

第1編 橋梁の現状と劣化の推定

1	概要	1-1
2	橋梁の現状	1-1
2.1	橋梁の現状	1-1
2.2	橋梁の劣化	1-6
2.2.1	コンクリート橋の劣化現象	1-6
2.2.2	鋼橋の劣化現象	1-7
2.3	部材（床版）の劣化	1-8
2.3.1	床版の劣化過程	1-9
2.3.2	劣化指標	1-10
2.3.3	劣化要因	1-10
2.3.4	劣化による性能の低下	1-13
2.3.5	劣化の予測指標	1-14
2.4	劣化と調査方法および補修方法	1-14
2.4.1	劣化と調査法	1-14
2.4.2	劣化と回復方策	1-15
2.4.3	調査法・工法の選定とシナリオの構築	1-16
3	荷重の実態	1-18
3.1	はじめに	1-18
3.2	橋梁を用いた軸重推定	1-18
3.2.1	軸重推定の概要	1-18
3.2.2	疲労照査の方法	1-19
3.3	U橋センサデータから見た荷重特性の推定と疲労に関する考察	1-20
3.3.1	U橋概要	1-20
3.3.2	交通センサ結果の整理	1-21
3.3.3	U橋の補強履歴について	1-23
3.3.4	床版の疲労評価フロー	1-23
3.3.5	U橋における疲労評価	1-24
3.3.6	まとめ，および今後の課題	1-26
3.4	遠隔モニタリングシステム	1-29

1 概要

日本の近代化土木遺産に多数の橋梁が含まれる。殖産興業という目標とその時流にあつて、列強先進国の新技術を導入・吸収し、早くに肩を並べたいとの意気込みで、若き技術者たちは情熱を燃やしていた。国全体に熱い時代があつた。

日本最初の鉄筋コンクリート橋は、フランスの技術を導入しセメントや鉄筋を輸入しながら 1903 年 7 月京都市に完成した。大学を卒業したばかり 21 歳の青年技師・田邊朔郎の手によるもので、「本邦最初鉄筋混凝土橋」の碑とともに現橋が今も残されている。鉄の橋は、それに遡ること 35 年、1868 年長崎市に建設された、くろがね橋が最初である。ここでも輸入材が用いられたが、10 年後には国産の鉄を使用した橋梁が早くも架けられている。プレストレストコンクリート橋はこれらに比べると新しく昭和 26 年(1951 年)石川県七尾市に架けられた長生橋が最初である。

このように材料革新による新素材の導入と、土木・橋梁工学の発展による設計施工における新技術新工法の導入などにより、橋梁をはじめとする道路構造物は、遅滞することなく常に進化してきた。それは、経済性の向上を図るとともに不可能を可能に、夢を現実に変えてきた。山間部、荒廃溪流、沿岸・海上部、急斜面上、軟弱地盤上、屈曲部や都市内錯綜部など至る所で架橋を可能にし、道路網を築き上げ、社会生活や産業活動にかかせない社会基盤として発達してきた。

その社会基盤としての橋梁がいま危機に瀕している。高齢化等に伴う各種劣化要因により、荒廃が進み、抜き差しならない事態にまで至るシナリオが想定される状況である。これらのことから、既設構造物の延命化に関する研究が重要であり、喫緊の課題であることをいみじくも現している。

ここでは、橋梁の現況を俯瞰するとともに、劣化の実態を把握し、適切な調査方法と補修方法の選定に至る手法について概説する。また、本プロジェクトが行ったモニタリングデータによる荷重の実態とそれから推定される疲労損傷度の算定を行った。これは実数把握により路線と橋梁の置かれている道路特性を明らかにするためのもので、U 橋現地に構築中の遠隔常時モニタリングシステムによる計測システムに連動することで、情報価値がさらに高まるものと考えている。

2 橋梁の現状

2.1 橋梁の実態

現在、橋長 15m 以上の道路橋は 14 万橋を超過し、その多くは 1960 年代から 1980 年代にかけて建設されている^{1) 2)}。その内訳は、図-1～図-4 に示すとおり、橋数では RC、PC などのコンクリート橋が半数以上を占めるが、橋梁の延長で比較すると鋼橋の割合が大きい¹⁾。

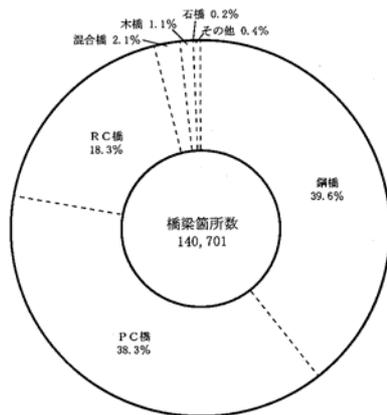


図-1 橋種別橋梁箇所数比率

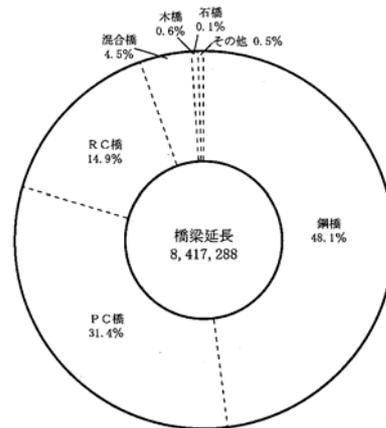


図-2 橋種別橋梁延長比率

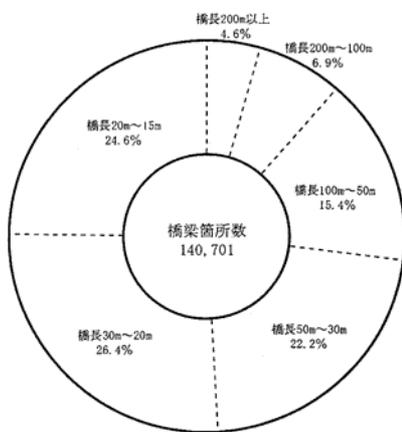


図-3 橋梁延長別箇所数比率

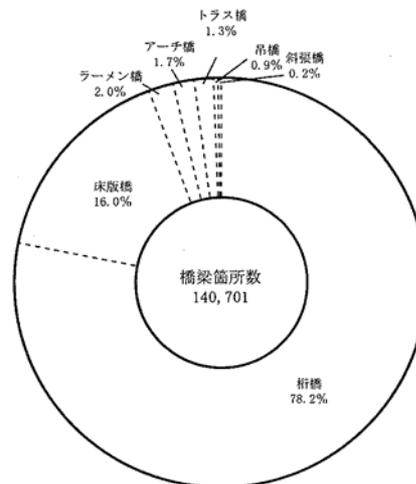


図-4 橋梁構造形式別橋梁箇所数比率

現在供用中の総道路橋数と建設数の推移は、図-5 に示すとおりである。高度成長期に大量に建設されており、そのまま高齢化が進むとこれら橋梁群の平均年齢のピークが 2020 年代には約 55 歳付近に来ることがわかる。(図-6 参照) また、55 歳以上の橋梁が 2001 年時点では約 1100 橋程度であるのに対し 2021 年には、20,000 橋を超えることになり高齢化する橋梁が加速度的に増加してゆくことになる。²⁾

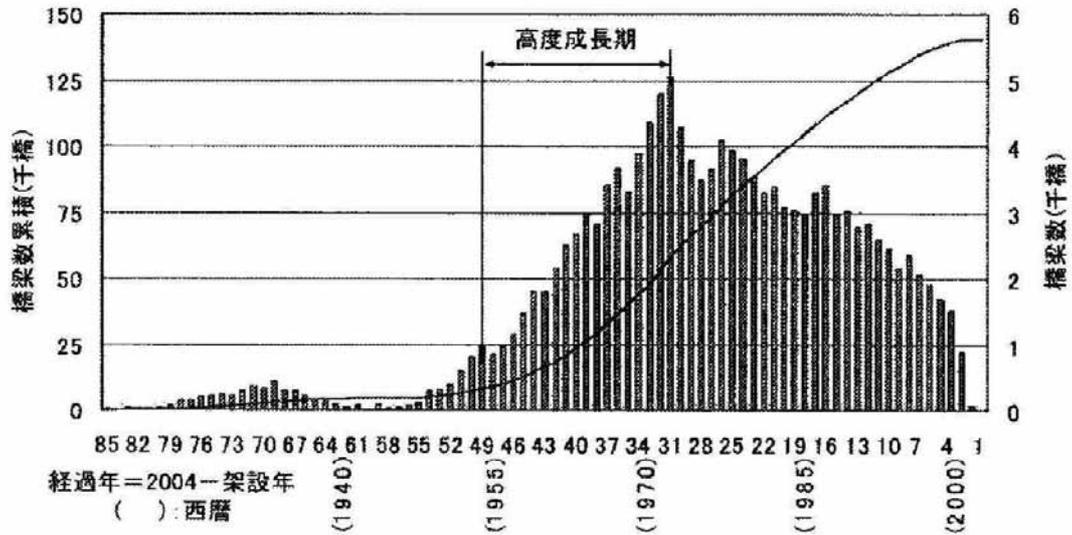


図-5 総道路橋数と建設数の推移

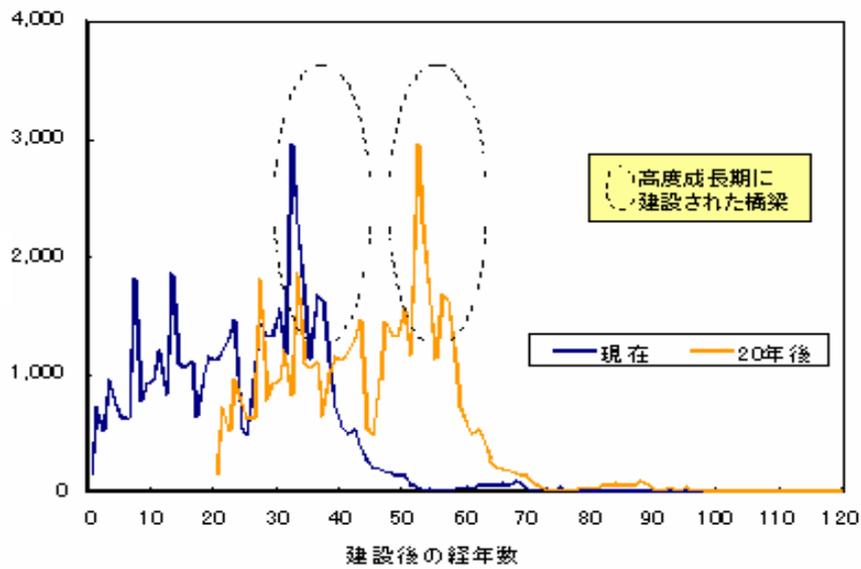


図-6 橋梁群の平均年齢

近畿地方整備局管内の全橋梁の架設竣工年を図-7 に示す．全国版とは幾分異なったグラフを示すものの，高度成長期に大量に建設されたものが高齢化していく様子は同様の状態と考えられる．橋長 15m以上の橋梁に着目し大きなイベント情報と重ね合わせるとわかりやすい．(図-8 参照) 図中の最も高齢化した部分を詳述した図が，図-9 である．

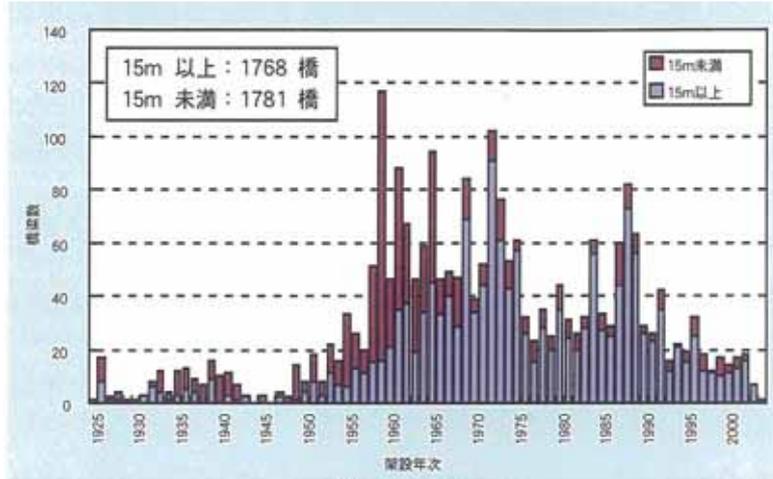


図-7 橋梁の架設数と竣工年⁴⁾

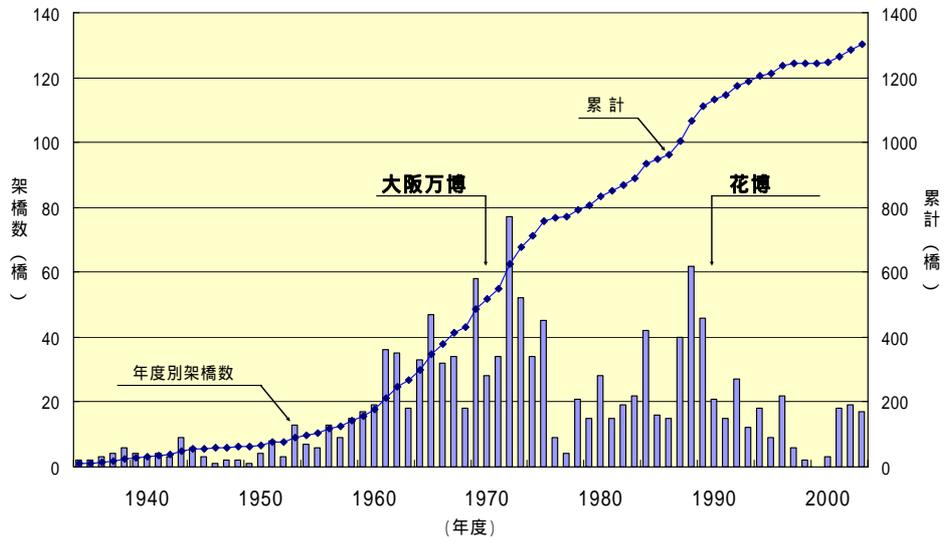


図-8 イベント情報と架橋数

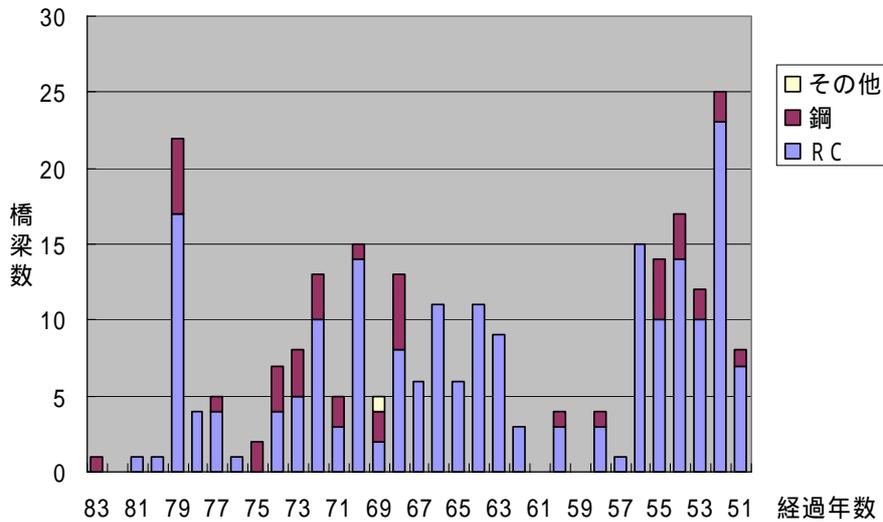


図-9 架橋数の内訳

過去に国土交通省管轄の道路橋に関して道路橋架け替えの理由を調査した結果、損傷を受けて架け替えを行った橋梁は 20%弱程度であり、ほとんどは機能上の問題や使用条件の変化などにより架け替えを行っている。(図-10 参照)²⁾

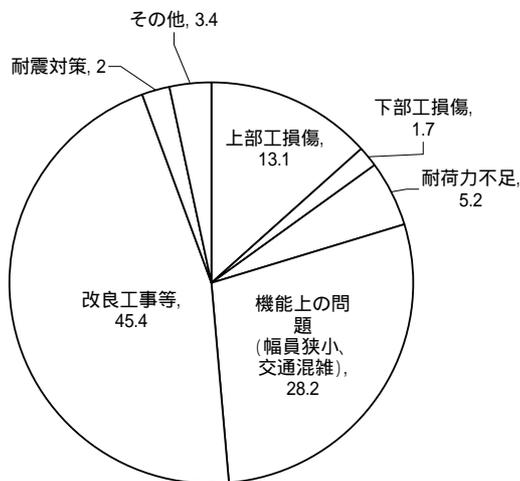


図-10 架け替えの理由

また、上部工に関する架け替えの理由は図-11 に示すとおりである。すなわち鋼橋に関しては、床版の損傷による架け替えが 67%であり、続いて鋼材の腐食が 26%となっている。また PC 橋、RC 橋に関しては、コンクリート自体の亀裂や剥離が半数を占める一方、床版の損傷が 3 割程度を占め、全形式を通じて床版の損傷が顕著であるといえる³⁾。

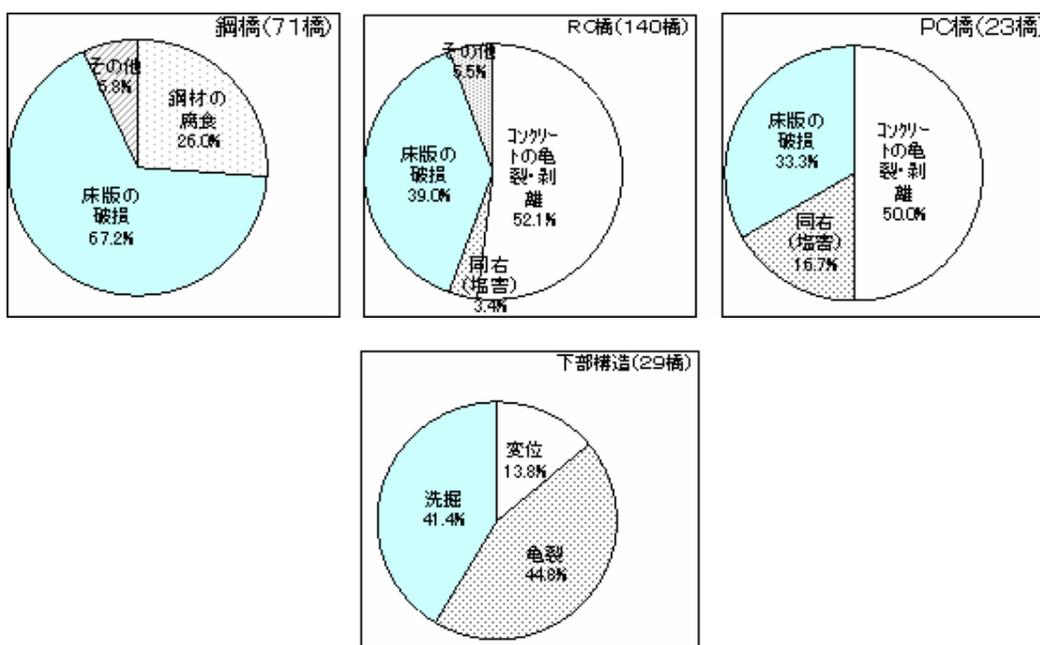


図-11 橋梁の架け替え理由

[参考文献]

- 1) 国土交通省道路局企画課監修：道路統計年報 2002（平成 12 年度），平成 14 年 11 月
全国道路利用者会議 発行
- 2) 橋梁マネジメント研究会：道路橋マネジメントの手引き，平成 16 年 8 月
（財）海洋架橋・橋梁調査会 発行
- 3) 建設省土木研究所橋梁研究室：土木研究所資料第 3512 号橋梁の架替に関する調査結果（ ），平成 9 年 10 月
- 4) 国土交通省近畿技術事務所：近畿技報「繫 Kei」Vol.13，平成 18 年 1 月

2.2 橋梁の劣化

2.2.1 コンクリート橋の劣化現象

コンクリート部材のうちでRC床版の疲労損傷は，鋼橋においても主たる損傷である．床版の疲労損傷は，鋼橋・コンクリート橋に共通する重要な項目であるので，節を設けて詳細を後述する．

(1) 塩害

塩害とは，コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され，腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり，鋼材の断面欠損などを引き起こしたりすることにより，構造物の諸性能が低下する減少である．

塩化物イオンは，海水や凍結防止剤など外的な要因により浸入する場合と，製造時にコンクリート中に含まれている場合がある．

塩害のメカニズムは，コンクリート中の空隙に塩化物イオンが拡散する過程から始まる鋼材位置の塩化物イオン濃度がある程度以上になると，鋼材の不働態皮膜が破壊され，水分と酸素の供給により腐食が生じる．腐食が進行すると，コンクリートにひび割れが生じ，ひび割れを通して酸素等の供給量が増加し，さらなる腐食の進展によりひび割れの拡大や剥離が生じる．また鉄筋の断面欠損により耐荷力の低下が生じる．

(2) アルカリ骨材反応

セメントに含まれる酸化ナトリウムや酸化カリウムなどのアルカリは，セメントの水酸化アルカリとなるため，コンクリートの細孔溶液はPH13程度の強アルカリ性の水溶液となる．ある種のシリカ好物や炭酸塩岩を含む骨材は，コンクリート中の高いアルカリ性の水溶液と反応し，コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させることがある．これがアルカリ骨材反応と呼ばれるもので，アルカリシリカ反応とアルカリ炭酸塩岩反応と2種類があるが，日本で報告されている被害はおもにアルカリシリカ反応である．

アルカリシリカ反応による構造物の劣化は，骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物とコンクリート中の水酸化アルカリを主成分とする水溶液との化学反応により，アルカリシリカゲルが生成されることに起因する．アルカリシリカゲルは，骨材周囲より水分を吸収し膨張する．この膨張により骨材のみならず，セメントマトリクスの崩壊を引き起こし，大きなひび割れへと進展する．結果として鋼材腐食やコンクリート自体の劣化を生じさせ，耐荷力低下を引きこすことになる．

(3) 中性化

中性化は，空気中の二酸化炭素がコンクリート内部に侵入し，炭酸化反応を起こすこと

により細孔溶液内のPHが低下する現象である。これにより、コンクリート内部の鋼材が腐食する可能性が生じる。鋼材の腐食進展により、ひび割れの発生、かぶりの剥落、鋼材の断面欠損等により構造物の耐荷力が低下する。また中性化は、細孔構造の変化などを伴うため、コンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もある。

中性化では、まず水分が散逸した細孔中に二酸化炭素が浸入し、細孔内の溶液に溶解することで炭酸イオンを生成する。その後炭酸イオンがカルシウムイオンと反応して水溶液のPHが低下し、鉄筋表面の不働皮膜が破損したり、コンクリート自体の強度が低下したりすることで、構造物の耐荷力が低下する。鉄筋腐食による構造物の耐力低下は、塩害と同様である。

2.2.2 鋼橋の劣化現象⁶⁾

鋼橋の劣化現象には、主に床版の疲労、鋼材の腐食、鋼材の疲労、ボルトの遅れ破壊などがある。ここでは、鋼橋特有の鋼材の疲労および鋼材の腐食に関して、劣化の特徴について整理する。詳しくは文献6)を参照されたい。

(1) 鋼材の疲労破壊

疲労現象は、ある材料が静的強度以下の応力であっても、繰り返し作用を受けることにより破壊に至る現象である。特に鋼材では、比較的低い応力を繰り返し受けると微細な亀裂が発生し、応力集中により亀裂が徐々に進展し安定成長する。最終的には、応力集中した部分が静的強度を超えて破壊に至る。しかし一般に、鋼橋に生じる応力の大きさは鋼材の静的強度に比べてかなり小さい場合が多い。よって微小な疲労亀裂の発生が部材や構造物全体の崩壊に直ちに繋がるものではなく、亀裂発生を早期に発見し、初期段階で対策を講じることにより、構造物全体の安全性を確保することができる。

疲労に大きく影響する要因は、繰り返される応力の変動幅と繰り返し回数である。応力範囲と疲労寿命の関係は両対数で直線を示すことが知られている。この関係を材料の疲労試験より求めて疲労設計に反映しているが、得に継手部分に対しての検討が詳細に行われる。すなわち継手部分などの複雑な形状をもつ部分は、応力集中しやすく、得に疲労損傷の影響を受けやすいといえる。また溶接部分も疲労損傷を受けやすく、溶接欠陥や鋼材の残留応力なども疲労破壊に大きな影響を及ぼす要因である。鋼材の疲労強度は高強度鋼になるに従い向上するが、溶接継手部の疲労強度は使用する鋼材の静的強度にほとんど関係せず、継手の形式によっては高強度鋼の方が低くなる場合もある。

鋼橋において確認されている疲労損傷の多くは、二次部材の接合部に発生している。これらの損傷は、一般的な設計手順では計算対象外となる部分に、応力集中、面外変形、二次応力などが重複して発生することが主な原因となっている。

鉄道橋では、比較的設計荷重に近い荷重が繰り返し載荷されるため、部材の疲労損傷を重要な限界状態の一つとして設計が行われる。鉄道構造物設計標準では、各種継手について分類を行い、それぞれについて疲労設計許容応力を定めている。また疲労検算を行っている鉄道橋の主要部材については、疲労損傷が発生した事例はほとんどない。

また文献7)では、道路橋に関して疲労の主な原因は活荷重であり、あるレベル以下の応力範囲は疲労損傷に対して影響が小さいこと、また疲労損傷が応力範囲の3乗とその繰り返

し数に比例することなどを勘案し、疲労損傷に関する重要事項として以下の点を指摘している。

- ・ トラックの通行台数が重要なこと
- ・ トラックの重量が2倍であれば被害が8倍（2の3乗）になること
- ・ 死荷重と活荷重のバランス，影響線の長さから，短い橋梁ほど疲労が激しくなること
- ・ 長い橋梁については，主部材に疲労の問題は少なく，床組に注意すべきこと等

さらに疲労の原因を，特に過積載のトラックによる活荷重であると指摘し，どの程度の重量のトラックが何台程度走っているか知ることが，疲労損傷を考える上で重要であると指摘している。

（2）鋼材の腐食劣化⁶⁾

腐食とは，一般に金属が外的要因によって化学的あるいは電気化学的に侵食される現象，すなわち酸化還元反応をいう。鋼材の腐食は水分と酸素供給により引き起こされるが，特にマクロセルと呼ばれる電子循環機構が構成されると，著しく反応が進展する。マクロセルとは，鋼材の異なる部分において，鉄のイオン化によりアノード部とカソード部という電位の異なる部位が発生し，アノード部からカソード部に電子の供給が起きる機構である。

腐食進展の程度は，構造物の環境や種類，また部位などにより大きく左右される。鋼橋の防食には，主に塗装が行われる。塗装が正常に機能している場合には，鋼材が腐食する心配はないが，塗装自体も経年劣化するため，ある周期で塗り替える必要がある。最近では高機能塗料の開発などにより，腐食環境の激しい場所では重防食塗料系（ジンク，エポキシ樹脂），高耐候性塗装系（ウレタン，フッ素，シリコン他）が使用されるようになり⁶⁾，塗装塗り替えの周期が伸びつつある。

腐食が生じると部材断面が減少し，強度および剛性が低下する。局部腐食や孔食が生じた場合には，腐食部分に応力集中が発生し，疲労強度の低下に繋がる。また腐食が進展している環境下での疲労強度は，通常の疲労強度よりも小さくなる。また静的な応力が発生している部材に腐食が生じると，応力と腐食の相互作用により亀裂が発生したり，破断したりすることもある。

2.3 部材（床版）の劣化

材料の静的強度に比較して一般に小さいレベルの荷重作用を繰返し受けることにより破壊に至る現象を疲労あるいは疲労破壊という。コンクリート構造物における疲労現象は，繰返し荷重によりその構成材料である補強鋼材（鉄筋やPC鋼材など）に亀裂やコンクリートにひび割れが発生し，これらの疲労損傷による部材の性能低下が起こり，最終的には常時の荷重作用下において破壊に至る現象である。

鉄筋コンクリート構造物の疲労は，はり部材の疲労と床版の疲労に分類することができる。はり部材においては一部を除いて補強鋼材の疲労に注目するのが一般であるのに対し，床版の疲労では下面ひび割れの方向性や密度が着目点となる。

コンクリート構造物の疲労による劣化・損傷事例は，道路橋床版を除いてほとんどない実態に鑑み，本稿ではRC床版の疲労に絞って記述するものとする。

2.3.1 床版の劣化過程

道路橋 RC 床版の疲労損傷メカニズムは、松井らによる輪荷重走行試験機による疲労実験、および理論解析によって解明された。それによると、損傷機構は以下に説明する 5 段階のプロセスによって進むようである（図-12）。

(1) 潜伏期（橋軸直角方向に初期ひび割れ）

まず、主桁によって拘束された床版コンクリートにおいて乾燥収縮が進行し、橋軸方向に引張りひずみが発生する。橋軸方向に十分な鉄筋が配置されていない場合、乾燥収縮ひび割れが発生する。

(2) 進展期（床版下面に曲げひび割れ網の形成、上面にもひび割れ）

潜伏期に発生した橋軸直角方向のひび割れによって床版に異方性が発現し橋軸方向への荷重分配性能の低下を招く。これによって、主鉄筋方向での荷重分担率

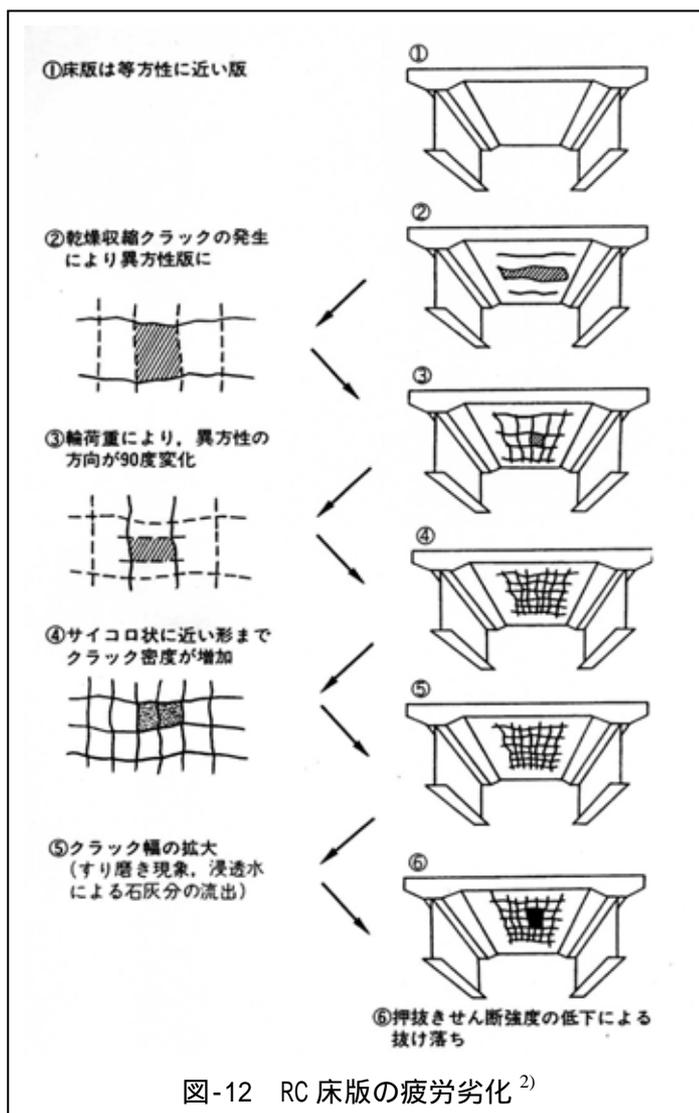
が増加するため、活荷重の載荷によって床版下面では橋軸方向にもひび割れが発生する。また、床版上面ではねじりモーメントが繰返し作用し橋軸直角方向のひび割れが支持桁付近から床版中央へと進展する。

(3) 加速期（雨水の浸透）

RC 床版とアスファルト舗装の間に防水層を設けていない場合、舗装には防水性は期待できないうえ透水性が高く、保水性が高い。上面あるいは貫通ひび割れが存在する床版上でアスファルトが雨水で飽和状態となり保水状態が続くと、ひび割れに水が浸透し、遊離石灰を下面に沈着させる。

(4) 加速期（橋軸直角方向のひび割れにおけるひび割れ面相互の摩耗）

橋軸直角方向の貫通ひび割れが形成された状態で走行輪荷重の載荷が続くと、ひび割れ面にせん断力やねじりモーメントが交番しながら繰返し作用する。すると、ひび割れ面相互には上下方向ならびに水平方向のこすり合わせの動きが起こり、ひび割れ面の摩耗が進行しながら、徐々にひび割れ幅が大きくなる。このような状況下では橋軸方向への荷重分配効果が低下し、床版は板構造から橋軸直角方向に梁を並べた状態へと変化する。さらにコンクリートが徐々に粉砕されて、骨材化現象が現れると推定される。



(5) 劣化期（破壊，陥没）

床版が橋軸直角方向に梁状化した結果，せん断強度の不足から，ついには耐荷力を喪失する．実橋では舗装により床版上面の破壊がわからないので，その後も自動車が走行すると，破壊部位のコンクリートが細かく割れて細片の落下が起こり，ついにはひび割れで囲まれた床版の一部が陥落する．

2.3.2 劣化指標

床版の疲労がどの過程にあるかは，床版下面のひび割れ状態を観察することにより比較的容易に評価判定できるが，ひび割れ密度は飽和することがあるため，期間を定量的に表すものではない．この場合，外観の変状に加えてひび割れの幅や深さ，ひび割れの開閉量や段差量などのひび割れ挙動の観測や，漏水や遊離石灰の流出状況および路面の変状などの観測が必要となる．加えて床版剛性の低下に対する指標であるたわみの測定が有効となる（表-1）．

表-1 RC床版の疲労劣化指標

劣化過程	外観の変状 （ひび割れの 方向性，密度）	外観の変状 （漏水，遊離 石灰の状況）	ひび割れの挙動 （幅，深さ，開 閉量，段差量）	路面の状況	たわみ
潜伏期					
進展期					
加速期					
劣化期					

2.3.3 劣化要因⁵⁾

道路橋のRC床版は，支間長に比して厚さの薄い構造であり，変動の激しい輪荷重を直接支える部材であるため，荷重の繰返しをもたらす疲労の影響による性能低下が顕在化する代表的な構造物といえる．

床版設計上は，曲げモーメントが支配的であることから，国内外を問わず弾性薄板曲げ理論に基づく許容応力度設計法による照査が行われてきており，繰返し荷重に対しても十分に安全との認識があった．しかしながら，昭和40年代後半から，床版下面のひび割れ発生とコンクリートはく落が認められるようになり，やがて鉄筋が健全であるにも係わらずコンクリートのみが陥没する現象が発生した．現象の解明に向けて道路を管理する諸機関による原因究明がなされた結果，陥没に至った原因と床版の疲労機構がおおよそ解明された．床版の疲労の主たる原因は，いうまでもなく過積載車両の走行であるが，表-2に示した要因が複合して劣化の急激な新興と最終的に陥没に至ったものと考えられる．

(1) 設計に関する要因⁴⁾

昭和55年以前の基準は，その損傷メカニズムが必ずしも解明されていなかった時期に作成されたが，その後，実橋損傷実態や実験成果を踏まえて改訂されてきた．

1956年の「鋼道路橋設計示方書」の段階から、床版は版としての考え方で設計されるようになったが、配力鉄筋方向の曲げモーメントや必要版厚への配慮不足などから、交通量増大や大型車の通行により損傷が著しくなった。その後、版厚や曲げモーメント式の検討や実験が行われ、示方書に採り入れられてきた。

現在のRC床版は版という考え方で設計され、2方向に配筋したうえで、鉄筋の応力度を $120\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に低く抑えることと、床版厚を厚くすることにより曲げモーメントによるコンクリートの引張応力度を抑え、せん断力に抵抗することが基本となっている。合成桁橋では、RC床版が劣化した場合、取替えなどへの対応が困難になるため、1970年中頃から単純桁、連続桁共に合成桁橋が採用されなくなった。

表-3は、道路橋RC床版の鉄筋の許容応力度、最小床版厚、配力鉄筋の量に着目し、設計基準の変遷をまとめたものである。

表-2 陥没に至った道路橋のRC床版の疲労劣化の要因

床版疲労の原因		解 説
使用条件	過積載車両の走行	昭和 30 年代の高度経済成長に伴う交通量の飛躍的な増大と、積載制限を超過する車両の影響を受けた。
設 計	薄い床版厚	昭和 39 年以前の鋼道路橋設計示方書により設計施工されたRC床版は、床版厚が 180mm 程度と薄く、このため大型車両の走行により曲げひび割れが発生しやすかった。
	主桁高速の影響	RC床版は、合成桁はジベルにより、非合成桁はスラブ止めにより固定され主桁と拘束され、乾燥収縮によるひび割れが潜在的に発生しやすかった。
	主鉄筋に比べて少ない配力筋	昭和 39 年以前の鋼道路橋設計示方書により設計施工されたRC床版は、配力筋が主鉄筋の 25%程度であり、主筋方向（橋軸直角方向）の曲げひび割れが発生しやすかった。
施 工	コンクリートの品質	疲労損傷した床版の施工は、コンクリート用の粗骨材が砂利から碎石へ移行した時期に一致し、ワーカビリティを得るために練り混ぜ水の割り増しとセメントの増量を必要としたことから、結果としてモルタル分の多いコンクリートとなり、乾燥収縮によるひび割れを生じやすかった。
環 境	雨水の浸透	乾燥収縮や荷重作用により発生したひび割れが貫通すると、路面からの浸透水によりひび割れ面の摩耗が促進するとともに、RC床版上縁の圧縮側コンクリートを分離させる骨材化現象をもたらすことから、さらに疲労が促進された。

表 - 3 道路橋 RC 床版の設計基準の変遷⁴⁾

基準	鉄筋の許容応力度 (kgf/cm ²)	最小床版厚 (cm)	配力鉄筋の量 (L:床版支間)
1886年8月 国道の築造基準 (内務省訓令第13号)	規定なし	規定なし	規定なし
1919年12月 道路構造令及び街路構造令 (内務省令)			
1926年6月 道路構造に関する細則案 (内務省土木局)	規定なし 1200程度に抑えている	規定なし	RC断面の2%以上 またはRC有効断面 の3%以上
1939年2月 鋼道路橋設計示方書(案) (内務省土木局)			
1956年5月 鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)	規定なし	有効厚 11 以上	主鉄筋断面の 25% 以上
1964年6月 鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会)	SSD39:1800		
1967年9月 鋼道路橋一方鉄筋コンクリート床 版の配力鉄筋設計要領(建設省道路 局長通達)			
1968年5月 鋼道路橋の床版設計に関する暫定基 準(案) (日本道路協会)	1400	3L+11 16	主鉄筋量の 70% 以 上
1971年3月 鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の 設計について (建設省道路局長通達)			
1973年2月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1973年4月 特定路線にかかる橋高架の道路等の 技術基準 (建設省都市局長, 道路局長通達)			
1978年4月 道路橋鉄筋コンクリート床版の設 計, 施工について (建設省企画課長)	許容応力度 1400 に 対して 200 程度余裕 を持たせる	$K_1 k_2 (3L+11)$ K_1 :交通量係数 K_2 :付加モーメント係数	$M=0.8(0.1L+0.04)P$
1980年2月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1990年2月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1994年2月 道路橋示方書 (日本道路協会)			
1996年2月 道路橋示方書 (日本道路協会)			

- (2) 施工に関する要因
 - ・ コンクリートの品質
1960年代の粗骨材の砂利から碎石への移行 練り混ぜ水の割り増しとセメントの増量 乾燥収縮ひび割れを生じやすいコンクリート
- (3) 使用条件に関する要因
 - ・ 通過交通量
昭和30年代の高度経済成長に伴う交通量の飛躍的な増大
 - ・ 大型車重量
車両大型化による影響，積載制限を超過する車両の影響
 - ・ 大型車走行位置
- (4) 環境条件に関する要因
 - ・ 雨水の浸透
乾燥収縮や荷重作用によるひび割れの貫通 浸透水によるひび割れの摩耗促進
上縁圧縮側コンクリートを分離させる骨材化現象
- (5) 荷重に関する要因
 - ・ 過積載

2.3.4 劣化による性能の低下

- (1) 疲労の症状
RC床版の疲労劣化に関して，劣化段階に応じた症状をまとめると表-4のようになる．
- (2) 性能低下の評価
また各劣化段階に応じた性能低下を表-5にまとめる．

表-4 RC床版の疲労の症状³⁾

劣化過程	劣化の状態
潜伏期 (状態)	乾燥収縮もしくは載荷による，主筋に沿った一方向ひび割れが数本程度確認できる段階．主桁の拘束条件によっては乾燥収縮や主桁温度変化による橋軸直角方向のひび割れが進行することもある．
進展期 (状態)	主筋に沿った曲げひび割れが進展するとともに，配力筋に沿う方向のひび割れも進展し始め，格子状のひび割れ網が形成される段階．外観上ひび割れの密度の進行は著しいが，鉄筋コンクリート床版の連続性は失われていない．
加速期 (状態)	ひび割れの網細化が進み，ひび割れ幅の開閉やひび割れ面のこすり合わせが始まる段階．ひび割れのスリット化や角落ちが生じるとコンクリート断面の抵抗は期待できないので，鉄筋コンクリート床版の耐力は急激に低下し始める．
劣化期 (状態)	床版断面内にひび割れが貫通すると床版の連続性は失われ，貫通ひび割れで区切られた梁状部材として輪荷重に抵抗することになる段階．貫通ひび割れの間隔やコンクリート強度，配筋量などが部材としての終局耐力に影響するだけでなく，雨水の浸透や鉄筋腐食などにも配慮する必要がある．

表-5 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下⁵⁾

構造物の外観上のグレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態 (潜伏期)	-	-	-
状態 (進展期)	-	-	-
状態 (加速期)	せん断剛性の低下 ひび割れのスリット化, 角落ち	-	美観の低下 ひび割れ 遊離石灰
状態 (劣化期)	耐荷力の低下 ひび割れの貫通 雨水の浸透 鋼材腐食	疲労進行による路面の損傷 路面の亀裂・陥没	コンクリート表面の陥没 第三者への影響はく離

2.3.5 劣化の予測指標

(1) 定性的な予測指標

- ・ 劣化過程を潜伏期, 進行期, 加速期, 劣化期に分け, 各期間の長さを予測
(点検で得た床版下面の状態に, 疲労の進行に影響する要因を考慮して, 予測する)
- ・ 劣化進行に影響する要因を考慮して適度な安全度を見込む
- ・ 劣化状況が予測と異なる場合 原因究明 劣化予測の修正, 維持管理計画の変更

(2) 定量的な予測指標

コンクリートの疲労破壊は, 静的破壊と同様に骨材とマトリックス間のボンドひび割れやモルタルひび割れの発達伝播によって生じる。繰返し作用応力(静的強度に対する比, S_{max}/S_0)と破壊までの繰返し回数 N (対数表示) の関係は近似的に直線で表される (S-N 線図)。またランダム荷重下における疲労の簡便な取扱いとしてマイナー則と呼ばれる仮定が適用され, 疲労破壊は累積損傷度が 1 となったときに生じると考えられている。

あらかじめ実験によって材料の S-N 曲線が得られていれば, 任意の応力範囲に対しての N が既知であるといえるから, 実部材での応力範囲を測定しその頻度を用いて累積疲労損傷度が求まることになる。ただし, マイナー則は金属材料に対しては実用的には適用できるが, コンクリートに対してそのまま適用することには問題があり, 修正が試みられている。

2.4 劣化と調査方法および補修方法

2.4.1 劣化と調査方法

(1) 疲労対策に有効な点検方法 (目視レベル)

床版の点検項目は, 目視による外観変状の観察が主体となる。床版の疲労を評価および判定するための点検項目の標準を表-6 に示す。

(2) 疲労対策に有効な調査・試験方法 (詳細調査レベル)

RC 床版の詳細点検は, 主として目視による点検では劣化度の判定が困難な場合, あるいは床版が異常な劣化進行を示した場合に, 劣化程度の詳細な評価, 劣化原因の検討, その後の進行並びに補修・補強方法の検討などに関する詳細な資料を得ることを目的として実

施する。

表-6 点検方法⁵⁾

点検項目		点検方法
外観の変状	ひび割れ状態： (方向性，密度，幅，角欠けの有無) 漏水，遊離石灰，コンクリートの色合い	目視，簡単な計測，写真撮影
	不良音	打音法
路面の状態	亀裂，陥没の有無	目視，写真撮影
ひび割れの挙動	深さ，開閉量，段差量	超音波伝播速度，コンタクト ゲージ等

表-7 調査・試験方法⁵⁾

点検項目	点検方法	点検の目的	
変位に 関するもの	たわみ	載荷試験	劣化度の評価
	ひび割れの挙動	載荷試験	劣化度の評価
	ひび割れの深さ	超音波伝播速度計測，コア採取	劣化度の評価
材料に 関するもの	コンクリート強度	超音波伝播速度計測，打撃法， コア強度試験	劣化進行の予測
	コンクリートの品質	採取コアによる室内試験	劣化進行の予測
	コンクリート断面	コア採取，電磁波調査など	劣化進行の予測
	配筋の状況	電磁波調査，はつり調査	劣化進行の予測
交通特性に 関するもの	荷重実態	交通量調査，車両重量の計測な ど	劣化進行の予測

2.4.2 劣化と回復方策

それぞれの劣化に応じた対処工法を，表-8～表10にまとめる。

表-8 構造物の外観上のグレードと対策の選定⁵⁾

構造物の 外観上の グレード	点検 強化	補修	補強	修景	使用性 回復	機能性 向上	供用 制限	打替え 取換
状態 (潜伏期)		()				()		
状態 (進展期)			()			()		
状態 (加速期)						()		
状態 (劣化期)								

：標準的な対策， ：場合によっては考えられる対策，()：予防的に実施される対策

表-9 対策に期待する効果と工法⁵⁾

期待する効果	工法例
第三者影響度，美観・景観の改善	表面処理（被覆）
水の影響を除くことによる疲労耐久性の向上	床版防水の設置
ひび割れ開口の抑制による疲労耐久性の向上	FRP 接着，プレストレスの導入
引張縁への部材設置による断面剛性の回復	床版下面への鋼板等の接着，RC 断面の増厚，増設桁の設置
圧縮側断面のせん断剛性の向上による疲労耐久性の向上	床版上面増厚

表-10 構造物の外観上のグレードと標準的な工法⁵⁾

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
状態 （潜伏期）	床版防水
状態 （進展期）	床版防水，鋼板・FRP 接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
状態 （加速期で浸透水の影響有り）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，増設桁
状態 （加速期で浸透水の影響なし）	床版防水，鋼板接着，上面増厚，下面増厚，増設桁
状態 （劣化期）	供用制限，上面増厚，打替え

2.4.3 調査法・工法の選定とシナリオの構築

最適な調査技術・補修技術の選定や要因別対応策シナリオの構築に際しては，図-13 に示す延命化対策選定システムの全体フローを定め，これを洗練，高度化する中で進めていくものである．劣化現象に関しては，部材の劣化と構造の安全性について考え，この相互関係の中で健全性を評価することとする．

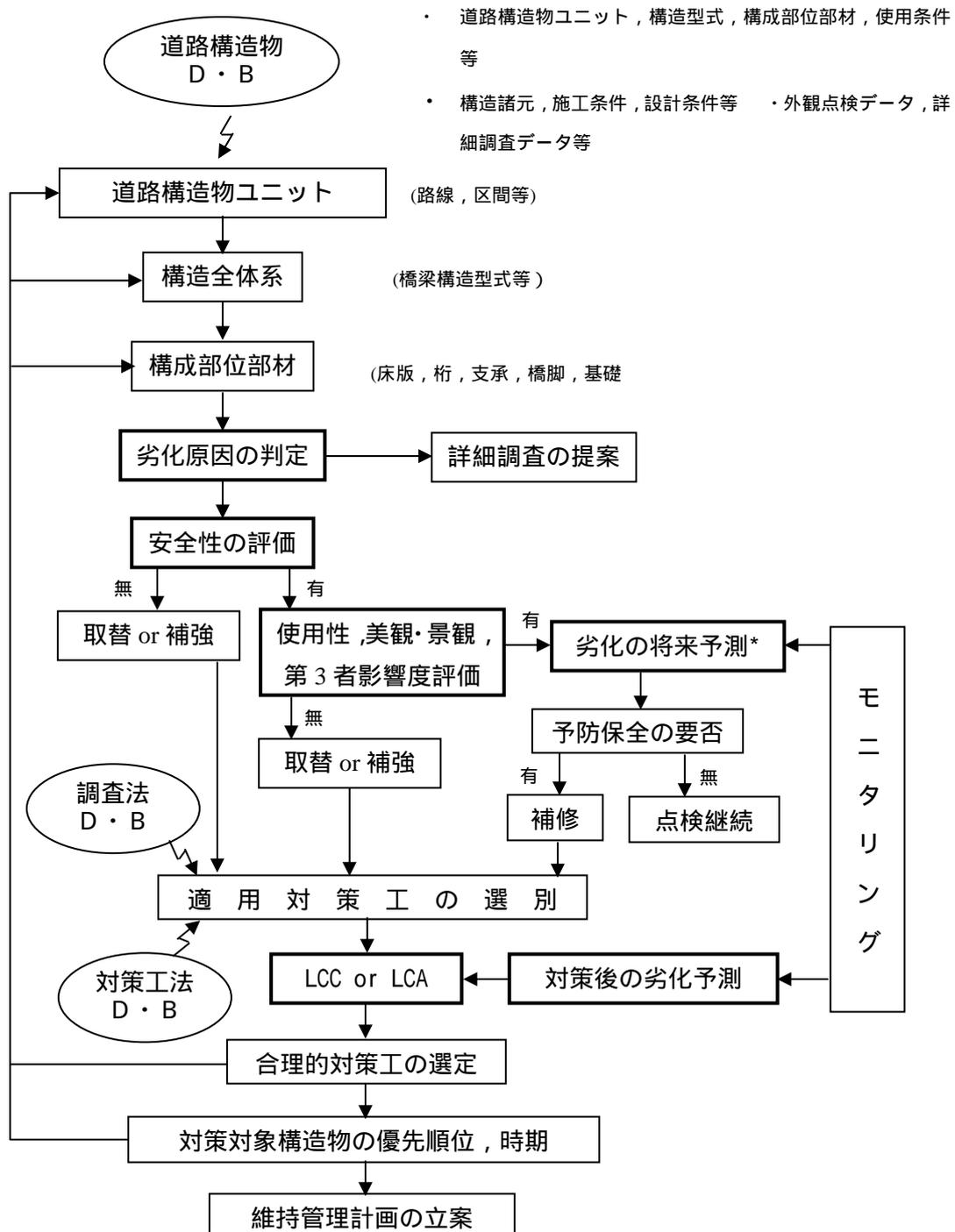


図-13 延命化対策工選定システム将来像

[参考文献]

- 1) 松井繁之：床版の技術開発，橋梁と基礎，vol.31/No.8，84-94，1997.8
- 2) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，vol.31/No.8，64-69，1997.8
- 3) コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 02，63-66
- 4) 多田宏行：橋梁技術の変遷，鹿島出版会
- 5) 土木学会：【2001年制定】コンクリート標準示方書 [維持管理編] 162-168
- 6) 土木学会鋼構造委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価，丸善(株)，1996.
- 7) 三木千壽：鋼橋のメンテナンス，橋梁と基礎，Vol.35 8，pp.50-53，2001

3 荷重の実態

3.1 はじめに

前節では、床版の疲労劣化では通過車両による繰り返し载荷により進展すること、さらに鋼部材では車両重量が2倍であれば疲労損傷度が8倍(2の3乗)になること指摘した。供用中の橋梁に作用する荷重の実態を明らかにできれば、より正確な損傷状況を明らかにできるとともに、累積損傷度による劣化予測も可能となる。よって本節では、橋梁応答を用いた車両荷重推定手法についてまとめ、通過車両の頻度と荷重から損傷度を推定する考え方について整理を行う。

また国道に架かる実橋梁を取り上げ、車両の通行状況や履歴を明らかにすると共に、累積損傷度の考え方から橋梁の劣化程度の診断を試みる。

3.2 橋梁を用いた軸重推定

3.2.1 軸重推定の概要

平成5年度には大型車両の積載物重量制限が最大20トンから25トンへと緩和され、また平成6年には設計荷重がB活荷重へ移行したことも含め、車両の実重量への関心が高まっている²⁾。また疲労損傷の原因究明や寿命予測という観点からも、橋梁に作用する荷重を明確に把握する必要がある。現在過積載のトラックの走行など、道路や橋梁に想定以上の重量が作用し、急激に構造物の損傷が増加している。構造物の安全上、さらには行政的な理由により車両総重量などを検知する必要があり、現在まで様々な軸重測定が行われてきた。軸重推定の方法は、計測の原理により以下のように大別される。

- 1) 直接法：計量台などにより直接軸重を計測する方法。トラックスケール、軸重計など
- 2) 間接法：車両通行に伴う橋梁の応答など、間接的に軸重を推定する方法。

直接法の例としては、高速道路の料金所入り口などに埋設されている軸重計がある。ここで使用されている軸重計は比較的低速(20km/h以下)で計測を行うもので、車両が必ず低速走行する場所にのみ設置が可能である¹⁾。また計量台に2軸が同時に乗らないよう、検知区間が数十センチと短く設定されているため、車両振動が大きい場合正確な計測が行えないという問題点がある。よって現在のところ軸重計は、過積載の警告を与える目的で使用されている。警察の取締りなど高精度で軸重を計測する必要がある場合は、トラックスケールが用いられる。トラックスケールは完全に静止した状態で計測するものであり、交通車両の実態把握など、すべての通行車両の重量を測定する目的では使用できない。また直接軸重を計測する手法として、国道などで走行車両の軸重を測定するシステムも開発されている。

一方、間接法として代表的な方法は、橋梁の応答を用いた軸重推定法(BWIM)である。この方法は、直接法に比べて安価なシステムとして研究が進められている。BWIMは、着目する部材応答により、主部材のひずみ応答に着目する手法、二次部材のひずみ応答に着目する手法、RC床版のひび割れ幅に着目する手法などに分類することができる¹⁾。またBIWMを原理別に整理すると表-11のようになる。

各種提案されているBWIMであるが、それぞれに長所短所があるため、橋梁の状態に応じ

て手法を選択すればよい。またこのようにBWIMを用いれば、比較的安価に橋梁に作用する荷重の実態を把握することができる。

表-11 軸重推定研究の動向

方式	原理	着目部材	特記事項
I ⁶⁾	主部材の影響線を利用。影響線を多項式近似し、応答値との誤差最小により軸重を推定。	主桁下フランジ：影響線応答 垂直補剛材：軸数、車線の判別 光スイッチ：車速の判別	車速（車両位置）の判別が必要。連行、並行した場合に誤差が大きくなる。
II ⁷⁾	縦桁の影響線を利用。応答値の面積が車両総重量に比例することを利用。	縦桁：影響線応答、車速の判別	車速（車両位置）の判別が必要。同時載荷（連行、並行）の場合推定が困難
III ⁸⁾	支点反力の影響線を利用。応答値の落差が軸重に対応する点に着目。	垂直補剛材：影響線応答	車速判別不要。垂直補剛材のない構造には適用不可。
IV ⁸⁾	RC床版のひび割れ幅の変動と車両軸重の相関から軸重を推定する。	床版：ひび割れ幅応答	車速判別不要。精度を高めるには、多くの測点を要する。
V ¹⁰⁾	たわみの応答と軸重の相関をGAにより推定する。	たわみを発生する部材全て：たわみ応答	車速判別不要。同時載荷の場合適用不可。実橋による検証例がない。
VI ¹¹⁾	主部材の影響線を利用。影響線を直線近似する。方式Iに準ずる。	主桁：影響線応答 床版：車速、車線、軸数の判別	車速（車両位置）の判別が必要。同時載荷の影響が大きい。

3.2.2 疲労照査の方法

ひずみ測定を直接行っている部材に関しては、ひずみ履歴をそのまま用いて応力頻度解析を行うことができる。また測定を行っていない部材に関しては、推定された軸重とその時刻歴から、疲労損傷度を推定することが可能である。すなわち、車両振動を無視し、車両進入にのみ応力が変動すると考えれば、各軸により各部材に発生する応力の変動は影響線と軸の大きさで決定する。また部材に発生する応力は、上載荷重の大きさや位置により解析的に求まるため、部材ごとの応力頻度を求めることができる。また同時載荷の影響や動的増幅率についても、設計上設定されている係数を付加することで考慮することが可能である。しかし、この方法もあくまでも解析モデルに依存するため、実際の応力履歴とは異なる可能性もあり、注意が必要である。

3.3 U橋センサデータから見た荷重特性の推定と疲労に関する考察

3.3.1 U橋概要

U橋は、昭和35年(1960年)に建設された7径間ゲルバー鋼鈹桁橋であり、現在、床版、および橋桁端部の疲労が問題となっている。また、国道2号線は大型車の交通量が比較的多いことから、今後もこれらの疲労損傷が進展する可能性が高い。橋梁諸元を表-12に示す。また上部工断面図を図-14に、橋梁全体の平面図、側面図をそれぞれ図-15、図-16に示す。

表-12 U橋概要

建設年月	昭和35年(1960年)3月		
橋長	L=187.00m		
支間長	吊桁	L=16.00m	
	定着桁	L=6.2m+28.4m+6.2m	
有効幅員	W=8.00m		
構造形式	上部構造	7径間ゲルバー鋼鈹桁橋(吊桁部は合成桁)	
	下部構造	橋台	壁式橋台
		橋脚	小判型壁式橋脚
基礎構造	ケーソン基礎		
橋格	1等級(TL-20)		
適用示方書	昭和31年鋼道路橋示方書		

上部構造断面図 s=1:50

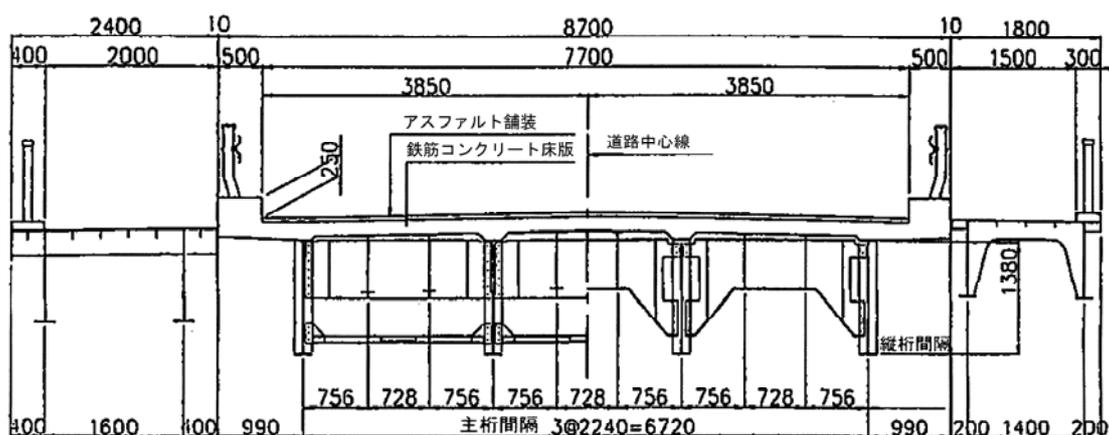


図-14 上部工標準断面図

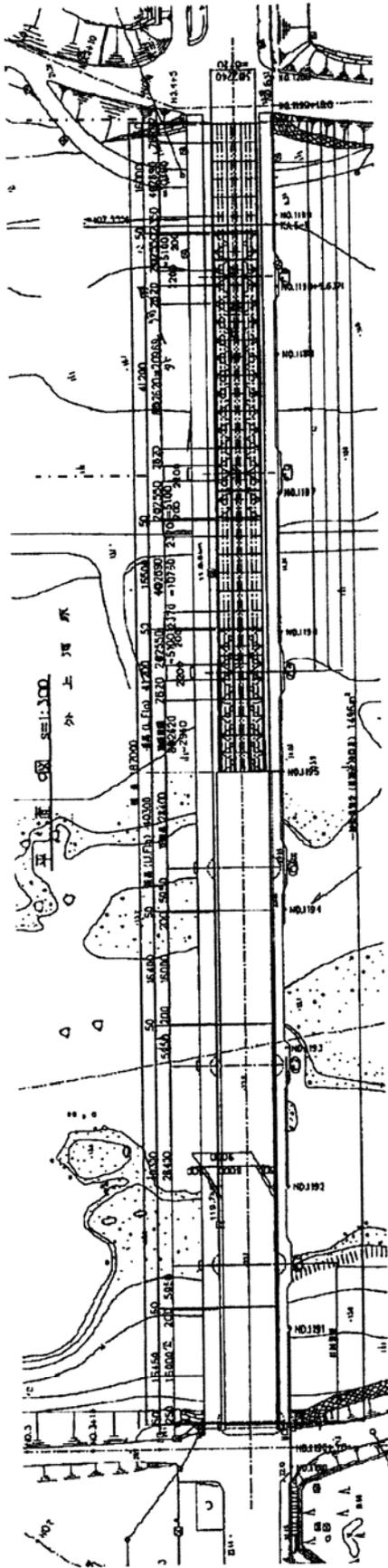


图-15 U 橋平面图

剖面图 s=1:300

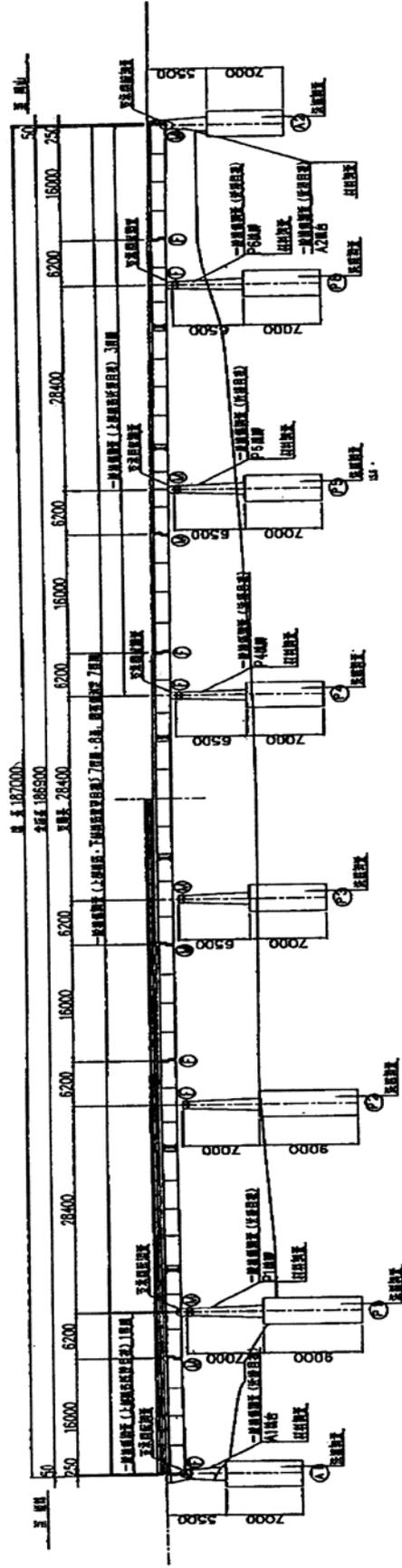


图-16 U 橋側面图

3.3.2 交通センサス結果の整理

U橋を通過した交通量を把握するため、建設年からの交通センサスデータについて調査を行った。U橋付近の道路開通状況を図-17に示す。また、U橋付近における交通量の調査結果を図-18にまとめる。

図-18に示すU橋付近の交通量データより、周辺道路開通状況と交通量との相関が確認できる。また、U橋に最も近いB地点のデータについては、昭和46年以前の交通量データが無いものの、A地点、およびC地点の交通量より十分予測可能であると考えられるため、U橋の通過交通量については、B地点のデータを用いるものとした。



図-17 U橋位置図，および周辺道路開通図

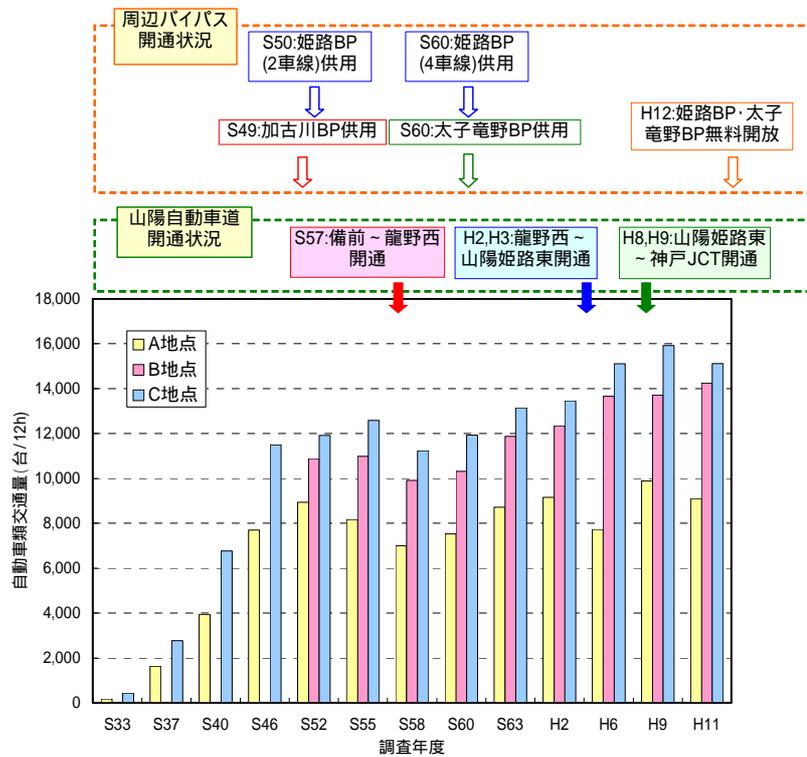


図-18 U橋付近交通量調査結果

3.3.3 U橋の補強履歴について

U橋は床版の疲労が問題となっており、建設時から現在に至るまで、補修補強が繰返し行われている。U橋での床版補強履歴を表-13に示す。U橋の補修補強履歴を見ると、疲労による損傷が発生していると考えられる床版については、昭和35年の建設当時から、増桁補強（昭和52年）、鋼板接着補強（昭和53年）と、床版増厚（平成15年）の2段階の補強が行われている。よって、床版の疲労損傷について検討する場合には、これらの補強イベントを踏まえた上で整理する必要がある。

表-13 U橋補修・補強履歴

支承	S47: 支承補修 S52: 沓座拡幅
桁	S52: 桁連結 S53: 増桁補強
床版	S53: 鋼板接着 (620m ²) H15: 床版増厚 (t=60mm)
伸縮	S57, S58: 伸縮装置補修 H15: 伸縮装置取替
その他	S62: 高欄取替 H15: 排水性舗装 (t=40mm) H15: 防水性舗装 (基層t=35mm) H15: 排水装置改良

3.3.4 床版の疲労評価フロー

床版の疲労については、実際に床版に載荷された軸重(P)と載荷回数(N)が大きく影響すると考えられる。ただし、竣工当時から実際に床版に載荷された軸重(P)、および載荷回数(N)の載荷状況は明らかではない。

そこで、対象橋梁の実測モニタリングによる軸重測定、および既存交通量データの整理による通過交通量を行うことによる床版の疲労評価フローを提案した。床版の疲労評価フローを図-19に示す。

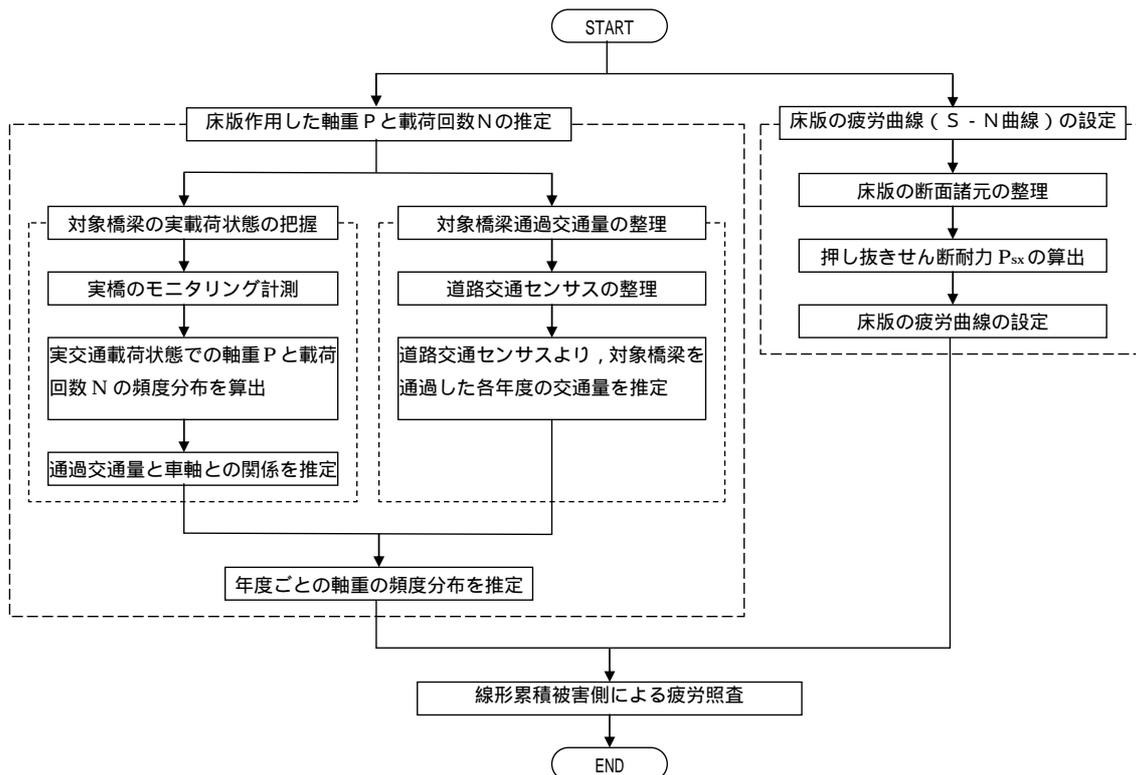


図-19 床版の疲労評価フロー

3.3.5 U橋における疲労評価

(a) 実測モニタリング結果の整理

U橋における実測モニタリングより軸重の頻度分布を算出した。軸重の頻度分布を図-19に示す。このデータは、3時間計測における軸重の頻度分布である。また、計測結果の軸重は通過車両の左右軸重の合計値となっている。

この図より、T荷重の設計値である $20tf$ ($10tf/\text{軸} \times 2$) を超過している車両が通行していることがわかる。床版の疲労照査については、過積載による超過軸重が大きく作用することから、軸重 P と载荷回数 N との関係は実測モニタリングにおける頻度分布をもとにして設定した。また、実測モニタリングにおいては、小型車通行時には、床版に作用する荷重が小さく、軸重として計測結果に現れてこない。よって、図-20で示されている頻度分布は大型車による軸重が支配的であると考えられる。

自動車の通過による疲労の影響は、大型車通行時によるものが大きく影響を及ぼすと考えられる。そこで、対象としたU原における交通量データについて、小型車と大型車とに分類し交通量の整理を行った。整理結果を図-21に示す。

図-20、および図-21の結果を用いて、U橋の通過軸重の推定を行った。大型車交通量と通過軸重との関係は、大型車の多くが3軸であるということを仮定し、大型車交通量を3倍することによって、通過軸重と設定した。

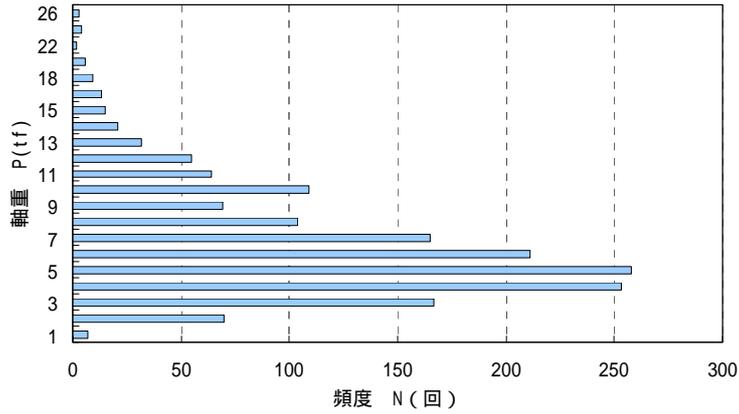


図-20 U橋実測モニタリングによる軸重頻度分布（平日3時間測定）

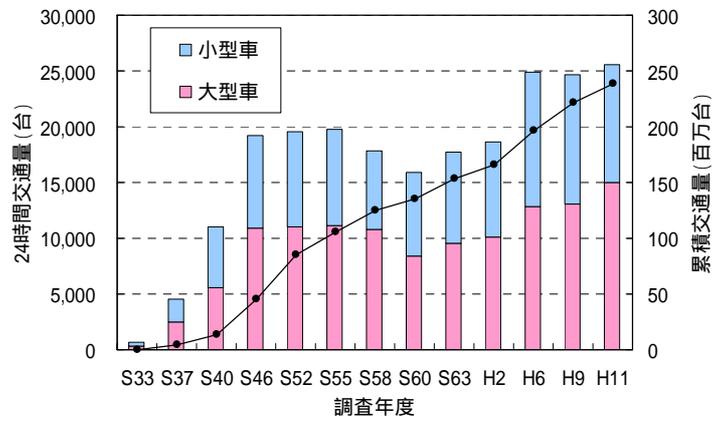


図-21 U橋における通過交通量の推移

(b)床版の疲労曲線，および疲労照査手法

床版の疲労曲線としては，種々の疲労曲線が設定されている．疲労曲線の一例を図-22に示す．この図に示す疲労曲線は，床版の押し抜きせん断耐力 P_{sx} を用いて，載荷荷重を無次元化することにより設定している．

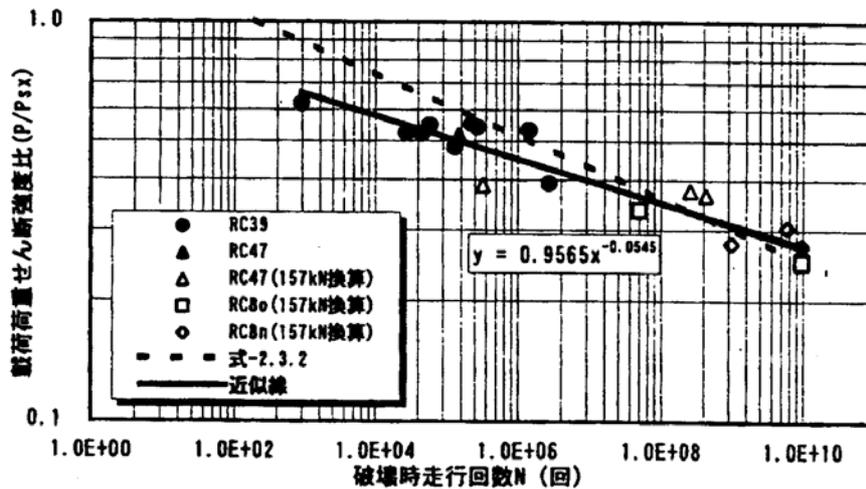


図-22 載荷荷重せん断強度比 (P/P_{sx}) と破壊時走行回数との関係¹⁾

また、一般に変動応力下における疲労損傷度の評価の考え方としては、線形累積被害則が用いられている。これは部材に作用する応力範囲 σ_i に対して N_i 回で部材に疲労損傷が生じる場合、応力範囲 σ_i の応力範囲 1 回の繰返しによる疲労損傷の程度を $1/N_i$ とし、変動応力下では、その和が疲労損傷条件 D に達した時に疲労損傷が生じると考えるものである（図-23、および式（1））。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = D \quad \text{式（1）}$$

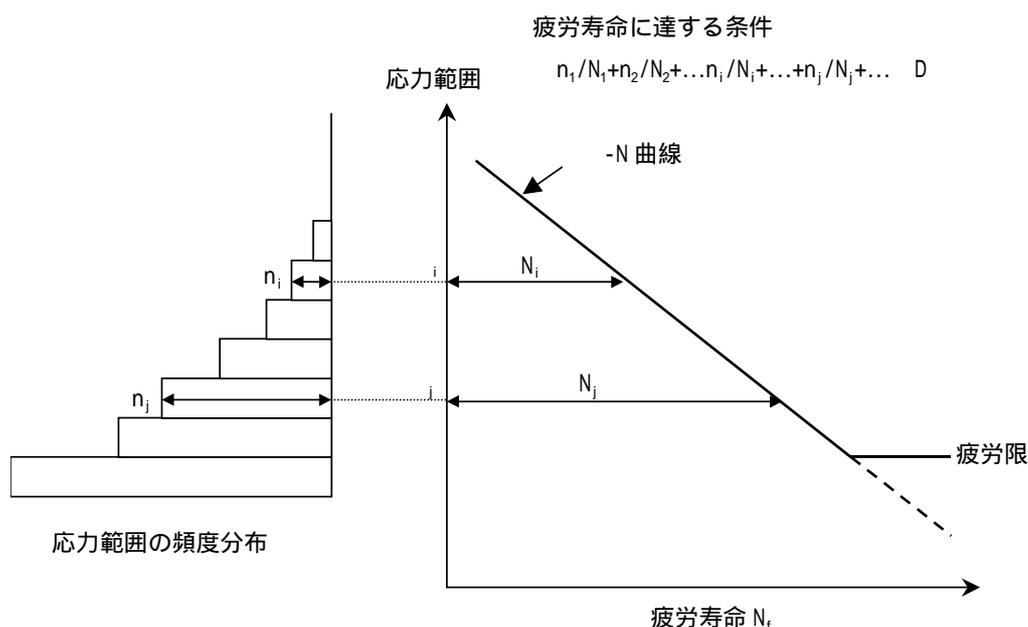


図-23 累積被害則の考え方

(c)U 橋における疲労評価結果

図-24 に示す床版の疲労曲線、および実測モニタリング、および通過交通量より推定した軸重の頻度分布を用いて、床版の疲労照査を行った。疲労照査結果を図-24、および図-25 に示す。

線形累積被害則による床版の疲労照査結果より、U 橋の床版は、昭和 51 年時点において疲労限界に達すると評価される。これらの結果は、第一段階の床版の補強時期である増桁補強（昭和 52 年）、鋼板接着補強（昭和 53 年）と近い値となっている。しかし、疲労評価を行うにあたって、夜間交通量、軸重の頻度分布等の推定値を数多く用いるために、今後実測モニタリングをもとに精度を高める必要がある。

また、疲労照査における閾値が疲労時の終局限界状態であり、床版の補強時期は使用限界状態であることを考えると、使用限界状態の閾値について今後検討する必要があると考えられる。

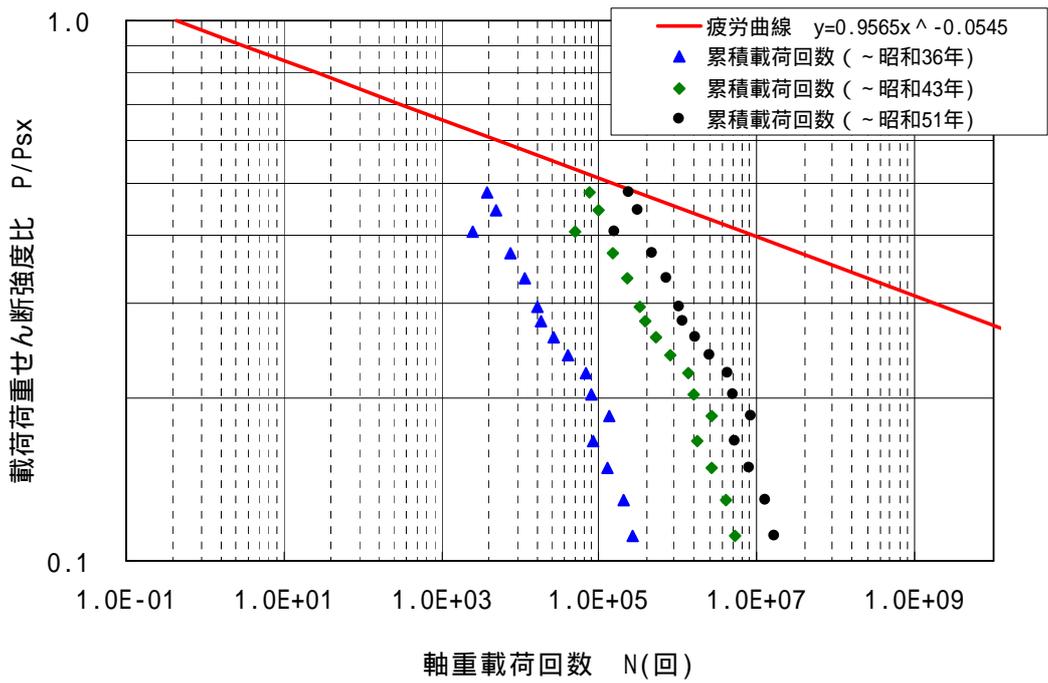


図-24 推定軸重の累積頻度分布と疲労曲線との関係

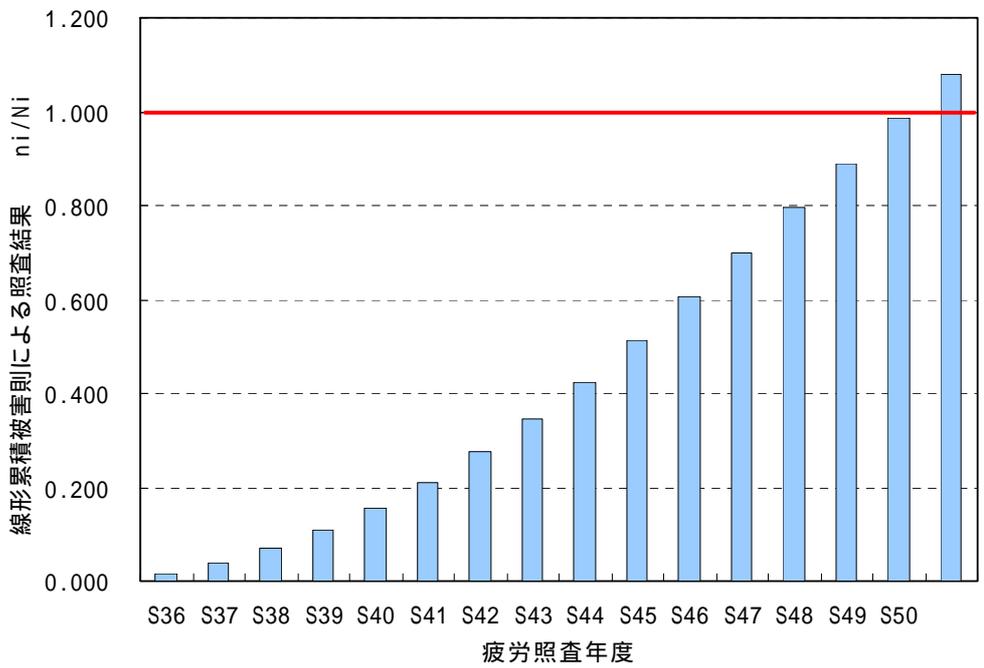


図-25 線形累積被害則による床版の疲労照査結果

3.3.6 まとめ、および今後の課題

U橋の床版疲労評価についてのまとめ、および今後の課題を次に示す。

- ・今回検討を行った U 橋の床版疲労評価は、今後精度を上げる必要があるものの、既存のデータ、および実測モニタリングを組み合わせることにより疲労評価システムとして構築できることが明らかとなった。
- ・また、床版の疲労に対して影響が大きい交通量、および通過軸重について疲労評価システムに組み込むことによって、床版の疲労に対する指標として有用であることが明らかとなった。
- ・U橋を対象とした床版疲労評価は、既存の交通量データ、および平日3時間のモニタリング結果をもとに通過軸重を推定し行った。今後、夜間交通量や夜間通過重量車の軸重等の計測結果をもとに路線特性やU橋が置かれている状況がより明確になってくる。
- ・平均軸重数については、今回の疲労評価では3軸大型車に着目し、大型車交通量の3倍と設定した。文献4)の表-付2.6.2の交通量データによると、大型車の平均軸重数は大型車交通量の2.61倍となり、今回の設定軸重数と近い値となっている。
- ・また、3軸大型車等については、連続して2軸が床版を通過するため、実験等による輪荷重載荷状態とは異なる状態となると考えられる。よって、交通量から輪荷重の載荷回数を推定する手法について検討する必要がある。
- ・床版のS-N曲線の設定は、疲労評価結果に大きく影響を及ぼすと考えるため、S-N曲線の選定について検討を行う必要がある。
- ・疲労評価を行う際に、既存の文献では疲労限界に対するS-N曲線の定義が多く、今後、使用限界に対するS-N曲線について検討を行う必要がある。
- ・今後、損傷状況と補修補強等の工事履歴イベントとの突き合わせを行い、安全側と危険側のシミュレーションを行うことを予定している。

3.4 遠隔モニタリングシステム

モニタリング技術に関しては、疲労のみならず広くほかの劣化要因である中性化やアルカリ骨材反応、塩害などについても適用手法やその基礎技術を調査、研究することとしているが、平成16-17年度の研究成果と構築した遠隔モニタリング技術・装置を活用して、供用中の実橋梁（当面U橋）を対象に、延命化方策の策定手法に関する研究を継続的、発展的に進めるものである。

そのための研究課題は、以下のとおりである。

- 1) 遠隔モニタリング技術を活用して活荷重特性等の評価を行う。
- 2) 最適な調査技術の選定や補修技術の検証などに活用・連動する仕組みの提案を行う。
- 3) 既設橋のインフラセキュリティシステムの提案を行う。

既設橋のインフラセキュリティシステムの基本フレームを図-26に示す。

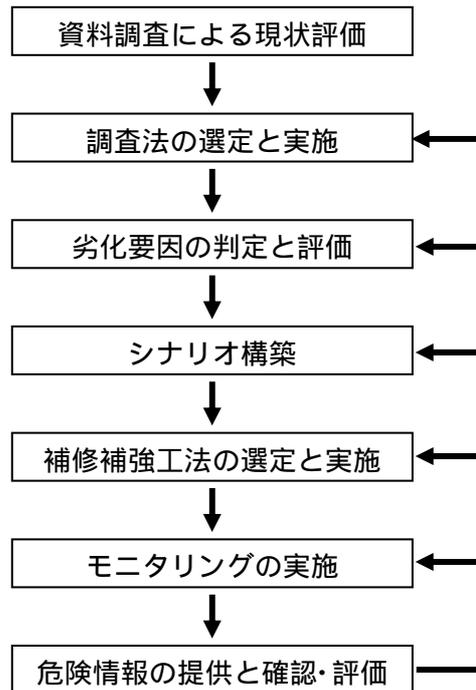


図-26 インフラセキュリティシステムの基本フレーム図

[参考文献]

- 1) 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，平成 12 年 10 月
- 2) 内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.37-42，1998 年 11 月
- 3) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性，平成 3 年 12 月
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成 14 年 3 月
- 5) 小川篤生編：現場技術者のための道路橋維持管理の実際（コンクリート橋編），山海堂
- 6) 小塩達也，山田健太郎，小林直人，水野良浩：鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発，構造工学論文集，Vol.47 A，1083-1091，2001．
- 7) 小塩達也，山田健太郎，貝沼重信，小幡敏幸，古市亨：鋼床版部材を用いた走行車輪の軸重推定，構造工学論文集，Vol.44 A，1141-1151，1998.
- 8) 中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太，石尾真理：橋梁を用いた車両重量計測システムの開発，土木技術資料 44-12，62-67，2002.
- 9) 小塩達也，山田健太郎，若尾政克，因田智博：支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析，構造工学論文集，Vol.49 A，743-753，2003．
- 10) 小塩達也，森田俊樹，深田宰史，山田健太郎，梶川康男：自動車荷重と橋梁・地盤振動の同期モニタリング，構造工学論文集，Vol.50 A，395-402，2004.
- 11) 米田昌弘，枝元勝哉：GA を適用した橋梁交通量の推定法に関する研究，構造工学論文集，Vol.49 A，755-765，2003.