれの過去の補修・損傷事例をもとに算出した重み係数から算出した点数によって行われている。

表一2.1.11、表一2.1.12に床版パネルのひび割れ判定ランク、および床版全体のひび割れ判定標準を示す。

ここで、ひび割れに関する評価は、まず床版の各パネルのランク分けを表一2.1.11に示した床版のひび割れ判定ランクに基づいて行い、それらを基本として橋梁1径間の全床版に関するひび割れの総括を表一2.1.12に示したひび割れ判定標準によって行うものとしている。また、コンクリートの品質に関する評価は、圧縮強度に基づいて行われている。

表一2.1.11 東京都の床版パネルひび割れ判定ランク

ランク	ひび割れの状態	ひび割れ密度	ひび割れ間隔	ひび割れ幅
a	1 方向ひび割れ (主鉄筋又は配力筋方向) が散在している。	2m/m <sup>2</sup> 未済	1m以内。	0.2mm以下
b	2 方向ひび割れ (主鉄筋及び配力筋方向) が発生している。	2~6m/m <sup>2</sup> 未済	0.7~1mで、部分的に0.4~0.7mの間隔で繋がっている。	0.2mm以上が少しある。
c	ランク b のひび割れ状態で全体的に縦横に発達している。	6~10m/m <sup>2</sup> 未済	全体的に0.4~0.7mの間隔で繋がっている。	0.2mm以上がかなりある。
d	ひび割れは亀甲状となりひび割れ幅の大きい所ではその縁端部で小剥離が生じている。	10~14m/m <sup>2</sup> 未済	0.3~0.4mの間隔で繋がり、部分的には主鉄筋又は配力筋と同ピッチで入っている。	0.2mm以上がほとんどである。
e	亀甲状ひび割れ状態でひび割れ付近のコンクリートが欠けているか又は剥離し陥没の恐れもある。	14m/m <sup>2</sup> 以上	ひび割れ間隔は、0.3m以下	0.5mm以上が多い。

表一2.1.12 東京都の床版全体のひび割れ判定基準

ランク	床版の状況
a1	ランク b が 30%未済であり、ランク c 以上を含まない状態。
b1	ランク b 以上の合計が 50%未済であり、ランク c 以上の合計が 30%未済の状態。
c1	ランク b 以上の合計の 50~70%未済であり、ランク c 以上の合計が 20~40%未済の状態。
d1	ランク c 以上の合計の 30~70%であり、ランク e 以上の合計が 30%未済の状態。
e1	ランク c 以上の合計の 70%以上であり、ランク e 以上の合計が 30%以上の状態。

なお、ひび割れに関する評価においては、調査区間の代表パネルについて、格子密度法によって求めた全ひび割れのひび割れ密度 (m/m<sup>2</sup>) (=ひび割れと橋軸、および橋軸直角方向の格子線とのそれぞれの交点数をそれぞれの格子線の延長で除して算出した橋軸方向ひび割れ密度と橋軸直角方向ひび割れ密度とを足した値) が重視されている。

$$\sum X = 0.5(x_1 + x_2) + 0.1(x_3 + x_4 + x_5 + x_6) \quad (2.1.1)$$

ここに、

- $x_1$ : ひびわれに関する評価
- $x_2$ : コンクリートの品質に関する評価
- $x_3$ : 交通条件に関する評価
- $x_4$ : 交通環境に関する評価
- $x_5$ : 施工難易度に関する評価
- $x_6$ : 気象条件に関する評価

表一2.1.13に上記得点によるコンクリート床版の総合評価、表一2.1.14に判定ランクに基づいた床版損傷原因に対する一般的な対策と工法を示す。

表一2.1.13 東京都のコンクリート床版の総合評価

総合評価	対策	総合ランク
1 未済	良好な状態であり補修の必要はない。	I
2~3	要注意、必要により補修。	II
3~4	できるだけ早い時期に補修、補強。	III
4~5	早急に補強、打換。	IV
5 以上	緊急に補修、補強。	V

表一2.1.14 東京都の判定ランクに基づいた床版損傷原因に対する一般的な対策と工法

総合ランク	床版損傷原因	対策	工法
I	健全	-	-
II	1 外的条件 ・気象条件 (塩害、凍害、その他) ・災害 (火災、地震等)	補修	FRP接着工法 表面劣化防止工法 樹脂注入工法
		補強	鋼筋接着工法 増筋工法 増厚工法 部分打換工法
III~V	2 荷重条件及び構造条件 ・荷重変化及び湿潤条件 の変化 ・疲労損傷	打換	鉄筋コンクリート床版 ユニット・スラブ I形鋼・鋼格子床版 鋼桁版 コンボスラブ
		改築・改良	架替

2.1.5 日本道路公団の床版の損傷度判定標準

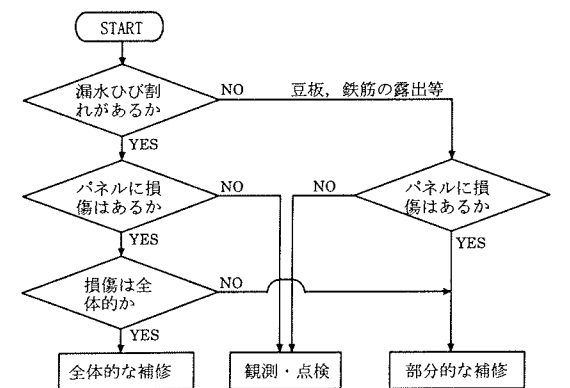
日本道路公団では、まず床版パネル別 (主桁と横桁とで囲まれた範囲) に床版の損傷度判定を行い、その結果からさらにスパン別 (支間×幅員) に床版の損傷度判定を行っている。ここで、床版パネルの損傷度判定法としては、一般的に行われているひび割れ密度による方法が煩雑であることと、ひび割れ密度が床版の損傷度とはあまり関係がないと判断されたことにより、目視によって簡単に判定できる遊離石灰による方法を採用している。また、施工打継目部の床版は、損傷が打継目部のみに集中し鉄筋の破断を誘発させるため、施工打継目部と一般部とを分けて判定している。表一2.1.15、表一2.1.16には、スパン別床版 (支間×幅員) の損傷度判定標準、およびパネル別 (主桁×横桁) の損傷度判定標準を示す。また、図一2.1.2には、床版の補修工法の選定フローを示す。

表一2.1.15 日本道路公団のスパン別床版 (支間×幅員) の損傷度判定標準

損傷度	床版の状況	判定の標準
I	床版パネルの 40%以上に損傷度 B 以上の損傷がある。	損傷が著しい。緊急な補修が必要。
II	床版パネルの 30%以上に損傷度 B 以上の損傷がある。	損傷が大きい。早急な補修が必要。
III	床版パネルの 40%以上に損傷度 D 以上の損傷がある。	損傷が大きくなりつつある。適時の補修が必要。
IV	床版パネルの 30%以上に損傷度 D 以上の損傷がある。	損傷は小さい。適時の補修が必要。
V	床版パネルの 30%未満に損傷度 D 以上の損傷がある。	損傷は小さい。部分的な補修が必要。

表一2.1.16 日本道路公団のパネル別 (主桁×横桁) の損傷度判定標準

損傷度	床版の状況		判定の標準
	遊離石灰を伴っている場合	遊離石灰を伴っていない場合	
A	遊離石灰が2方向に発生しており、両方向ともその間隔が50cm以下で、かつ、遊離石灰が泥水、錆汁で変色している。また、「B」でその進行が早いもの。	剥離: 径50cm以上の範囲にある。 鉄筋の露出: 主鉄筋が50cm以上の範囲に露出している。	損傷が著しい。緊急な補修が必要。
		施工打継目部において、遊離石灰が泥水、錆汁で変色している。	豆板・空洞: 径50cm以上の範囲にある。
B	遊離石灰が2方向に発生しており、両方向ともその間隔が50cm以下で、その色が白いもの。また、「C」でその進行が早いもの。	剥離: 径10~50cmの範囲にある。 鉄筋の露出: 主鉄筋が50cm以下の範囲に露出している。	損傷が大きい。早急な補修が必要。
		施工打継目部において、遊離石灰が発生しており、その色が白いもの。	豆板・空洞: 径10~50cmの範囲にある。
C	遊離石灰2方向に発生しており、片方向のひび割れ間隔50cm以上 (亀甲状となっていない、またはその間隔が大きい)。	剥離: 径10cm以下の範囲にある。 豆板・空洞: 径10cm以下の範囲にある。	損傷が大きくなりつつある。適時の補修が必要。
D	遊離石灰が1方向に発生している。	-	損傷は小さい。定期的な点検が必要。
E	遊離石灰が発生していない。	-	-



図一2.1.2 日本道路公団の床版補修工法の選定フロー

2.1.6 首都高速道路公団の床版の損傷度判定標準

首都高速道路公団の床版の損傷度判定標準を、表一2.1.17に示す。ここで床版の損傷度判定項目には、コンクリートひび割れ、はく離、鉄筋露出、強度低下、汚れ、不良音、漏水、短冊鋼板破損、型枠材損傷などを挙げている。また、図一2.1.3に床版の補修工法選定フローを示す。

表-2.1.17 首都高速道路公団の床版の損傷度判定標準

損傷種別	A	B	C	D	備考
基本概念	交通や第三者への影響を防止するために、緊急の対応を必要とする損傷。	緊急度は高くないが、補修補強や追加調査等の対応を必要とする損傷。	次回点検時まで対応を必要としない損傷。	点検実施の事実を記録	・本体構造物の劣化損傷は、構造物全体の安全性に影響のある損傷(0.7mm)と、構造物全体の安全性には直接影響しないが第三者被害を起す可能性のある損傷(A1)がある。
[コンクリート床版]					
コンクリートひびわれ	①床版のひびわれが亀甲状にひびわられた状態で、コンクリートが剥離または剥離するなどの損傷が著しく、路面陥没等交通に支障を生じることがある場合(A0)が損傷の場合。	床版のひびわれが亀甲状のひびわれ(幅0.1mm以上)が60cm以下の間隔でつながっており、ほとんど遊離石剥離にひびわれがあるいは遊離石質の流出がある場合。	①床版のひびわれがひびわれがある場合。②コンクリート剥離にひびわれがある場合。	ひびわれ等がない場合	・コンクリート床版には、普通コンクリート床版、軽量コンクリート床版、F.Cコンクリート床版、ウレタン樹脂高層、及びそれらに対して行われた床版補強用鋼板やCFシート等を含有し、最近点検及び高層下後歩点検を主な点検とする。
コンクリート欠落、剥離、及び鉄筋露出(※1)	②コンクリート欠落や剥離、または海水により第三者被害を起す可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	コンクリートの欠落、剥離により鉄筋が露出している場合。	コンクリートの欠落、剥離があるが、鉄筋が露出していない場合。	損傷等がない場合	・高層下後歩目視点検では徒歩目視で確認可能な範囲で左記の判定を行う。
コンクリート空洞、豆板、及び鉄筋露出(※1)	③型枠材(コンクリート)の脱落により、豆板、鉄筋が露出する可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	空洞、豆板により鉄筋が露出している場合。	空洞、豆板があるが、鉄筋が露出していない場合。	損傷等がない場合	・高層下後歩目視点検では徒歩目視で確認可能な範囲で左記の判定を行う。
コンクリート劣化、変色、材料強度低下、及び汚れ	④型枠材(コンクリート)の脱落により、豆板、鉄筋が露出する可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	①コンクリートの劣化、変色があり剥離が著しく、材料強度低下がない場合。②変色や汚れが目立ち不快感を生ずる場合。	①コンクリートの劣化、変色があるが、材料強度低下がない場合。②汚れが発生している場合(※2)	損傷等がない場合	・高層下後歩目視点検では徒歩目視で確認可能な範囲で左記の判定を行う。
コンクリート塗布劣化及び汚れ	⑤劣化(カビ、カビのび)が相当範囲に広がっている場合。⑥変色や汚れが目立ち不快感を生ずる場合。	①劣化が発生している場合。②変色や汚れが発生している場合。	①劣化が発生している場合。②変色や汚れが発生している場合。	損傷等がない場合	(※1) コンクリートの欠落・剥離に関しては、床版剥離及び高層下に本切部に着目して点検を行う。床版剥離出部では一方倒ひびわれでも剥離につながる場合があるため特に注意が必要である。また、軽微なコンクリート剥離のひびわれは短期間で剥離につながる場合もあり特に注意が必要である。
不良音、異常音	⑦たたき点検による不良音がある場合。⑧異常音がある場合(異常音に関しては、遡源なく追加調査を行い原因を特定すること)	①たたき点検による不良音がある場合。②異常音がある場合(異常音に関しては、遡源なく追加調査を行い原因を特定すること)	①たたき点検による不良音がある場合。②異常音がある場合(異常音に関しては、遡源なく追加調査を行い原因を特定すること)	損傷等がない場合	(※2) 高層下後歩目視点検では歩行音による異常音に関しては、遡源なく追加調査を行い原因を特定することとする。
漏水、湧水(※3)	⑨ひびわれ部またはコンクリート打継目から漏水がある場合。⑩床版上に湧水がある場合。	①ひびわれ部またはコンクリート打継目から漏水がある場合。②床版上に湧水がある場合。	①ひびわれ部またはコンクリート打継目から漏水がある場合。②床版上に湧水がある場合。	損傷等がない場合	(※3) 第三者被害を起す可能性がある漏水はA0と判断する。
床版補強用鋼板破損	⑪ひびわれ、はがれ、大きな変形がある場合。⑫腐食による発生腐食がある場合。⑬取付金具に損傷がある場合。	①ひびわれ、はがれ、大きな変形がある場合。②腐食による発生腐食がある場合。③取付金具に損傷がある場合。	①ひびわれ、はがれ、大きな変形がある場合。②腐食による発生腐食がある場合。③取付金具に損傷がある場合。	損傷等がない場合	
型枠材脱落	⑭型枠材(コンクリート)の脱落により、豆板、鉄筋が露出する可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	①型枠材(コンクリート)の脱落により、豆板、鉄筋が露出する可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	①型枠材(コンクリート)の脱落により、豆板、鉄筋が露出する可能性がある場合(A0)が損傷の場合。	損傷等がない場合	

2.1.7 阪神高速道路公団の床版の損傷度判定標準

阪神高速道路公団では表-2.1.18 に示す床版の判定区分を踏まえ、未補修床版については表-2.1.19 および表-2.1.20に示す判定標準によってその損傷度判定を行い、図-2.1.4 に示すフローによって損傷に対する補強・補修工法の選定を行っている。

表-2.1.18 阪神高速道路公団の床版の判定区分

判定区分	損傷状況
①	損傷が著しく道路構造物の機能低下を招き、安全かつ円滑な交通の確保に支障をきたす恐れ、または第三者への影響が大であると考えられ、緊急に補修の必要がある場合
A	損傷が著しく、早急に補修する必要がある場合
B	損傷があり、状況に応じて補修する必要がある場合
C	損傷が軽微である場合
OK	上記以外の場合

表-2.1.19 阪神高速道路公団の未補修床版の判定標準

判定区分	A	B	C
点検項目	① 連続した集中ひびわれ、角落ち、ずれが発生し、陥没がある場合。	① 合計0.1m以上の範囲で鉄筋が露出している。	① 0.1m未満の剥離、欠落、空洞がある。
鉄筋露出	② 剥離、豆板、空洞などでコンクリート落下の恐れがある場合。	② 合計長さ50cm以上の主鉄筋が露出している。	② 0.1m未満の剥離、欠落、空洞がある。
漏水および遊離石灰の流出	③ 0.3m以上の範囲で漏水、遊離石灰がある。	③ 合計長さ50cm未満の主鉄筋が露出している。	③ 0.1~0.3m未満の剥離、欠落がある。
その他	④ 0.3m以上の範囲で剥離、欠落がある。	④ 0.1~0.3m未満の剥離、欠落がある。	④ 0.1~0.2m未満の豆板、空洞がある。
	⑤ 0.2m以上の豆板、空洞がある。	⑤ 0.1~0.2m未満の豆板、空洞がある。	⑤ 0.1~0.2m未満の豆板、空洞がある。
	⑥ 0.3m以上の範囲で漏水、遊離石灰がある。	⑥ 0.3m未満の範囲で漏水、遊離石灰がある。	⑥ 0.3m未満の範囲で漏水、遊離石灰がある。
	⑦ 鋼構造物にAランクの腐食を生じさせている。	⑦ 鋼構造物にBランクの腐食を生じさせている。	⑦ 鋼構造物にCランクの腐食を生じさせている。
	⑧ 床版からの浮きがあり、車両通過時に挙動している。	⑧ 床版造間が不良である。	⑧ 端横桁との間にすき間があるが、挙動していない。
	⑨ 床版相互が接触している。		

表-2.1.20 阪神高速道路公団の床版ひび割れ判定標準

ひび割れの種類	判定要素		判定
	平均ひび割れの幅	平均ひび割れの間隔	
二方向	0.1mm 程度以上	40cm 以下	A
		40~60cm	B
		60cm 以上	C
局所的に集中したひび割れ、または局部的に発生した亀甲状ひび割れに対する判定	0.2mm 程度以上	-	A
	0.1~0.2mm 程度	-	B
一方	0.2mm 程度以上	50cm 以下	A
		50cm~1m	B
		1m 以上	C
局所的に集中したひび割れ、または局部的に発生した亀甲状ひび割れに対する判定	0.1~0.2mm 程度	1m 未満	B
		1m 以上	C
		-	A
局所的に集中したひび割れ、または局部的に発生した亀甲状ひび割れに対する判定	0.1~0.2mm 程度	-	A
		-	B

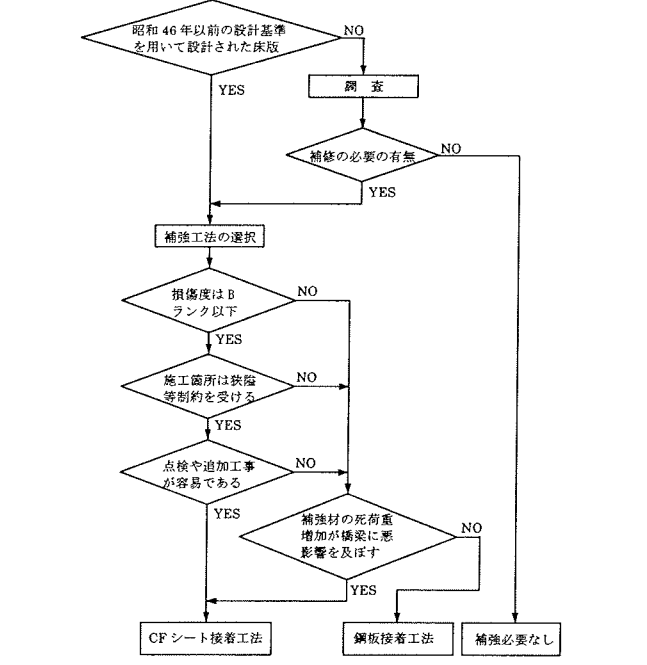


図-2.1.4 阪神高速道路公団の補強工法の選定フロー

ここで、床版の損傷度判定は、①ひび割れ、②はく離、③鉄筋の露出および腐食、④錆の流出、⑤漏水、⑥遊離石灰、⑦豆板・空洞、および⑧その他の損傷を評価項目として実施している。このうち、ひび割れの判定は、1方向ひび割れと2方向ひび割れとに大別して行っている。また、ひび割れ幅、およびひび割れ間隔は、平均値で評価している。床版の補修、または補強対策としては、一般的に、鋼板接着工法、および炭素繊維シート接着工法を採用している。ただし、炭素繊維シートによって補強・補修された床版の劣化速度については未解明であるため、漏水や漏水跡などが見られる場合においては、原則的に樹脂注入を伴う鋼板接着工法による工法を採用することを推奨している。しかしながら、床版のひび割れ注入工、床版上面における防水層の施工、および床版排水孔の設置などにより総合的な防水対策を行う場合においては、炭素繊維シート接着工法を採用できるとしている。

なお、炭素シート接着工法を採用する場合には、炭素シート接着工法が面的な補強効果により床版自体の耐久性の向上を図っている一方、せん断変形に追随しにくい特性を有するため、床版の打継目付近のように局部的なせん断変形による損傷が存在する場合には、補強効果が得られない場合があることに留意しなければならない。

点検判定において損傷度A以上の判定を受けた床版は、そのコンクリート部材の耐力力が非常に劣化している可能性があるため、ひび割れ注入などによる断面修復を行ったうえで、鋼板接着工法により補強を行うことを原則としている。また、抜け落ちに近い損傷が確認されている場合は、全面あるいは部分的な床版打換えを行うことを推奨している。しかし、やむを得ず炭素繊維シート接着工法を採用する場合は、暫定的な床版延命措置として他工法との併用や損傷メカニズム、経済性を加味した総合的な工法選定の検討を行うこととしている。

最後に、補修済床版の判定標準を、表-2.1.21 に示す。

表-2.1.21 阪神高速道路公団の補修済床版の判定標準

判定区分	A	B	C
点検項目	① たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以上の範囲に不良音がある。	① たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以下の範囲に不良音がある。	① たたき点検において、不良音がわずかにある。
不良音	② 鋼構造物にAランクの腐食を生じさせている。	② 鋼構造物にBランクの腐食を生じさせている。	② 鋼構造物にCランクの腐食を生じさせている。
漏水および遊離石灰	③ 鋼板に0.2m程度以上の腐食がある。	③ 鋼板に0.2m程度未満の腐食がある。	③ 鋼板に錆が点在している。
錆および腐食	④ 鋼板全面積(パネル)の1/2以上に錆がある。	④ 鋼板全面積(パネル)の1/2未満に錆がある。	④ 鋼板の一部に錆が認められる。
鋼板の変形	⑤ 鋼板の著しい変形や、ずれが認められる。	⑤ 鋼板の一部に変形が認められる。	⑤ 変形はあるが警備である。

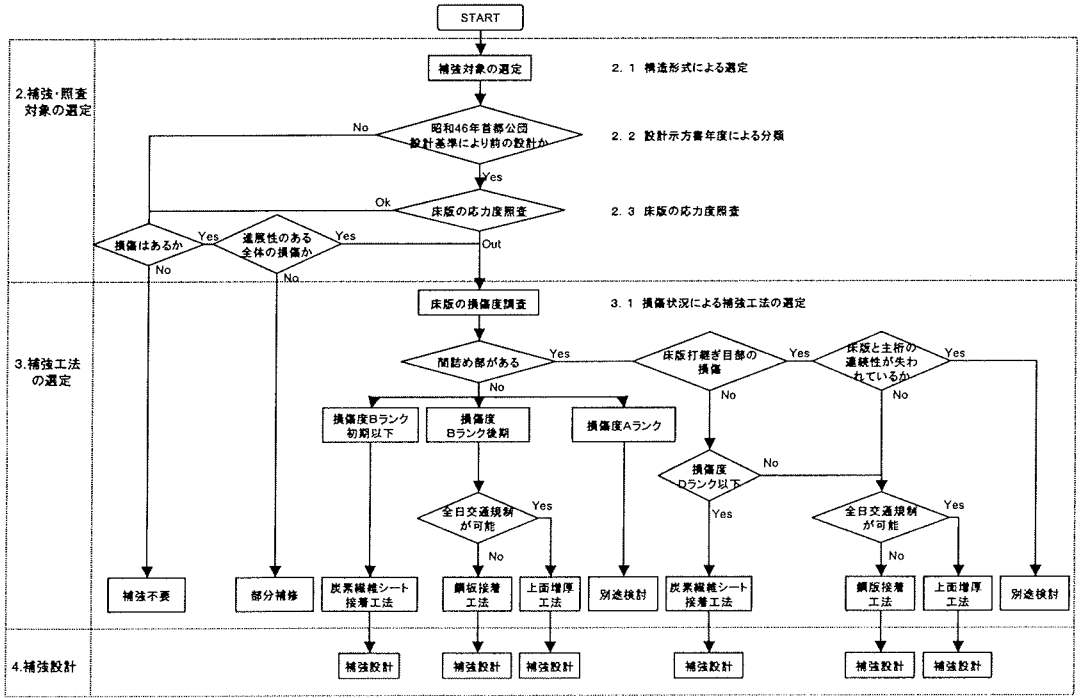


図-2.1.3 首都高速道路公団の補強工法の選定フロー

## 2.2 鋼板接着工法

### 2.2.1 工法概要

鋼板接着工法は、床版下面に鋼板（例、SS400 t=4.5mm）をアンカーボルトで固定し、鋼板周囲をシール後に床版との間に設けたすき間（例、4mm）にエポキシ系樹脂を注入して、既存の床版と接着一体化させる工法であり、鋼とコンクリートの合成効果により、活荷重に対して床版耐荷力を向上させるものである。本工法の特徴としては、①床版の一部を部分補修することができる、②ひび割れ面への樹脂注入も併せて施工できる、③コンクリート破片の落下を防止し、第三者被害を防止できる、④施工時に本線上の交通規制を必要としない、などがあげられる。

図-2.2.1に本工法の概略図、写真-2.2.1～2.2.6に工程写真を示す。

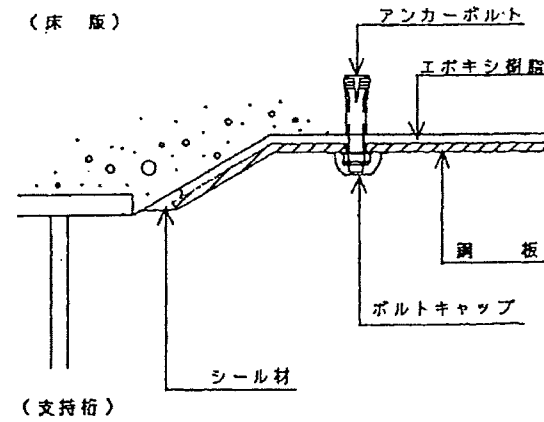


図-2.2.1 鋼板接着工法概略図

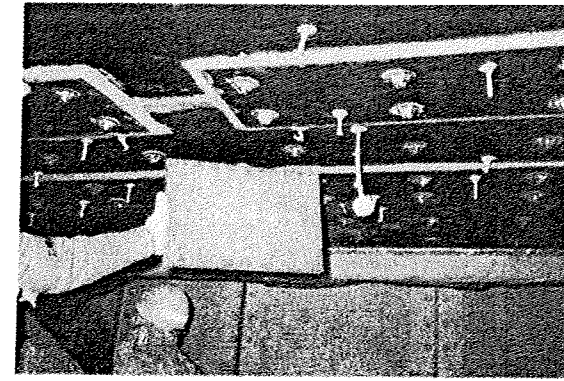


写真-2.2.5 樹脂注入状況  
可使時間内に使用する量のエポキシ樹脂を混合した後、鋼板の低い方よりグラウトポンプで圧力注入を行う。

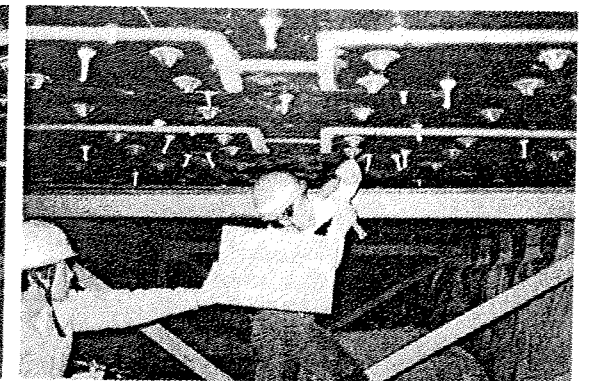


写真-2.2.6 注入パイプ処理状況  
注入材硬化後に注入パイプを切断除去した後、鋼板面の塗装を行う。

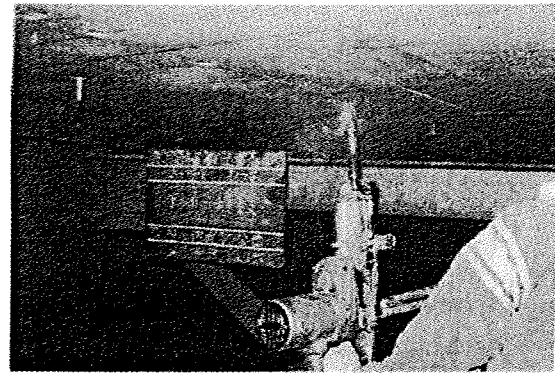


写真-2.2.1 コンクリート穿孔状況  
鉄筋にあたらぬようにハンマードリルで穿孔し、ホールインアンカーの打ち込みを行う。同時にアンカー位置、鋼板形状寸法取りを行う。

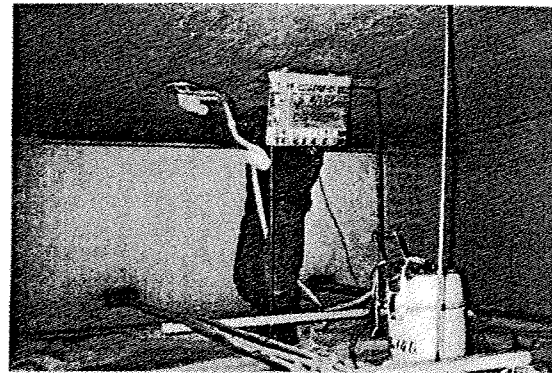


写真-2.2.2 コンクリート面不陸処理状況  
コンクリート面の不陸処理を行い、遊離石灰、塵埃、などをディスクサンダーで除去する。



写真-2.2.3 鋼板取り付け状況  
鋼板接着面をシンナーで清掃した後、鋼板取り付けボルトで固定する。

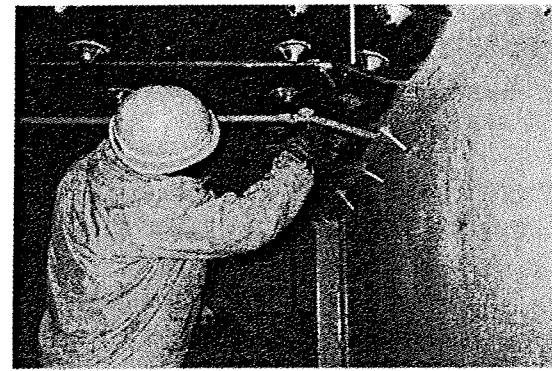


写真-2.2.4 シール材充填、注入パイプ取り付け状況  
鋼板の周囲にシール材を充填し、注入ポンプの取り付けを行う。また、エア抜きパイプの取り付けを行う。

### 2.2.2 適用状況

当該工法は昭和45年頃から採用されはじめ、道路橋において多くの実績がある。阪神公団では鋼桁のRC床版の全パネル数約12万パネルに対して、約6万パネルの補強に適用されている。

### 2.2.3 補強効果

道路橋RC床版の代表的な劣化機構は、活荷重の繰返しによる疲労である。鋼板接着補強工法は、この疲労により低下したRC床版の性能回復ならびに劣化進行の抑制を目的として採用された補強工法であるが、これまでに実施された疲労試験や応力解析結果等の各種調査結果によれば、鋼板接着補強工法の補強効果および補強後の疲労特性に関して以下の知見が得られている。

- (1) 補強効果に関して
- ① 鋼板接着工法は、RC床版の曲げ剛性を大きく（3倍強）向上させる<sup>1)</sup>。その結果、床版の疲労寿命は著しく伸び、一例では補強前床版の200倍～2,000倍に達している<sup>2)</sup>。
  - ② 鋼板接着工法は、ひび割れ損傷がせん断力が支配する領域まで進行した床版についても補強効果が期待できる<sup>1)</sup>。しかし、ハンチ部や鋼板端部でのせん断耐力の向上は期待できない<sup>2)</sup>。
- (2) 補強後の劣化進行に関して
- ① 鋼板接着補強後における劣化進行パターンは、次のように想定される。
    - ・鋼板はく離の発生およびその範囲の拡大
    - ・コンクリート内部における斜引張りひびわれの進行
    - ・床版上面でのコンクリートの砂利化
    - ・アンカーボルトの破断
    - ・最終的に床版は押し抜きせん断破壊または支点端部でのせん断破壊に至る

したがって、点検は鋼板のはく離や漏水、錆の流出に着目すればよいと推察される<sup>1)</sup>。

- ② 鋼板のはく離は、鋼板端部や鋼板継目部などの不連続部から発生し、荷重の繰返しによりアンカーボルトを包み込むように進行する<sup>1)</sup>。
  - ③ 活荷重たわみは破壊寸前まで顕著な増加を示さない<sup>3)</sup>。
  - ④ 鋼板接着工法による補強効果は、補強前の損傷状態にあまり影響を受けない<sup>4)</sup>。
- (3) その他
- ① 鋼板のはく離は、床版剛性の低下には直接結びつかない。一例では、はく離が床版全面積の2/3に達しても、床版は十分な合成効果を有していたとの報告もある。なお、これはアンカーボルトが合成効果保持に寄与しているものと考えられている<sup>2)</sup>。
  - ② アンカーボルトは、鋼板のはく離および斜引張りひびわれの進行を抑制する<sup>2)</sup>。

### 2.2.4 点検のポイント

鋼板接着補強後のRC床版の維持管理は、表-2.2.1に示すような点検項目と判定区分を用いて、床版下面から行うのが一般的である<sup>5)</sup>。具体的には、足場もしくは高所作業車上からハンマーを用いた鋼板のたたき点検による不良音の検出、目視による漏水および遊離石灰、錆および腐食、鋼板の変形を確認して健全度を判定している。

#### (1) 損傷事例<sup>6)</sup>

補修済み床版の目視およびたたき点検により、一部の床版で接着不良音や鋼板端部の腐食、シール部分の縁切れなどが発見されている。たたき点検で不良音を発する箇所の鋼板をはがして調査すると床版と鋼板の間には樹脂が十分充填されているが、樹脂と床版もしくは鋼板とはく離現象が見られ、これが不良音発生の原因と考えられる。

表-2.2.1 補修済み床版の判定基準の例

損傷形態		判定
不良音	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以上の範囲に不良音がある。	A
	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以下の範囲に不良音がある。	B
	たたき点検において、不良音がわずかにある。	C
漏水および遊離石灰	鋼構造物に、Aランクの腐食を生じさせている。	A
	①漏水、遊離石灰の著しい流出がある。 ②鋼構造物に、Bランクの腐食を生じさせている。	B
	漏水、遊離石灰がわずかにある。	C
さびおよび腐食	①鋼板に0.2㎡程度以上の腐食がある。 ②鋼板全面積（パネル）の1/2以上にさびがある。	A
	①鋼板に0.2㎡未満の腐食がある。 ②鋼板全面積（パネル）の1/2未満にさびがある。	B
	鋼板にさびが点在している。	C
鋼板の変形	鋼板の著しい変形や、ずれが認められる。	A
	鋼板の一部に変形が認められる。	B
	変形はあるが軽微である。	C
シール部の離れ	シール部の一辺を超える範囲に進行性のはく離がある。	A
	シール部の一辺にわたり、はく離がある。	B
	シール部の一部にはく離、またはひびわれがある。	C

判定区分

- A：損傷が著しく、早急に補修する必要がある場合
- B：損傷があり、状況に応じて補修する必要がある場合
- C：損傷が軽微である場合

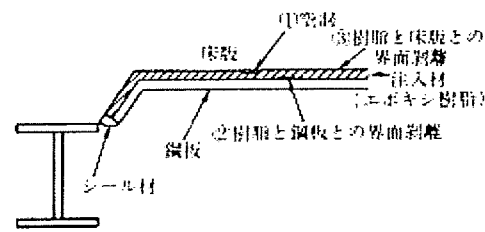


図-2.2.2 接着不良箇所の概念図

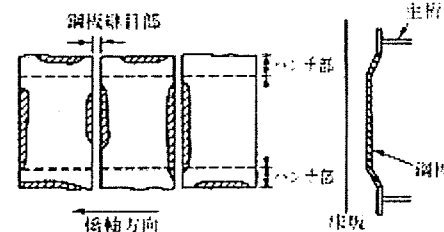


図-2.2.3 はく離箇所の多い箇所

接着不良は、①樹脂充填不足による空洞、②鋼板と樹脂の界面におけるはく離、および③樹脂と床版の界面におけるはく離によるものが考えられる。調査結果の一例を示すと①のタイプは調査の結果1カ所もなかった。②のタイプは鋼板面に水分が進入し、鋼板を発錆させることによるはく離で、鋼板継ぎ目部やハンチ部での発錆が多い。鋼板継ぎ目部は橋軸方向の鋼板不連続部で、接着層のせん断応力および鉛直応力ともに応力集中の結果、継ぎ目部からの鋼板はく離を起し、活荷重の繰り返し作用によって、はく離面積が徐々に広がる。さらに水の供給により錆面積も拡大する。接着不良箇所と発錆が大体一致している箇所は、このタイプであると思われる。③のタイプの原因として考えられることは、樹脂注入時に床版下面が湿っていた場合で、樹脂硬化後の界面付着強度が不足したためにはく離が生じたものと考えられる。

「不良音」（鋼板のはく離）、「漏水、遊離石灰」の損傷事例を写真-2.2.7～2.2.13に示す。

1) 「不良音」（鋼板のはく離）

鋼板接着補修済床版に対する疲労試験結果では、鋼板のはく離はハンチ部や鋼板の継ぎ目部から進行しているが、実橋の補修済床版では必ずしもハンチ部や鋼板継ぎ目に集中しておらず鋼板の広い範囲に分布しており、パネル全面に不良音が確認されるパネルも見られる。



写真-2.2.7 鋼板はく離（不良音箇所の分布の一例）



写真-2.2.8 鋼板はく離（不良音箇所の分布の一例）

2) 「漏水、遊離石灰」について

a) 箱桁張出部床版……耳桁及びブラケット上フランジ部  
このタイプでは、箱桁張出部床版の耳桁またはブラケットの上フランジより漏水が見られる。漏水箇所の大半は地覆部直下であり、雨水が滞留しやすい位置となっている。損傷は、路面に滞留した雨水が乾燥収縮などによるひび割れから床版下面に流出しているものと考えられる。

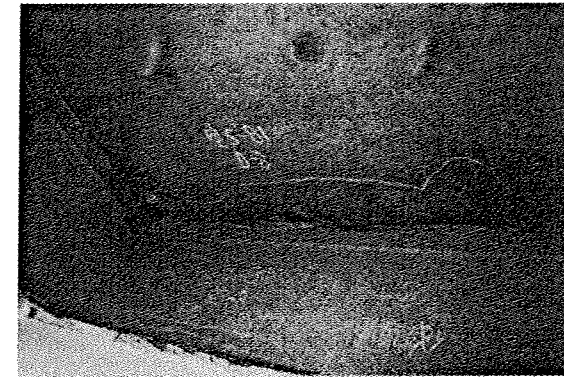
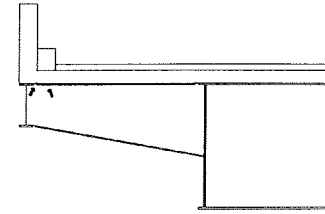


写真-2.2.9 漏水による鋼板の錆の状況

b) I桁支間部床版……中央分離帯直下主桁上フランジ部  
中央分離帯直下に位置する主桁上フランジ部から漏水している。中央分離帯部も地覆部同様雨水が滞留しやすい構造であり、同箇所での漏水は一般の床版においても頻繁に見られる損傷である。この損傷も a)タイプと同様に、路面に滞留した雨水が乾燥収縮などによるひび割れから床版下面に流出しているものと考えられる。

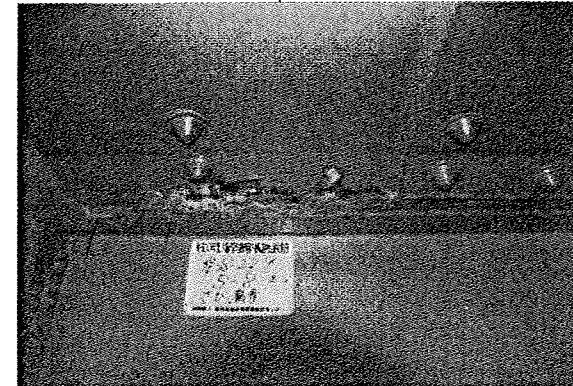
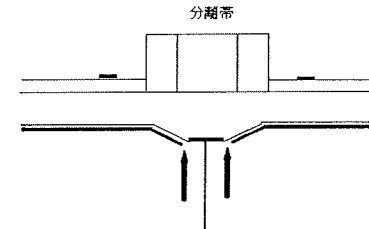


写真-2.2.10 漏水による鋼板の錆の状況

c) 排水管または電気配管引出部

地覆または分離帯部での排水管あるいは電気配管の床版下面引出部から漏水が見られる。この損傷は鋼板接着補修済床版に限らず床版全般に共通して見られる。

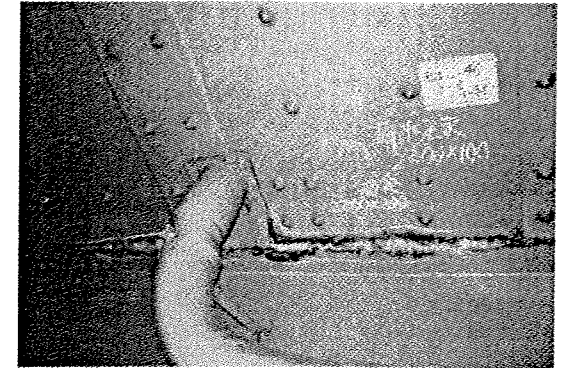


写真-2.2.11 漏水による鋼板の錆の状況

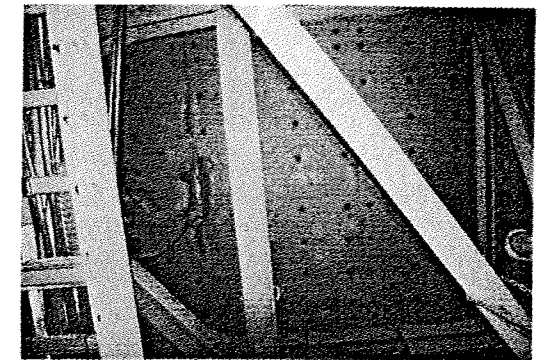


写真-2.2.12 漏水による鋼板の錆の状況

d) 箱桁張出部床版……主桁上フランジ部  
下図に示すような、片勾配を有する非合成箱桁の上フランジより漏水している。漏水箇所周辺の補強鋼板にはく離は見られない。損傷は横断勾配の下流側で著しく箱桁上フランジ上部に侵入した雨水が、上フランジを伝って流出しているものと考えられる。

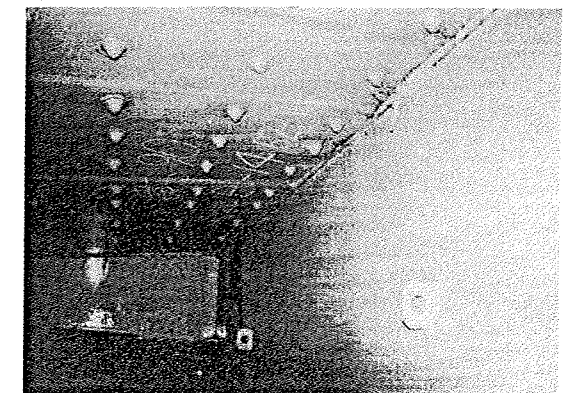
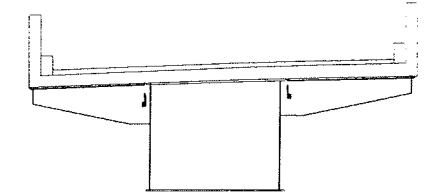


写真-2.2.13 漏水による鋼板の錆の状況



## 2.2.5 維持管理の課題

鋼板接着工法により補強したRC床版の損傷メカニズムや安全性能の評価および再補修工法については、未だ確立されていないのが現状であり、損傷の判定基準、点検手法、再補修工法など合理的な維持管理を行うための検討が必要である。

## 2.3 縦桁補強工法

### 2.3.1 工法概要

昭和30年代後半から40年代前半にかけて、重交通を支える鋼橋のコンクリート床版の陥没事故が顕在化した。これが契機となって、既設床版の補強方法についての研究が進められ、その対策の一つとして、縦桁増設工法が開発された。本工法は、既設の主桁（縦桁）間に新たな縦桁を増設することで既設床版の支間を短縮し、主に床版に発生する曲げモーメントを減少させ床版の曲げ耐力を向上させるもので、主に既設橋梁の上部構造が鋼I桁および鋼箱桁の場合に適用されている<sup>1)2)3)</sup>。（図-2.3.1）

本工法の補強設計の基本方針としては、以下の2項目が挙げられる。

- 1) 設計荷重作用時の部材断面の応力度照査を行う
- 2) 部材の設計に用いる断面力は、通常、弾性理論により算出する。この際、床版支間方向の曲げモーメントは、支持桁の剛性の違いなどを考慮する。

具体的な設計のフローは以下の3段階により行う。

- 1) 補強後の床版支間方向の曲げモーメントの算出
- 2) 床版支間方向の付加曲げモーメントを算出
- 3) 床版支間方向の床版応力度、増設縦桁の応力度及びたわみの照査

また、これらの検討のあとで、床版支間直角方向の補強の必要性を検討し、必要な場合は短冊鋼板の接着により補強を行う。なお、本工法では、既設の床版の支間に新たに1本もしくは2本の縦桁を増設することが一般的である。また、増設する縦桁の支持材として既存の横桁が利用できる場合は、それを利用し、対傾構の場合には、横桁を新たに設置することが一般に行なわれている。

縦桁増設工法の施工は、大きく3段階に分けられる。

第1段階では、補強すべき床版の損傷調査のあとで、床版面を清浄する。これは、縦桁を所定の位置にセットした後、最後に縦桁の上フランジ上面と床版面との隙間に樹脂を注入するためである。

第2段階では、新設の縦桁を設置するために既設の横桁に補強材を取り付ける。（写真-2.3.1）

第3段階では、主桁補強材のスカーラップや工事用足場の設置のため、吊りピースに反力をとらせ、チェンブロックを使用して縦桁を所定の位置にセットする。（写真-2.3.2）

その後、樹脂を注入して縦桁と床版の密着性を確保する。（写真-2.3.3）

この工法の主な利点は、

- ① 路下からの施工のため交通規制を伴わず施工が可能である。
- ② 橋梁・高架橋の維持管理の面からみると縦桁増設後の床版の変化を継続して観察することができる。

これに対して、主な欠点は、

- ① 既設橋梁に添架物がある場合には、縦桁の増設、横桁の取替えが困難な場合がある

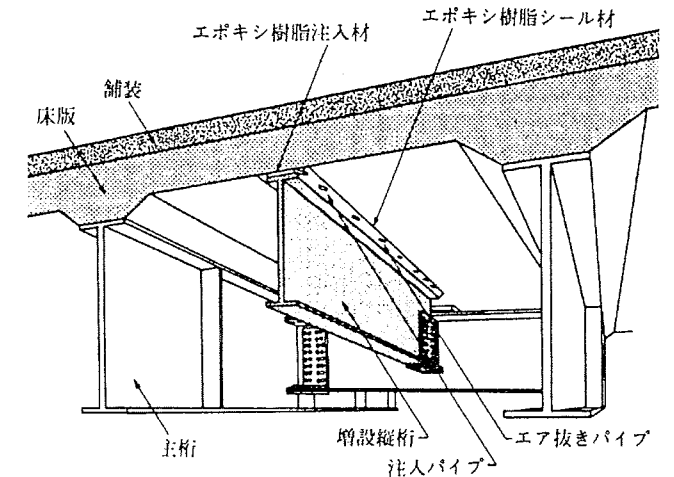


図-2.3.1 縦桁補強の概念図



写真-2.3.1 横桁（既設）への補強材設置状況

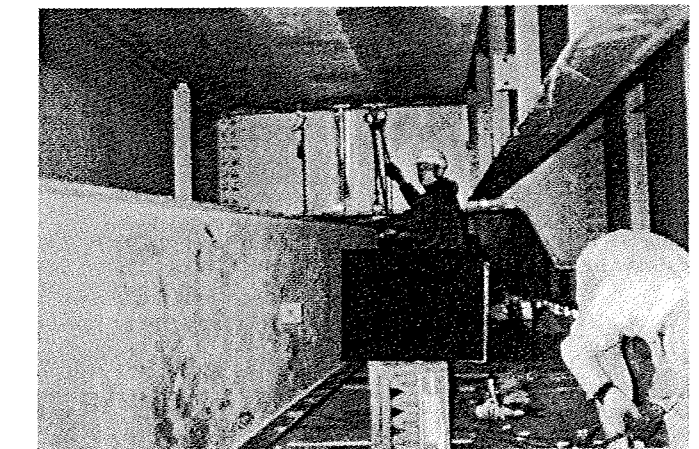


写真-2.3.2 縦桁設置状況

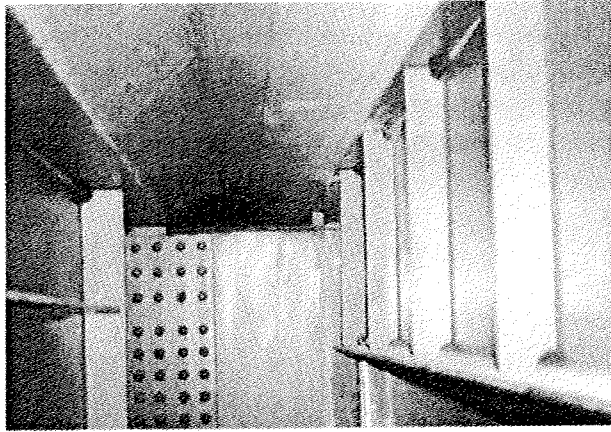


写真-2.3.3 縦桁増設工法施工後

### 2.3.2 適用状況

本工法は、損傷が進展し貫通ひび割れが形成されている床版に対しては、押しめきせん断耐力を増加させる効果は少ないため、大きな補強効果は期待しにくい。したがって、損傷が軽微な床版に対して適用することが望ましい。

### 2.3.3 補強効果

昭和 50 年代に本格的に採用されるために行なわれた静的試験、定荷試験（疲労試験）の試験結果<sup>4)</sup>では、

- ①縦桁増設工法の断面性状は、重ね梁作用と合成桁作用との中間にあるが、ひずみ分布は、平面保持をしていない。
- ②縦桁の増設位置が自動車走行位置にあるかどうかは補強効果に大きく影響する。
- ③実験は多くのクラックが入った状況で行ったため、その補強効果は計算値と比較して小さかったが、損傷度が軽微な床版に対して用いれば損傷を遅延させる効果が期待できる。

また、同時期に床版の定位置荷試験と走行荷重荷試験により縦桁増設の効果が確認されている<sup>5)6)</sup>。ここで得られた知見では、

- ①定位置荷試験では、実物大の床版、モデル床版ともにひび割れは、荷重位置を中心に放射状に発生し進展する。また、静的破壊パターンは、実物大供試体、モデル床版ともにコンクリートのパンチング破壊である。
- ②モデル床版の走行試験では、ひび割れは亀甲上に発達し、無補強床版や剛度の小さい縦桁を補強した床版では、比較的少ない繰返し数の荷重段階で主鉄筋方向の貫通ひび割れが生じ、この貫通ひび割れは荷重回数の増加に伴い磨り減り、角落ち等に至ることが明らかとなった。
- ③縦桁の補強効果は、床版のたわみ制御、主鉄筋応力の改善の面で大きな補強効果を示し、使用する縦桁剛性が

が大きいほど一般的にその効果も大きいと言える。

- ④配筋筋応力については、縦桁と床版は当初、合成効果を発揮し、主桁作用により床版コンクリートには圧縮力が生じ版作用による引張力が相殺される傾向がある。しかしこの傾向は荷重繰返し数の増加につれて主桁作用が徐々に低下し、版作用による応力が卓越する。いずれにしても、縦桁補強工法の配筋筋応力への補強効果はあまり明確には把握できない。

さらに縦桁補強と鋼板接着工法を併用した供試体に対して静的破壊試験も実施されている。これによれば、

- ①縦桁増設および鋼板接着併用による補強は、縦桁補強のみのものと比較して破壊耐力の向上が確認された。また、縦桁本数が 2 本配置されることにより破壊領域が限定され、破壊面積が減少することも明らかとなった。
- ②縦桁増設補強および鋼板併用によって、床版のたわみは減少する。床版鉄筋応力も、応力改善に対する補強効果が確認された。

その後、輪荷重走行試験により縦桁増設による補強効果が確認されている<sup>7)</sup>。

### 2.3.4 点検のポイント

本工法の適用可否を判断するためには、床版の性状を観察し、ひび割れの開閉、上下方向の動きの有無を観察することが必要である。これらの現象が観察された場合には本工法の採用を見合わせた方が望ましい。

補強完了後は、床版の性状の変化とともに増設した縦桁、横桁等の腐食状況についても点検を実施する必要がある。

なお、床版の下面を補強材料で覆わない本工法は、補強後の床版の性状変化を確認しやすいことが他の工法と比較して有利な点である。

## 2.4 上面増厚工法

### 2.4.1 工法概要

床版上面増厚工法は、既設床版コンクリートの上面を切削後、切削面を研磨し、鋼鉄維補強コンクリートの打設を行い、新旧コンクリートを一体化させ増厚を行うもので、主に押抜きせん断に対して床版を補強する工法である。

(図-2.4.1) また、鉄筋補強上面増厚工法は、増厚コンクリートに補強鉄筋を配置し、曲げ耐力の向上を図る工法である。(図-2.4.2) 以下に各工法の特徴を記述するとともに、ここではこれらを総称して上面増厚工法という。

上面増厚工法の施工は、一般車両の通行を確保し、車線規制により実施されることが多く、規制時間短縮の観点から、一般的に超速硬セメントが使用され、材料供給を含むすべての作業が本線上で実施されている。

なお、過去に報告された上面増厚後の損傷原因は、既設床版に内在するひび割れ等に起因するものが多いことから、既設床版コンクリート上面の切削後に行われる「たたき点検」は床版表面の浮きや劣化状況を判定するため重要であると考えられる。

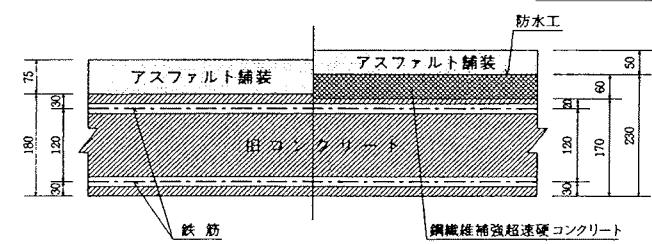


図-2.4.1 床版上面増厚工法

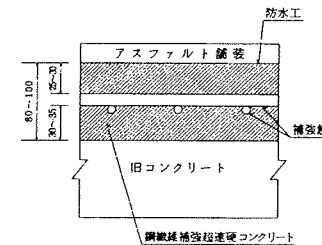


図-2.4.2 鉄筋補強上面増厚工法

#### (1)床版上面増厚工法の特徴

薄い RC 床版の曲げ耐力と押抜きせん断力の向上に有効であり、特に床版の最終破壊形態である押抜きせん断破壊に対する補強効果に優れている。また、床版の補強効果だけでなく橋全体の剛性が高まり、主桁たわみの減少や対傾構取付部等の局部応力の緩和にも有効である。

#### (2)鉄筋補強上面増厚工法の特徴

主に連続橋の中間支点や張出し床版部の負の曲げ耐力の向上に有効であり、新旧コンクリートの付着により応力を伝達し、全体を一体断面としての補強効果が期待できる。また、床版の押抜きせん断に対する補強効果も兼備しているとともに主桁支間部の正の曲げモーメントに対しても有効高が増加するため、効果が期待できる。

### 2.4.2 適用状況

上面増厚工法は、アメリカで行われていたコンクリート舗装版の付着型オーバーレイ工法を参考とし、日本での施工環境や条件を考え合わせ、昭和 53 年に鋼橋 RC 床版の補強対策として、初めて名神高速道路の醒ヶ井高架橋で人力による施工が行われた。その後、使用材料、施工機械および新旧コンクリートの一体性等について実施工や試験を積み重ねながら、施工規模の拡大と工法の確立を図ってきた。また、設計施工マニュアル<sup>1)</sup>も整備されている。

### 2.4.3 補強効果

鋼橋 RC 床版に関しては、現在までに多くの調査・研究によりその損傷機構が明らかにされている。上面増厚工法は、曲げひび割れの進展から押抜きせん断破壊に至る過程で、旧コンクリート上面のぜい弱部を取り除き新コンクリートを打設し一体化する工法であるため、曲げ耐力と押抜きせん断耐力の向上が期待できる。以下に各工法の主な効果を記す。

#### (1)床版上面増厚工法

- ① 浸透水によるすりみがき作用を受けにくい床版となるため大幅に寿命を延ばすことができる。増厚による疲労寿命は、松井らの論文<sup>2)</sup>によると大きな効果が確認されており、さらに鋼鉄維補強コンクリートは内部ひび割れを鋼鉄維が拘束するため、同厚の RC 床版より疲労寿命が延びると報告されている。
- ② 床版の有効厚が大きくなるため、せん断耐力の向上ばかりか、曲げ耐力の向上効果も大きい。
- ③ すりみがき作用によると考えられる旧コンクリート上面のはく離損傷についても、上面増厚工法は対応が可能である。
- ④ 橋梁全体の剛性向上による活荷重たわみの減少と活荷重応力の低減が期待できる
- ⑤ 床版自体の剛性向上による対傾構および取付部周辺の活荷重応力の緩和が期待できる。

#### (2)鉄筋補強上面増厚工法

- ① 新旧コンクリートが十分に付着・一体化し、理論どおりの曲げ補強効果が期待でき、鉄筋の降伏応力時まで一体性が保持されていた。(静的荷試験の結果より)
- ② 設計で考慮すべき活荷重による発生応力の 30% 余裕を見込んだ振幅に対し、200 万回の繰返し荷重を実施しても、打継界面の付着切れは発生せず、付着・一体化は保持されていることが判明した。(動的荷試験の結果より)
- ③ また、200 万回繰返し荷重後でも曲げ補強効果は低下することなく理論どおりの効果が持続していることが明らかになった。(動的荷試験後の静的荷試験結果より)

## 2.4.4 点検のポイント

上面増厚工法の施工は、一般的に通行車線の確保のため、橋軸方向に増厚コンクリートの打継目を設けている。これにより橋軸方向の増厚コンクリート打継目は、増厚コンクリート施工時にフィニッシャーの端部となるため、締固め不足になりやすいこと、橋軸直角方向においては乾燥収縮が最大になること、舗装の打継目の近傍となるため水が浸透しやすいこと、および輪荷重作用位置になること等により、構造上の弱点となる。

よって点検の着目点としては、橋軸方向の増厚コンクリート打継目近傍における舗装面のひび割れの有無、降雨後の床版下面からの漏水の有無、降雨後の舗装（増厚コンクリート）打継目近傍の比較的広範囲にわたる湿潤状態の有無などが挙げられる。

なお、上記の状態が確認された場合は、今後さらに水の浸入等の要因により進行することが予想されるため、進行状況を追跡観察し、過度に進行しない時期に損傷の範囲を限定させ補修補強する必要がある。

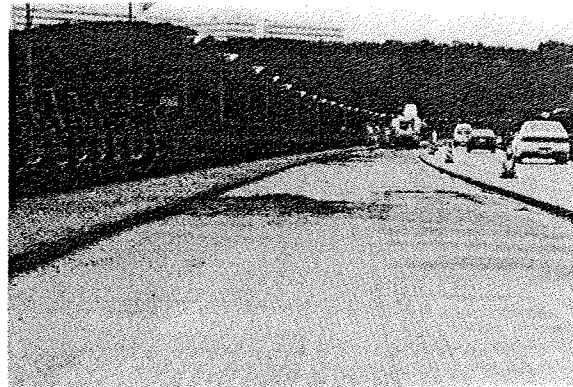


写真-2.4.1 アスファルト路面およびコンクリート切削工

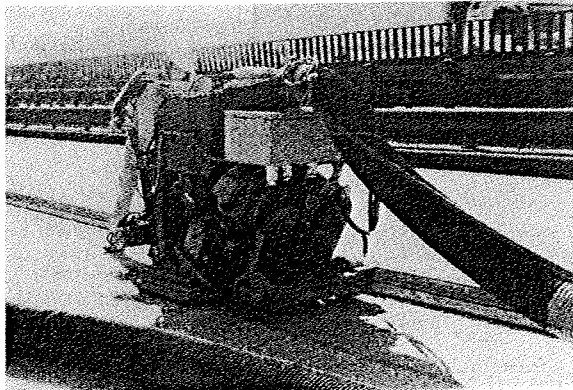


写真-2.4.2 研掃工



写真-2.4.3 鉄筋工（鉄筋補強上面増厚工法の場合）

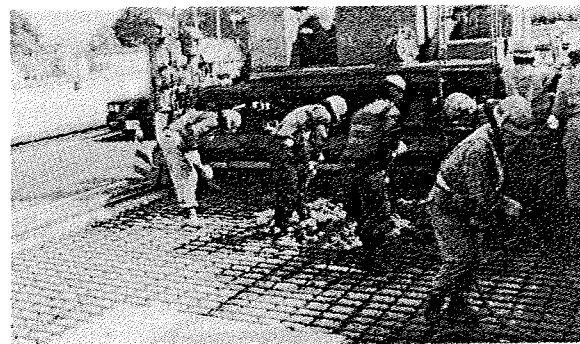


写真-2.4.4 繊維補強超速硬コンクリート工

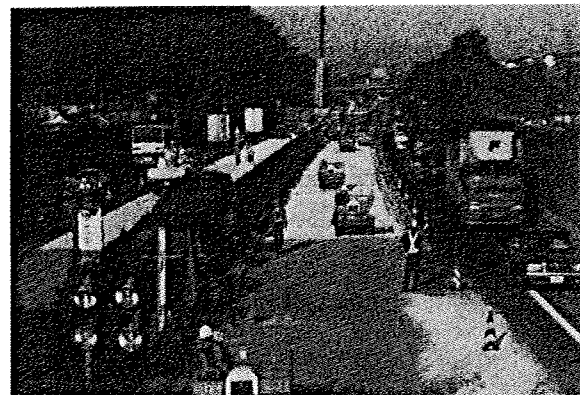


写真-2.4.5 全体施工状況

## 2.5 炭素繊維シート接着工法

### 2.5.1 工法概要

炭素繊維シート接着工法は、炭素繊維を一方方向に配列したシートを床版の引張応力作用面にエポキシ樹脂などの接着剤を含浸させながら接着し、床版コンクリートと一体化する工法である。炭素繊維シート接着工法の標準断面を図-2.5.1に、施工手順を写真-2.5.1に示す。

この工法では、曲げひび割れの開口挙動を拘束し、たわみや鉄筋の応力度を低減し、床版の疲労耐久性を向上させる効果がある。炭素繊維シート接着工法は、RC床版の補強で多数の施工事例があり、各機関で設計施工指針などの技術基準の作成が行われている。近年、アラミド繊維シートの利用についても研究がはじめられている。

本工法は、鋼橋およびコンクリート橋いずれのRC床版に対しても利用されている。適用範囲は、床版支間中央部の補強が主であるが、張出床版など主桁上の負曲げモーメントに対する補強に適用された例もある。

炭素繊維シートは、主として曲げモーメントに対して引張材として機能する。炭素繊維シート自体のせん断剛性は小さいので、RC床版の静的押し抜きせん断耐力の向上に対する効果は小さいものと考えられるが、20%程度耐荷力が向上したとする報告もある<sup>1)</sup>。

本工法の設計は、設計荷重に対して鉄筋、コンクリートの応力度が許容応力度以下になるように炭素繊維シートの補強量を算定する許容応力度法による方法と、輪荷重走行試験などにより実験的に床版の延命効果を把握して補

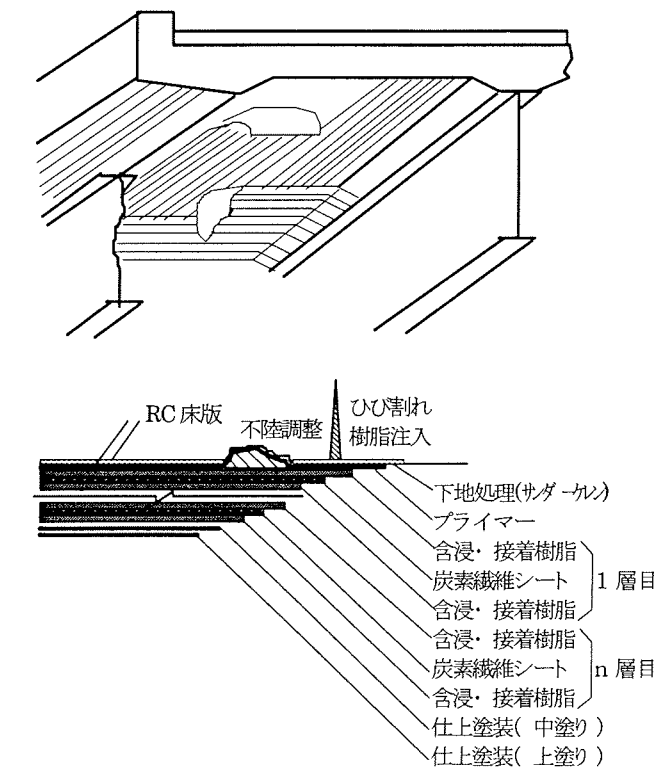


図-2.5.1 炭素繊維シート接着工標準断面図

強量を設定する手法がある。輪荷重により床版下面に生ずる引張ひずみは、大きくても数100 $\mu$ 程度であり、鉄筋や炭素繊維シートの疲労破断により床版が破壊に至る可能性は少なく、一般に押し抜きせん断タイプで破壊する。そのため補強効果は、連続繊維シートの引張耐力よりも引張剛性EAに依存すると考えられており、引張剛性により補強量を規定する方法が一般的に採用されている。

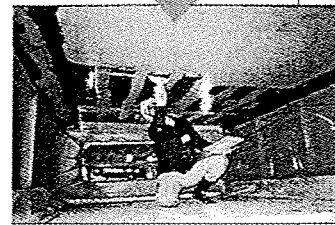
また工法の適用範囲の判定も重要である。実験的には、通常の炭素繊維シート接着工法では、補強前の床版の劣化



①下地処理  
サンダーケレン



②プライマー塗布  
プライマー樹脂塗布



③不陸修正  
樹脂パテ塗布、  
施工面の平坦化



④炭素繊維シート接着  
含浸接着剤下塗り  
炭素繊維シート貼付け  
含浸接着剤上塗り



脱泡



⑤仕上  
塗料塗布

写真-2.5.1 炭素繊維シート接着工法の施工手順

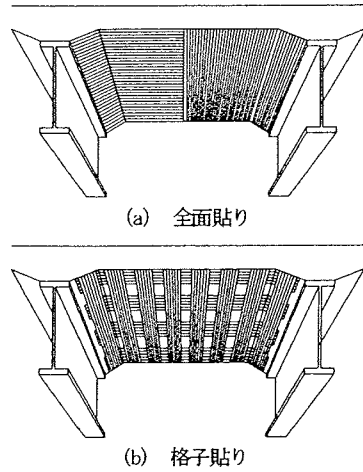


図-2.5.2 炭素繊維シートの接着方法<sup>4)</sup>

表-2.5.1 炭素繊維シートの種類

種類	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	繊維目付量 g/mm <sup>2</sup>
高強度型	245	2900-3900	200-600
中弾性型	350-450	2400-2900	300-450
高弾性型	540-640	1900	300

度が補強効果に大きな影響を及ぼしたことはないようである。しかし本工法は、原理的に曲げや、ひび割れ開口の拘束に対して効果を示すため、床版の変形を抑制すると考えられる。但し床版の劣化が過度に進行して貫通ひび割れが多数発生し、床版コンクリートのブロック化により版としての連続性が失われ面外のせん断変形が生じるような床版に対して、どの程度まで適用できるかは今後の実験成果によらなければならない。

## 2.5.2 適用状況

1990年頃に一方向性の炭素繊維シートが開発されてRC床版の補強に試験的に適用され始めた。その後、道路橋の技術基準の改訂に伴い、設計荷重の増加に対応する補強策としても用いられるようになった。

1998年に建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会の共同研究報告書として設計施工指針(案)<sup>2)</sup>が発刊された。この指針(案)では、補修および補強を行う場合の標準的な炭素繊維シートの補強量を示している。耐荷力の向上を目的としない補修の場合には、高強度型炭素繊維シートをひび割れに直交する方向に1層ずつ接着することを標準とした。補強を行う場合には、従来の許容応力度法によらず輪荷重走行試験の結果に基づき、標準補強量として主筋方向・配力筋方向の各方向に炭素繊維シートの引張剛性が82kN/mmとなるように接着することが定められ、一般国道や地方道での適用が増加した。

また阪神高速道路公団では、鋼板接着工法等、従来の補強工法が適用困難な箱桁内などの狭い部分をもつ床版に対して1998年ごろから採用された。輪荷重走行試験などによる検討に基づき、中弾性型炭素繊維シートを主筋方

表-2.5.2 炭素繊維シートの物性

種類	厚み (mm)	引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張り弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
GM	0.167	3 930	2.3×10 <sup>5</sup>
HM 1	0.143	3 000	4.7×10 <sup>5</sup>
HM 2	0.143	2 970	6.5×10 <sup>5</sup>

注) CFシートの物性は硬化体としての実験値である。

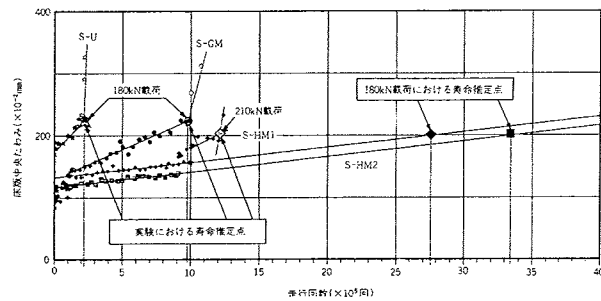


図-2.5.3 床版中央活荷重たわみからの疲労寿命推定<sup>6)</sup>

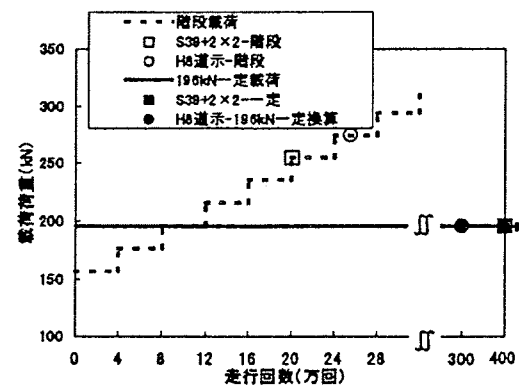


図-2.5.4 階段載荷の結果および載荷方法<sup>8)</sup>

向・配力筋方向に各1層接着することを標準仕様とした<sup>3)</sup>。

首都高速道路公団では、2000年ごろからコンクリート橋のRC床版の補強に用いられるようになり、当初は高強度型の炭素繊維シートを主筋方向・配力筋方向に各2層接着していたが、経済性を考慮して中弾性型炭素繊維シートを主筋方向・配力筋方向に各1層と変更された。さらにその後、輪荷重走行試験による検証を行い補強後の維持管理の観点や床版内の滞水を防ぐ目的で、図-2.5.2に示すように炭素繊維シートに間隔を開けて格子状に接着する方法を採用している<sup>4)</sup>。

## 2.5.3 補強効果

炭素繊維シート接着工法で補強したRC床版の輪荷重走行試験が各所で行なわれ、炭素繊維シートで補強することによりRC床版の疲労耐久性が向上することが報告されている<sup>1),4),5),6),7)</sup>。星島らは、炭素繊維シートのヤング係数をパラメータとして炭素繊維シート補強床版の輪荷重走行試験を実施した。その結果、炭素繊維シートのヤング係数が高く補強材の引張剛性EAが高い方が疲労寿命延長の効果が大きいとしている(図-2.5.3)。

松尾<sup>7),8)</sup>らは、昭和39年道示床版を炭素繊維シートで補強した供試体の階段載荷および一定荷重載荷による輪

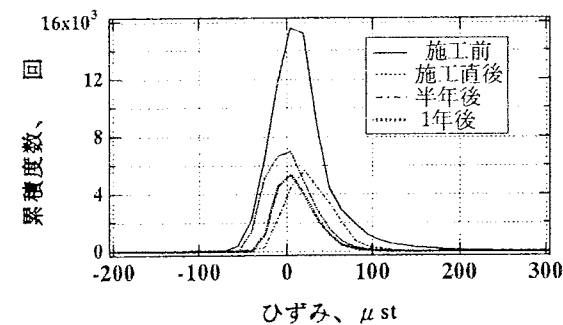


図-2.5.5 ヒストグラム測定結果例(主筋ひずみ)<sup>9)</sup>

荷重走行試験を建設省土木研究所において行っている。

階段載荷試験では、炭素繊維シートの種類や貼付け枚数の影響について検討を行い、高強度型の炭素繊維シート(ヤング係数 $2.4 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , 目付 $300 \text{g/m}^2$ )を主筋方向×配力筋方向に各2層接着した場合に補強効果が最も高かったとしている。また一定荷重による輪荷重走行試験の結果、初期損傷(2方向のひび割れ損傷が進行し一部貫通ひび割れが見られる程度)を与えた床版に、炭素繊維シート(ヤング係数 $2.4 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , 目付 $300 \text{g/m}^2$ )を主筋方向×配力筋方向に各2層接着した場合、炭素繊維シートで補強した床版は無損傷の平成8年道示による床版と同等程度の疲労耐久性を有することを報告している(図-2.5.4)。

また実橋で炭素繊維シート補強の施工前後での床版の応力度測定および追跡調査が行なわれている。図-2.5.5は、補強前、補強直後、1年後までの通常交通荷重下での7日間の主鉄筋ひずみの累積頻度を示したものである。補強により鉄筋ひずみが減少し、累積頻度のカウント数は補強前の1/2程度まで減少し、1年後においてもその効果が持続していた。このように炭素繊維シート補強により既設鉄筋の活荷重応力度の低減が図られること、追跡調査でもその補強効果が持続していることが確認されている。

## 2.5.4 点検のポイント

炭素繊維シート接着工法による床版補強において、施工中あるいは施工後の供用期間中に懸念される変状としては、コンクリートと炭素繊維シート間の浮き、膨れの発生(以下総称して、「はく離」と呼ぶ)および進展があげられる。施工中のはく離の発生原因としては、下地処理不足による段差、コンクリート表層でのエアホール内の空気膨張、樹脂の塗りむら、含浸不良などが考えられる。これらのはく離は、連続繊維の種類によらずガラス繊維やアラミド繊維シートでも発生する可能性がある。施工時の接着不良については、施工中あるいは施工完了時に目視や打音検査によりはく離の有無について確認し、樹脂注入や不良部の切除・再接着などにより補修するのが一般的である。

施工後における供用中のはく離の発生および進展については、炭素繊維シート接着工法が実橋に適用されて経過年月も浅いことから、現在までのところほとんど報告されていない。はく離の発生原因としては、供用中の繰返し

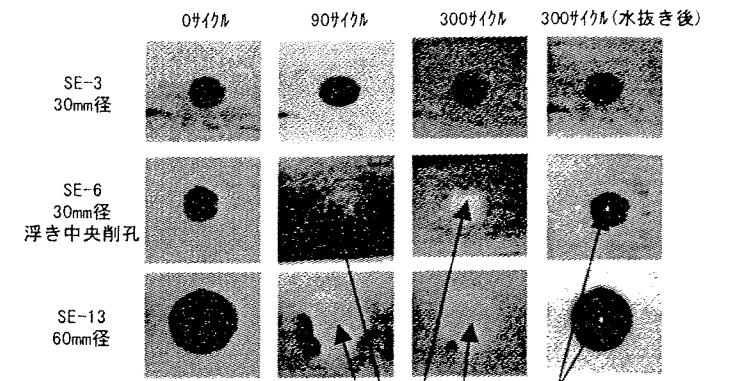


図-2.5.6 赤外線撮影結果<sup>11)</sup>

自動車荷重あるいは過大な荷重によるコンクリートのひび割れ損傷の発生や進行に伴うひび割れ周辺での炭素繊維シートのはく離の発生、床版コンクリート内部に浸透した水分の凍結融解によるコンクリートのはく離に伴う炭素繊維シートのはく離などが考えられる。

炭素繊維シートとコンクリートのはく離が、補強構造物に及ぼす影響については、実験室で模擬はく離を発生させて検討したものが数例報告されている。吉沢らは、両引き型の連続繊維シートとコンクリートの付着試験体を用いて、炭素繊維シートとコンクリートの接着面に人工的にはく離を発生させ、はく離が付着耐力に及ぼす影響を調べた<sup>10)</sup>。その結果、約10mm角のはく離が全接着面積の13%となるように配置しても、付着耐力は完全接着したものほとんど変わらなかった。このように、炭素繊維シートにはく離がある程度生じていても、静的な耐荷力に与える影響はあまり大きくないことが報告されている。

宇佐美らは、直径を2mmから60mmに変化させた円形のはく離を設けて炭素繊維シートを貼り付けたコンクリート供試体の凍結融解試験を実施した<sup>11)</sup>。JSCE-G503「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて $-18^\circ\text{C} \sim +5^\circ\text{C}$ の凍結融解を300サイクル実施した。凍結融解後のはく離の範囲を、目視、打音検査、赤外線撮影により観察した。図-2.5.6に各凍結融解サイクル後の赤外線画像を示すが、はく離範囲は、いずれも凍結融解サイクルを与える前後ではほぼ同じで、はく離の範囲が明確に拡大したものはなかった。ただし直径40mm以上のはく離は、すべて凍結融解サイクル中に内部に水が進入していた。この実験結果から、直径30mm以下のはく離については、凍結融解によるはく離の拡大が生じる可能性は低いが、直径40mm以上のはく離については、更に厳しい条件で凍結融解が繰り返された場合には内部に侵入した水の凍結に伴う膨張により、初期はく離の周辺にはく離の範囲が拡大する可能性があるとしている。これより日本道路公団では、施工管理要領で炭素繊維巻き立て工法について、施工後の検査で直径30mm以上の浮きや膨れがないこと、直径10mm以上30mm未満の浮きや膨れが局部的に集中していないこと(概ね $1 \text{m}^2$ あたり10個未満)を貼り付け状態の良否の判断基準としている<sup>12)</sup>。

炭素繊維シート接着工法では、一般に床版下面全面を炭

素繊維シートで覆うことから、補強後の床版の健全度、劣化の進行状況の確認が困難である。しかし、床版コンクリートに損傷が発生、あるいは進行した場合には炭素繊維シートとコンクリートのはく離が生じることが予想されるため、これを検知することができれば、定期的に床版の劣化状況をモニタリングすることが可能となる。はく離の検知法としては、現状では打音検査による方法が一般的であるが、足場を必要とすること、点検結果が点検者の技量に依存することなどの課題もあり、赤外線サーモグラフィを用いた検出法などが研究されている<sup>12)</sup>。また、近年、床版下面のひび割れ観察や橋面からの浸透水の排水や点検を目的として、炭素繊維シートの間隔を空けて格子状に接着する方法も行われている。

## 2.6 下面増厚工法

### 2.6.1 工法概要

下面増厚工法は、床版下面に補強材（鉄筋、炭素繊維格子等）を配置し、接着性に優れたポリマーセメントモルタル（以下、PCM）で既設床版と合成させることにより、床版の剛性を向上させる補強工法である。

この工法は、床版のたわみや鉄筋の応力度を低減し、曲げひび割れの開口挙動を拘束することで床版の疲労耐久性の向上を図るものである。主要材料は、補強材（鉄筋、炭素繊維格子等）とPCMの2つに分けられる。

補強材は、床版剛性を高める目的、PCMは主として補強材を既設床版に合成させる目的で使用され、左官によるコテ塗り施工や機械吹付けによる施工によって増厚されている。図-2.6.1、2.6.2、2.6.3にその概要を示す。

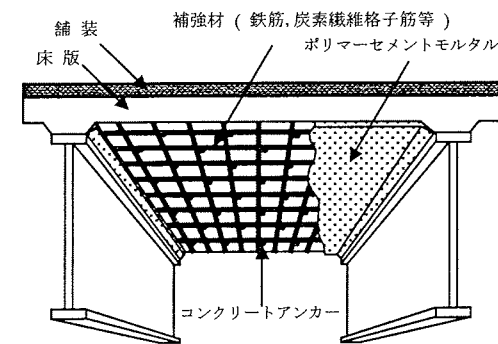


図-2.6.1 下面増厚工法概念図

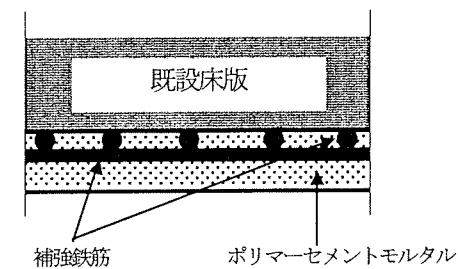


図-2.6.2 補強断面図（鉄筋の場合）

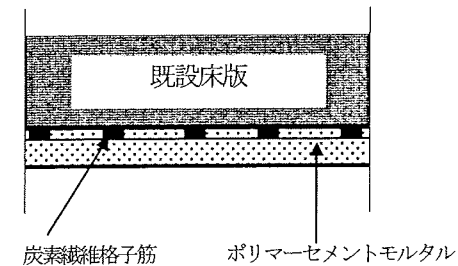


図-2.6.3 補強断面図（炭素繊維格子の場合）

本工法は、鋼橋およびコンクリート橋のRC床版に対して用いられている。適用範囲は、床版支間中央部の補強が主であるが、張出床版の上面など主桁上の負荷モーメントに対する補強が行われた例もある。

補強材は、主に曲げモーメントに対して引張材として機能し、ひび割れの拘束効果、既設鉄筋の応力低減効果、たわみの抑制効果がある。これらの効果によってRC床版の

疲労耐久性を向上させる。

さらにポリマーセメントモルタルによって、床版を増厚するため、RC床版の静的押し抜きせん断耐力も増加し、結果として約60%程度耐力が向上したとの報告もある<sup>1)</sup>。

本工法の設計は、設計荷重に対して鉄筋、コンクリートの応力度が許容応力度以下になるように補強材（鉄筋、炭素繊維格子）の補強量を算定する。しかし、実際に輪荷重により床版下面に生ずる引張ひずみは、大きくても数100 $\mu$ 程度で鉄筋や補強材の疲労破断により床版が破壊することはなく、押抜きせん断形式で破壊する。よって、補強に必要な鉄筋量や、炭素繊維格子断面積は許容応力度法によって計算された数量ほど必要ではなく、補強効果は耐力よりも引張剛性EAに支配されると考えられるが、補強量の規定を行なう計算式を確立するまでには至っていない。

また工法の適用範囲の判定も重要である。本工法は、原理的に曲げや、ひび割れ開口の拘束に対して効果がある。また、上記に述べたようにせん断耐力に対する抵抗もある程度期待できることから、貫通ひび割れが発生し、ひび割れ密度10m/m<sup>2</sup>程度の損傷においても、十分適用が可能であると考えられる<sup>1)</sup>。

さらに、ハンチ部については、走行レーン等を十分考慮した上で、補強材の配置が望ましい。

### 2.6.2 適用状況

1990年に、横浜市において道路橋床版の補強に下面増厚工法が適用された。その後、道路橋の技術基準の改訂に伴い、設計荷重の増加に対応するための補強対策としても用いられるようになった。

1996年には松井らによって鉄筋を補強材とする下面増厚工法の輪荷重走行試験機による実験論文が発表され<sup>2)</sup>、翌1997年に道路橋での補強効果実験の報告がなされている<sup>3)</sup>。さらに、5年経年した追跡データを付加した報告もされている<sup>4)</sup>。これらの報告により、RC床版の疲労耐久性に効果があることが明らかとなり、一般国道や地方道での利用が増加した。

### 2.6.3 補強効果

下面増厚工法で補強したRC床版の輪荷重走行試験が各所で行なわれ、疲労耐久性が向上することが報告されている<sup>1),2),3),4)</sup>。佐藤<sup>5)</sup>らは、昭和39年道示床版をFRPグリッド（炭素繊維格子）で補強した供試体の階段荷重および一定荷重荷重による輪荷重走行試験を国土交通省土木研究所において行なっている。

初期損傷（2方向のひび割れ損傷が進行し一部貫通ひび割れが見られる程度）を与えた床版に、FRPグリッド（繊維弾性係数 $3.9 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、繊維断面積 $15 \text{mm}^2$ ）を主筋方向×配筋筋方向に配置した場合、段階荷重による輪荷重走行試験の結果、補強した床版は平成8年道示による床版と同等程度の疲労耐久性を示すことを報告している<sup>1),5)</sup>。

また図-2.6.4に示すように、実橋の鉄筋補強による下

面増厚工法での施工前後の床版の応力度、たわみ、ひび割れ開閉量の測定を行い、それぞれについて低減化が図られること、および5年後の追跡調査でも補強効果が持続していることを確認している<sup>4)</sup>。

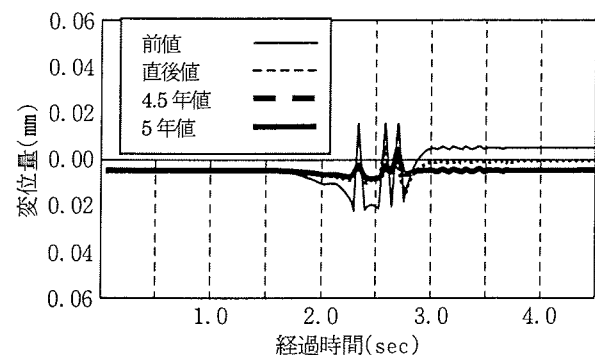


図-2.6.4 ひびわれの上下方向ずれ

さらに、図-2.6.5に示すように、補強材としてFRPグリッドを使用した場合においても、ひび割れ変位の低減が見られている<sup>1)</sup>。

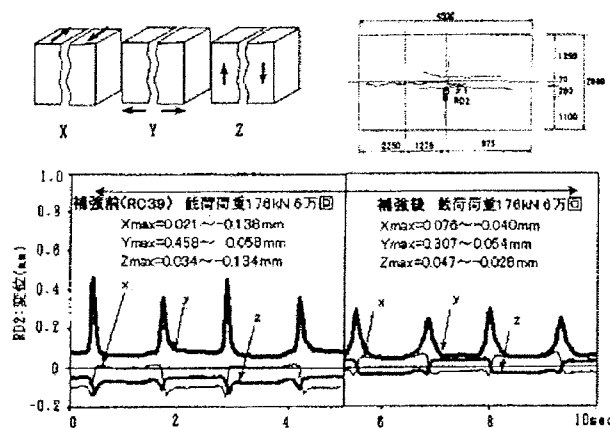


図-2.6.5 3方向ひび割れ変位補強前後の比較

## 2.6.4 点検のポイント

下面増厚工法による床版補強において、施工中あるいは施工後の供用期間中に懸念される変状としては、コンクリートと増厚部間の浮き、膨れの発生（以下総称して、「はく離」と呼ぶ）および進展があげられる。施工中のはく離の発生原因としては、PCMの厚塗りによる材料落下、下地処理時におけるコンクリート表面の不純物の撤去不足、下地コンクリート表面の水分の除去不足などが考えられる。これらのはく離は、使用するPCMの種類によらず発生する可能性があるものである。施工時の接着不良については、施工中あるいは施工完了時に打音検査によりはく離の有無について確認し、補修するのが一般的である。

施工後における供用中のはく離の発生および進展については、一部研究会報告等による以外、ほとんど報告されていないが、床版端部付近の増厚部表面にひび割れが発生した例や、水平方向の施工打ち継ぎ面の急激な乾燥によるPCMの施着不良の報告がある。

その他の主なはく離の発生原因としては、供用中の繰返し自動車荷重あるいは過大荷重、衝撃荷重によるコンクリートのひび割れ損傷の発生や進行に伴うひび割れ周辺でのPCMのはく離の発生、下地処理の不具合（プライマー施工の有無、脆弱部の除去不足、施工打継目の不適切な処理等）によるはく離などが考えられる。

下面増厚工法では、一般に床版下面全面をPCMが覆うこととなるが、PCM自体は、透水性を有していることから、雨水が浸透した場合には、PCM表面に変状が表れる。さらに、疲労の進行によって、PCM表面にひび割れやはく離が生じることも判明している<sup>1),5)</sup>ことから、定期的に床版の劣化状況をモニタリングすることが可能となる。はく離の検知法としては、打音検査による方法が現状では、最も信頼性が高く一般的であるが、足場を必要とすること、点検結果が点検者の技量に依存することなどの課題もあり、超音波探査や赤外線サーモグラフィを用いた検出法などが研究されている。

## 第3章 道路橋床版の健全度評価

### 3.1 道路橋床版の健全度評価手法の現状

道路橋床版の維持管理においては、管理対象となる供用中の床版の状態を示す「健全度」の把握が重要な課題である。現在、道路橋を管理する公共機関の多くは独自の「損傷度判定標準」を有しており、それぞれの供用環境に即した判定がなされていると考えられる。これらの判定標準の具体的な内容に関しては既に第2章において詳述されているのでここでは省略するが、これらの判定標準で想定されているのは鉄筋コンクリート床版であることが多い。そして、PC床版や鋼・コンクリート合成床版、さらには補修歴を有する床版等には適用困難であると予想される場合が少なくない。

ここでは現在健全度評価に用いられる可能性の高い手法について、各道路管理機関の判定標準に採用されているか否かを考慮せずに紹介し、その長所、短所について確認を行うことで今後の議論の基となる部分を確認することにした。

#### 3.1.1 床版のひび割れ発生状況に着目した方法

この手法は道路管理に関わる公共機関の多くが採用しており、現時点では、床版の健全度評価の主流をなす手法である。健全度評価に関わるひび割れの幅は表-3.1.1に示すように0.1mm~0.2mmに設定されている場合が多い。ひび割れ幅以外の指標としてはひび割れの間隔、方向、密度(=1m<sup>2</sup>あたりのひび割れ長さ:m/m<sup>2</sup>)が採用されており、日本道路公団の判定標準ではひび割れからの遊離石灰の析出の有無が重要視されている。

特に、ひび割れ密度を用いた評価手法では、既往の調査・研究において、ひび割れ密度と床版の劣化度合いの間に有意な関係が見出されており、この成果に基づいた閾値を設定して床版の管理を行っている機関もある。

しかし、既往の調査・研究において対象となった床版は補修を受けていないRC床版であったため、補修を受けた床版、特に下面に補強材が配置されるような場合においては評価ができなくなるなどの問題点があることがわかっている。また、RC床版以外のコンクリート系床版(PC床版、鋼・コンクリート合成床版)においてはひび割れの発生状況の確認が困難であり、ひび割れ発生状況が異なると考えられることから、これまでRC床版に適用してきた手法をそのまま当てはめることは適切でないと考えられる。

表-3.1.1 各機関の損傷度判定に用いるひび割れ幅

機関	損傷度判定に用いられるひび割れ幅
国土交通省	0.05mm以下 ~ 0.1mm ~ 0.2mm以上
北海道開発局	0.1mm以下 ~ 0.3mm ~ 0.4mm以上
東京都建設局	0.2mm以下 ~ 0.5mm以上
日本道路公団	—
首都高速道路公団	0.1mm
阪神高速道路公団	0.1mm以下 ~ 0.2mm程度以上

#### 3.1.2 床版内のひずみに着目した方法

この手法を床版の健全度評価に用いるように明文化した公共機関は現在のところ存在しない。しかし、この手法は床版の維持管理において、重大な損傷と疑われる変状が確認された場合や新しい補修工法の効果の確認、重要路線における橋梁管理に用いるデータの収集(BWIM形式による交通実態モニタリング等)といった場合に採用されることが多い手法である。

この手法では床版内の鉄筋をはじめとする鋼材や床版下面のコンクリート表面にひずみゲージ等のセンサーを取り付けて特定部位に発生するひずみを計測し、その値から床版の状態を推測する方法である。この手法は床版形式や境界条件の影響を顕著に受けるので、適用に際しては事前に調査対象橋梁に関して数値解析を実施し、床版の劣化状態と想定されるひずみの値との関係をあらかじめ調査しておくことが肝要である。しかし、このことが調査に関わる費用や時間の面で負担が増加する一因となっており、各道路管理機関において一般的な手法として採用されるに至っていない原因であると考えられる。

ひずみを計測する場合の注意事項としては以下の点が挙げられる。

- 1)床版下面のコンクリートは供用開始後すぐにひび割れが入ることが想定されコンクリートにゲージを貼る際にはその影響を受けないように位置を選定することが必要である。
- 2)鉄筋等の鋼材にひずみゲージ等のセンサーを設置する場合、ひずみ計測値がセンサー周辺のコンクリートに発生しているひび割れの分布状況に影響される可能性が高いので極力影響を受けない部位を選択する必要がある。
- 3)床版内部の鋼材のひずみを計測する場合にはかぶり部分のコンクリートをはつきり落とす必要が生じる。この場合、センサーを設置した後は設置位置周辺の部位に与える影響を極力抑えるため断面修復等の措置を速やかに講じる必要がある。

これらの点を考慮に入れても現場においてしばしば採用されるのは以下の長所があるからである。

- 1)直接ひずみを計測するので、床版内部の応力状態を確認するのに有利である。
- 2)補修工法の効果確認等の目的がある場合、その当該部位のひずみを確認できるので、当初の調査目的を達成できる可能性が高い。
- 3)光ファイバーや高耐久型ひずみゲージなどセンサーに耐久性の高いものを用意すれば、長期にわたる継続調査が実施でき、調査対象の床版が置かれた荷重環境を直接確認できる。

特に、最近では床版にひずみ計測デバイスを組み込んでBWIMシステムを構築するなどの手法により、リアルタイムで橋梁の維持管理に必要なデータを収集することが盛んに行われているため、今後はこの方面からの採用が増加することが期待される手法といえる。

### 3.1.3 床版の変形に着目した方法

この手法もまた、前項で紹介したひずみに着目した手法と同様、床版の健全度評価に用いるように明文化した機関は存在しない。しかし、この手法はひずみに着目した手法と同様に床版の維持管理における重要な局面において採用される手法である。特に、重大な損傷が疑われる床版の剛性の評価や補修工法の効果確認に多用される傾向が強い。この手法の特徴は以下の通りである。

- 1) 床版の変形を直接計測するので、床版剛性の評価において確実性を持たせることができる。
- 2) 床版の上面もしくは下面にセンサーを配置し計測を実施するが床版のコンクリート等を傷つけるような作業は必要ないので、計測に起因する損傷について考慮する必要がない。
- 3) 既往の研究で、計測された変形量を基に劣化度などの指標を適用することによって健全度の評価を行うことが可能であることがわかっており、それまでの荷重履歴に関わらずおよそその床版の状態を知ることができる。
- 4) コンクリートのひび割れ状況や内部の状況に関係なく計測の実施や評価を行うことができるので、補修を受けた床版や鋼・コンクリート合成床版に適用することが可能である。

また、この手法を用いる際の注意事項としては

- 1) 変形の計測方法を誤ると評価が困難になる。
- 2) 補修・補強を行った床版に対しては補修・補強に際して付加された部材の評価を行う必要がある。
- 3) 変形を計測するためのセンサーを設置するために架台等を設置する必要があり、そのための作業が大掛かりになる可能性が高い。

などが挙げられる。しかし、今後、補修を受ける床版が増加することや鋼・コンクリート合成床版の普及が見込まれることを考えると、この手法が有する利点はこれらの事項を補うに十分な長所であると考えられ、このことから本分科会では床版パネル中央のたわみの実測値を基にした劣化度による評価に着目した議論を行うことにした。

### 3.2 劣化度を用いた道路橋床版の健全度評価手法

床版はその構造的特徴からいくつもの種類に分類されるが、それぞれの床版形式によって、変形の大小や許容される変形量に大きな差がある。床版の健全度評価において、車両が床版上を通過する時の変形に着目する場合、一般にはその絶対量で評価することは避けなければならない。特にRC床版と合成床版やPC床版の間ではこの差は顕著であるため、計測された変形量の値をそのまま用いて評価することは誤った結論を導くもとになるので注意が必要である。このため、床版の変形量を評価するにはその値を基準化するための指標が必要となる。そのために用いられる指標として劣化度がある。

劣化度とは、供用されている床版の劣化状況を表す指標と

して松井らより提案された指標である。この指標は次の式により定義される。

$$D = \frac{\delta - \delta_0}{\delta_c - \delta_0} \quad (3.1)$$

- ただし、 $D$ ：劣化度 ( $0 \leq D \leq 1$ )  
 $\delta$ ：床版中央におけるたわみ (実測値)  
 $\delta_0$ ：全断面のコンクリートを有効とみなした時の床版中央におけるたわみ (計算値)  
 $\delta_c$ ：引張側コンクリートを無視した時の床版中央におけるたわみ (計算値)

劣化度  $D$  はその定義からも明らかなように、健全である場合には0に近づき、劣化が進み、使用限界に近い状態に至ると1に近い値をとると考えられている指標である。この劣化度が1を超過した場合には、床版の劣化が急激に進み、押しぬきせん断破壊が発生する危険性が極めて高くなることも知られている。また、劣化度を求めるために必要な $\delta_0$ や $\delta_c$ を計算する際にはできるだけ実際の値を把握して行うことが重要であり、特に床版に使用されているコンクリートに関する物性値に関しては現場から採取されたサンプルから求められる値を使用することが望ましい。

劣化度の輪荷重走行試験機を用いた疲労試験における変動のイメージを図-3.2.1に示す。この図を見ると明らかなように、コンクリート系床版における劣化度の変動は単調増加であり、この指標を的確に評価することができれば評価対象床版の健全性や残存耐久性などを推定することが可能である。ただし、劣化度を求める際に使用する床版たわみの測定値は主桁との間の相対たわみであることや以下に述べるような特徴を有することに留意することも忘れてはならない。

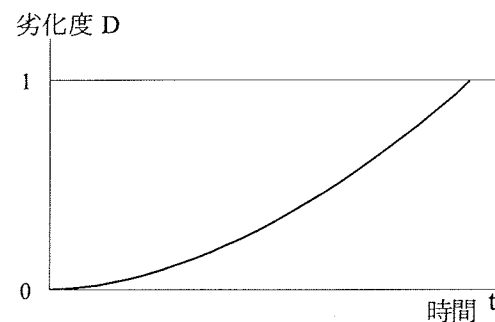


図-3.2.1 劣化度のイメージ

### 3.3 道路橋床版の健全度評価に劣化度を用いる際の問題点

3.2でも述べたとおり、床版の健全度をそのたわみから判断する場合、床版はその構造、材料により変形量が大きく異なることから、たわみの絶対値から健全性を把握することは行うべきではない。この点を解決するための個々の床版に関する指標として劣化度が提案されていることに

ついては既に述べたとおりである。劣化度はコンクリート系床版の健全性を把握するためには有利な点を有していることが分かっている。しかし、これは実験室においてなされた輪荷重走行試験の結果に対する評価や補修を行わないうちに破壊に至ってしまった床版の評価に関して言うことであると考えられている。

現在、コンクリート系床版の維持管理において、劣化の程度が著しいと認められた場合、何らかの補修・補強工法により対策がなされるのが一般的である。このときに用いられる工法は結果として床版を大幅に強化し、その結果としてたわみやひずみの発生量をかなり小さくすることがわかっている。この場合、劣化度を用いた一般的な方法で評価を行うと劣化度の値が負となり、劣化度が定義されている範囲 ( $0 \leq D \leq 1$ ) を外れてしまうことが起こってしまう。さらには、補修・補強作業に際して取り付けられた補強材の影響により、床版の破壊機構や許容される最大変形量に変化が生じる可能性が高いことから、 $D = 1$  となった時点を使用限界と定義することが困難になることが想定されている。このような事態を回避し、床版に対する補修・補強が想定されるシナリオにおいても劣化度を適切に使用するための手法として、本分科会では次に述べる手法の導入を提案する。

### 3.4 道路橋床版の維持管理シナリオにおける健全度評価の改善に関する提案

現在、各道路管理機関における道路橋床版の維持管理では、床版の供用に伴う劣化に対する補修・補強を含まないプログラムは想定されていない。このように、床版における疲労損傷の進展とそれに対する対策としての補修・補強工法をある程度確立してはいるものの、その適切な実施時期や補修・補強作業後の床版の健全度に関する評価と継続的管理については統一的手法を持ち合わせていないのが現状である。本分科会ではこのような状況を打開するための方策の一つとして、床版の健全度評価に床版変形に基づいて与えられる「劣化度」を積極的に取り入れるべきであるとの結論に至ったが、3.3に述べたような問題点があるため、この解決を図らなければならない。そこで、本分科会では道路橋床版の維持管理における床版構造の変化に着目し、以下の手段を講じることによって床版の種類や維持管理シナリオに基づく補修・補強の影響を取り込んだ形での健全度評価を行うことを提案する。

まず、床版の維持管理シナリオにおける健全度の経時変動を図-3.4.1のように想定する。ここで、図中において健全度が大幅に改善しているところは補修を行った時点を示している。この時点の前後における床版の状態を考えてみると、図-3.4.2に示されるように、補修・補強前後では床版の挙動に影響する部位に違いがある。すなわち、補修・補強前には存在しなかった部材が補修・補強作業で取り付けられることにより、床版の構造系が変化していることがわかる。このことを考慮するために、本分科会では劣化度の定義を以下のように再定義することを提案する。

$$D_i = \frac{\delta - \delta_{0,i}}{\delta_{c,i} - \delta_{0,i}} \quad (3.2)$$

ただし、

$D_i$ ：維持管理シナリオ上の各段階における床版の劣化度 ( $0 \leq D \leq 1, i = 1, 2, \dots$ )

$\delta$ ：床版中央におけるたわみ (実測値)

$\delta_{0,i}$ ：維持管理シナリオ上の各段階における床版断面内のコンクリートを全て有効とみなした時の床版中央におけるたわみ (計算値)

$\delta_{c,i}$ ：維持管理シナリオ上の各段階における床版引張側コンクリートを無視した時の床版中央におけるたわみ (計算値)

この再定義を行うことにより、道路橋床版の維持管理シナリオ上で想定される補修・補強作業などの構造系の変化を含む多くの変化に対して劣化度の定義幅を柔軟に変化させることが可能になる。このことにより道路橋床版の供用期間全般にわたって劣化度  $D = 1$  となる時点を使用限界とする運用ができる可能性が高いと考えている。ただし、補修・補強工法を施した床版の中には本分科会で考えているよりも脆性的な床版の破壊形態をもたらすものがある可能性は否定できないことから、この指標の運用方法等に関しては今後も検討を加えていくことが必要である。

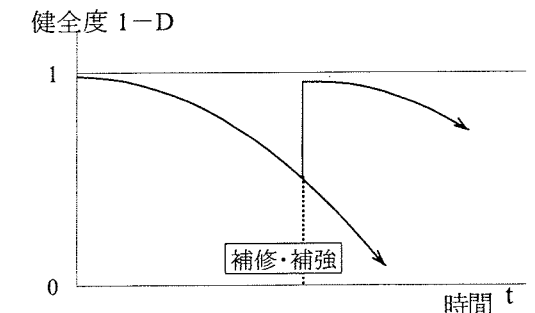


図-3.4.1 床版健全度の推移

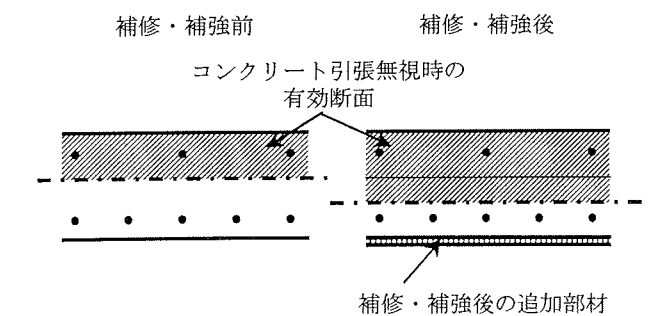


図-3.4.2 補修・補強前後の床版構造

## 第4章 床版下面からの点検方法

### 4.1 概説

床版下面からの点検方法として、目視、赤外線、打音、超音波法、衝撃弾性波法等がある。

それぞれの点検方法には、オールマイティな方法はなく、それぞれの特徴を理解し、点検目的に応じた点検方法を選択することが重要である。さらに、一つの点検方法で満足しない場合には、それらを併用するという視点も必要である。

補強済み床版の一次点検は、取付部材からの漏水や遊離石灰の流出、腐食やはがれ等を双眼鏡等を用いた目視で検出することが通常である。

従来の目視による方法では、点検員の熟練度や技術力の差異により、判定結果にばらつきが出ることも少なくない。ここでは、ひび割れ位置を情報化する方法として、デジタル画像を用いた方法を紹介する。

赤外線センサーは、いわゆる表面温度計であり、床版下面と補強部材の間にはく離等の空隙があると、この空隙が大きな熱抵抗を持つため、外部から熱が与えられた場合、はく離部と補強材の間に温度差が生じ、これを表面温度の変化として、熱赤外線で検知することができる。

打音法、超音波法、衝撃弾性波法は、いずれも弾性波法の1種であり、床版コンクリート内に伝播可能な弾性波を送信・受信および解析することによって、はく離やひび割れ等の床版の内部情報を得ることが可能である。各種方法は、周波数帯域、波の送信・受信方法によって区別される。

以下に、それらの計測原理、計測方法、評価方法について述べる。

### 4.2 目視

#### 4.2.1 概要

路下からの日常の床版下面からの目視点検は、ひび割れの進展、漏水・遊離石灰の発生、下面コンクリートの欠落などの損傷を確認することで、その床版の安全性と落下等の第三者への影響の有無を判定することを目的としている。鋼板接着補強済みの床版においては、接着鋼板端部やアンカーボルト部からの漏水や遊離石灰の流出、鋼板の腐食等を目視点検することが通常である。

ところで、従来の目視による方法では、点検員の熟練度や技術力の差異により、判定結果にばらつきが出ることも少なくない。近年のデジタルカメラの性能は急速な進歩を遂げており、目視調査に変わるひび割れ位置を情報化する方法の一つであるデジタル画像を用いた床版劣化状態を判断する方法について以下に紹介する。

#### 4.2.2 デジタルカメラによる点検

##### (1) 計測原理

デジタルカメラは CCD が撮影素子となり、カメラの光学系から撮影された画像を電子的に記録するものである。デジタルカメラの基本性能は CCD および工学レンズの性能に依存するところが大きい。

床版表面のひび割れ調査にデジタルカメラを利用する場合、調査したいひび割れ幅、撮影画角の関係を、あらかじめ確認したのちに、実際の撮影を行う。

画角数が 1960x1960、2.0m角を撮影した画像において、デジタル分解能は 1mm であるが、**図-4.2.1** に示すひび割れデジタルイメージ認識によって 0.05mm のひび割れが検出可能なことを実験的に検証している。この場合の撮影画角と認識ひび割れ幅の関係を **図-4.2.2** に示す。<sup>1) 2)</sup>

##### (2) 計測方法

床版表面のひび割れ、遊離石灰、補強鋼板の腐食等の損傷を、デジタルカメラと画像処理支援ソフトを使用して RC 床版の損傷図を作成する。

##### ① 準備

計測原理で示したように、撮影画角と認識ひび割れ幅の関係を検証したデジタルカメラと要求されるひび割れ幅と現地撮影画角の大きさを考慮したズームレンズを準備する。予め、撮影される床版の画角分割計画をおこなっておくことは、現場作業の効率を高める上で重要である。

##### ② 撮影

撮影は現地にてできるだけ正対面で撮影する。光量が十分確保できない場合には、三脚、ストロボ等の補助機材を使用する。

##### ③ 損傷図の作成

現地において撮影した部分床版画像を、撮影角度補正機能・画像合成機能・座標機能・画像強調・ひび割れ特徴化機能をもつ画像処理支援ソフトを用いて全体画像として作成し、さらにトレース機能を用いてひび割れ状態をスケ

ッチし、床版の損傷図として作成することが可能である。調査例を**写真-4.2.1**と**図-4.2.3**に示す。

##### (3) 評価方法

各機関の橋梁点検要領の健全度判定基準、すなわち、ひび割れの幅・間隔・密度等と比較評価する。

視認可能なひび割れは、**図-4.2.2**に示したように、撮影画角の大きさに影響を受ける。この時の条件としてはコンクリート表面の汚れが少ない状態が良好である。このため、各撮影床版のひび割れを正確に評価するためには、現場におけるクラックゲージを用いたひび割れ幅のキャリブレーション等を行い、その結果を参考にすることが望ましい。

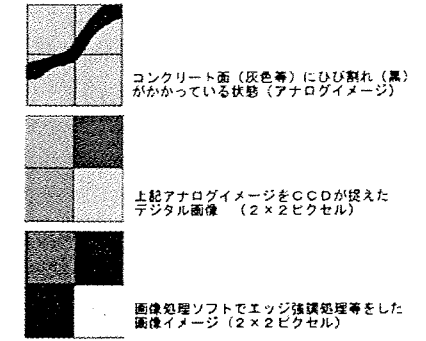


図-4.2.1 ひび割れのデジタルイメージ

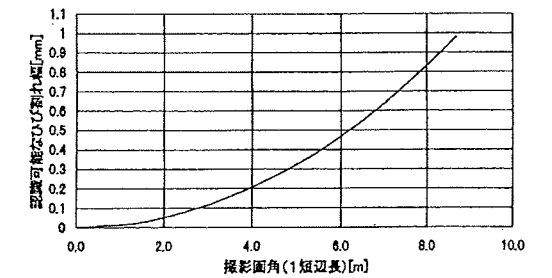


図-4.2.2 画角と認識ひび割れ幅の関係

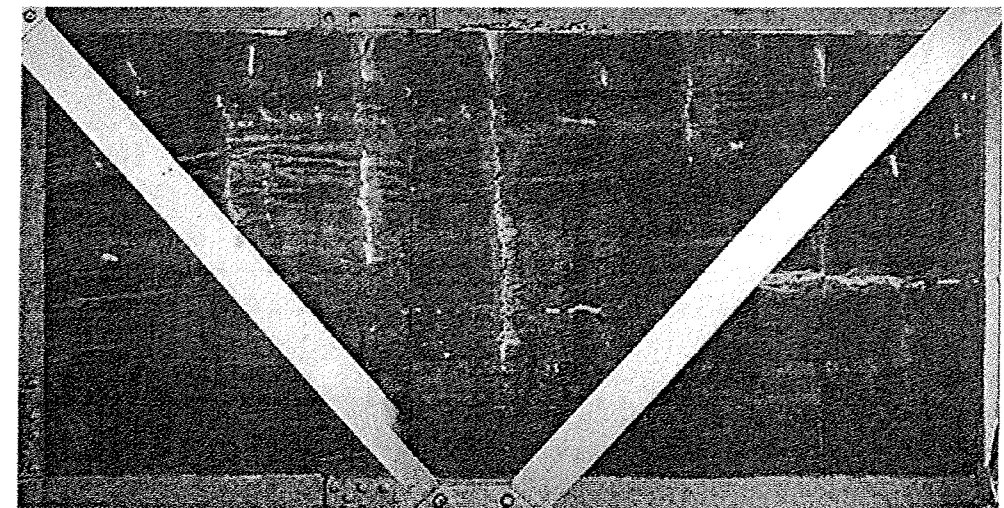


写真-4.2.1 デジタル画像 (株コニシより提供)

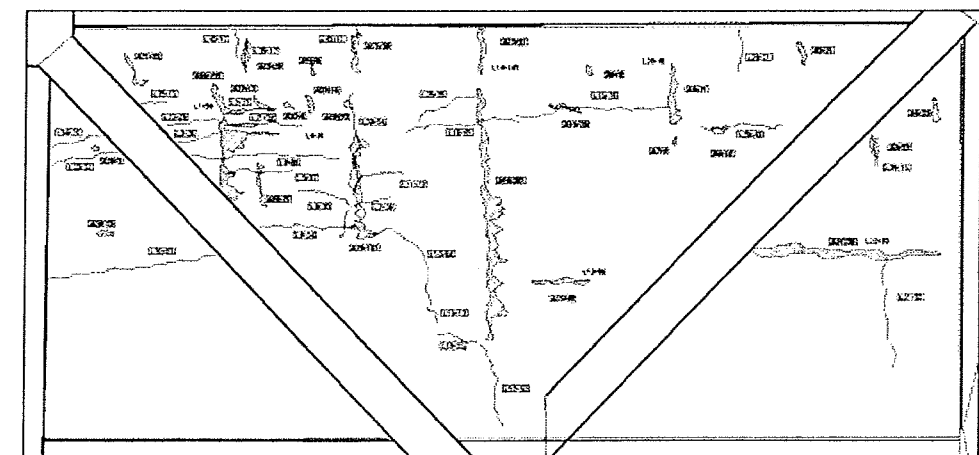


図-4.2.3 損傷スケッチ図 (株コニシより提供)



### 4.3 赤外線

#### 4.3.1 計測原理

赤外線による点検は、床版下面から放出される赤外線を検出素子を用いて二次元的に走査し、検出された赤外線量を映像として表示する方法である。床版下面に浮きや空洞が存在する場合には、熱伝導率、比熱等、熱的性質が健全部と異なり、その違いは温度や日射等によって生じる構造物の温度変動の中で、表面温度の差となって現われる。

補強済み床版においては、床版下面と補強部材の間にはく離等の空隙があると、この空隙が大きな熱抵抗を持つため、外部から熱が与えられた場合、はく離部と補強材の間に温度差が生じ、これを熱赤外線検出することができる。

赤外線による検出において、表面温度の差を得ることが重要であるが、熱源の与え方で一般に2つの方法に区分される。1つは内部に生じた空隙が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生じる表面温度の日変動の中で、欠陥部と健全部との間の表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、内部欠陥を検出するパッシブ熱源法であり、もう一つの方法が構造物を人工的に加熱して強制的に欠陥部と健全部との間の温度差を生じさせるアクティブ熱源法である。

#### 4.3.2 計測方法

以下に計測方法の事例として、パッシブ法およびアクティブ法について、それぞれの試験事例を示す。

##### (1) 炭素繊維シート補強のはく離検知<sup>2)</sup>

日射や外気温の変化によるパッシブ熱源法によって、炭素繊維シート補強床版に関して、炭素繊維シートとコンクリートのはく離を検知する方法が研究された事例について以下に紹介する。

鉄筋コンクリート床版の下面に、繊維目付量 400g/m<sup>2</sup> の中弾性型炭素繊維シートを格子状に2層接着した。この床版を図-4.3.1に示すように、屋外の地上約5mの位置に設置し、床版上面には直射日光が当たるようにした。供試体の設置場所は、兵庫県神戸市内であり、赤外線カメラによる撮影は、夏季(9/3 8:00-19:00)、日気温較差の大きい秋季(11/14 10:00-20:00)の2回実施した。撮影日の天候は、いずれも晴れであった。

赤外線カメラは、実橋での点検を考慮して、バッテリー駆動可能な非冷却型の小型携帯型のものを使用した。温度分解能は、0.1℃、表示画素数は、320H×240V、最小検出寸法は、測定距離1mで1.4mm、10mで14mmである。

図-4.3.2に示すように、コンクリートと炭素繊維シートの層間、炭素繊維シートの1層目と2層目の層間、炭素繊維シートの層内に、炭素繊維シートとコンクリートあるいは炭素繊維シート間の空隙の距離はほとんどないものに近い人工的にはく離を設けた。写真-4.3.1は、床版下面の可視画像であるが、白線は打音検査により検知したはく離領域を示している。

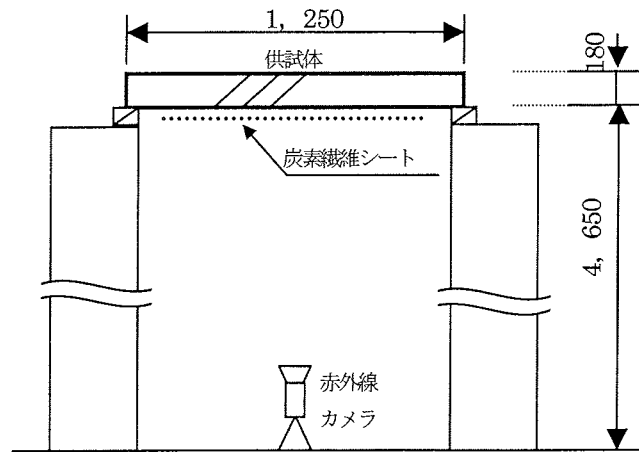


図-4.3.1 炭素繊維シートのはく離観察状況

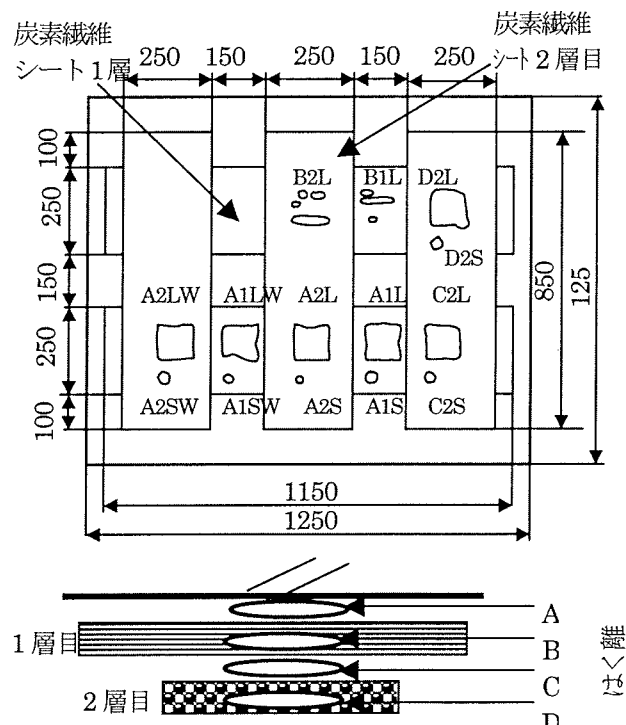


図-4.3.2 炭素繊維シートの人工はく離分布

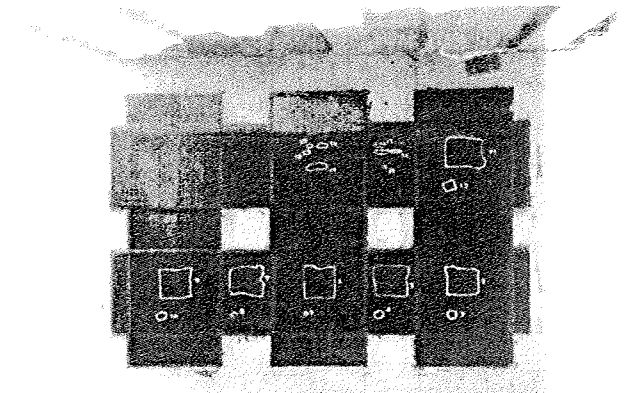


写真-4.3.1 炭素繊維シートのはく離の可視画像

夏季測定においては、気温の日較差が小さく、ほとんどの時刻で炭素繊維シートのはく離部と健全部とで検出可能な温度差が生じず、赤外線画像では明確には判別できなかった。一方、秋季測定においては、明瞭にはく離部を赤外線画像上で確認することができた。床版下面の外気温、炭素繊維シートの表面温度の健全部と健全部 (A1 と C2 部) の温度較差の時間変化を図-4.3.3に示す。午前10時の観察画像を写真-4.3.2に示す。100mm角の大型のはく離は検出可能だが、30mm角の小型のはく離は識別できていない。またA:コンクリートと炭素繊維シートの層間、C:炭素繊維シートの1層目と2層目の層間にはく離は明瞭に識別できるが、炭素繊維シートの層内にはく離を設けたもの(B, D)は、2層目層内のD2Lのみ識別できている。撮影時にはく離部に注水したものは、注水しなかったものに比べ識別が困難で1層目のA1LWのみ識別できた。10時から13時の間は、はく離部を検知することが可能で、この時間帯ではく離部が外気温の上昇にあわせて、健全部より温度が高くなっていった。14時から15時の間は、床版下面温度がほぼ均一ではく離部を検知することができなかった。その後、気温の降下にあわせて、16時から18時の間は、はく離部の温度が、健全部に比べて低くなり、赤外線画像上で識別することができた。

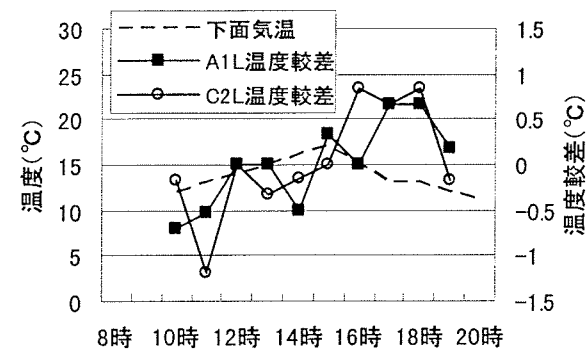


図-4.3.3 はく離部と健全部の温度較差 (秋季)

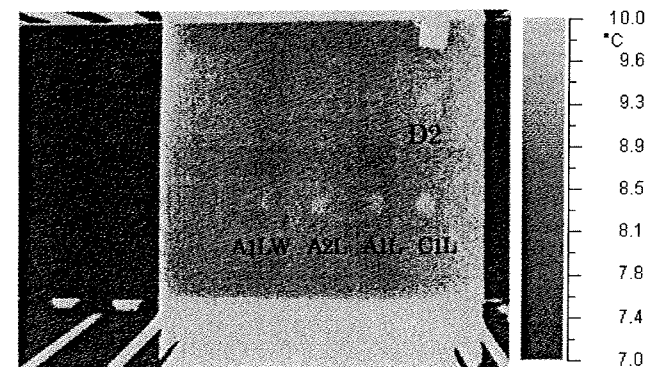


写真-4.3.2 赤外線画像 (秋季測定 10:00)

(2) 改修工事におけるアスファルト舗装時の舗装熱を利用した内部欠陥の検出<sup>3)</sup>

金光寿一他「舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床版内部の欠陥検出に関する研究」によると、アクティブ加熱事例として、改修工事におけるアスファルト舗装時の舗装熱を利用した内部欠陥の検出について研究が行われており、大きな熱容量が与えられるため、期待される加熱方法である。

実験に供したコンクリート試験体は、図-4.3.4および表-4.3.1に示すように、500mm×500mmの正方形で、実橋梁の設計断面を勘案して厚さを160mm、200mm及び240mmの3種類としたものである。RC床版内部空洞・空隙を想定した模擬欠陥は、発泡スチロールを加工して、コンクリート下面から20mmおよび40mm(表面間寸法)の位置に固定したものである。

アスファルト舗装は、基層に砕石マステックアスファルト舗装(SMA舗装)および表層に排水性舗装の二層仕上げを想定し、繰り返して実験を行うためにISO標準砂(天然けい砂)を代用して舗装した。1層目の温度管理では、SMA舗装時の温度である160℃~165℃が2次転圧終了温度(約60℃程度)に降下するように設定し、2層目の温度管理も1層目と同様とした。なお、コンクリート表面にはエポキシ樹脂プライマー処理後にシート系防水工を施した。

使用した熱赤外線センサは2次元非冷却マイクロボロメータ型、応答波長領域8.0~14.0μm、感度0.15℃であり、温度測定は、写真-4.3.3のように、測定距離1.35mの真下の位置から1層舗装直後より10分間隔で6時間連続撮影して時系列に熱画像を撮り込むことにした。

図-4.3.5は厚さ160mmで模擬欠陥深さ20mm、厚さ240mmで模擬欠陥深さ40mmにおける各欠陥部の平均温度と健全部で得られた平均温度の差分を時系列に示したものである。表-4.3.2は、-0.5℃の閾値を設定して求めた各欠陥検出のための検出開始時間、検出許容時間ならびに検出判定の結果である。表-4.3.3に示すように、コンクリートの厚さが小さいほど、欠陥が大きいくほど舗装後の早い時間から欠陥検出が可能になることが分かる。深さの異なる同厚試験体から確認できるように、伝達熱が欠陥側面からの拡散によって廻り込むことになるため健全部との温度差が小さくなり、欠陥部が深くなるほど検出開始速度が遅くなる事が分かる。

検出許容時間では、図-4.3.5に示す温度差の時系列変化から、測定終了時間の360分以降もしばらくは-0.5℃以下の温度差を保持して推移するものと考えられ、実橋梁においても十分にモニタリングできる時間帯を確保できる。

別途、実施した試験体をモデル化した熱伝導解析による数値シミュレーションでは、先に示した現地試験結果を模擬できるとともに、改修工事におけるアスファルト舗装時の舗装熱を利用した内部欠陥の検出の可能性について以下の結果を得ている。

図-4.3.6に示すように、欠陥100mmが検出できるコンクリートの厚さの限界は、検出温度差-0.5℃の場合、欠陥の深さ20mmでは340mmまで、欠陥の深さ40mmでは300mmまで検出することができる。図-4.3.7に示すように、欠陥部100mmが検出できる欠陥の深さの限界は、コンクリートの深さ160mmの場合71mmまで、コンクリートの厚さ240mmでは54mmまで検出できる。

表-4.3.1 試験体一覧

試験体	コンクリート厚さ(mm)	欠陥寸法(mm)		深さ(mm)
		大きさ	厚さ	
SH160	160	30×30	5	20
SH200	200	50×50		40
SH240	240	70×70		
			100×100	

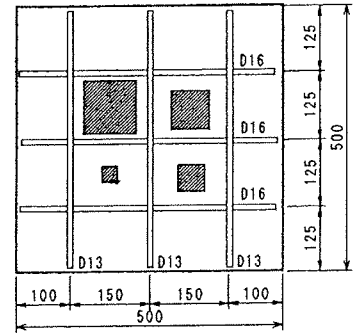
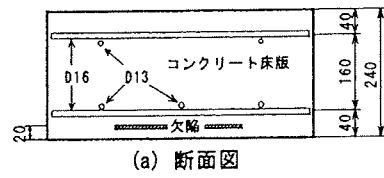


図-4.3.4 試験体断面（厚さ240mm、欠陥深さ20mm）

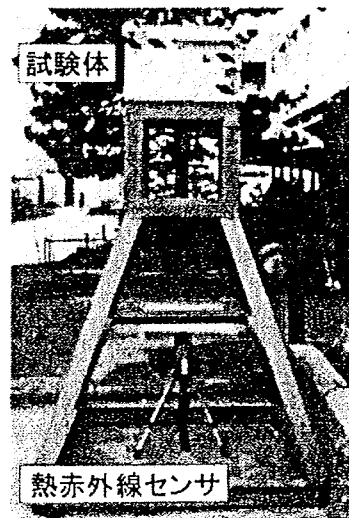
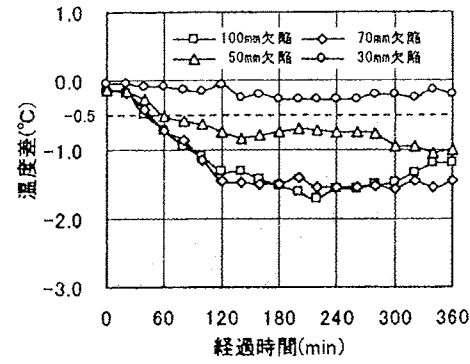
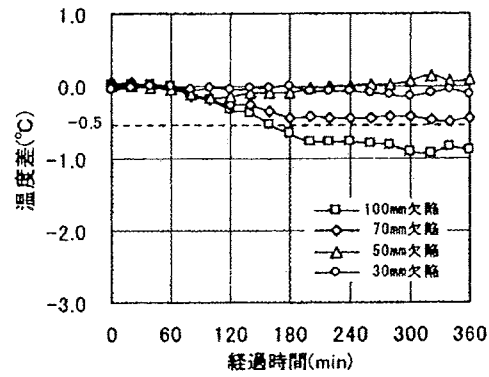


写真-4.3.3 測定状況



a) SH160-20



f) SH240-40

図-4.3.5 温度差の時系列変化

表-4.3.2 欠陥検出時間及び許容時間

試験体	検出開始時間(min) / 許容時間(min)			
	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	×	○	○	○
SH200-20	○	○	○	○
SH240-20	○	○	○	○
SH160-40	△	○	○	○
SH200-40	△	×	○	○
SH240-40	×	×	○	○

○:検出可能 △:誤診 ×:検出不能

表-4.3.3 最大温度及び経過時間

試験体	最大温度差(°C) / 経過時間(min)			
	欠陥の大きさ(mm)			
	30	50	70	100
SH160-20	-0.3 / 260	-1.1 / 340	-1.6 / 300	-1.7 / 220
SH200-20	-0.6 / 240	-1.2 / 320	-1.3 / 360	-1.6 / 280
SH240-20	-0.8 / 280	-0.8 / 360	-1.1 / 360	-2.4 / 280
SH160-40	-0.4 / 240	-0.5 / 360	-0.9 / 360	-1.2 / 360
SH200-40	-0.4 / 280	-0.3 / 360	-0.5 / 340	-1.0 / 320
SH240-40	-0.2 / 300	-0.2 / 340	-0.5 / 340	-0.9 / 320

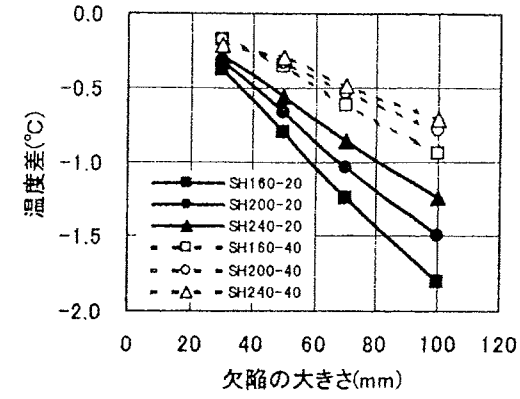


図-4.3.6 温度差と欠陥の大きさ(360分後)

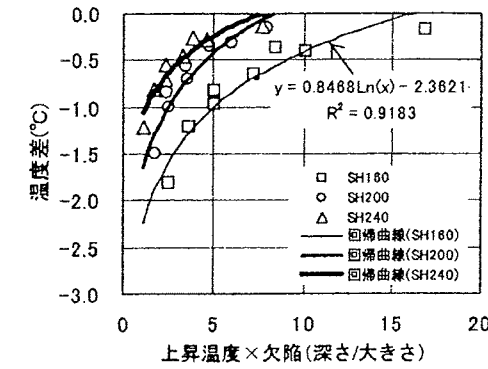


図-4.3.7 温度差と欠陥の深さ及び大きさの関係温度

#### 4.3.3 評価方法

床版コンクリートの欠陥部は、赤外線法によって表面の温度差を感知し、その部分に浮きまたははく離があるものとして評価される。

赤外線法によるコンクリート構造物の点検は、現状の技術では欠陥や空隙の深さを推定することが難しい。検出精度は、検出対象欠陥の大きさにもよるが、構造物表面から50mm程度が限界であるといわれている。<sup>1)</sup> また、気象条件や加熱条件に左右されることも多い。一方、コンクリート表面の光沢や汚れにより生じる温度差を欠陥と誤認する可能性があり、注意が必要である。したがって、評価方法は、赤外線カメラによる解析画像だけでなく、他の点検、例えば、デジタルカメラのひび割れ画像の解析結果を重ね合わせるにより、床版内部の劣化状況について、より高い精度のデータを得られるものと考えられる。

#### 4.4 打音

##### 4.4.1 計測原理

打音法とは、定期点検時等に足場や橋梁点検車を利用して床版下面に近接可能な場合に、ハンマーなどにより図-4.4.1のように床版下面をたたいて、その発生音から床版のはく離や空洞を検出する方法である。補修済みの鋼板接着床版においては、鋼板のたたき点検時の不良音によって、鋼板のはく離状況について確認できる。したがって、補強材とコンクリート間の空隙がほとんどなく接触している場合でも、はく離部で異音が発生し、はく離を検知することが可能である。

打音法の計測原理は弾性波法の1種であり、この計測原理は、ハンマーなどの打撃によりコンクリート中に弾性波を発生させ、この弾性波がコンクリート表面から空气中に放出されて生じた音波を測定する。打音法では、通常は可聴域と呼ばれる20Hz~20kHzの周波数域の音(弾性波)を使用する。

健全部とはく離部は、オシロスコープから打撃波形を比較分類することによって検出することができる。打撃波形は圧力素子や加速度計をヘッド部に内蔵したインパルスハンマー等を利用して、打撃音をマイクロフォンにて集音する。

##### 4.4.2 計測方法

鋼板表面を打撃して受信子により打音信号データを採取し、事後の破壊調査結果と対比させ、周波数解析などにより健全部及び不健全部の信号特徴に差異があるかどうか検討した。

データ採取手順は以下の通りとした。最初に、従来の打音法(ハンマー打撃し人の耳で判断)により鋼板がはく離していると思われる箇所を抽出、マーキングし、図-4.4.2のように、定性的ではあるが、健全な音をS(キンキン)、重度のはく離音をA(ポコポコ)、中度のはく離音をB(ポコンポコン)、軽度のはく離音をC(カンカン)で分類した。

その後、はく離していると思われる箇所、および健全と思われる箇所の代表的な部分を対象に、打撃時の受信信号波形を採取した。使用機材は、打撃具としてハンマー、受信子として広帯域マイクロホン、信号記録装置としてデジタルオシロスコープを用いた。

採取した信号波形(時間波形、および周波数スペクトル)の代表例を図-4.4.3に示す。はく離部及び健全部における打音信号波形の定性的特長としては、はく離部では健全部に比べて、信号振幅が大きく、周波数スペクトルの高周波成分が少ないという結果が得られた。

##### 4.4.3 評価方法

打音信号について、時間波形及び周波数スペクトルの波形をもとに、計測箇所全体において、各種特徴量(信号振幅値、スペクトルの特定周波数領域の積分値)を算出し、それら特徴量の値をもとにパターン解析した結果を図-4.4.4に示す。

パターン解析の結果、はく離部と健全部の分布に分離傾向が認められ、打音法による鋼板のはく離の識別が可能と考えられる。

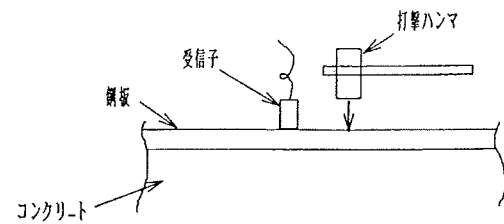
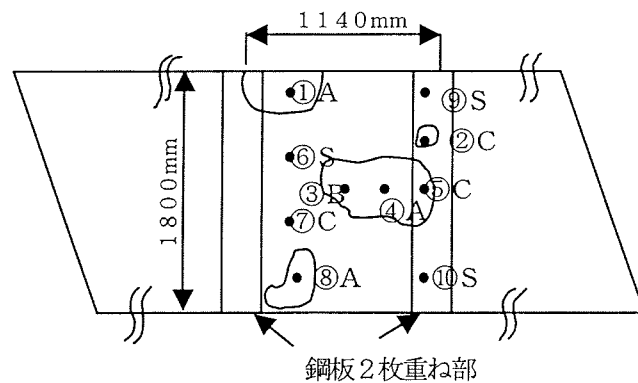
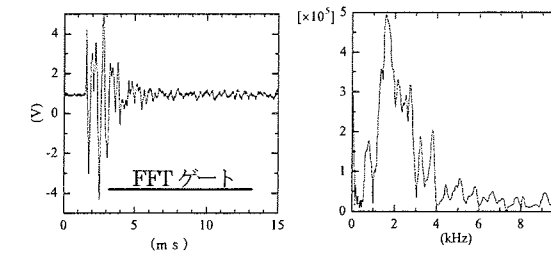


図-4.4.1 打音解析法のイメージ

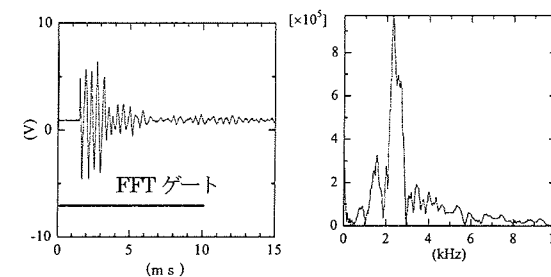


- : 人の耳で抽出したはく離箇所
- : 打音データ採取箇所
- A : 重度のはく離音(ポコポコ)
- B : 中度のはく離音(ポコンポコン)
- C : 軽度のはく離音(カンカン)
- S : 健全な音(キンキン)

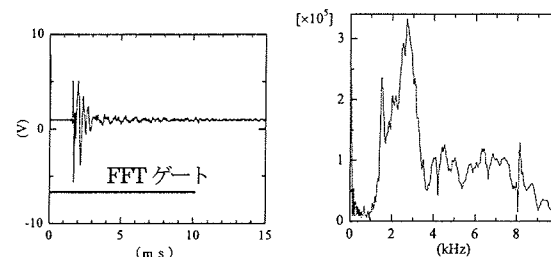
図-4.4.2 データ採取位置図



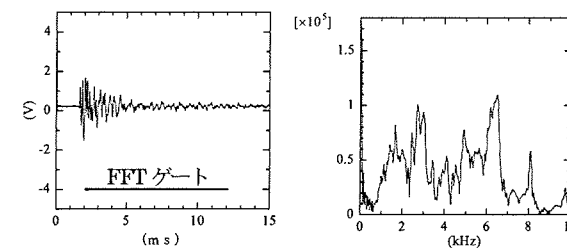
箇所④: 打音種別(A)



箇所③: 打音種別(B)



箇所⑦: 打音種別(C)



箇所⑥: 打音種別(S)

図-4.4.3 マイク受信による打音信号波形

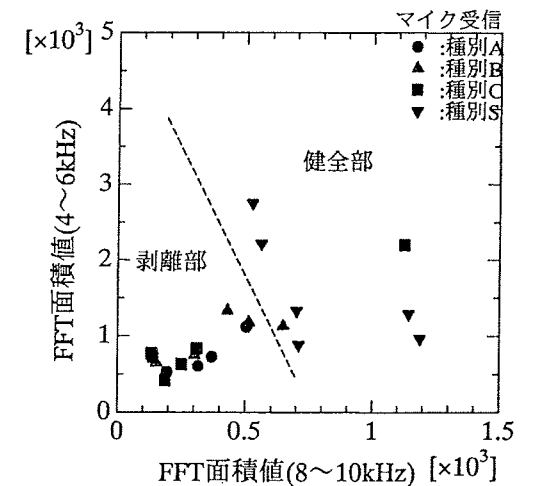
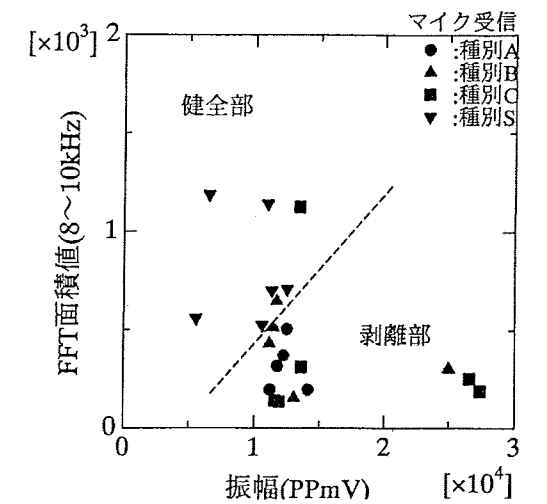


図-4.4.4 マイク受信による打音信号パターン解析結果

## 4.5 超音波法

### 4.5.1 原理

超音波法とは、使用周波数が 20kHz 以上の超音波域と呼ばれる周波数帯を主に使用し、発振子からシリコングリース等の接触剤を介してコンクリート中に発射された超音波を受振子で測定する方法である。比較的高い周波数を使用するため、コンクリート中の伝播距離は 1.5~2.0m 程度である。そのため、一般的には床版全体の評価ではなく、部分的な損傷（ひび割れ深さ測定、内部欠陥測定）を対象に適用される手法である。

### 4.5.2 測定

コンクリートに直接超音波を入力した場合に超音波の指向性が悪いことを逆に利用して図-4.5.1に示すように、ひび割れ先端から迂回する超音波の伝播時間を測定することでひび割れ深さを測定する方法が提案されている。また、図-4.5.2に示すような共振周波数を測定する手法でコンクリート中の内部欠陥を検出することも行われている。

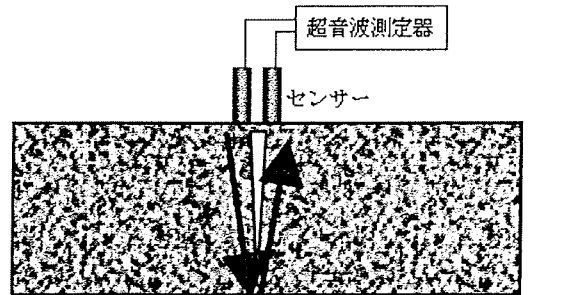


図-4.5.1 ひび割れ深さ測定（近距離迂回法）

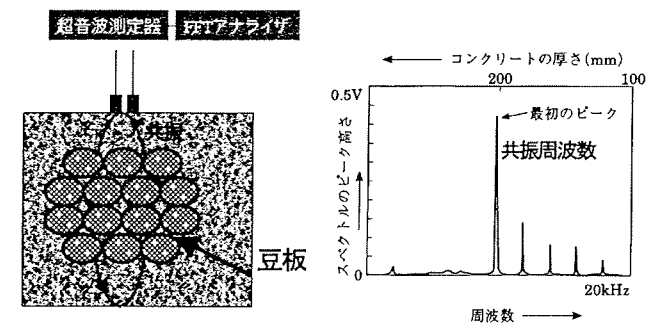


図-4.5.2 内部欠陥測定概略図

鋼板接着が施された RC 床版の接着不良部の検出を目的に超音波法の適用性が検討されている。鋼板がコンクリートと接着している部分では、超音波が鋼板~接着部~コンクリートへ伝播する(図-4.5.3(a))のに対して、接着不良(はく離)部分では、鋼板とコンクリートとの隙間で超音波は反射し、鋼板内でさらに反射を繰り返し多重反射することとなる(図-4.5.3(b))。よって、鋼板接着状況の調査は、鋼板の多重反射信号の有無を調査することで、接着不良箇所を検出することとなる。

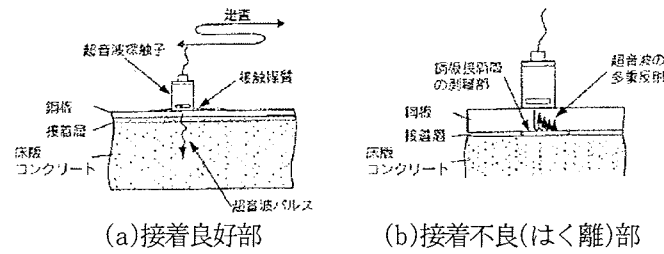


図-4.5.3 超音波法による調査要領

### 4.5.3 補強床版への適用事例

約 30 年間供用されてきた橋梁で、鋼板接着による補強が施されている床版での鋼板のはく離を超音波法で調査した事例を以下に示す<sup>1)</sup>。

鋼板接着部の調査結果を図-4.5.4に示す。また、調査に用いた供試体の鋼板を剥がし、はく離部分を目視調査した結果を図-4.5.5に示す。

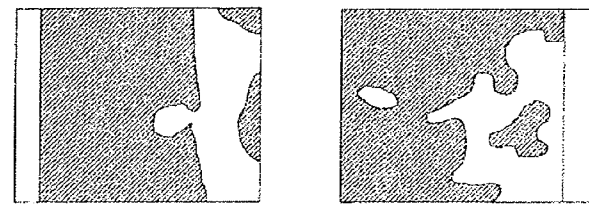


図-4.5.4 鋼板接着部の調査結果

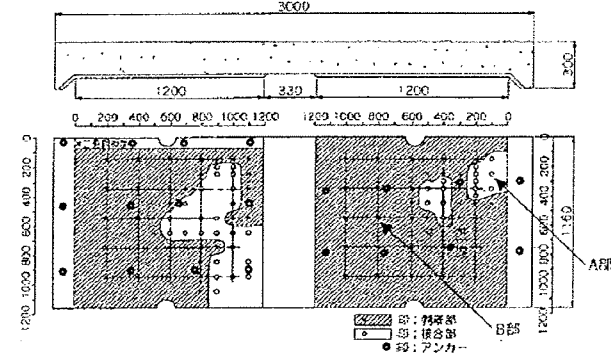


図-4.5.5 剥がし調査による鋼板接着部の調査結果

調査の結果、鋼板接着の良好な部分とはく離部とは、鋼板の信号波形に明確な差異が認められた(図-4.5.6)。接着良好部では鋼板の多重反射信号は、徐々に低下する減衰信号として検出されたことに対して、はく離部では、多重反射が顕著に検出された。

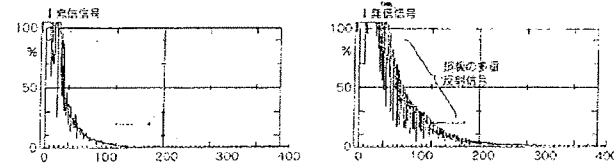


図-4.5.6 超音波信号波形の例

また、剥がし調査の結果と比較しても、超音波法によるはく離部の検出が十分可能であることが確認された。

ただし、はく離部に雨水などが滞水している場合に、接着部と同様の波形が検出されることがあるため、精度向上のための検証を行っていく必要がある。

## 4.6 衝撃弾性波法

### 4.6.1 原理

衝撃弾性波法とは、ハンマー等でコンクリート表面に打撃を加えてコンクリート表面に瞬時の変形を与えることで発生する波(衝撃弾性波)がコンクリート中を伝播した時の振動応答を調べることによって、コンクリート内部の情報を間接的に得る方法である。同種の方法で一般的なものとして超音波法がある。超音波法は、およそ 20kHz 以上の波をコンクリート中に入力し、その伝播特性によって内部の状況を調べる手法である。超音波法が 20kHz 以上の周波数を使って行う手法に対して、衝撃弾性波法は打撃方法にもよるが主に 0~20kHz の周波数領域を持った比較的低周波数の波を使用する。コンクリートの場合、金属材料と異なり材質的に不均一なため超音波の減衰が大きくなるのに対して、衝撃弾性波法の場合は、減衰の小さい低周波数の波を使用し、大きなエネルギーをコンクリートに与えることができるため、より遠くまで伝播させることができる。主にコンクリート杭のような長いコンクリート部材の探査に利用されている。

### 4.6.2 測定

衝撃弾性波による測定装置概略図(例)を図-4.6.1に示す。

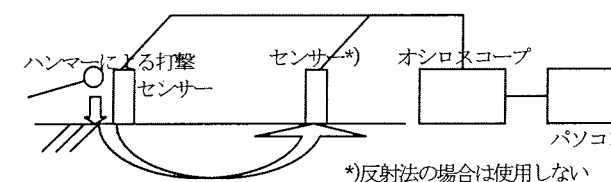


図-4.6.1 衝撃弾性波測定装置概略図

装置は打撃部および2つのセンサー(一個のセンサーで行う場合もある)とオシロスコープおよび波形記録装置(パソコンなど)から構成される。

### 4.6.3 衝撃弾性波による床版点検評価適用

衝撃弾性波を利用した非破壊試験の適用例としては、杭の損傷、PC グラウトなどの充填状況を確認するための非破壊試験として有効と考えられている。さらに、超音波法と同様にひび割れ深さの測定、内部欠陥の検出、弾性波速度測定が可能で、基礎、護岸および杭など大断面のコンクリート構造物の破損検出に適用される<sup>2)3)4)</sup>。受信波形の読み取り方法として、経験的で相対的な評価が多い等の問題があったが、現在、受信波形はスペクトル解析、ウェーブレット<sup>3)</sup>等を行うことによって判定に客観性を持たせる研究がなされている。そのなかで、コンクリートにひび割れが発生しているものと健全なコンクリートとで、衝撃弾性波の伝播特性の違いについてウェーブレット変換を利用して求めた研究がある<sup>5)</sup>。これによると、図-4.6.2

に示す測定で、ひび割れが発生したコンクリートに衝撃弾性波が伝播した際に減衰が大きくなるとされている(図-4.6.3, 4.6.4)。

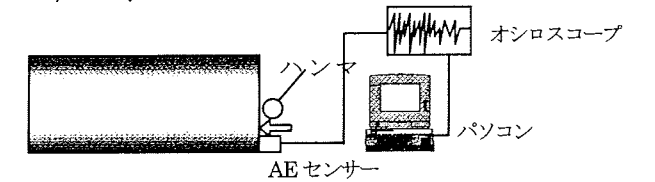


図-4.6.2 測定概略図

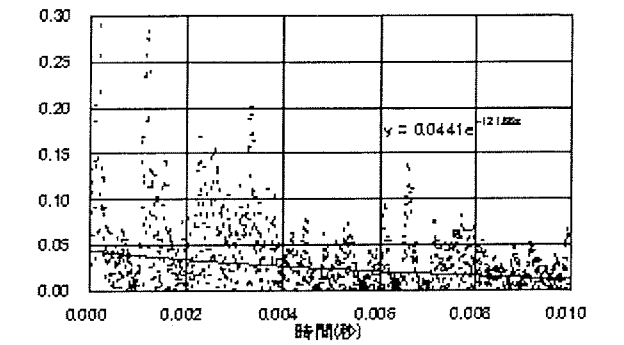


図-4.6.3 健全コンクリートでの測定結果

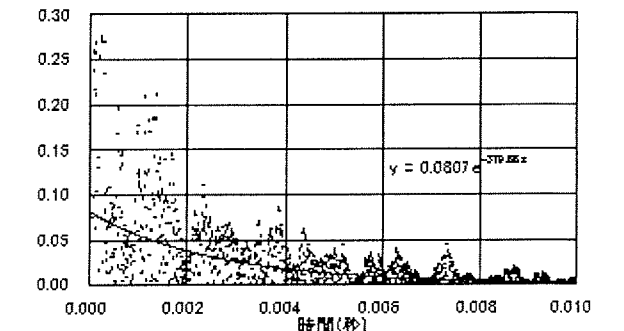


図-4.6.4 ひび割れ発生部での測定結果

この現象をもとに現在、床版の疲労状況と衝撃弾性波の伝播特性の関連性を実験的に求める研究が行われており、衝撃弾性波の伝播速度の低下、低周波数領域の顕著な減衰現象等が確認されつつある。将来的には、衝撃弾性波の比較的低周波数まで伝播するという特性を利用して、RC 床版の広範囲の診断(一次診断)方法として適用が望まれる。

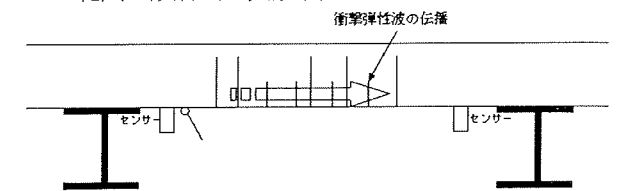


図-4.6.5 衝撃弾性波実験概略図

以下に測定例を示す。打撃部での測定値および伝播後の測定値をレベル5までにウェーブレット変換し、レベル3のデータを抽出したものを図-4.6.6, 4.6.7に示す(マザーウェーブレットは db3)。また、振幅の最大値の減衰率を疲労劣化の経過とともに測定した結果を図-4.5.8に示す。疲労劣化とともに減衰率が低下する傾向が見られる。

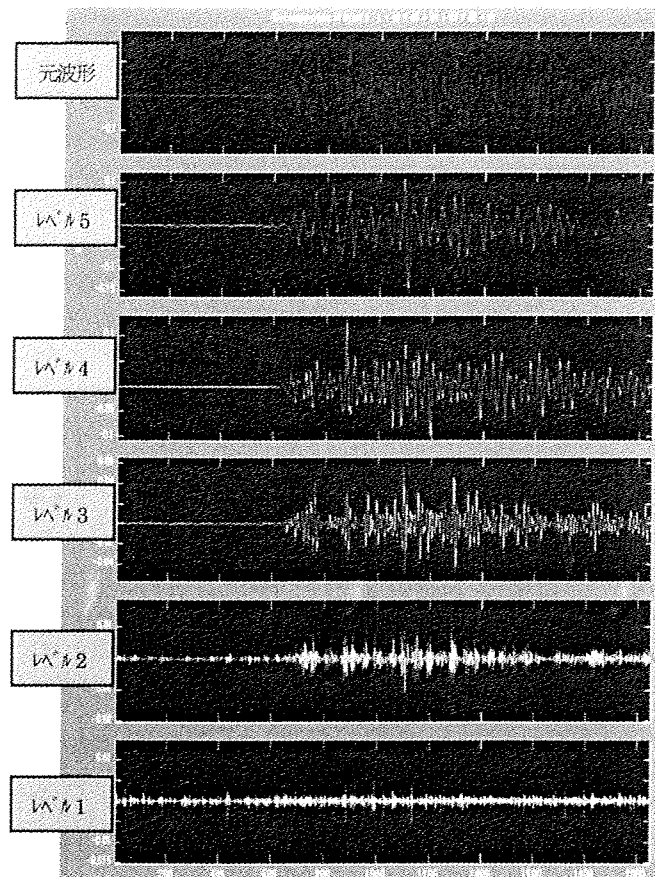


図-4.6.6 ウェーブレット変換後の波形例

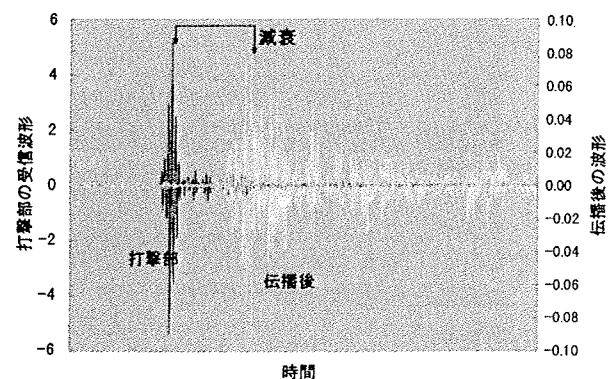


図-4.6.7 打撃部での測定値および伝播後の測定値 (ウェーブレット変換後：レベル3)

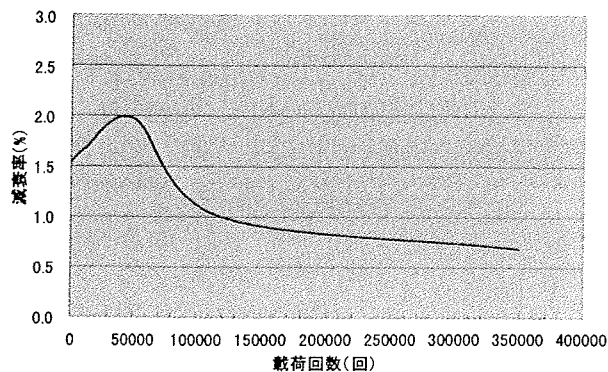


図-4.6.8 載荷回数と減衰率

\*ウェーブレットとは  
ある波形からマザーウェーブレットと呼ばれる波形と相似な波形だけを抽出する、一種のフィルターのようなものである。マザーウェーブレットを伸縮、平行移動することによって、解析する波形中のこれと相似なさまざまなスケール(周波数)の波形を時間軸情報を失うことなく抽出することができる。(図-4.6.9)

$$\text{定義式: } W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt$$

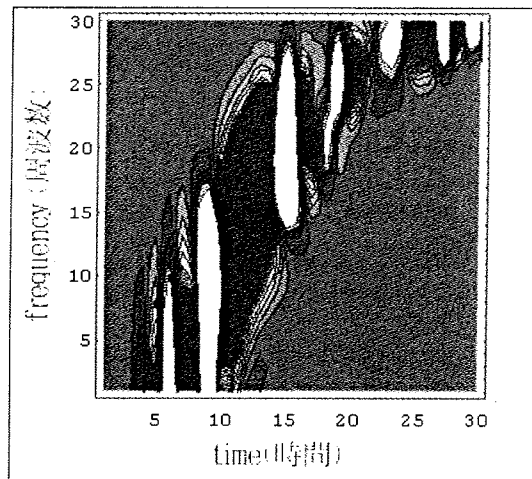
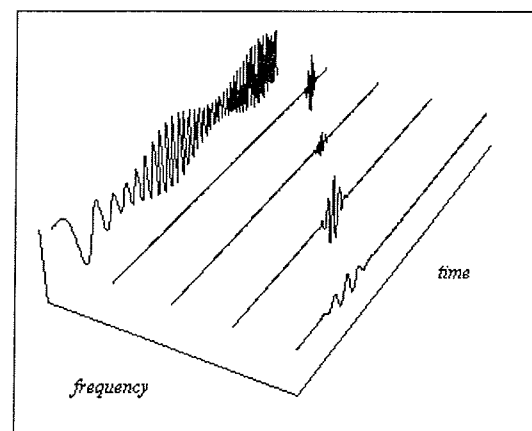


図-4.6.9 ウェーブレット解析による波の分解例

## 第5章 床版上面からの点検方法

### 5.1 概説

床版上面からの点検方法としては、一般に舗装面に現れる貫通ひび割れや陥没の前兆となる舗装面の窪み(鳥巣状のパッチング跡)、床版上面コンクリート部の砂利化現象などがある。これらは、陥没や劣化の指標となるが、舗装単体の劣化や損傷の可能性もあるため、床版下面の状態も合わせて確認しなければならない。ここでは、荷重車を用いた載荷試験による構造評価に代わる方法として、舗装の動的たわみ測定機のFWD(フォーリングウェイトデフレクトメータ)を用いて床版上面からたわみ量を測定して構造評価する新しい点検手法について記述する<sup>1)2)3)4)</sup>。

FWDの特徴は、

- ① FWDの測定では、従来の載荷試験に必要な足場、荷重車、計測機器等が不要である。
- ② FWD本体にたわみセンサを7個から10個備えており、床版パネル単位のたわみ量を多数のセンサで同時に計測できるため、たわみ形状の評価が簡単に行える。
- ③ 一箇所当たりの測定時間は10分以内であり、橋梁全体または1径間の全数調査も可能である。
- ④ FWDを橋梁床版のたわみ量の測定に適用した場合には、衝撃荷重によって床版がたわむと床版を支持している桁もたわむことから、たわみセンサにジオフォンを使用している機種では、支持桁のたわみ成分も同時に計測されることから補正が必要である。

これらの特徴を活かすとFWD調査は、現行の載荷試験に比べ簡便で安価に大量のデータを取得することができるため、新しい調査法に発展する可能性を有している。

### 5.2 FWDの構造と測定原理

#### 5.2.1 FWDの構造

FWDは1980年代に舗装の構造評価用たわみ測定機として欧米で開発された。わが国では1990年初頭にはじめて導入され、現在20台以上が稼働している。FWD本来の利用目的は、舗装のたわみ量を測定することによって、多層弾性理論を適用して舗装を構成している路床・路盤・基層・表層の各層の厚さと弾性係数およびポアソン比を基に、所定の荷重を作用させたときの変形量との関係から構造評価するために用いられる。具体的には、たわみ量を計測することにより、健全な状態に対してどの程度弾性係数が低下しているか、あるいは各層の下面の引張りひずみを算出し疲労破壊基準との関係で評価する方法が一般的である。

FWDの概念図を図-5.2.1に示す<sup>5)</sup>。FWDのタイプには、大別すると載荷装置としての重錘のタイプとたわみセンサのタイプで分類される。重錘のタイプは、図-5.2.1の例は重錘が1個の単重錘式であるが、バッファの上に2個重錘がある複重錘式がある。荷重の発生は、載荷板の直

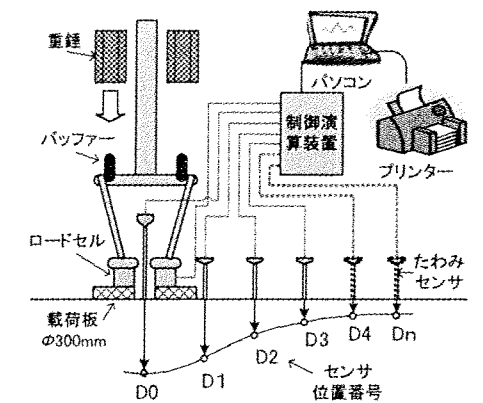


図-5.2.1 FWDの構造概念図

表-5.2.1 FWDの仕様

FWDタイプ	質量(kg)	計測方式	最大測定たわみ量	荷重(kN)
フェニックス	2,700	ジオフォン	5mm	49,78.4,98
コマンKM150	740	リニアゲージ	2mm	29.4,49,68.6



写真-5.2.1 車載型FWD

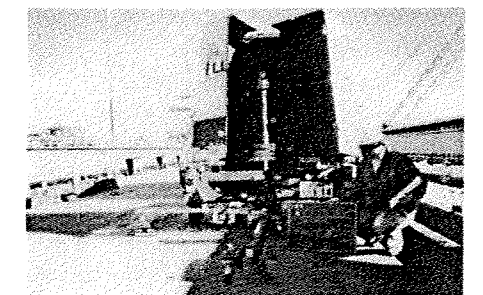


写真-5.2.2 牽引式FWD

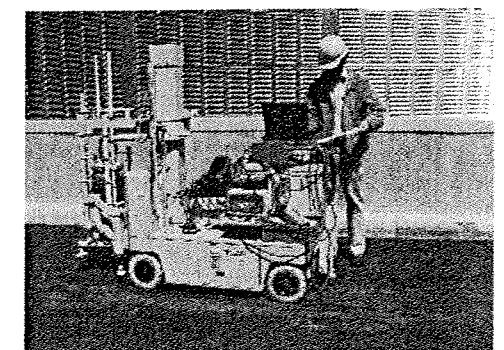


写真-5.2.3 床版用衝撃加振装置(IIS)

上にあるガイドにドーナツ型の重錘 (200kg~300kg) が装着されており、重錘の落下高さを調整することにより発生荷重をコントロールする。また、センサのタイプには、表-5.2.1に示すジオフォン (速度計、加速度計) と変位計 (リニアゲージ、作動トランス) に分けることができる。

発生可能な荷重は道路舗装用では衝撃荷重値で 30 kN ~100 kN が一般的であり、道路舗装では設計輪荷重の 50 kN が標準とされている。また、空港舗装用では最大 200 kN まで載荷できる機種もある。国内で使用されている FWD の機種は、写真-5.2.1に示す車載型と写真-5.2.2に示す牽引式がある。橋梁の床版に適用する場合は、取廻しのよい小型のものが使いやすい。東京都土木技術研究所では、写真-5.2.3に示す小型で取廻しのよい床版専用の簡易型の衝撃加振試験機を開発している。

### 5.2.2 測定原理

FWD は舗装のたわみ量を簡便に測定するために開発されたもので、不動点を必要としない測定システムである。

舗装は路面が無限板として存在し、衝撃荷重による第1波のたわみ曲面の生成は、ごく短時間である。また、第1波の変形のピーク値は、10~30ms の間に生じるよう設計されている<sup>3)</sup>。一方、たわみセンサの支持部は FWD 本体から軟らかいパネで吊り下げるパネで支持して、瞬間的な変位に対してセンサは追従するがセンサを固定している支持部は追従しない構造となっている。したがって、第1波の変形が完了し重錘がバウンドして2回目の荷重が作用する 100ms 程度の間では、センサを固定している支持棒は不動の状態を保持しており、この間に測定を完了する。

### 5.2.3 測定方法

測定位置は、床版パネルの中心位置を橋面上にマーキングし、直径 300 mm の載荷板中心位置とのずれが概ね 50 mm 以内になる条件で載荷する。測定回数は、測点 1 箇所あたり同一荷重で 4~5 回測定し、最初と異常値を切捨て 3 回の平均値を測定値するのが望ましい。温度の測定は、路面温度と気温を計測する。また、経年変化を調べる場合には、温度の影響を考慮して同一の季節とするのが望ましい。載荷荷重は、たわみ量の測定精度を考慮して、通常測定たわみ量の最大値が 1 mm 程度となる荷重が望ましいが、昭和 39~47 年の道示設計基準の床版では 50kN でよい。

同時に測定可能なたわみセンサは 7~10 個、載荷点からの距離は 0~2m 以内が一般的で、センサ取付け位置は任意に設定できる。取付け方向は、搭載車両の中心軸上に一方向 (縦方向) に取付けられているため、橋梁上で測定する場合は、橋軸方向のたわみを測定する機構になる。ただし、図-5.2.2の多摩水道橋の例<sup>4)</sup>に示したコマツ FWD のように橋軸直角方向にセンサを装着すると橋軸直角方向も測定できる。

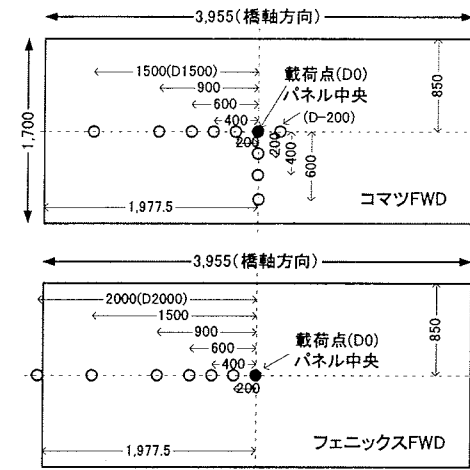


図-5.2.2 多摩水道橋 FWD センサ配置図

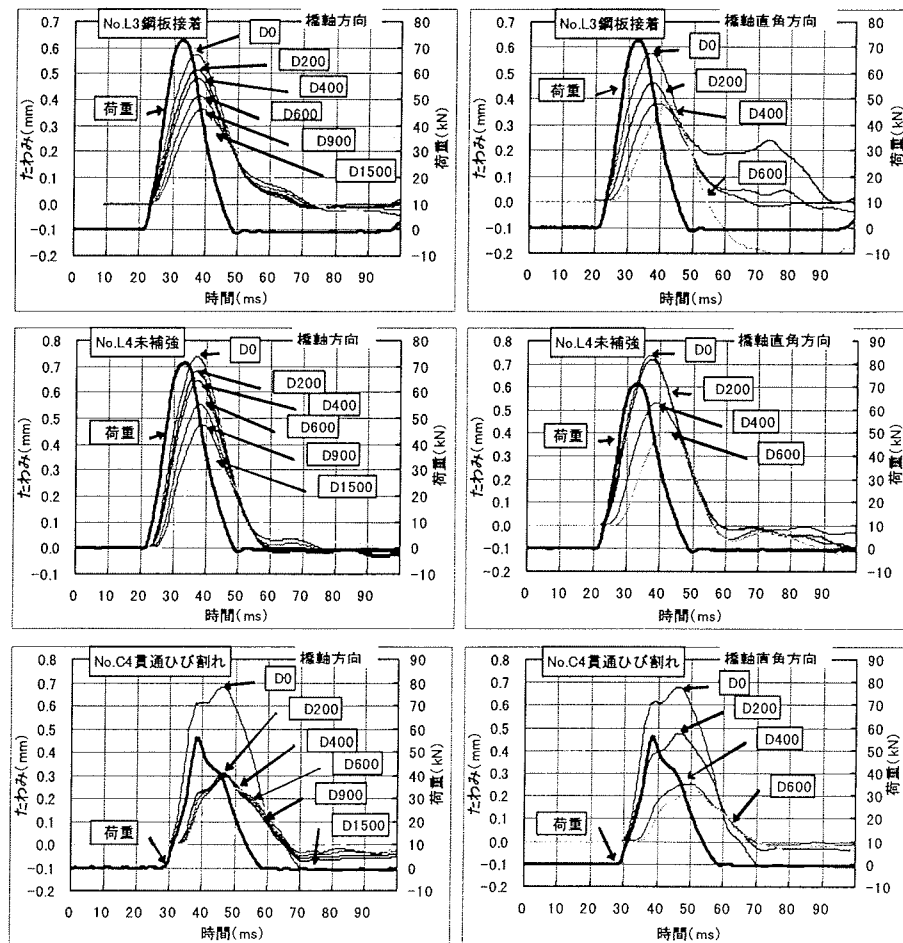


図-5.2.3 多摩水道橋コマツ FWD の荷重-たわみ測定波形

測定は測定位置に載荷板の中心を合わせ、載荷板とたわみセンサを路面に接触させる。重錘を所定の高さから落下させるとバッファ (ゴムやスプリング) を介して載荷板に荷重が作用し、短時間ではあるが路面 (床版) は図-5.2.1 の概念図に示したたわみ曲面のように変形する。作用する力は衝撃荷重であるため、たわみ曲面は振動波形となる。このときロードセルで荷重をたわみセンサで直接変位または振動波形を速度計や加速度計を使用してサンプリング間隔 2ms 程度で制御演算装置に取り込み、フィルタ処理と振動波形の速度や加速度は積分することで変位に変換し、たわみ量としてパソコンの記憶装置やプリンタに出力する。図-5.2.2 のように配置した各センサの荷重-たわみ測定波形の例を図-5.2.3に示した。

上段は鋼板接着床版、中段は未補強床版、下段は主鉄筋方向に貫通ひび割れがある床版の応答である。L3, L4 のピーク荷重発生時間は約 13ms, C4 は約 10ms であり許容範囲内にある。また、舗装の場合には荷重の応答波形は L3, L4 の出力例のように実際の走行荷重に近いハーフサイン波あるいはハーフサイン波<sup>5)</sup>とされており、床版に適用した場合にも同様な応答波形が得られる。

荷重が同じレベルでは載荷点の D0 の最大たわみ量は、床版の剛性すなわち健全性に依存して、L4 未補強床版 > L3 鋼板接着床版の結果が得られている。L3 鋼板接着床版の応答では、ピーク後の波形の橋軸直角方向 D400 (載荷点と支持桁との中間点) が乱れており、鋼板の接着部のはく離や完全合成でない状態を感知しているものと推察される。C4 の未補強貫通ひび割れ部の応答波形では、荷重のピーク波形が階段状に変化しており、貫通ひび割れ部の荷重伝達に遊びが感知され、D0 と D200 に不連続な応答が確認された。この影響は特に橋軸直角方向で顕著に現れている。応答波形にそれぞれの特徴が現れている。

各センサ応答最大値をプロットすることで図-5.2.4に示したたわみ曲線が求まる。たわみ曲線の形状やたわみ量の比較により床版の剛性や劣化の状況を判断する有用な情報となる。

### 5.2.4 支持桁のたわみ補正方法

FWD を橋梁に適用した場合には、図-5.2.5に示すように衝撃荷重によって床版がたわむと床版を支持している支持桁も曲げやねじれ振動でたわむことから、測定されるたわみ量に支持桁のたわみ成分も含まれ、支持桁を基準

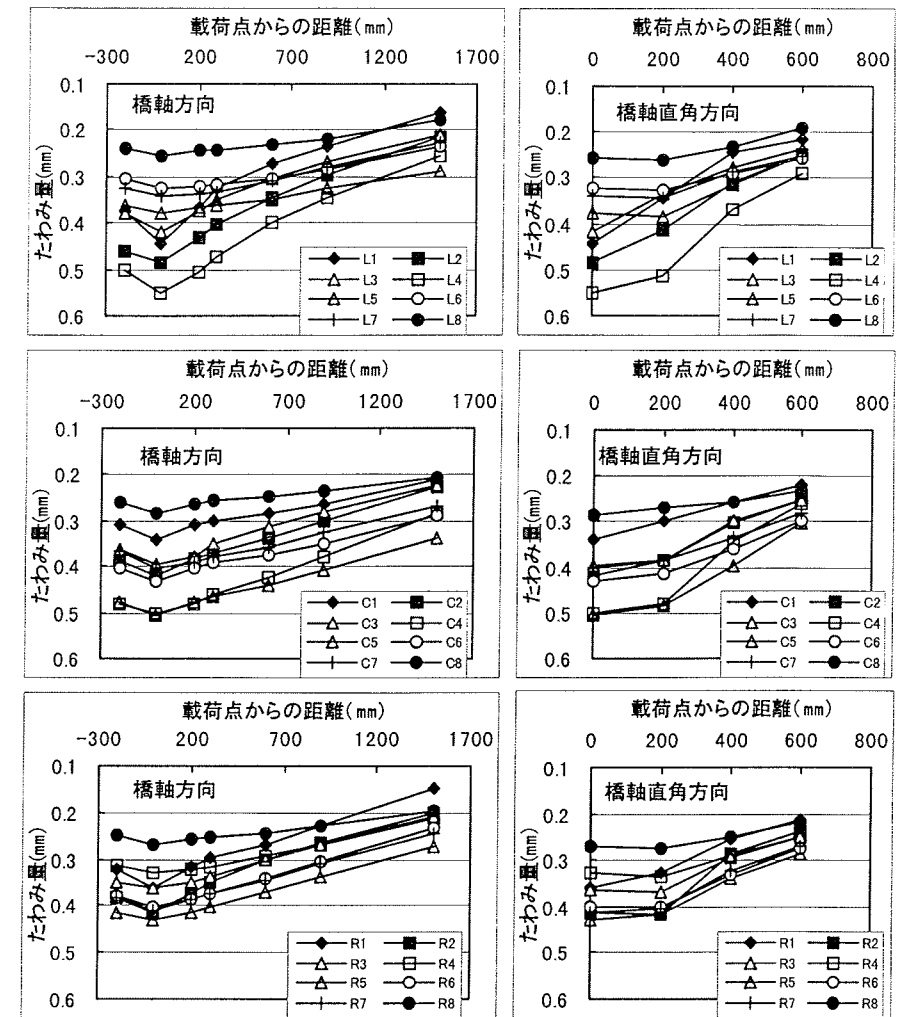


図-5.2.4 多摩水道橋 P1-P2 径間床版のコマツ FWD49kN たわみ測定結果

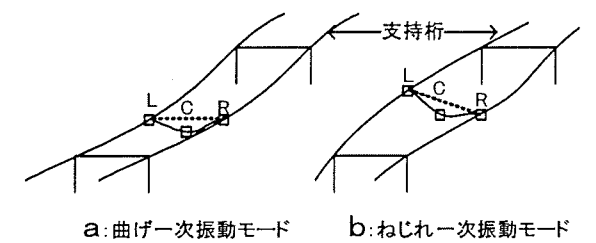


図-5.2.5 支持桁の振動モード

とする床版たわみ量と一致しない場合がある。図-5.2.6に荷重レベルを変えた場合の上下たわみ量の関係を示す。センサにジオフォンを使用しているフェニックス FWD は、リニアゲージタイプのコマツ FWD に比べ、上下のたわみ量の差が大きいことがわかる。

支持桁の変位成分を補正する方法としては、次の 2 方法が提案されている<sup>3)</sup>。

- ① 下面たわみ量を数箇所同時に測定してキャリブレーションを適切に行う。
- ② 床版を支持している主桁のたわみ成分も同時に計測して、合成波形法で補正する。

②の波形合成法で、上下振動に関係する主な橋梁の振動モードは、曲げ振動(面内振動)とねじれ振動が卓越することから、**図-5.2.4**のようにモデル化される。曲げ振動は橋軸直角方向に位置する主桁上の2つの測定点LとRの上下振動の位相は同位相になり、ねじれ振動は逆位相になる。この関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{支持桁の曲げ振動} &= (L+R)/2 \\ \text{支持桁のねじれ振動} &= (L-R)/2 \text{ または } (R-L)/2 \\ \text{床版のたわみ振動} &= C-(L+R)/2 \end{aligned}$$

L, R, Cの3成分を測定することによって合成波形を分解し、床版のたわみ振動波形を求めることができる。

### 5.3 適用事例

#### 5.3.1 補修効果の評価に活用した事例

**図-5.3.1**は、実橋における各種の床版補強工法の補修効果の評価した例である<sup>2)</sup>。補修前後にFWDを載荷装置として用い、下面に変位計をセットして49kN(5tf)の衝撃荷重を載荷して、補修効果をたわみの低減率で評価している。

$$\text{たわみ低減率(\%)} = \frac{\delta - \delta_r}{\delta} \times 100 \quad (5.3.1)$$

ここに  $\delta$  : 補修前たわみ量(mm)  
 $\delta_r$  : 補修後たわみ量(mm)

#### 5.3.2 たわみに基づく劣化度評価

松井らの文献<sup>6)</sup>によれば、実橋と輪荷重走行疲労実験によりひび割れ密度とたわみ量の関係を調査した結果、ひび割れ密度とたわみの使用限界を基準に、それぞれの劣化度を次式で表現すると両者の関係は比例関係にあることから、いずれの劣化度も有効な指標であるとしている。たわみ量による劣化度(D $\delta$ )は次式で求める。

$$D\delta = \frac{(W - W_0)}{(W_c - W_0)} \quad (5.3.2)$$

ここに、  
D $\delta$  : たわみ量に基づく劣化度  
W : ある荷重のたわみ量 (mm)  
W<sub>0</sub> : 全断面有効とする等方性版理論による計算たわみ量 (mm)  
W<sub>c</sub> : 引張りコンクリートを無視した直交異方性版理論による計算たわみ量 (mm)

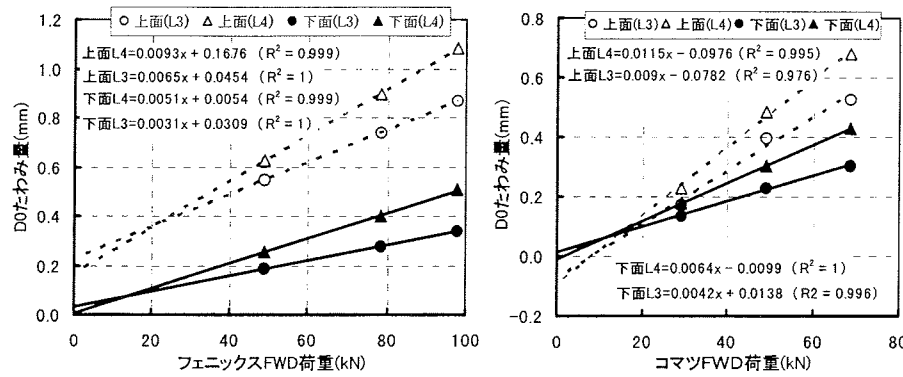


図-5.2.6 荷重レベルを変えた場合の上下たわみ量の関係

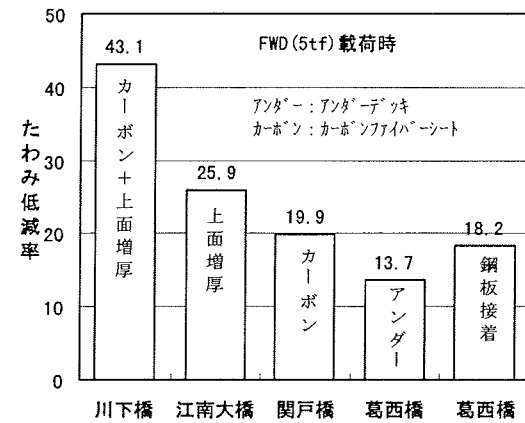


図-5.3.1 FWDを載荷装置に活用した補修効果の評価

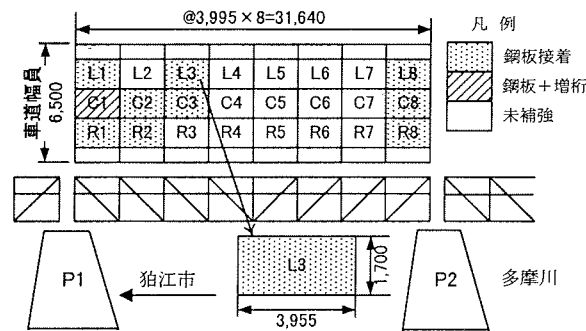


図-5.3.2 多摩水道橋の調査箇所図

表-5.3.1 49kN 載荷 D0 補正たわみ量 (mm)

床版No.	1	2	3	4	5	6	7	8
L	0.213	0.265	0.233	0.294	0.188	0.162	0.171	0.137
C	0.170	0.221	0.203	0.251	0.242	0.210	0.202	0.140
R	0.194	0.226	0.199	0.185	0.223	0.217	0.217	0.147

調査橋梁は、**図-5.3.2**に示す東京都の多摩水道橋で、D0 補正たわみ量は**表-5.3.1**のとおりである。理論たわみ量を求めるための計算条件と計算結果は**表-5.3.2**、**表-5.3.3**のとおりである。床版厚と配筋は切出し床版の平均断面から設定した。床版厚は調整コンクリートが完全に一体として機能していたことから、調整コンクリートを含む厚さを床版厚として計算している。なお、調査が秋季から冬季のため、アスファルト舗装も考慮すべきと考えられるが、ひび割れが入っている箇所も散見されることから、

計算では考慮していない。文献6)によるたわみ量に基づく劣化度と健全度ランクの関係を本調査橋梁のA1-P1 区間の24床版パネルに適用すると**図-5.3.3**に示す結果が得られる。評価結果は健全度ランクA(劣化度0~0.3未満)と健全度ランクB(劣化度0.3~0.6未満)に集中している。

#### 5.3.3 ひび割れ密度に基づく劣化度評価

文献6)によるひび割れ密度に基づく劣化度(D<sub>c</sub>)は、式(5.3.3)で定義されている。

$$D_c = \frac{C_d}{10} \quad (5.3.3)$$

ここに、  
C<sub>d</sub> : ひび割れ密度 (m/m<sup>2</sup>)  
10.0 : 使用限界のひび割れ密度 (m/m<sup>2</sup>)

ひび割れ密度に関する調査は、ひび割れ密度(C<sub>r</sub>)のほかにひび割れの角欠け部をカウントした角欠け密度(C<sub>k</sub>)とひび割れ密度と角欠け密度を足し合わせたひび割れ+角欠け密度(C<sub>rk</sub>)を算出した。それぞれの指標の供用限界はC<sub>r</sub>とC<sub>k</sub>については10.0m/m<sup>2</sup>、C<sub>rk</sub>は両者の合計20.0m/m<sup>2</sup>と仮定する。それぞれの劣化度を式(5.3.2)および式(5.3.3)により算出した結果を**表-5.3.3**に示した。

たわみ量による劣化度D $\delta$ とひび割れに関する3指標(C<sub>r</sub>, C<sub>k</sub>, C<sub>rk</sub>)の劣化度の関係を**図-5.3.4**に示した。ひび割れ密度とたわみ量に基づく劣化度の関係より角欠け密度とたわみ量に基づく劣化度の関係の方が若干相関は良い結果となった。ここで、東京都の目視観察を主体とする技術者による健全度ランクとたわみ量に基づく劣化度の評価結果を**表-5.3.4**に示す。上段は現行の技術者による健全度評価ランクであり、鋼板接着および縦桁併用補強床版のランクは一義的にランクCに評価されている。

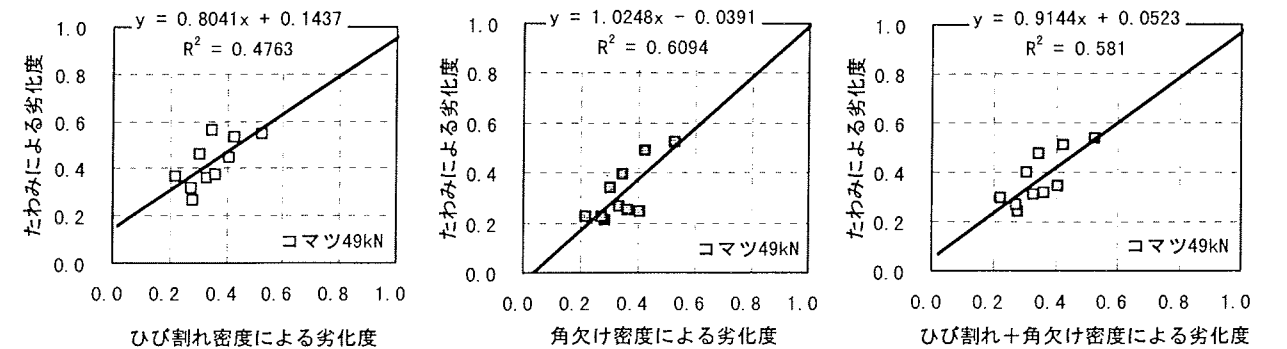


図-5.3.4 ひび割れ密度による劣化度とたわみによる劣化度の関係

表-5.3.2 計算条件と49kN 載荷計算たわみ量

床版厚 (mm)	コア強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	主鉄筋		配筋筋		計算たわみ量(mm)	
				上段:圧縮 有効高 (mm)	下段:引張 (mm)	上段:圧縮 有効高 (mm)	下段:引張 (mm)	全断面有効	引張り無視
215	60.1	41000	0.19	φ13@250: 84	φ13@125: 189	φ9@275: 121	φ9@250: 178	0.066	0.500

表-5.3.3 たわみとひび割れに関する劣化度

床版No.	L4	L5	L6	C4	C5	C6	R3	R4	R5	R6
劣化度D $\delta$	0.526	0.282	0.221	0.427	0.406	0.331	0.306	0.275	0.362	0.347
劣化度DC <sub>r</sub>	0.549	0.268	0.368	0.533	0.445	0.358	0.462	0.318	0.373	0.563
劣化度DC <sub>k</sub>	0.527	0.213	0.225	0.489	0.246	0.265	0.340	0.225	0.255	0.395
劣化度DC <sub>rk</sub>	0.538	0.241	0.297	0.511	0.346	0.311	0.401	0.271	0.314	0.479

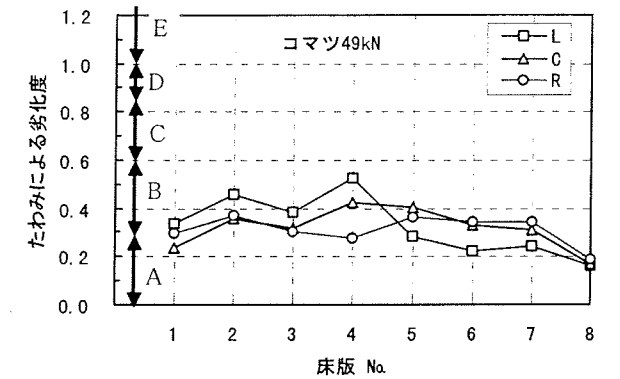


図-5.3.3 たわみによる劣化度の評価

表-5.3.4 技術者評価とたわみ量による劣化度の評価

技術者の健全度評価									凡例
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	
L	C	C	C	D	C	C	C	C	鋼板接着 鋼板+縦桁 未補強
C	C	C	C	D	D	C	D	C	
R	C	C	C	C	B	C	C	C	

コマツFWDたわみ量に基づく評価例									D $\delta$ の凡例
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	
L	B	B	B	B	A	A	A	A	A=0.3未満 B=0.3~0.6 C=0.6~0.85 D=0.85~1.0 E=1.0以上
C	B	B	B	B	B	B	B	A	
C	B	B	B	A	B	B	B	A	
R	B	B	B	A	B	B	B	A	

一方、下段はFWD たわみ量を文献6)のランク分けて評価した場合の例であり、たわみ量に基づく判定は、目視による現行の判定をカバーし、かつ鋼板接着床版のランクを一義的に判定することなく、より合理的な評価結果を得ることができる。

## 第6章 おわりに

昭和39年道路橋示方書（以下道示）で設計されたRC床版は、鉄筋量および床版厚の不足、また、近年の車両の大型化および交通量の増大等に起因する床版コンクリートの抜け落ち等の損傷事例が報告された。これが契機となり、RC床版の損傷機構の解明や損傷対策に関する調査研究がさかんに行われた。構造物の補修・補強では、損傷原因の特定やメカニズムの解明が重要であり、原因の解明が不十分なまま補強を行った場合には、その対策が十分であったかどうかの確証は得られず、不測の事態を招くおそれもある。RC床版の損傷については、その部材の持つ役割から、損傷原因は疲労現象であるということは比較的容易に推測されたが、実橋床版の破壊現象や疲労寿命の説明は困難であった。しかし、輪荷重走行試験の実施により、従来説明が困難であった床版の損傷メカニズムは、ほぼ解明されたと考えられている。

一方、昭和39年道示以降、示方書の変遷に目を向けると、床版の設計曲げモーメントの基本式は昭和48年道示で改訂され、現平成14年道示にも適用されている。現在、昭和48年道示以降に設計されたRC床版については、その設計手法に起因する損傷事例はまだ報告されていないが、供用後30年以上経過していることから、今後疲労損傷が生じることも考えられる。

このようなことから、今後の課題としては、従来、昭和39年道示を適用して設計したRC床版の疲労劣化に対する健全度判定を昭和48年以降の道示で設計された床版に適用することの妥当性について検討する必要がある。

また、補強済のRC床版については、疲労劣化が進んだ段階で補強対策が実施されることから、劣化状態により補強効果についても大きく異なる可能性がある。補強後の点検においても、一部の機関を除いては具体的な方法が定められていないことに加え、補強後のRC床版は「補強することによって健全な状態に回復した」として、健全な床版と同等の疲労耐久性を有しているものとして取り扱っているのが現状である。しかし、補強済RC床版は一度損傷を受けているため、人間に例えると健常者に比べ体力が弱いと考えることができる。すなわち、健全な床版と比較して疲労耐久性が低下しやすい構造特性を有していると考えられる。したがって、人間が定期検診を受診すると同様に、補強後のRC床版もきめ細かな点検を実施すべきである。例えば、補強部材により床版表面が被覆され、従来の目視を主とする点検が適用できない場合でも、本報告書で紹介した各種点検方法を採用することにより、合理的な維持管理が行えるものとする。また、各種点検で得られた成果を蓄積することで、新たな知見が得られるものとする。

このような現状を踏まえ、昭和48年道示以降の道路橋床版および補強済RC床版の維持管理手法を確立していくことが重要であり、さらに、合成床版、PC床版にも適用を拡大していかななくてはならない。そのために、今後も積極的な検討を進めていきたいと考えている。

## 参考文献

＜第2章 RC床版の維持管理と現状＞

・2.1 各道路管理機関におけるRC床版の健全度判定標準

- 1) 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, 土木学会, 平成12年10月
- 2) 既存橋梁床版の維持管理(その1), 松井繁之・太田孝二・西川和廣, 橋梁と基礎, 平成11年1月
- 3) 道路橋マネジメントの手引き, (財)海洋架橋・橋梁調査会 平成16年8月
- 4) 北海道における鋼道路橋の設計および施工指針, 平成7年12月
- 5) 道路橋床版補修要領(案), 東京都建設局, 昭和63年4月
- 6) 維持修繕要領, 日本道路公団, 昭和63年5月
- 7) 構造物等点検要領 首都高速道路公団 保全施設部 平成16年4月
- 8) 道路構造物の点検標準, 阪神高速道路公団, 平成14年5月
- 9) コンクリートの耐久性, 岡田清編著, 1986年1月
- 10) CFシートを用いたRC床版補強要領(暫定案), 阪神高速道路公団, 平成10年3月

・2.2 鋼板接着工法

- 1) 堀川, 加藤, 吉川, 山口, 園田: 「鋼板接着工法で補強されたひび割れ損傷RC床版の耐久性について」, 構造工学論文集 Vol.44A, 土木学会, 1998.3
- 2) 松井, 中井, 栗田, 黒山: 「鋼板接着工法により補強したRC床版の疲労性状」, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1986.9
- 3) 宮崎, 西川, 内田, 廣松, 松尾: 「上面増厚工法および鋼板接着工法で補強したRC床版の輪荷重走行試験」, 土木学会第54回年次学術講演会, 1998.10
- 4) 林, 園田, 松井, 沖野: 「鋼板補強したRC床版の疲労試験」, 土木学会第42回年次学術講演会, 1987.9
- 5) 阪神高速道路公団: 「道路構造物の点検要領(土木構造物編)」, 平成14年5月
- 6) (財)阪神高速道路管理技術センター: 「損傷と補修事例にみる 道路橋のメンテナンス 阪神高速道路」, 平成5年3月 他

・2.3 縦桁補強工法

- 1) (社)土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, p55-56, 平成12年10月
- 2) (株)テクノシステム 鉄筋コンクリート構造物の劣化対策技術, p313
- 3) 道路保全技術センター, 道路構造物保全研究会: 保全技術者のための橋梁技術の変遷, p60, 平成11年7月
- 4) 日本道路公団試験所 試験所報告(昭和52年度), P210-225, 昭和53年12月

- 5) (財)首都高速道路協会 床版補強の設計施工に関する調査研究(その2)報告書, 昭和56年3月
- 6) (財)首都高速道路協会 床版補強の設計施工に関する調査研究(その3)報告書, 昭和57年3月
- 7) 深山他 縦桁が増設されたRC床版への連続シートによる再補強に関する研究 土木学会第59回年次学術講演会, p271-272, 平成16年9月

・2.4 上面増厚工法

- 1) 高速道路調査会: 上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.11
- 2) 松井繁之, 木村元哉, 蓑毛勉: 「増厚工法によるRC床版補強の耐久性評価」, 構造工学論文集, Vol.38A, 土木学会, 1992-3

・2.5 炭素繊維シート接着工法

- 1) 森成道, 若下藤紀, 松井繁之, 西川和廣: 「炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究」, 橋梁と基礎, 95-3
- 2) 「コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ)-炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-」, 建設省土木研究所・炭素繊維補修補強工法技術研究会, 建設省土木研究所共同研究報告書第235号, 1999.12
- 3) 「CFシートを用いたRC床版補強要領(案)」, 阪神高速道路公団, 1999
- 4) 岡田昌澄, 大西弘志, 松井繁之, 小林朗: 「格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果」, 第3回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, 2003
- 5) 林秀侃, 林田充弘, 及川じゅん: 「RC床版の炭素繊維シート補強に関する考察」, 第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, 1998
- 6) 星島時太郎, 太田黒博文, 坂井広道, 松井繁之: 「損傷した道路橋床版の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究」, 橋梁と基礎, 98-9
- 7) 松尾伸二, 西川和廣, 内田賢一: 「炭素繊維シート接着工法による既設RC床版の疲労耐久性に関する研究」, 第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, 1998
- 8) 松尾伸二, 宇治公隆, 西川和廣, 小林朗, 内田賢一: 「荷重一定載荷による炭素繊維シート接着床版の疲労耐久性に関する実験的検討」, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999
- 9) 松浦弘, 久良木, 吉沢弘之: 炭素繊維シート接着工法による橋梁床版補修工事, 第21回日本道路会議論文集, 1995
- 10) 吉沢弘之, 島内洋年, 木虎久人, 國川正勝: 炭素繊維シートとコンクリートの定着挙動, 土木学会第50回年次講演会概要集, V-201, pp. 52-53, 1995.
- 11) 宇佐美惣, 長田光司, 井ヶ瀬良則, 斉藤誠: 炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響,



コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1225-1230, 1999

- 12) 日本道路公団：構造部物施工管理要領, 平成 11 年 7 月

#### ・2.6 下面増厚工法

- 1) 「道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価方法の開発に関する共同研究報告書(その5)-評価編-」, 国土交通省土木研究所, (財)土木研究センター他, 国土交通省土木研究所共同研究報告書第 277 号, 2001.3
- 2) 佐藤貢一, 松井繁之, 渡辺祐一, 高井剣: 「下面増厚工法による RC 床版補強の耐久性」, 橋梁と基礎, 1996-9
- 3) 軽尾助夫, 末田彰助, 松井繁之, 財津公明: 「PP モルタルを用いた下面増厚工法の床版補強効果確認実験」, 橋梁と基礎, 1997-5
- 4) 伊藤利和, 松井繁之, 牧添幸徳, 財津公明: 「下面増厚工法によって補強された RC 床版の経年調査結果」, 第 2 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, 2000
- 5) 佐藤貢一, 財津公明, 小林朗, 関根憲一, : 「FRP グリッドを補強筋に用いた道路橋床版下面増厚補強工法の輪荷重走行試験による性能評価」, 性能照査型システムにおけるコンクリート構造物の補強に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 2001

#### <第3章 道路橋床版の健全度評価>

- 1) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984 年 11 月

#### <第4章 床版下面からの点検方法>

##### ・4.2 目視

- 1) 小出ほか, デジタルスチル画像によるコンクリート床版ひび割れ認識の研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp454. 1999
- 2) 川合ほか, CCD カメラシステムによる橋梁点検技術の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 2001

##### ・4.3 赤外線

- 1) コンクリート診断技術 '03[基礎編] 社団法人日本コンクリート工学協会 pp. 109~112
- 2) 佐藤辰巳ほか, 各種工法による補強済み RC 床版の維持管理手法について, 土木学会鋼構造委員会 第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集 pp49~54, 2003. 6
- 3) 金光寿一ほか, 舗装熱を利用したサーモグラフィ法による RC 床版内部の欠陥検出に関する研究, 土木学会論文集 No. 732/V-59, 95-108, 2003. 5

##### ・4.4 打音

- 1) コンクリート診断技術 '03[基礎編] 社団法人日本コンクリート工学協会 pp. 112

##### ・4.5 衝撃弾性波法

- 1) 田中, 松村, 中谷, 猪八重: コンクリート非破壊検査の検証例, 土木技術 57 巻 12 号, pp39~46, 2002
- 2) 南荘, 枚本, 今田, 仲田: 埋め立て地盤における基礎杭の健全性調査手法について, 第 31 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp1791~1792, 1996
- 3) 仲田, 南荘, 安田, 今田: 非破壊試験の橋脚基礎損傷調査への適用事例, 耐震補強・補修技術耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集, pp189~196, 1997
- 4) 仲田, 南荘, 川上, 今田: フーチング上面からの基礎杭非破壊調査手法について, 第 51 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp716~717, 1996
- 5) 木虎, 水口: 非破壊試験によるコンクリート杭の劣化診断に関する基礎的研究, 第 53 回セメント技術大会講演要旨, pp372~373, 1999

#### <第5章 床版上面からの点検方法>

- 1) 阿部忠行, 関口幹夫, 小原利美: 土木構造物の維持更新と機能向上技術開発, 平 8. 都土木技研年報, pp. 115-126, 1996.
- 2) 関口幹夫: RC 床版の衝撃加振たわみによる健全度評価法に関する基礎的検討. 土木学会第 57 回年次学術講演論文集, CS4-037, PP. 183-184. (H14 年 9 月)
- 3) 関口幹夫: FWD による床版たわみ測定手法の検討. 土木学会第 58 回年次学術講演論文集, CS6-051, PP. 253-254. (H15 年 9 月)
- 4) 関口幹夫, 国府勝郎: FWD による床版の健全度評価手法の検討, 構造工学論文集, Vol. 50A, PP. 697-706. 2004.
- 5) 土木学会: FWD および小型 FWD 運用手引き, 舗装工学ライブラリー 2, 2002.
- 6) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集 第 374 号, pp. 419-426, 1986.

#### 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上

平成16年11月10日印刷

平成16年11月15日発行

編集者 東京都新宿区四谷一丁目(外濠公園内)

土木学会鋼構造委員会

発行者 東京都新宿区四谷一丁目(外濠公園内)

土木学会 古木守清

発行所 東京都新宿区四谷一丁目(外濠公園内)

社団法人土木学会

〒160-0004/電話(03)3355-3441番(代表)