

第1章 研究の概要

1.1 研究の背景

交通荷重の繰返載荷に起因する道路橋のコンクリート系床版の損傷は、架け替えに至った道路橋の主たる損傷要因にもなっている^{1.1)}。この損傷が昭和40年代初期に発生が認められてから、道路橋の設計基準においても疲労耐久性の確保が課題となっており、現在は、経験的に耐荷力の向上や構造細目により、間接的に耐久性が確保されている。また、近年床版コンクリートの下面側に一体化された底鋼板が設けられるとともに床版内部にはコンクリートと一体で挙動する種々の鋼部材が設けられている形式の床版（以下「合成床版」という。）など、少数I桁橋や開断面箱桁橋などに代表される合理化形式の橋梁構造の採用とともに新しい形式のコンクリート系床版の採用事例が増えつつあることから、コンクリート系床版に対して、定量的に疲労耐久性を評価する手法の開発が不可欠となってきた。

道路橋のコンクリート系床版の疲労耐久性に関する研究はこれまでも実施されており、疲労損傷メカニズムの解明について数多く検討がなされてきた。大阪大学の松井^{1.2)}らによって輪荷重走行試験が開発され、それまで定点繰返載荷試験で再現することができなかったひび割れ性状を、比較の実橋に近い形態で再現するとともに、床版のコンクリート各部分で発生する応力の大きさや方向及びそれらの変化履歴が実橋での自動車荷重の移動で生じる現象を比較的良く再現しているものと考えられている^{1.3)}。

輪荷重走行試験では、実橋の設計供用期間中に床版を通過する膨大な輪荷重の数に対して、供試体実験でこれを忠実に再現することは困難なため、載荷途中で段階的に載荷荷重を引き上げるいわゆる階段状漸増載荷が採用されることが多い。しかし荷重の引き上げによって新たなひび割れが発生したり、既に発生しているひび割れが進展する可能性があることなど、荷重の引き上げによって変化した床版各部の発生応力などの応答の変化の影響が耐久性とどのような関係にあるかは明確ではないことから、輪荷重走行試験は同じ条件の試験を行った床版同士の相対比較を耐久性の評価に用いることが一般的である。

松井ら^{1.2)}は、さらに疲労が進行した最終段階の破壊形態として一般的とされる床版部材としての押し抜きせん断破壊耐力との関係において疲労耐久性を評価する方法なども提案しているが、実橋の床版の破壊形態は必ずしも押し抜きせん断耐力の算出で想定しているような形態とならない場合もある。また、実橋の供用性にかかわる疲労耐久性の評価にあたっては、ひび割れが増加して押し抜きせん断破壊面が形成されるまでの間、徐々に床版の損傷が進展していく過程がそのほとんどの期間を占め、ある段階の状態に着目しての評価ではその状態になるまでの過程が各々異なる合成床版など新しい構造や形式の床版への適用には限界があると考えられる。

前川ら^{1.4) 1.5)}は、コンクリート組織の破壊による圧縮剛性の低下、鉄筋とコンクリートの付着疲労による引張剛性の低下、繰返荷重の影響によるひび割れ面の平滑化に伴うせん

断伝達力の低下の3つのコンクリート要素の破壊要因がそれぞれモデル式から基本構成則として考慮されている極めて緻密なシミュレーションにより、様々な鉄筋コンクリート床版等について疲労寿命と損傷課程の推定が可能としている。

しかしながら、設計段階における構造の決定や損傷の有無による耐久性の評価を目的とする場合においては、乾燥収縮の影響の見積もりが結果を左右するなど、極めて緻密なモデルであるがために、基本構成則などに考慮されない要因による差異が解析結果の差として現れ、緻密なモデルに見合った詳細な材料特性の解析への取り込みや適正な結果の評価に課題もあるものと考えられる。

このような背景のもと、本研究では、様々な架橋条件等により詳細な材料特性等の管理が困難な新設橋梁の設計段階や、部材によりばらつきのある材料特性を持つ既設橋梁の耐力評価や補修補強検討を目的として、構造形式の違いによる疲労耐久性の違いが定量的に評価できる手法を検討する。

なお、本研究では、コンクリート系床版の破壊に至る現象を厳密に表現することを目標とするものではなく、あくまでも自動車荷重などの外力条件や施工条件、及び、コンクリートの品質などのばらつきも含めて考慮するものとし、以下の2点を満足する設計手法を目標とする。

- ・ 現行設計基準による鉄筋コンクリート床版との相対比較において、コンクリート系床版の構造形式の違いにより、設計供用期間における疲労耐久性を定量的に評価できること。
- ・ 様々な構造形式のコンクリート系床版に対して解析的に局部の応力状態と疲労損傷の進展過程を表現できる、すなわち想定される実現象におけるひび割れの発生と進展という疲労損傷過程を擬似的に表現できること。

国土技術政策総合研究所、大阪工業大学、九州工業大学、(社)日本橋梁建設協会の4者で、2004(平成16)年度から2006(平成18)年度までの約2カ年にわたって行った、道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究(以下「過去の共同研究」という。)では、コンクリート系床版の疲労損傷過程を解析的に模擬する手法について検討を行い、一般的な鉄筋コンクリート床版及び合成床版に対する解析的手法による疲労耐久性評価法を開発した^{1.6)}。

しかし、開発した評価法を合成床版の疲労耐久性の評価へ適用するにあたっては、多様な合成床版において、鋼部材とコンクリートの合成効果、鋼部材とコンクリートの付着特性について安定して適切な結果が得られるモデル化方法に課題が残された。

本共同研究では、上記の課題を解決し、開発した評価法に対して多様な合成床版の構造特性とその劣化過程を導入する手法を確立することで、多様な構造形式の床版への適用性の拡大の開発を目指すものである。

1.2 過去の関連研究

(1) 概要

過去の共同研究^{1.6)}においては、多様な形式のコンクリート系床版に対して適用可能な汎用性のある疲労耐久性評価法の開発を意図して、疲労損傷課程を定量的に表現することのできる解析手法について検討した。

過去の輪荷重走行試験や実橋の損傷状態の観察から、鉄筋コンクリート床版の疲労による劣化形態は概ね把握されている。実橋の鉄筋コンクリート床版では床版コンクリートがブロック化して抜け落ちを生じても鉄筋は破断していないものがほとんどであり、コンクリートのひび割れの進展と鉄筋の疲労は必ずしも連動して生じるものではないと推定される。また、合成床版の輪荷重走行試験の結果では、圧縮側コンクリートにひび割れが生じたものや、コンクリート内部で補強鋼材との境界を起点としたひび割れが発生したものが確認されている。これらのことから、コンクリート系床版の疲労損傷過程は内部鋼材の形式や配置の相違などの構造形式によっても異なり、疲労耐久性を評価するにあたって平均化された一様な物理特性を持つ版構造として扱うことで精度良く推定することには限界があると考えられた。そこで、コンクリート系の床版構造を構成する3つの要素である「コンクリート」、「鋼部材」、及び「コンクリートと鋼部材の一体化機構」の3つの要素に分けて扱い、各時点の床版全体の劣化状態は、これらの3つの要素の劣化状態の組み合わせられた結果として現出しているものと捉えることにした。

(2) 床版コンクリートの応力状態と疲労

大小の骨材とセメントからなり、微視的には複雑で一様な構造ではないコンクリート系床版のコンクリート部分について、平均化して捉えることができると仮定するある規模の領域部分に対して、それぞれに繰り返される応力変動の規模と回数からなる累積値がある条件に達した時点で破壊を生じて剛性が発揮できなくなるものと仮定する。このような要素ごとの破壊は、実現象におけるひび割れの発生と進展という疲労損傷課程を模擬的に表現したものであり、これにより数値解析によって疲労耐久性を定量的に評価することを意図したものである。

(3) 解析の方法

1) 解析方法の概要

道路橋のコンクリート系床版では、輪荷重の移動の影響を受け、床版コンクリートや内部鋼材に発生する応力は多軸応力状態であり、かつその方向も荷重の移動につれて3次元的に複雑に変化する。さらに、鉄筋やPC鋼材以外に床版コンクリートに様々な形状の鋼部材が配置される合成床版では、鋼材周囲のコンクリートは局部的に大きな応力が発生し

たり、荷重載荷位置の変化に応じて複雑な応力状態の変化が生じることがある。そこで、コンクリート各部分で生じる応力変動の繰返しの影響がある物理量としてその部分にダメージが累積され、これがある破壊基準に達するとその部分のコンクリートは剛性を失うなどの変状を来すものと仮定した。この各部位の変状は実現象でコンクリートにひび割れが発生進展していくことに相当する床版コンクリートの変化の影響の表現であり、これにより応力変動の繰返しによってひび割れが拡大していく現象を解析的に疑似表現することとした。

2) 解析モデル

解析には弾性 **FE** モデルを用い、解析の要素の大きさは、コンクリート要素毎にある閾値で急変する物性の変化として表現できるように設定することが必要で、要素分割の大きさが粗すぎると損傷進展過程や各時点での耐荷力性能などの実床版との対比が困難となる。本研究では平面的には $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ で床版厚さ方向に 5 分割 (要素高さは床版厚によって $38, 40, 50\text{mm}$) の 6 面体ソリッド要素により分割することを基本とした。ここで、鉄筋を含む要素では、コンクリート部の母要素と自由度を共有する従属要素「埋め込み鉄筋要素」を用いて鋼材をソリッド要素に埋め込みモデル化した^{1,8)}。埋め込み鉄筋モデルを用いたのは、コンクリート要素内の任意の位置に鉄筋を挿入することが可能であるためである。なお、コンクリートと鉄筋は完全付着としている。

境界条件を図-1.2.2 及び表-1.2.1 に示す。床版支間方向の支持条件は、鉛直方向の変位のみを固定するピン支持を基本とする。橋軸端部では、輪荷重走行試験で設置される弾性ばねをモデル化し、弾性支持とする。

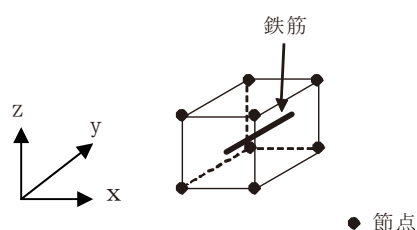


図-1.2.1 3次元8接点要素と埋め込み鉄筋モデルのイメージ

表-1.2.1 拘束条件 (構造モデルの最下層の節点)

	変位			回転		
	X方向	Y方向	Z方向	X軸回り	Y軸回り	Z軸回り
床版支間支点	Mov.	Mov.	Fix.	Mov.	Mov.	Mov.
隅角部	下図の通り			Mov.	Mov.	Mov.

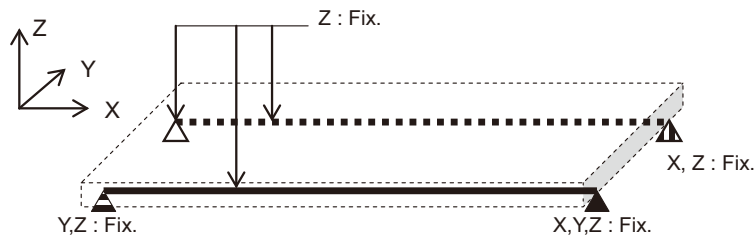


図-1.2.2 床版の支持条件（床版モデルの最下層の節点）

3) 荷重条件

荷重は、輪荷重走行試験を模擬するため、少なくとも5箇所以上の荷重点を設け、それらを図-1.2.3に示すケース1→2→3→4→5→1→2→3→…というように、荷重荷重位置の移動を繰り返す。なお、ケース1から5を2回繰り返した時点をも、輪荷重走行試験の1往復とみなし「走行回数2回」という。また、新たな要素が破壊したとみなせるまでの間は、走行回数は増えるものの解析モデルに変化はなく同じ解析モデルのまま行われる一連の解析を「解析ステップ」という。

荷重荷重範囲は、輪荷重走行試験の荷重ブロックの大きさに合わせて、供試体のモデルごとに適宜設定する。例えば、土木研究所の輪荷重走行試験における荷重ブロックの寸法は、200×500mmである。

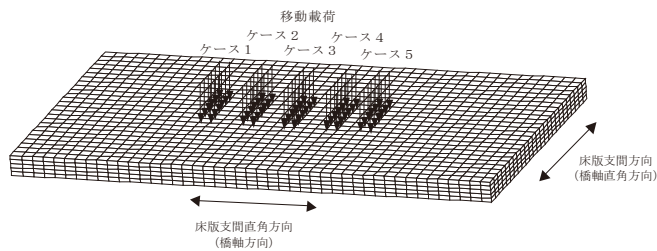


図-1.2.3 荷重荷重の概念図

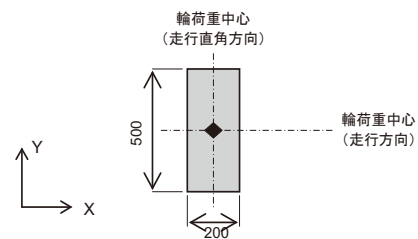


図-1.2.4 等分布荷重の分布範囲
(車輪の接地範囲)

4) コンクリート要素の疲労破壊

コンクリートの疲労耐久性は、一軸の室内疲労試験結果から、コンクリートに作用する最小応力と静的強度の比 S_{min} 、最大応力と静的強度の比 S_{max} と関連づけて、ある程度精度良く表現できるとの研究成果が得られていおり、例えば、式-1.2.1に示す S-N 曲線による定量的な疲労耐久性の評価手法も提案されている^{1.7)}。

$$\log N = 17 \frac{1 - S_{max}}{1 - S_{min}} \quad (\text{式-1.2.1})$$

ここに、N：応力繰り返し数（但し、 $N \leq 2 \times 10^6$ ）

S_{max} ：最大応力と静的強度との比

S_{min} ：最小応力と静的強度との比

しかし、単純な一方向の応力変化のみの条件で得られた評価式を、輪荷重の移動の影響により床版コンクリートや内部鋼材に 3 次元的に複雑に変化する応力状態に、そのまま適用できるかどうかについては明らかにされていない。

本研究では、コンクリートの各部分で生じる応力変動の繰り返しの影響が、ある要素にダメージとして累積され、これが破壊基準に達したときにその部分のコンクリートは剛性が低下するといった変状をきたすと仮定することで、この各部位の変状は実現象のコンクリートにひび割れが発生し、拡大していく現象を解析的に疑似表現できるものとした。

①各コンクリート要素の応力とひずみとの積の変動分の算出方法

コンクリート要素の破壊は、走行回数ごとに生じる主引張応力と引張ひずみとの積の変動分（以下、「疲労度」という。）を累積した値に基づき破壊と判定する。

輪荷重モデルの載荷位置 k に対し、要素 i に生じる疲労度 U_{ik} は次式により求まる。

$$U_{ik} = \frac{1}{2} \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} \quad (\text{式-1.2.2})$$

各コンクリート要素について、式-1.2.2 により算出した各荷重条件下で生じる疲労度の最大値 $Max(U_{ij})$ と最小値 $Min(U_{ij})$ を抽出し、それらの差をとることにより、輪荷重 1 回走行時の疲労度 ΔU_{ij} を算出する。

$$\Delta U_{ij} = Max(U_{ij}) - Min(U_{ij}) \quad (\text{式-1.2.3})$$

ここに、 ΔU_{ij} : 輪荷重 1 回走行で要素 i に生じる疲労度 (N/mm²)

$Max(U_{ij})$: 輪荷重 1 回走行時の U_{ik} の最大値 (N/mm²)

$Min(U_{ij})$: 輪荷重 1 回走行時の U_{ik} の最小値 (N/mm²)

j : 検討している載荷ステップ数 (ステップ)

②コンクリートの被害則

コンクリートの累積損傷度 D は、図-1.2.5 に示す疲労度に基づく被害則によるものとし、解析ステップ j における疲労度 ΔU_j と走行回数 N_j との関係（以下「コンクリートの被害則」という。）として、図-1.2.5、式-1.2.4 及び式-1.2.5 に示すように定義する。

ここで、疲労度の蓄積が疲労強度に及ぼす感度は不明のため、便宜的に 8 乗の対数則に従うものと仮定した。なお、このコンクリート被害側の傾きを表す値そのものは劣化過程の時間の絶対評価には直接関わるものの、弾性解析の繰り返しであり、本方法で比較される構造が類似した異なる床版同士の解析結果にあらわれる耐久性の優劣の定性的な相対関係には影響しないと考えられる。

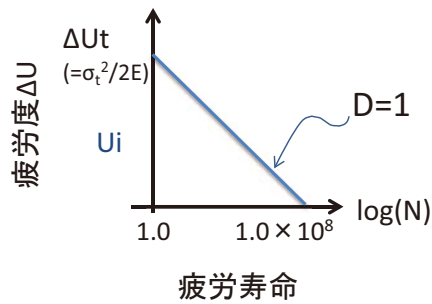


図-1.2.5 コンクリートの被害則

解析ステップ j における要素 i の累積損傷度 D_{ij} は、コンクリートの被害則と、上記①で算出した疲労度から、次のとおり算出できる。累積損傷度 D_{ij} が 1 に達したとき、コンクリートの要素 i はひび割れたものとみなす。

解析ステップ k から輪荷重走行試験結果の走行回数と比較するための、換算方法については、以降③に示す。

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^j \frac{n_{ik}}{N_{ik}} \quad (\text{式-1.2.4})$$

ここに、 n_{ik} : 解析ステップ k の走行回数 (回)

N_{ik} : 要素 i の解析ステップ k から換算した疲労寿命となる走行回数(回)
(コンクリートの被害則と解析ステップ k で生じる疲労度 ΔU_j から算出される。)

D_{ij} : 解析ステップ j における要素 i の累積損傷度

なお、輪荷重走行 1 回の破壊基準 (y 切片) は、すなわち静的な破壊基準とみなせることから、コンクリートの引張強度を用いて次式により算出する。

$$\Delta U_t = \frac{1}{2} \sigma_t \varepsilon_t = \frac{1}{2E} \sigma_t^2 \quad (\text{式-1.2.5})$$

ここに、 ΔU_t : 走行回数 1 回で破壊すると仮定した場合の相当疲労度 (N/mm^2)

σ_t, ε_t : 破壊時の応力 (N/mm^2)、ひずみ

③ 走行回数

輪荷重走行試験結果における走行回数との比較に関しては、各解析ステップ数を輪荷重走行回数に換算した値 (以下「走行回数 N 」という。) を用いた。走行回数は、コンクリートの被害則に基づいて、各要素の疲労度より求められる残存寿命を累積して算出する。なお、ここでは、主引張応力と引張ひずみが同時に生じる状態のみを合計している。

これまでの走行回数 N_k と载荷ステップ数 k との関係を、式-1.2.6 及び図-1.2.6 に示す。

$$N_k = \sum_{k=1}^{k-1} n_k \quad (\text{式-1.2.6})$$

ここに、 $k-1$: これまでの载荷ステップ数 (ステップ)

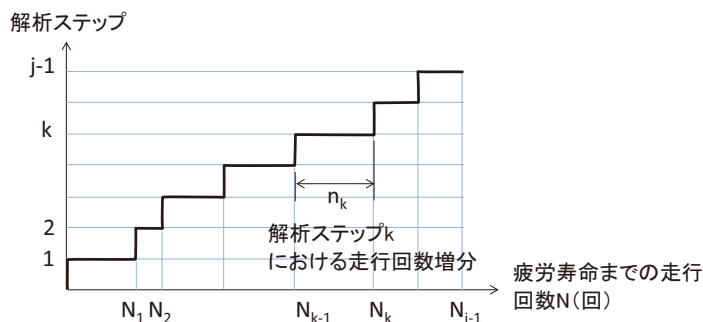


図-1.2.6 走行回数と解析ステップ数の関係

④コンクリート要素の破壊状態のモデル化

コンクリート要素の繰返荷重による疲労は、実際の現象としては骨材及びセメント等の組織の緩みやひび割れなどが複合的に生じているものと考えられ、その結果としてある領域のヤング係数やせん断弾性係数が低下すると考えられる。ここでは、それらのコンクリート要素の破壊による剛性の低下を、各方向の疲労の蓄積やそれまでの破壊状態に応じて考慮できることを目的に、モデル化した。

コンクリート要素の破壊による剛性の低下は、ヤング係数 E を $1/10$ に低減することによってモデル化する。ここで、あらたに累積する際、後述のとおりヤング係数 E を低減させた方向については疲労度及び方向別疲労指数を計上しないこととする。これは、実際のひび割れ近傍では、有限要素に相当する領域の変形はひび割れ開口によるものであり、ひび割れ面に垂直な方向にはコンクリートにひずみは生じないと仮定したことによる。

5) 解析の手順

平成 16 年度から平成 19 年度に行った研究に基づく解析の手順を、図-1.2.7 に示す。

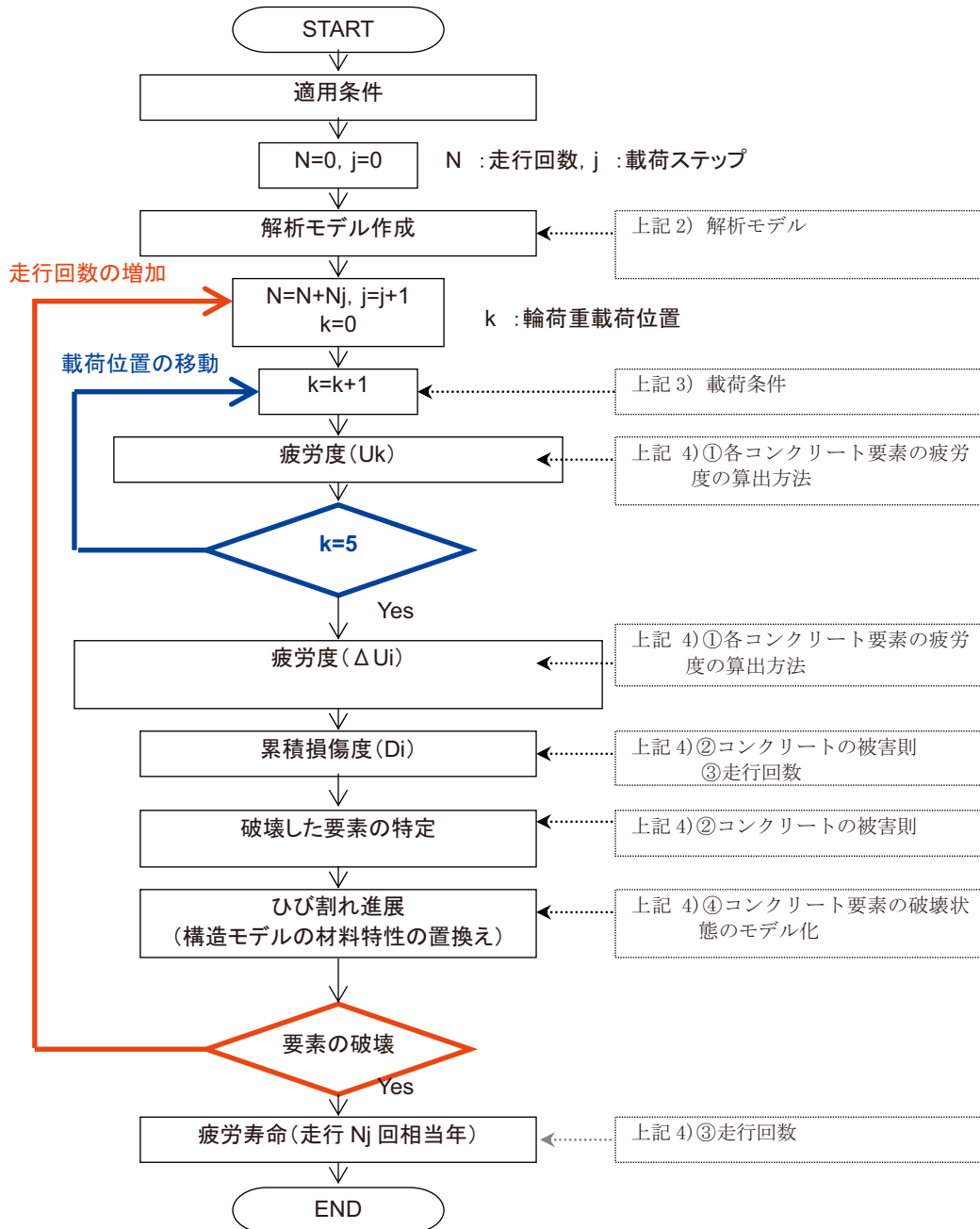


図-1.2.7 解析フロー図 (平成16年度から平成19年度に行った研究)

(4) まとめと課題

平成 16 年度から平成 19 年度に行った一連の研究により、コンクリート系床版の統一的な概念での疲労耐久性評価を解析的に行うことの可能性が示唆された。さらに、このような評価手法を用いて、適切にモデル化するとともに、解析値と実験結果の整合を図ることで、版全体としては弾力的な挙動が生じている段階での床版の疲労劣化過程における応力状態は、ある程度の信頼性をもって解析的に評価できる可能性があると考えられる。

なお、評価手法としての信頼性向上の観点から、解決すべき残された検討課題として以下のものが挙げられる。

解析精度の向上：各種合成床版における輪荷重走行試験より、合成床版内部のリブ上端や上側鉄筋に沿ってひび割れが発生すると考えられる。本解析では、コンクリート要素の破壊の方法について、コンクリート要素にダメージとして累積され破壊基準に達したときに、全ての方向に対して剛性を低下させている。そのため、水平方向のひび割れが発生する初期の段階において、本来抵抗できる方向の剛性も低下させることとなり、適切に疲労耐久性を評価できない可能性がある。

モデル化方法：鋼部材とコンクリートとの接触面における境界条件のモデル化の違いで、コンクリートの内部応力が比較的大きく影響を受けることが判明した。また、作用荷重の大きさによってもこの境界条件のモデル化の影響が変化する。また、検討に用いた合成床版は、リブとトラスを用いた限定的なケースのみの検証である。そのため、現在開発されている多様な合成床版に対しては、条件に応じて疲労耐久性の評価に用いるモデル化の方法を整理する必要がある。

実橋との違い：「コンクリート」及び「コンクリートと鋼部材の一体化機構」の疲労に及ぼす応力変動の影響については、疲労限の有無、変動応力振幅の変化パターンや大きさなどとの関係について不明な点もあり、これらとの関係に対する本手法の適用性については、様々な構造形式の合成床版、劣化した床版の余寿命推定などの解析における適用範囲と連動して見極める必要がある。

1.3 本研究の目的

本報告書の構成の概念を図-1.3.1に示す。

本共同研究においては、過年度までの研究で得られたコンクリート系床版の疲労耐久性を評価する手法として、より精度良く、普遍的に適用できる解析手法を検討した。

第1章では、過去の研究の概要を整理し、本共同研究にて改良した解析手法の内容を説明した。

第2章では、旧土木研究所において輪荷重走行試験を実施した鉄筋コンクリート床版を対象として、本共同研究で提案する解析を行い破壊の状況を確認した。また、合成床版の開発・採用において耐久性を評価するための解析指標を設定するため、鉄筋コンクリート床版に要求される性能を整理するとともに、解析により得られた損傷の段階と実験結果との関係から安全側に評価できる破壊の状態を定義した。

第3章では、交通実態のデータと現行設計基準で設計された鉄筋コンクリート床版における破壊の状態との関係から、合成床版の疲労耐久性と相対比較することのできる破壊回数を算出した。

第4章では、各種合成床版について、提案する疲労耐久性評価手法における解析モデル化手法について検討するとともに、各床版の損傷過程を想定し、疲労耐久性評価手法の適用範囲について検証した。

第5章では、既設橋の状態評価への適用拡大を狙いとして、実交通荷重により劣化した既設橋梁から撤去された床版を対象とした、輪荷重走行試験結果と解析結果を比較し、破壊の傾向について整理した。

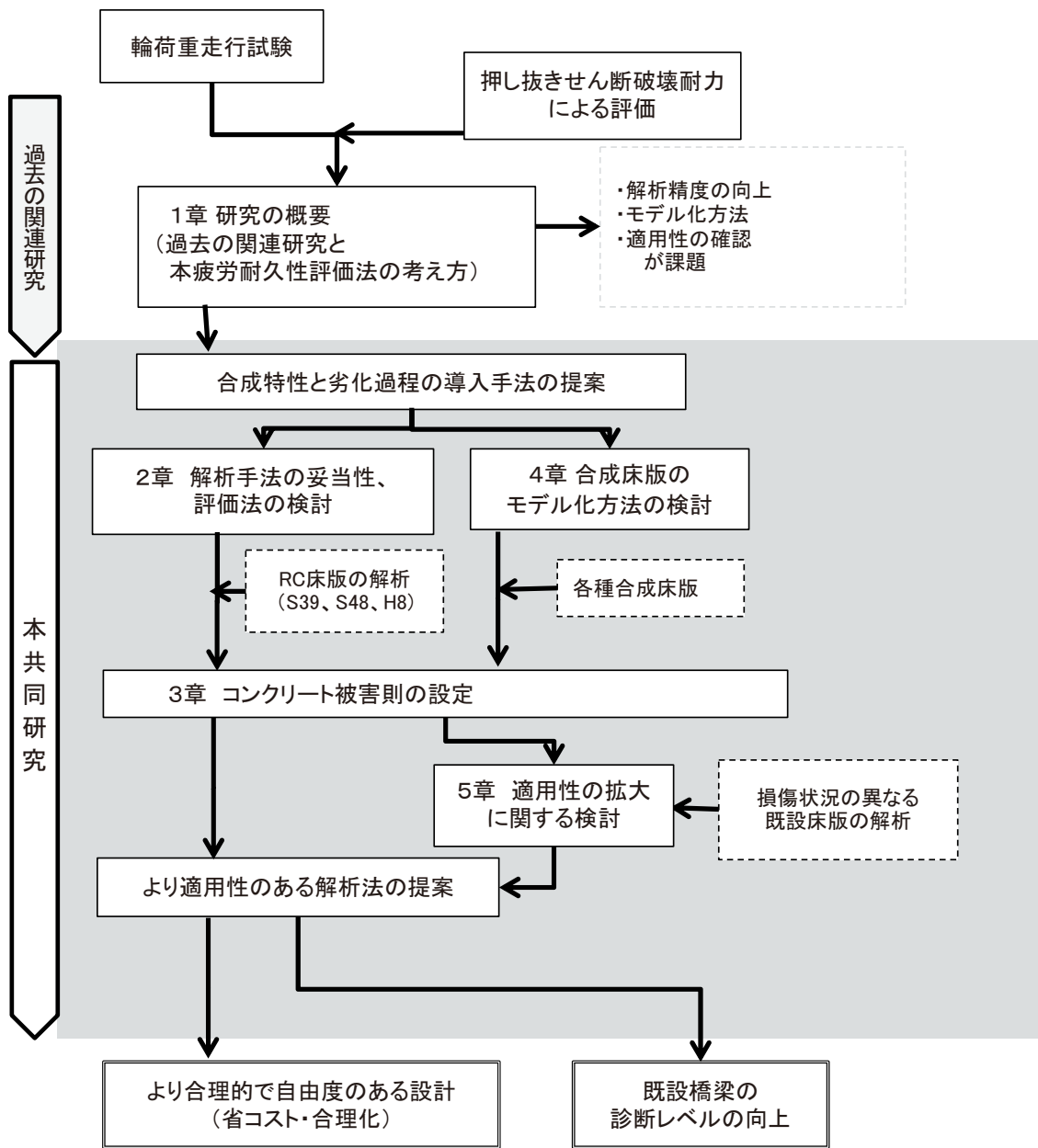


図-1.3.1 本研究の構成の概念

1.4 本検討に用いた解析方法（3方向破壊を考慮した解析モデル）

(1) 概要

各種合成床版における輪荷重走行試験より、合成床版内部のリブ上端や上側鉄筋に沿ってひび割れが発生すると考えられる。しかしながら、1.2(4)「解析精度の向上」に関する課題で記述したとおり、リブ上端や上側鉄筋に沿って生じる局部応力の繰返しに対してコンクリート要素の破壊に対して方向性を考慮する方法に見直す必要があることが示された。

そこで本研究では、床版コンクリートの応力状態、疲労の考え方、解析方法などは過年度の検討を踏襲し、破壊方法を方向別にヤング係数及びせん断弾性係数を低下させる（3方向破壊）とすることで、合成床版におけるリブ上端や上側鉄筋に沿ったひび割れなどの破壊形態を適切に評価できる方法を検討した。

(2) 解析の方法

1) 解析手順

平成 16 年度から平成 19 年度に行った研究に基づく解析からの改良点を次に示す。図-1.4.1 に示す解析手順のうち、改良点は太字で示しており、改良点について後述する。

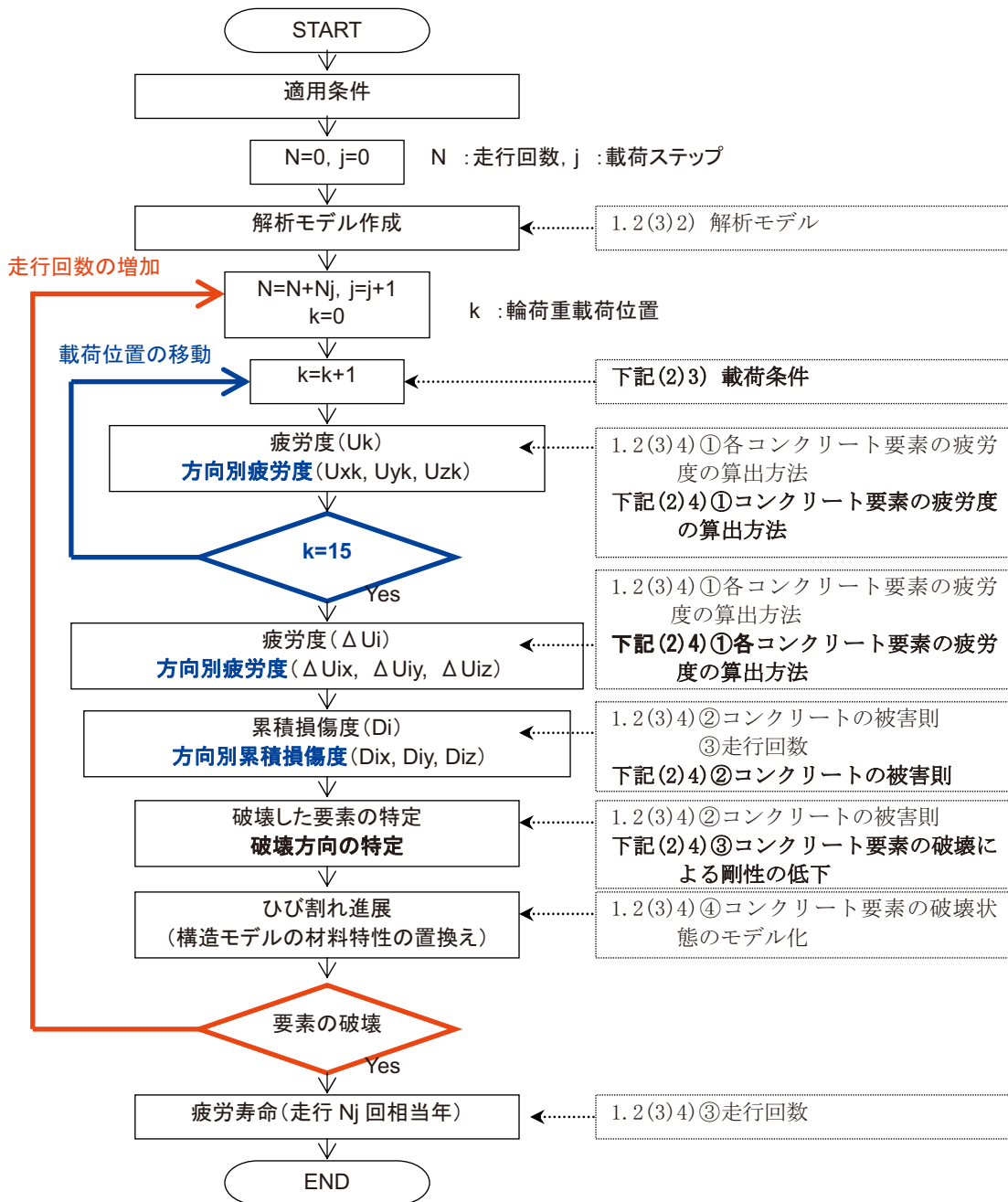


図-1.4.1 解析フロー図

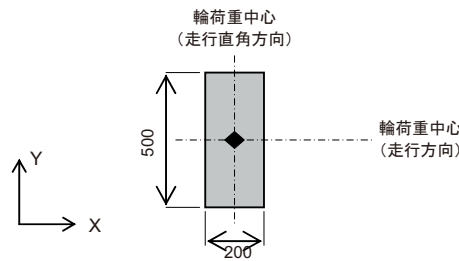
2) 解析モデル

上記 1.2(3)2) と同様とする。

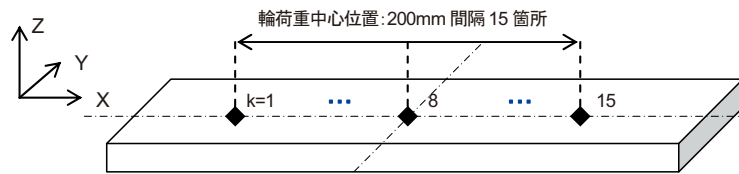
3) 荷重条件

解析では、本研究で比較のための実床版の疲労試験を行った土木研究所の輪荷重走行試験の状況を再現して、輪荷重走行試験を模擬するため、15箇所の荷重点を設け、それらを図-1.4.2に示すケース 1→2→3→4→5→…というように、荷重荷重位置の移動を繰り返して、荷重ごとの応答値を累積していく。

荷重荷重の設置範囲を幅 500mm、長さ 200mm の矩形とし、この範囲で等分布させる。床版中央の輪荷重走行範囲において、200mm 間隔 15 箇所で順次荷重する。輪荷重は 157kN とする。



(a) 等分布荷重の分布範囲 (車輪の接地範囲)



(b) 輪荷重中心位置 (k=1~15)

図-1.4.2 荷重条件

4) コンクリート要素の破壊

①各コンクリート要素の疲労度の算出方法

破壊による剛性低下方向の判定は、荷重位置 k のときに要素 i に生じる疲労度は、方向性を考慮し、式-1.4.1のとおりとする (以下「方向別疲労度」という。)

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{11} \varepsilon_{11} + \frac{1}{2} \sigma_{22} \varepsilon_{22} + \frac{1}{2} \sigma_{33} \varepsilon_{33} = \frac{1}{2E} \sigma_{ik}^2 \quad (\text{式-1.4.1})$$

$$\begin{cases} \sigma_{i11k} \geq 0, & \sigma_{i22k} \geq 0, & \sigma_{i33k} \geq 0 & (\text{注, 引張主応力} \geq 0) \\ \varepsilon_{i11k} \geq 0, & \varepsilon_{i22k} \geq 0, & \varepsilon_{i33k} \geq 0 & (\text{注, 引張主ひずみ} \geq 0) \end{cases}$$

ここに、 k : 輪荷重モデルの荷重位置

U_{ik} : 要素 i に生じる疲労度 (N/mm²)

$\sigma_{i11k}, \sigma_{i22k}, \sigma_{i33k}$: 要素 i に生じる主応力 (N/mm²)

ε_{i11k} , ε_{i22k} , ε_{i33k} : 要素 i に生じる主応力方向の主ひずみ

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{i11k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i11k} - \nu(\sigma_{i22k} + \sigma_{i33k})) \\ \varepsilon_{i22k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i22k} - \nu(\sigma_{i33k} + \sigma_{i11k})) \\ \varepsilon_{i33k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i33k} - \nu(\sigma_{i11k} + \sigma_{i22k})) \end{array} \right.$$

式-1.4.1により算出した、各荷重条件に対する方向別疲労度の最大値と最小値を抽出し、それらの差から、輪荷重 1 回走行時の方向別疲労度を算出する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_{ix|j} = \text{Max}(U_{ix|j}) - \text{Min}(U_{ix|j}) \quad (\text{式-1.4.2}) \\ \Delta U_{iy|j} = \text{Max}(U_{iy|j}) - \text{Min}(U_{iy|j}) \quad (\text{式-1.4.3}) \\ \Delta U_{iz|j} = \text{Max}(U_{iz|j}) - \text{Min}(U_{iz|j}) \quad (\text{式-1.4.4}) \end{array} \right.$$

ここに、 $\Delta U_{ix|j}$, $\Delta U_{iy|j}$, $\Delta U_{iz|j}$: 輪荷重 1 回走行に対する方向別疲労度 (N/mm²)

$\text{Max}(U_{ix|j})$, $\text{Min}(U_{ix|j})$: 輪荷重 1 回走行時の $U_{ix|k}$ の最大値, 最小値 (N/mm²)

$\text{Max}(U_{iy|j})$, $\text{Min}(U_{iy|j})$: 輪荷重 1 回走行時の $U_{iy|k}$ の最大値, 最小値 (N/mm²)

$\text{Max}(U_{iz|j})$, $\text{Min}(U_{iz|j})$: 輪荷重 1 回走行時の $U_{iz|k}$ の最大値, 最小値 (N/mm²)

j : 解析ステップ数

②コンクリートの被害則

コンクリートの被害則は、1.2(4)3)②と同様に、疲労度が疲労強度に及ぼす影響は不明のため、便宜的に 8 乗の対数則に従うものと仮定している。

載荷ステップ 終了時の要素 の方向別累積損傷度 D は、式-1.4.5 により定義する。

コンクリート要素の累積損傷度が 1 に達した場合、XYZ 方向のうちで最も累積が大きい方向をひび割れたものとする。

$$\left. \begin{array}{l} D_{ix|j} = D_{ix|j-1} + n_j \Delta U_{ix} \\ D_{iy|j} = D_{iy|j-1} + n_j \Delta U_{iy} \\ D_{iz|j} = D_{iz|j-1} + n_j \Delta U_{iz} \end{array} \right\} (\text{式-1.4.5})$$

ここに、 $D_{ix|j}$, $D_{iy|j}$, $D_{iz|j}$: 方向別累積損傷度 (N/mm²)

$U_{ix|j-1}$, $U_{iy|j-1}$, $U_{iz|j-1}$: これまでの方向別疲労指数 (N/mm²)

n_j : 本載荷ステップの走行回数 (回)

$\Delta U_{ix|j}$, $\Delta U_{iy|j}$, $\Delta U_{iz|j}$: 輪荷重 1 回走行に対する方向別疲労度 (N/mm²)

③走行回数

上記 1.2(3)4)③と同様である。

④コンクリート要素の破壊による剛性の低下

- コンクリート要素の累積損傷度が 1 に達した場合、XYZ 方向のうちで最も累積が大きい方向に直角な断面がひび割れたものとして、その累積方向の剛性のみ低下させる。例えば、x 方向に疲労が蓄積された場合は、図-1.4.3~5 に示す破壊判定タイプ-x となる。
- 剛性を低下させた要素は、それまでの累積損傷度が解放されるとし、累積損傷度及び方向別疲労指数を 0 とする。その後剛性が低下していない方向についてのみ、輪荷重の走行に対して疲労被害を累積し、3 方向 (3 回) までそれぞれに対して破壊判定する方法とした。これは、実際のひび割れ近傍では、有限要素に相当する領域の変形はひび割れ開口によるものであり、破壊判定面に垂直な方向にはコンクリートにひずみは生じないと仮定したことによる。
- コンクリートの破壊による剛性の低下率は、表-1.4.1~8 のとおり、ヤング係数 E 及びせん断弾性係数 G を $1/10$ に低減することによってモデル化する。これは、コンクリートが繰返荷重により疲労すると、骨材やセメント等の組織のゆるみやひび割れなどが複合的に生じ、ある領域のヤング係数やせん断弾性係数が低下すると考えたものである。したがってここでは、各方向別に疲労による要素の破壊状態における挙動を、コンクリート要素の破壊による剛性の低下としてモデル化することにした。なお、要素破壊の前後でポアソン比は変えないこととしている。

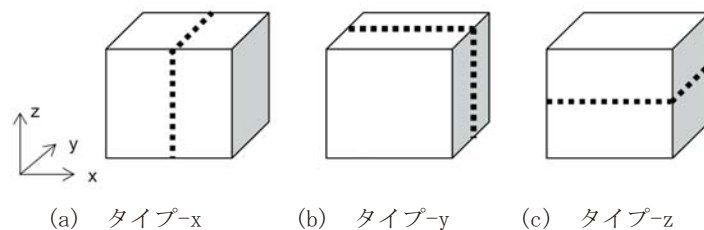
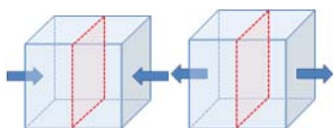
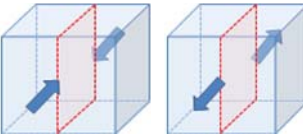
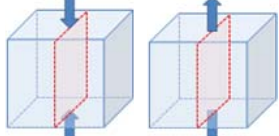
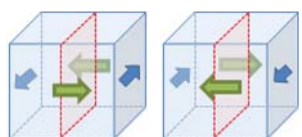
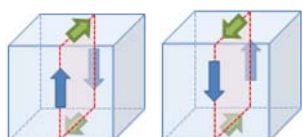
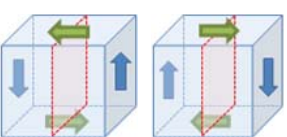


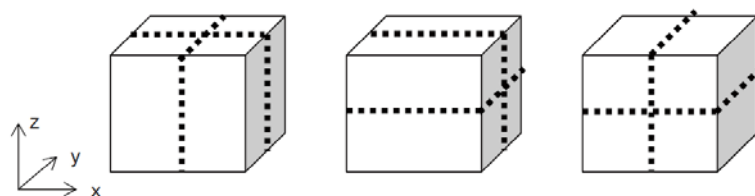
図-1.4.3 破壊判定タイプ (1 方向ひび割れ)

表-1.4.1 破壊判定タイプ別の剛性低下率（1方向ひび割れ）

	タイプ-x			タイプ-y			タイプ-z		
ヤング係数	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	$E_c/10$	E_c	E_c	E_c	$E_c/10$	E_c	E_c	E_c	$E_c/10$
せん断弾性係数	x-y	y-z	z-x	x-y	y-z	z-x	x-y	y-z	z-x
	$G/10$	G	$G/10$	$G/10$	$G/10$	G	G	$G/10$	$G/10$
ポアソン比	x-y	y-z	z-x	x-y	y-z	z-x	x-y	y-z	z-x
	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν

表-1.4.2 破壊判定タイプごとの剛性低下と方向別低減率（タイプxの例）

	タイプ-x		
ヤング係数	x	y	z
			
せん断弾性係数	x-y	y-z	z-x
			



(a) タイプ-xy (b) タイプ-yz (c) タイプ-zx

図-1.4.4 破壊判定タイプ（2方向ひび割れ）

表-1.4.3 破壊判定タイプ別の剛性低下率（2方向ひび割れ）

	タイプ-xy			タイプ-yz			タイプ-zx		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
ヤング係数	$E_c/10$	$E_c/10$	E_c	E_c	$E_c/10$	$E_c/10$	$E_c/10$	E_c	$E_c/10$
せん断弾性係数	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$	$G/10$
ポアソン比	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν

表-1.4.4 破壊判定タイプxyの剛性低下と方向別低減率

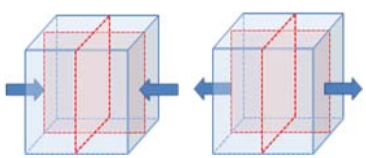
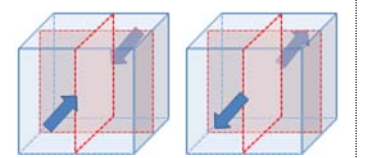
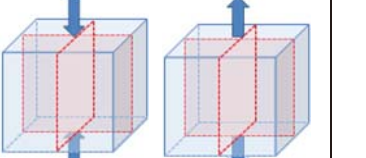
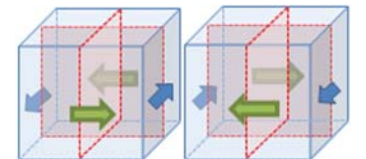
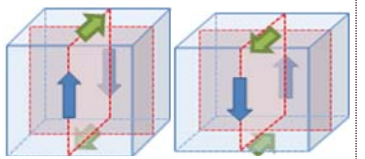
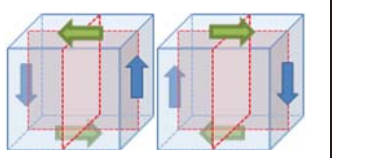
	タイプ-xy		
	x	y	z
ヤング係数	 <p>× : 1/10 に低減</p>	 <p>× : 1/10 に低減</p>	 <p>○ : 低減なし</p>
せん断弾性係数	 <p>× : 1/10 に低減</p>	 <p>× : 1/10 に低減</p>	 <p>× : 1/10 に低減</p>

表-1.4.5 破壊判定タイプ y z の剛性低下と方向別低減率

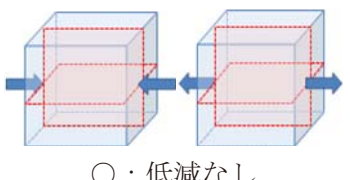
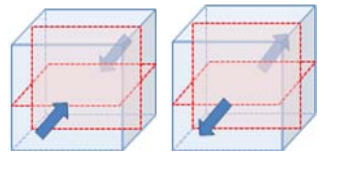
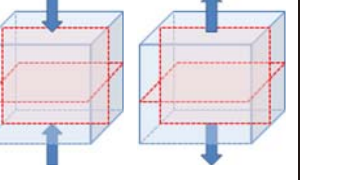
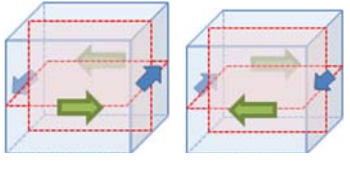
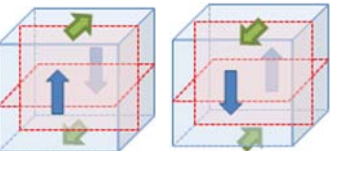
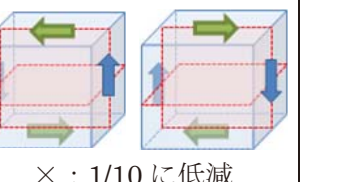
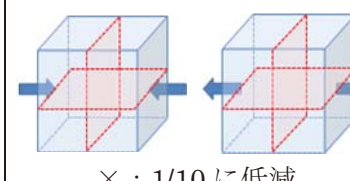
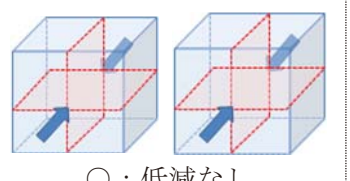
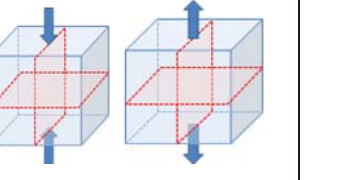
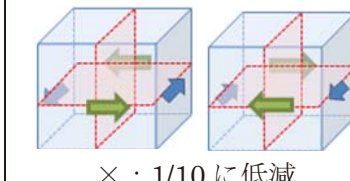
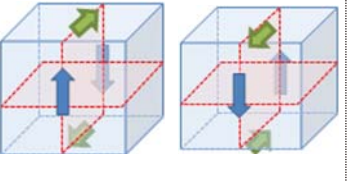
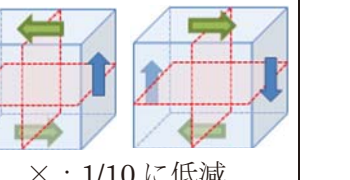
		タイプ-y z		
		x	y	z
ヤング 係数				
	○ : 低減なし	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	
せん断 弾性係 数				
	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	

表-1.4.6 破壊判定タイプ z x の剛性低下と方向別低減率

		タイプ-z x		
		x	y	z
ヤング 係数				
	× : 1/10 に低減	○ : 低減なし	× : 1/10 に低減	
せん断 弾性係 数				
	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	

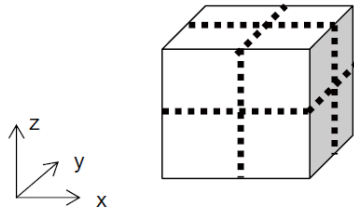


図-1.4.5 破壊判定タイプ (3方向ひび割れタイプ-xyz)

表-1.4.7 破壊判定タイプ別の剛性低下率 (3方向ひび割れ)

	タイプ-xyz		
	x	y	z
ヤング係数	$E_c/10$	$E_c/10$	$E_c/10$
せん断弾性係数	x-y	y-z	z-x
	$G/10$	$G/10$	$G/10$
ポアソン比	x-y	y-z	z-x
	ν	ν	ν

表-1.4.8 破壊判定タイプ x y z の剛性低下と方向別低減率

	タイプ-x y z		
	x	y	z
ヤング係数	<p>× : 1/10 に低減</p>	<p>× : 1/10 に低減</p>	<p>× : 1/10 に低減</p>
せん断弾性係数	<p>× : 1/10 に低減</p>	<p>× : 1/10 に低減</p>	<p>× : 1/10 に低減</p>

(3) 解析結果の例

図-1.4.6, 図-1.4.9 及び図-1.4.12 に輪荷重走行試験で破壊に至った後の床版下面及び断面のひび割れ状況を、図-1.4.7, 図-1.4.10 及び図-2.1.13 に解析における載荷解析ステップごとの要素の破壊状況を示す。なお、要素内に縦線「|」または横線「-」がある要素ではそれと直行する方向に要素が破壊したことを示す。また、「×」は水平方向の破壊を示す。さらに「+」は「|」と「-」の両方、「*」は全ての方向が破壊したことを示す。このように標記することで、移動載荷に伴うコンクリート各部の破壊を、損傷進行段階ごとに図示することが可能である。

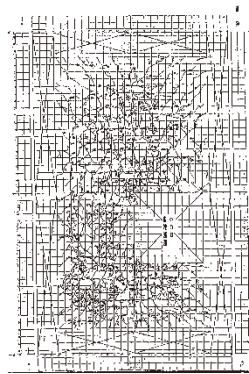


図-1.4.6 試験後のひび割れ状況 (床版下面)

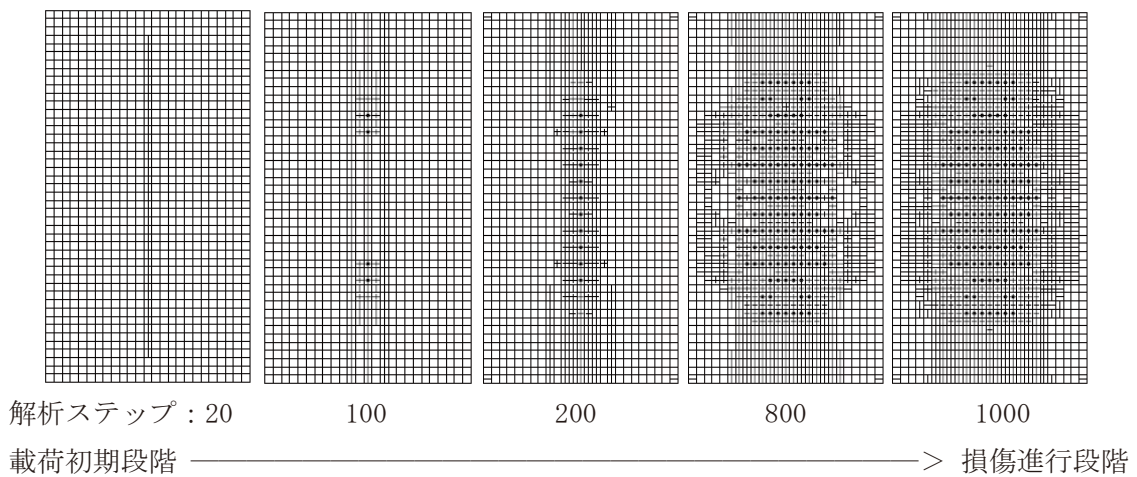


図-1.4.7 損傷進展 (床版下面)

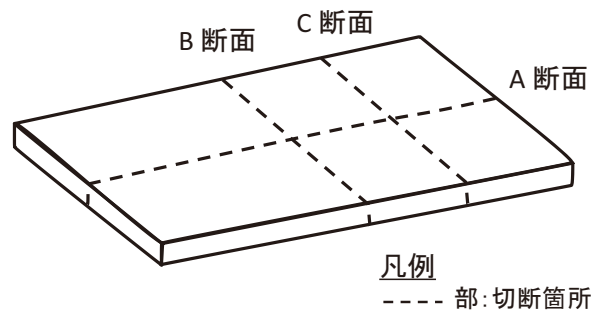


図-1.4.8 断面表示位置

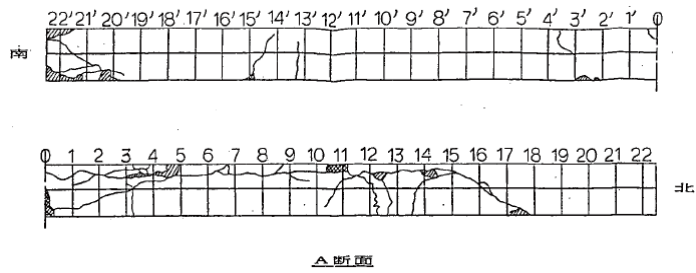


図-1.4.9 実験結果 (A断面)

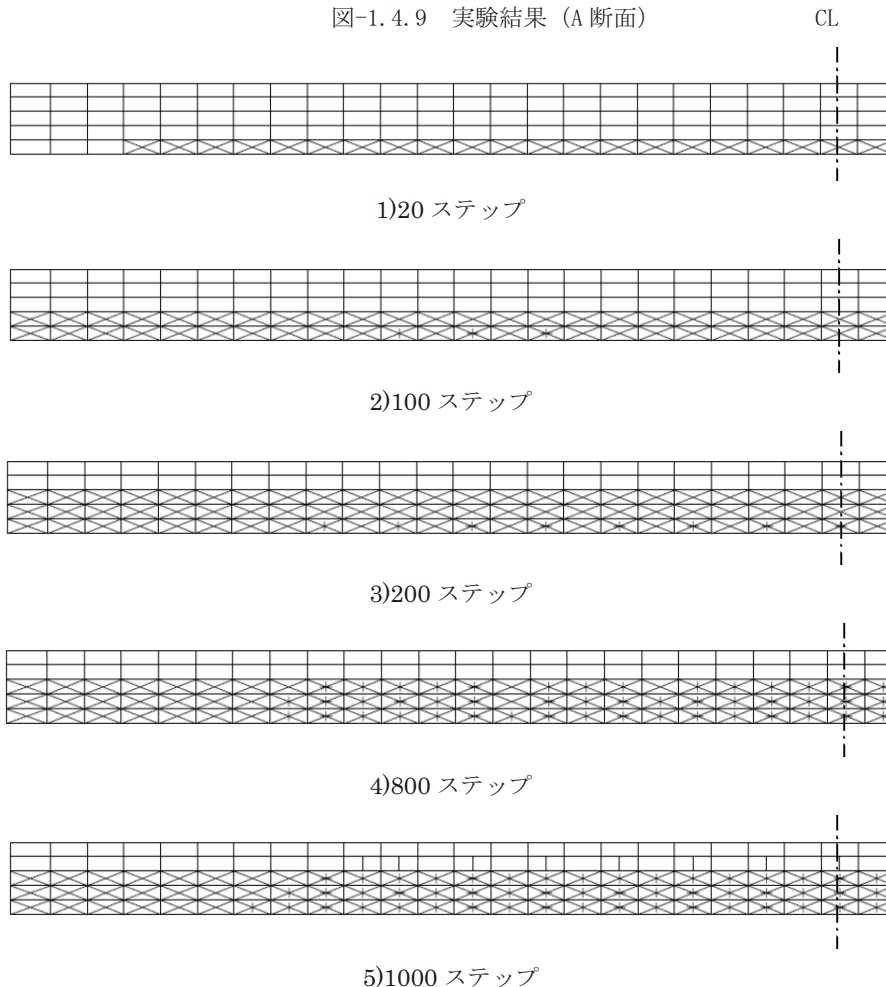


図-1.4.10 解析結果A断面 (3方向)

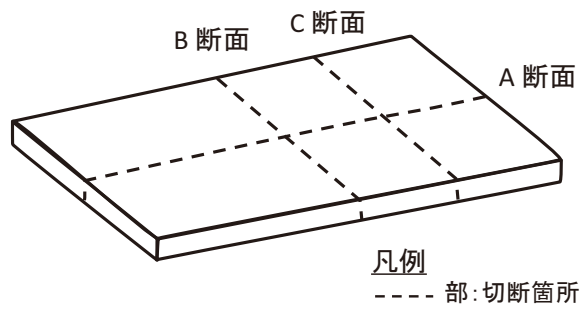


図-1.4.11 断面表示位置

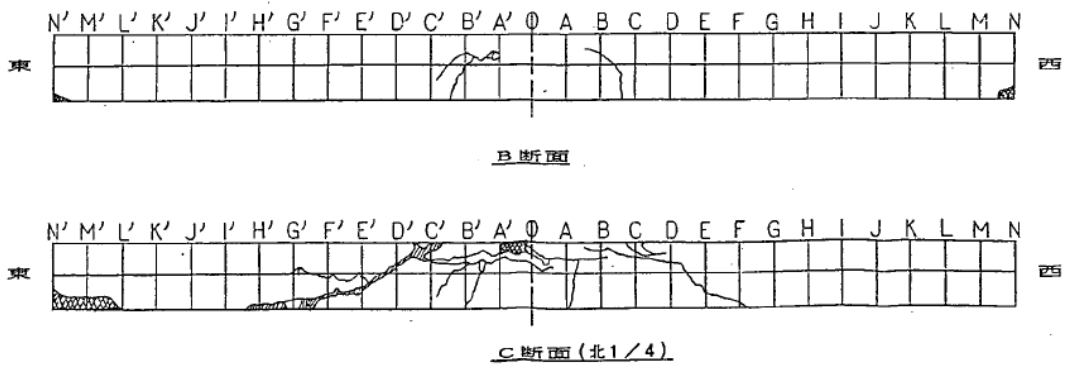


図-1.4.12 実験結果(B, C断面)

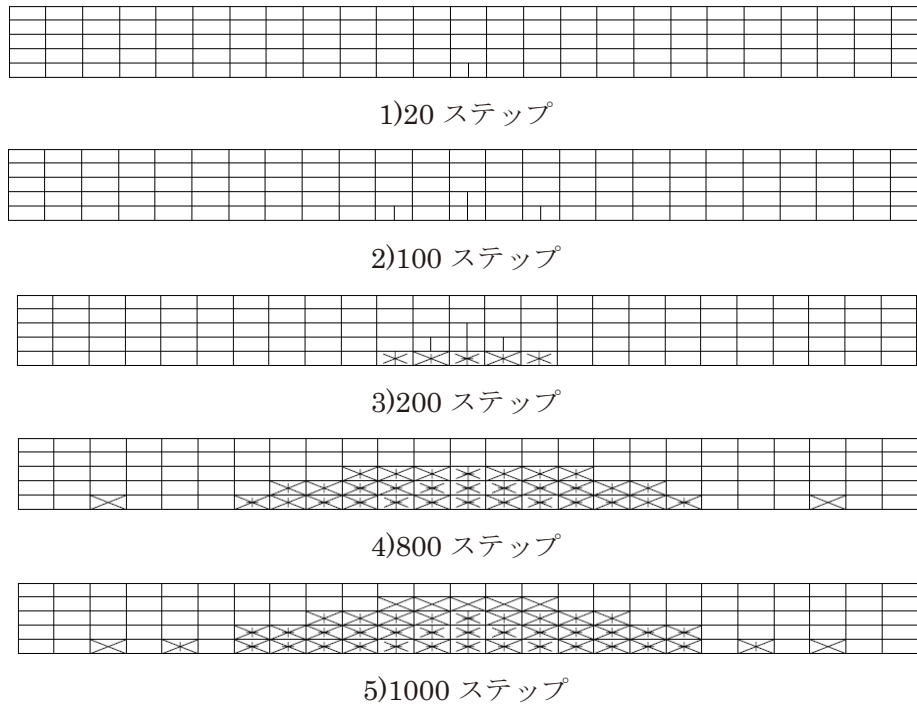


図-1.4.13 解析結果 B断面 (3方向)

1 章 参考文献

1. 1) 玉越隆史, 大久保雅憲, 市川明広, 武田達也: 橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料, 第 444 号, 2008.4.
1. 2) (社)土木学会鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委員会, 道路橋床版の要求性能と維持管理技術, 2008.6.
1. 3) 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, 大阪大学大学院博士論文, 昭和 59 年 11 月
1. 4) 藤山知加子, 商峰, 櫻井伸彰, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A Vol.66, No.1, 106-116, 2010.3.
1. 5) 藤山知加子, 櫻井信彰, 中山逸人, 前川宏一: 鋼コンクリート境界面特性が合成床版疲労破壊機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 2010.
1. 6) 国土技術政策総合研究所, 大阪大学大学院, 大阪工業大学, 九州工業大学, 日本橋梁建設協会: 道路橋床版の疲労耐久性に関する研究, 国交省国総研共同研究報告書, 第 472 号, 2008.8.
1. 7) コンクリート標準示方書(2012 年制定)[設計編:標準], 土木学会コンクリート委員会, 2012.3.