

資料2

コンクリート系床版の疲労解析ガイドライン（案）

目 次

1. 概要.....	資料 2.1
2. コンクリート系床版における疲労耐久性評価の基本事項	資料 2.2
2.1 適用の範囲	
2.2 基本方針	
2.3 用語の定義	
3. 輪荷重走行試験による性能評価.....	資料 2.5
3.1 輪荷重走行試験	
3.1.1 供試体	
3.1.2 境界条件	
3.1.3 荷重条件	
3.1.4 計測項目と試験結果の整理	
3.2 性能評価	
4. 疲労損傷解析による性能評価	資料 2.8
4.1 破壊特性の把握と破壊の定義	
4.2 疲労損傷解析	
4.2.1 構造モデル	
4.2.2 コンクリート要素の破壊のモデル化	
4.2.3 境界条件	
4.2.4 荷重条件	
4.2.5 解析結果の整理	
4.3 性能評価	

1. 概要

鉄筋コンクリート床版の損傷でこれまで大半を占めてきたのが自動車荷重の繰返通行による疲労損傷であり、この損傷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されてきた。しかし、コンクリートを主体とする床版の破壊メカニズムは、複雑であり設計計算による疲労耐久性の照査も困難であることから、現在鉄筋コンクリート床版の設計基準では、経験的に耐荷力を向上させ、構造細目を規定することにより、間接的に疲労耐久性が確保されている。また、鋼コンクリート合成床版など「新技術」の採用においては、設計計算による疲労耐久性の照査が困難であるという理由から、現行設計基準において規定は設けられておらず、現実的な確認手法として国土交通省で提案されている輪荷重走行試験機を用いた階段状荷重漸増載荷（以下「階段載荷」という。）により、破壊メカニズムを確認するとともに、疲労耐久性がある程度明らかになっている鉄筋コンクリート床版との相対的な比較により確認されている。

しかしながら、輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価は、新しい床版の形式や構造条件に対しては、原則としてその都度実験して確認することが必要となる。また、同条件下の試験結果の相対関係の評価としては有効である反面、試験設備の制約等から縮尺や支持条件などを実橋と完全に同条件にすることは困難な場合がほとんどであり、試験結果から実橋においてどの程度の疲労耐久性が見込めるかを精度よく推定することは一般的に困難である。

このような状況を踏まえ、多様な床版構造に対しても普遍的に適用できる解析的疲労耐久性評価手法の開発を行ったものである。

本ガイドライン（案）は、その成果として鉄筋コンクリート床版及び鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性を、道路橋示方書・同解説（（社）日本道路協会、平成 24 年）に基づいて設計された鉄筋コンクリート床版との相対比較により、数値解析を用いて間接的に確認する手法（以下「疲労解析」という。）を適用についてとりまとめたものである。

2. コンクリート系床版における疲労耐久性評価の基本事項

2.1 適用の範囲

(1) 本ガイドライン（案）は、鉄筋コンクリート床版及び鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性の評価に適用する。

(1) 本ガイドライン（案）は、道路橋示方書（平成 24 年）Ⅱ鋼橋編 9 章「床版」に基づき、その疲労耐久性を評価するための手引きとして適用する。

鋼コンクリート合成床版については、「設計ガイドライン（案）」「施工の手引き（案）」「施工管理要領（案）」（いずれも平成 17 年 8 月、国土交通省関東地方整備局道路部道路工事課）が公表されている。また、鋼コンクリート合成床版も含めた新工法の性能評価のガイドラインとして、国土技術政策総合研究所資料第 609 号「道路橋の技術評価手法に関する研究－新技術評価のガイドライン（案）－」（平成 22 年 9 月）が刊行されている。本ガイドライン（案）は、これら資料により設計し性能を確認した上で、疲労耐久性を評価する目的で適用される。

ここで、本ガイドライン（案）において鋼コンクリート合成床版とは、鋼板や形鋼等の鋼部材とコンクリートが一体となって荷重に抵抗するよう鋼板とコンクリートをずれ止めで結合したものや形鋼と型枠となる鋼板を接合したものにコンクリートを充てんし、合成構造として設計されたものとする。なお、鋼コンクリート合成床版における底鋼板、ずれ止め等の鋼材及びそれらの継手の疲労耐久性については、別途、部材試験等を実施し疲労耐久性を評価するものとし、本ガイドライン（案）では触れていない。

2.2 基本方針

(1) 鉄筋コンクリート床版及び鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性評価にあたっては、道路橋示方書などの適用基準による要求性能との関係を明確にしたうえで、それらを満足することを検証しなければならない。

(2) 本ガイドライン（案）では、鉄筋コンクリート床版及び鋼コンクリート合成床版の性能を推定し、道路橋示方書・同解説（(社)日本道路協会、平成 24 年）に基づいて設計された鉄筋コンクリート床版との相対比較により間接的に疲労耐久性を満足することを確認する方法を基本としている。

(3) 鋼コンクリート合成床版を開発する場合の疲労耐久性の評価は、3 章に示す輪荷重走行試験により破壊メカニズムを確認し、4 章に示す疲労解析により行う。

(1) 社会資本である道路橋の設計にあたっては、満足すべき要求性能が適用基準によって規定されている。したがって、技術の評価では、適用基準の求める要求性能が満足することを確認することとなる。道路橋示方書などの適用基準の求める性能を満足する状態は、照査する床版におけるどのような状態であるのかについては一概ではなく、性能照査に先だってそれぞれの技術や構造の特性に応じて個別に性能照査における評価の対象となる状態を設定する必要がある。また、照査する床版性能評価にあたっては、達成

されると考えられる性能と関連する技術基準の様々な規定内容およびそれが意図する達成すべき要求性能との相互の関係についてもれなく確認することが重要である。

(2) 現在、鉄筋コンクリート床版では、コンクリートを主体とする床版の破壊メカニズムは複雑であり、設計計算による疲労耐久性の照査も困難であることから、経験的に耐荷力の向上や構造細目により、間接的に疲労耐久性が確保されている。そこで、新たなコンクリート系床版の開発・採用にあたっては、本ガイドライン（案）に従って疲労解析を実施し、道路橋示方書・同解説（(社)日本道路協会、平成 24 年）に基づき疲労耐久性が確保されている鉄筋コンクリート床版を基準床版とし、それらの結果を比較することにより、疲労耐久性を評価する方法を基本としている。

(3) 新たなコンクリート系床版の工法を開発する場合、疲労耐久性の評価は輪荷重走行試験により行う。さらに、疲労解析によっても検証を行い、疲労寿命に基づいた評価を行うとともに、輪荷重走行試験での確認が難しい载荷途中における内部の破壊状況を推定する等して、設計時、施工時及び維持管理時に留意すべき点を把握する。

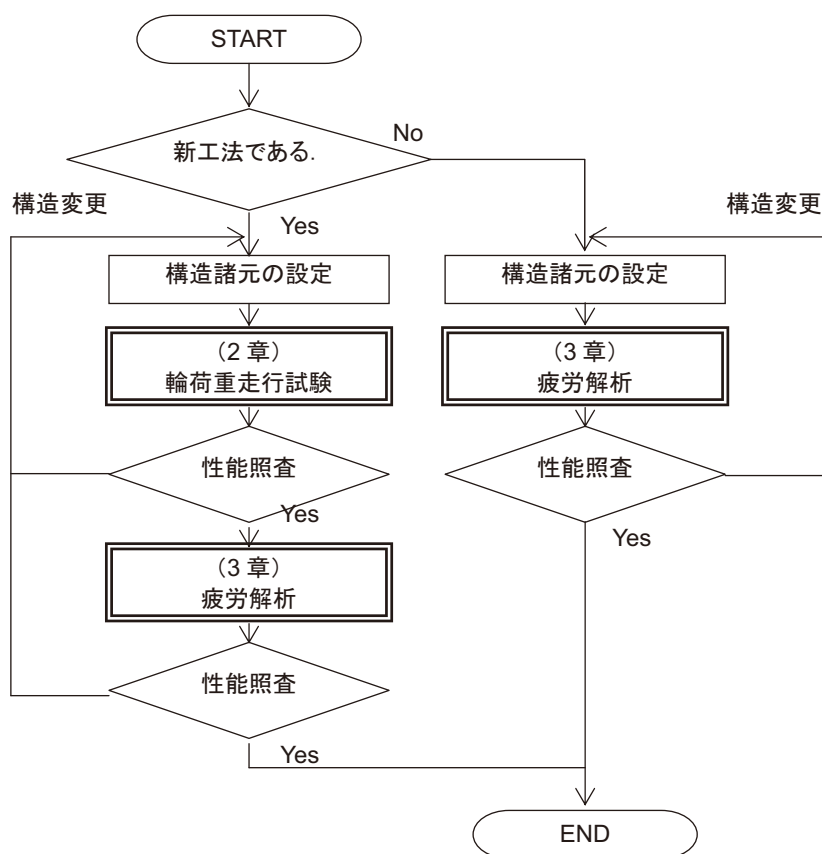


図-2.1 疲労耐久性の評価の概略フロー

2.3 用語の定義

(1) 床版の破壊	本ガイドラインにおける床版の破壊とは、以下に示す定義とする。
(2) 基準床版	道路橋示方書（平成 24 年）に基づいて設計された鉄筋コンクリート床版。
(3) 走行回数	輪荷重走行試験において、1 往復を 2 回とする。 解析において、荷重モデルが床版の端から端まで 1 回繰り返した時点を 1 回とする。（輪荷重走行試験の 1 回に相当。）
(5) 解析ステップ	解析において、要素が破壊するとみなせるまでの一連の解析とする。
(6) 載荷ステップ	解析における荷重の移動数とする。
(7) 疲労度	1 解析ステップで生じる主引張応力と引張ひずみとの積の変動分

3 輪荷重走行試験による性能評価

3.1 輪荷重走行試験

国土技術政策総合研究所資料第 28 号「道路橋床版の疲労耐久性に関する試験」と同等の試験により確認する。

輪荷重走行試験による性能評価では、上記試験で行われた道路橋示方書（平成 8 年）に基づいて設計・製作された鉄筋コンクリート床版の試験結果との比較による。そのため、評価床版の輪荷重走行試験の試験条件は、これと同等とみなせる試験により確認する。

表-3.1 比較基準とする試験ケース

試験ケース	備考
RC8n1	圧縮鉄筋量を鉄筋の配置間隔調整したケース

※ 国総研資料第 28 号 p.7 より

3.1.1 供試体

- (1) 実物大とする。
- (2) 形状寸法は、床版支間方向が 2,800mm, 輪荷重走行方向が 4,500mm の矩形とする。
- (3) 内部鉄筋を端部で定着する等して、実橋における挙動を再現させる。
- (4) 使用材料の材料試験により、材料特性を把握する。

- (1) 実物大とすることにより、実構造物における疲労状況を再現する。
- (2) 形状寸法は、床版支間方向が 2,800mm, 輪荷重走行方向が 4,500mm の矩形とする。
- (3) 供試体は、実構造物から(2)で規定される平面形状寸法で取り出した部分となるため、その境界条件を実構造と合わせるために、内部鉄筋を端部で定着する等、適切な処理を施す。
- (4) 試験結果を正確に評価するために、コンクリートや鋼材等の材料特性は、実際に使用材料の材料試験の結果より把握する。

3.1.2 境界条件

- (1) 床版支間は 2,500mm とする。
- (2) 床版支間方向は単純支持、輪荷重走行方向は弾性梁を用いて弾性支持とする。

- (1) 基準床版と統一する。
- (2) 輪荷重走行方向について、同方向の支間長の影響が無いとみなせるよう、適当な剛性を有する H 型鋼を横梁に用いる等して弾性支持する。ここで、弾性梁の剛性は、床版が輪荷重走行方向に無限に長いとみなせるように設定する。

3.1.3 荷重条件

- (1) 輪荷重は、幅 500mm の鋼製の車輪により、床版上に 500mm×200mm の載荷ブロックを一行に配置した軌道を介して、床版中央にて 3,000mm の範囲で走行させる。
- (2) 荷重強度は 157kN 一定載荷又は階段載荷とする。

- (1) 基準床版では、載荷ブロックは図-3.1 に示すブロックタイプを一行に配置した

3.1.4 計測項目と試験結果の整理

- (1) 破壊に至るまでの載荷荷重と走行回数との関係。
- (2) 各荷重ステップでの (a) 供試体上面及び (b) 供試体下面のひび割れ図。
- (3) 試験終了時の (a) 供試体上面、(b) 供試体下面及び (c) 供試体中央における、床版支間方向断面ひび割れ図及びその他の破壊状態。
- (4) (a) 除荷時及び (b) 載荷時における床版中央たわみと走行回数との関係。
- (5) 載荷時における (a) 主鉄筋及び (b) 配力鉄筋のひずみと走行回数との関係。その他、底鋼板や合成用の内部鋼材についても同様。
- (6) (a) 主鉄筋断面及び (b) 配力鉄筋断面の中立軸高さ と走行回数との関係。

- (1) 疲労耐久性、耐荷性の評価指標
- (2) 外部のひび割れ性状、破壊特性の把握
- (3) 試験終了時の床版内部のひび割れ性状、鋼材の剥離、破壊特性の推定根拠
- (4) 床版中央たわみの進展、状態変化点の把握
- (5) 鋼材のひずみの進展、状態変化点の把握
- (6) 中立軸高さの変化、状態変化点の把握

3.2 性能評価

- (1) 最大荷重時で未破壊であることを確認する。
- (2) 最大荷重に至るまで、急激な状態の変化がないことを確認する。
- (3) 最大荷重時に、コンクリートの表面において、ひび割れがほとんど発生しないことを確認する。
- (4) 構造物の安全性等、床版の要求性能の前提となる状態が保持されていることを確認する。

国土技術政策総合研究所資料第 28 号「道路橋床版の疲労耐久性に関する試験」によると、基準床版の試験結果は以下のとおりであったことから、これと同等以上の疲労耐久性を確保するという観点から各項目を規定した。

- (a) 階段載荷により最大荷重時（載荷荷重 392kN、走行回数 52 万回）でも破壊に至らなかったケースは 6 ケースの内 3 ケースで、今回対象とした RC8n1 の場合、その破

壊時走行回数は 489,555 回（破壊時荷重 392kN）であった。破壊した 3 ケースはいずれも、供試体上面に設置した载荷ブロック端部から床版下面に広がる押し抜きせん断により破壊に至った。

- (b) 中央におけるたわみは、载荷初期に急増した後、漸増し、破壊の直前において再度急増した。
 - (c) 鉄筋のひずみは、破壊直前においてもほとんど降伏ひずみに達しなかった。
 - (d) 鉄筋ひずみから求めた中立軸高さは、主鉄筋断面において载荷初期に急減したものの、その後の変動は微小であり、破壊の直前においても急変しなかった。
- (1) 上記結果(a)に基づき、2.2.3 で規定する最大荷重時で破壊に至らないことを確認する。
 - (2) コンクリートの押し抜きせん断や鉄筋の降伏等は、コンクリート系床版の安全性や耐久性を低下させる要因となり得る。そのため、ここでは、上記結果(a)、(b)及び(c)も踏まえ、最大荷重に至るまでの間、2.2.4 で規定する各観察及び計測結果に基づき、それらが急激に変状しないことを確認する。
 - (3) 上記結果(d)に基づき、最大荷重時に至るまでの間、コンクリートの表面において、ひび割れがほとんど発生しないことを確認する。
 - (4) 鋼材とコンクリートとの剥離等、最大荷重時に至るまでの間、床版の要求性能の前提となる状態が保持されていることを確認する。

4. 疲労損傷解析による性能評価

4.1 破壊特性の把握と破壊の定義

- (1) 疲労解析を実施する前に、対象とする床版工法について、その標準的な適用条件を想定した輪荷重走行試験や部材の静的載荷試験等を実施することとする。
- (2) 疲労解析では、4.2 に規定する標準的なモデル化手法に限らず、対象とする床版工法固有の破壊特性を再現できるよう、適切に改良することとする。

- (1) 本章で規定する疲労損傷解析による耐久性の評価法は、各床版工法で着目すべき疲労損傷状態に至るまでの疲労寿命と、疲労耐久性が明らかになっている鉄筋コンクリート床版の疲労寿命を比較することにより行われる。そのため、次節以降で規定する疲労損傷解析を実施する前に、対象とする床版工法の基本的な損傷特性及び破壊と見なせる状態について把握するために、支間長や床版厚、支点上の支持条件、施工順序等の標準的な適用条件を想定した輪荷重走行試験や部材の静的載荷試験を実施し、コンクリート部のひび割れやコンクリートと底鋼板の剥離等の破壊の発生及び進展の状況を確認する必要がある。また、確認された破壊の状態から、疲労耐久性の判定に用いる破壊の定義を設定する必要がある。

鉄筋コンクリート床版では、次に示す定義Aの変状を、試験結果の比較に用いる照査値として定義する。また、耐荷力が著しく低下している恐れのある床版等においては定義Cについても併せて照査値とする。

定義A：上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した時点。

定義C：第4層にz方向（水平方向）の剛性低下要素が生じた時点。

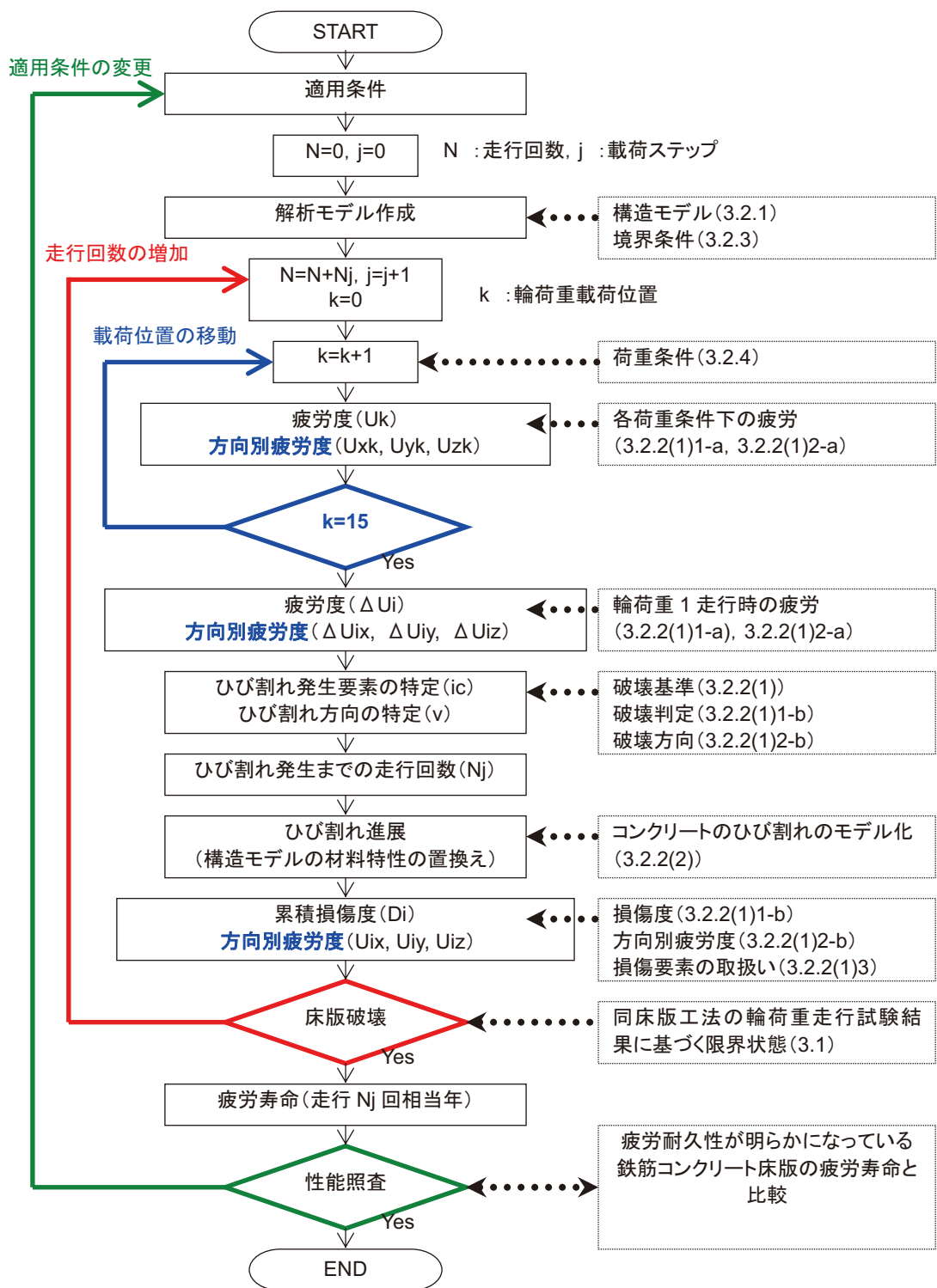
- (2) 新たな床版工法の場合、標準的なモデル化手法を基本としつつも、上記の各載荷試験により確認された破壊特性を参考に、個々の床版の破壊特性を再現できるよう、適切に改良する必要がある。

合成床版の破壊の定義は、対象とする床版工法固有の破壊特性を踏まえて設定することを前提とし、圧縮力を分担する中立軸より上方の床版上面側に水平ひび割れが橋軸方向に300mm以上連続した時点を照査値とする。

4.2 疲労損傷解析

4.2.1 構造モデル

- (1) 弾性 FE モデルとする。
- (2) 形状寸法は、床版支間方向が 2,800mm (張出し長 150+床版支間 2,500+張出し長 150)、輪荷重走行方向が 4,500mm、厚さは実物大の矩形とする。
- (3) 材料特性には、道路橋示方書に規定された設計値を適用する。
- (4) コンクリートのモデル化は以下を基本とする。ただし、鋼材配置や床版厚さによっては、事前の輪荷重走行試験により確認された破壊特性を再現できるよう、適切なモデル化を行う。
 - 1) 弾性 6 面ソリッド要素を用いる。
 - 2) 要素寸法は、輪荷重走行方向及び床版支間方向が 100mm 程度、高さは床版厚さの 1/5 程度とする。ただし、鋼材配置や床版厚さによっては、事前の輪荷重走行試験により確認された破壊特性を再現できるよう、適切な寸法とする。
- (5) 鋼材は引張側・圧縮側対称の弾完全塑性体とする。
 - 1) 鉄筋と周囲のコンクリートとは完全付着とする。
 - 2) 鋼板は弾性シェル要素を用いてモデル化する。ここで、鋼板と周囲のコンクリートとの付着について、底鋼板では付着はないものとし、その他の鋼板リブ等では完全付着とする。
 - 3) スタッドは弾性棒要素を用いてモデル化し、スタッドの曲げ剛性及びせん断剛性を考慮する。なお、鋼板との溶接部は完全結合とし、周囲のコンクリートとの付着はすべりや剥離のない完全付着とする。
 - 4) 鋼管は弾性シェル要素を用いてモデル化し、周囲のコンクリートとの付着はすべりや剥離のない完全付着とする。



付図-4.1 疲労損傷解析による性能評価の全体概要

- (1) 基準床版と統一する。
- (2) 基準床版と統一する。

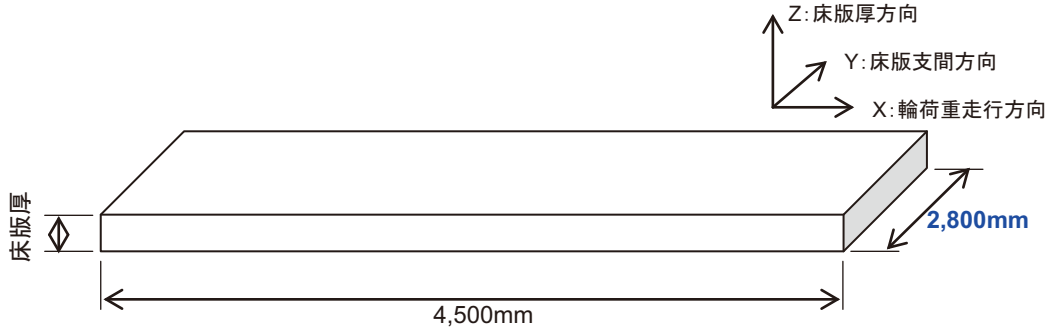


図-4.2 構造モデルの形状寸法

- (3) 道路橋示方書に準じる。
- (4) コンクリート要素のモデル化。

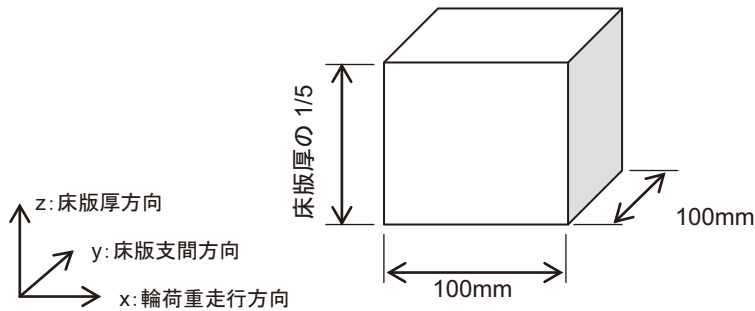


図-4.3 コンクリート要素のモデル化

- (5) 鋼材のモデル化は、繰返荷重による周囲のコンクリートのひび割れ、破壊等の現象を模擬できるよう、それぞれ適切な要素を用いて行うこととした。

ここで、2)鋼板のモデル化において、底鋼板とコンクリートとの間で付着切れを考慮するとしたのは、底鋼板を有する鋼コンクリート合成床版では、4.1 で定義する破壊状態に至るまでにすべりや剥離を許容するのが一般的であるためである。

ずれ止めや補剛材の形鋼の形状を再現する必要性から細幅の要素が含まれていて、要素の大きさが周囲の要素に比べて大きく変化する場合は、荷重位置と細幅要素との位置関係で、局部応力が卓越しすぎる場合があるので、要素分割と荷重位置の影響を確認しておくのが良い。

4.2.2 コンクリート要素の破壊のモデル化

- (1) コンクリート要素の破壊
- 1) コンクリートの破壊は、疲労度に基づく線形累積被害則に従うものとする。ここで、疲労度に基づく疲労被害則は、疲労度 ΔU と走行回数 N との関係として定義する。なお、繰返しの影響がない静的な破壊の判定基準 (y 切片) は使用するコンクリートの引張強度から算出し、コンクリート疲労被害則は 8 乗の対数則に従うものとする。
 - 2) 破壊によって剛性が低下する方向の判定は、方向別の応力変動とひずみ変動との積の累積値に基づいて行うこととし、これが最大の方向に発生するものとする。
 - 3) 破壊したと判定された要素では、一旦、疲労被害の蓄積を解消し、その後、剛性が低下していない方向についてのみ、改めて疲労被害を累積しなおすものとする。
- (2) コンクリート要素の破壊による剛性の低下
- 1) コンクリートの破壊による剛性の低下は、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。
 - 2) 鋼コンクリート合成床版における底鋼板上のコンクリート要素については、当初より全方向のヤング係数 E とせん断弾性係数 G を 1/10 に低減することとする。

(1) コンクリートの疲労破壊

- 1) コンクリートの疲労破壊は、疲労度に基づく線形累積被害則によるものとする。ここで、疲労度に基づく疲労被害則は、疲労度 ΔU と走行回数 N との関係として定義する。

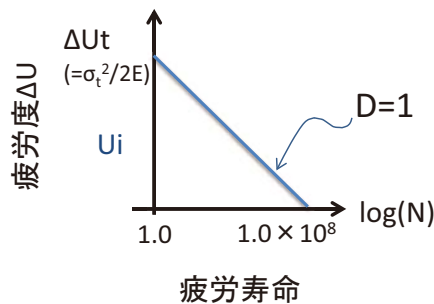


図-4.4 コンクリートの疲労被害則 (U-N 線図)

なお、輪荷重 1 回走行の破壊基準 (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。

$$U_i = \frac{1}{2} \sigma_i \varepsilon_i = \frac{1}{2E} \sigma_i^2 \quad (4.2.2.1)$$

ここに、 U_i : 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_i, ε_i : 破壊時の応力 (N/mm²), ひずみ

また、コンクリートの被害則は、道路橋示方書・同解説 ((社)日本道路協会, 平成 24 年) に基づいて設計された鉄筋コンクリート床版 (床版支間 3.0m, 連続版) を対象とした、重交通路線の交通実態調査に基づく供用 100 年の軸数を算出した結果 (157kN 換算) に基づき 8 乗の対数則に従うことで、現行基準で設計された床版が疲労耐久性を損なう回数を安全側に評価できる。

1-a) 各コンクリート要素の疲労度の算出方法は以下のとおり。

1-a-1) 4.2.4 で規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。

$$U_{ik} = \frac{1}{2}\sigma_{i11k}\varepsilon_{i11k} + \frac{1}{2}\sigma_{i22k}\varepsilon_{i22k} + \frac{1}{2}\sigma_{i33k}\varepsilon_{i33k} \quad (4.2.2.3)$$

ただし、

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

ここに、 U_{ik} : 荷重 k で要素 i に生じるひずみ疲労度 (N/mm²)
 $\sigma_{i11k}, \sigma_{i22k}, \sigma_{i33k}$: 荷重 k で要素 i に生じる主応力方向の応力 (N/mm²)
 $\varepsilon_{i11k}, \varepsilon_{i22k}, \varepsilon_{i33k}$: 荷重 k で要素 i に生じる主応力方向のひずみ

ここに、

$$\begin{cases} \varepsilon_{i11k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i11k} - \nu(\sigma_{i22k} + \sigma_{i33k})) \\ \varepsilon_{i22k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i22k} - \nu(\sigma_{i33k} + \sigma_{i11k})) \\ \varepsilon_{i33k} = \frac{1}{E}(\sigma_{i33k} - \nu(\sigma_{i11k} + \sigma_{i22k})) \end{cases}$$

k : 輪荷重モデルの載荷位置

1-a-2) 各コンクリート要素について、(4.2.2.3) 式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 ($k=1,15$) の疲労度 ΔU_{ij} を算出する。

$$\Delta U_{ij} = Max(U_{ij}) - Min(U_{ij}) \quad (4.2.2.4)$$

ここに、 ΔU_{ij} : 輪荷重 1 回走行に対する方向別疲労度 (N/mm²)
 $Max(U_{ij}), Min(U_{ij})$: 輪荷重 1 回走行時の U_{ik} の最大値, 最小値 (N/mm²)
 j : 解析ステップ数

1-b) 各コンクリート要素の残存寿命の算出方法は以下のとおり。

1-b-1) 荷重ステップ^{*} j において、要素 i の残存寿命 n_{0i} を算出する。ここで、これまでの要素 i の累積損傷度は以下で表される。

$$D_{ij-1} = \sum_{m=1}^{j-1} \frac{n_{im}}{N_{im}} \quad (4.2.2.5)$$

ここに、 D_{ij-1} : 要素 i のこれまでの累積損傷度
 N_{im} : コンクリートの被害則 (U-N 関係) に基づく ΔU_{im} に対する疲労寿命 (回)。ただし、 ΔU_{im} は荷重ステップ m で生じる疲労度 (N/mm²)
 n_{im} : 荷重ステップ m の走行回数 (回)
 $j-1$: これまでの荷重ステップ数 (ステップ)

※ これまでの走行回数 N_{j-1} と荷重ステップ数 $j-1$ との関係は以下のとおり。

$$N_{j-1} = \sum_{m=1}^{j-1} n_m \quad (4.2.2.6)$$

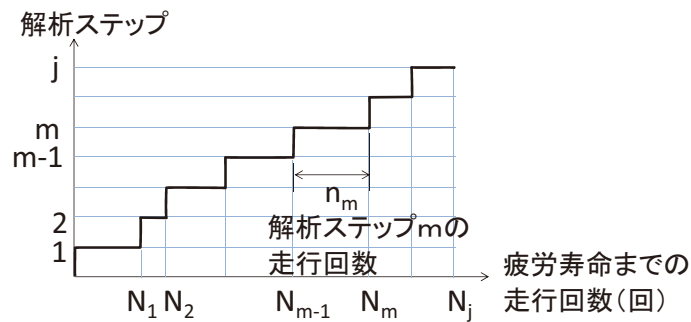


図-4.5 走行回数と荷重ステップ数の関係

1-b-2) 要素 i の現時点での残存寿命 n_{0ij} は次式により求まる。

$$n_{0ij} = (1.0 - D_{ij-1})N_{ij} \quad (4.2.2.7)$$

ここに、 n_{0ij} : 要素 i が破壊に至るまでに要する残りの走行回数、すなわち、残存寿命 (回)
 D_{ij-1} : 要素 i のこれまでの累積損傷度
 N_{ij} : コンクリートの被害則 (U-N 関係) に基づく ΔU_{ij} に対する疲労寿命 (回)
 j : 検討している荷重ステップ数 (ステップ)

1-c) 床版全体での新たな破壊の特定方法は以下のとおり。

1-c-1) 全てのコンクリート要素の残存寿命 n_{0ij} を算出した後、次の破壊は残存寿命が最短の要素で発生するとし、本載荷ステップの走行回数 n_j を求める。

$$n_j = \min(n_{0ij}) \quad (4.2.2.8)$$

ここに、 n_j : 本載荷ステップの走行回数 (回)
 n_{0ij} : 載荷ステップ j における、要素 i の残存寿命 (回)
 j : 検討している載荷ステップ数 (ステップ)

1-c-2) 載荷ステップ j 終了時の要素 i の累積損傷度は次式により求まる。

$$D_{ij} = \sum_{m=1}^j \frac{n_{im}}{N_{im}} \quad (4.2.2.9)$$

ここに、 D_{ij} : 要素 i の累積損傷度
 N_{im} : コンクリートの被害則 (U-N 関係) に基づく ΔU_{im} に対する疲労寿命 (回)。ただし、 ΔU_{im} は載荷ステップ m で生じる疲労度 (N/mm²)
 n_{im} : 載荷ステップ m の走行回数 (回)
 j : 検討している載荷ステップ数 (ステップ)

1-c-3) ここで、破壊すると判定された要素 ic では、累積疲労度が解放されるとし、載荷ステップ j 終了時の要素 i の累積損傷度は 0 とする。

$$D_{ic|j} = 0 \quad (4.2.2.10)$$

ここに、 $D_{ic|j}$: 破壊要素 ic の累積損傷度 (=0)
 j : 検討している載荷ステップ数 (ステップ)

2) 破壊による剛性低下方向の判定

破壊による剛性低下方向の判定は、輪荷重 1 走行時に生じる各方向の応力とひずみとの積の変動分 (以下、「方向別疲労度」という。) を走行回数に応じて累積した値 (以下、「方向別疲労度」という。) に基づいて行う。

2-a) 方向別疲労度の算出方法は以下のとおり。

2-a-1) 4.2.4 で規定する輪荷重モデルの載荷位置 k に対し、要素 i に生じる方向別疲労度を次式により定義する。

$$U_{ix|k} \equiv \frac{1}{2} \sigma_{ix|k} \varepsilon_{ix|k}, \quad U_{iy|k} \equiv \frac{1}{2} \sigma_{iy|k} \varepsilon_{iy|k}, \quad U_{iz|k} \equiv \frac{1}{2} \sigma_{iz|k} \varepsilon_{iz|k} \quad (4.2.2.11)$$

ここに、 $U_{ix|k}$, $U_{iy|k}$, $U_{iz|k}$: 荷重 k , 要素 i に対する各方向の方向別疲労度 (N/mm²)
 $\sigma_{ix|k}$, $\sigma_{iy|k}$, $\sigma_{iz|k}$: 荷重 k で要素 i に生じる各方向の応力 (N/mm²)
 $\varepsilon_{ix|k}$, $\varepsilon_{iy|k}$, $\varepsilon_{iz|k}$: 荷重 k で要素 i に生じる各方向のひずみ
 k : 4.2.4 で規定する輪荷重モデルの載荷位置
 x, y, z : 要素 i の要素内座標系

2-a-2) (4.2.2.11) 式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、それらの差をとることにより、輪荷重 1 回走行時 ($k=1,15$) の方向別疲労度を算出する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{ix|j} &= \text{Max}(U_{ix|j}) - \text{Min}(U_{ix|j}) \\ \Delta U_{iy|j} &= \text{Max}(U_{iy|j}) - \text{Min}(U_{iy|j}) \\ \Delta U_{iz|j} &= \text{Max}(U_{iz|j}) - \text{Min}(U_{iz|j}) \end{aligned} \right\} (4.2.2.12)$$

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 : 検討している載荷ステップ数 (ステップ)

2-b) 方向別疲労度の算出方法は以下のとおり。

2-b-1) 載荷ステップ j 終了時の要素 i の方向別疲労度は次式により定義する。

$$\left. \begin{aligned} U_{ix|j} &= U_{ix|j-1} + n_j \Delta U_{ix} \\ U_{iy|j} &= U_{iy|j-1} + n_j \Delta U_{iy} \\ U_{iz|j} &= U_{iz|j-1} + n_j \Delta U_{iz} \end{aligned} \right\} (4.2.2.13)$$

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

2-b-2) 全てのコンクリート要素について方向別疲労度を算出した後、(4.2.2.13) で求めた方向別疲労度が最大の方向に破壊すると判定する。

3) 破壊したコンクリート要素の疲労被害の累積

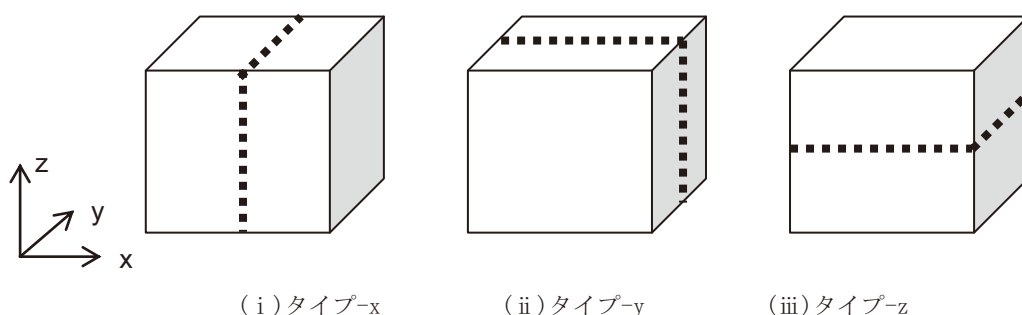
破壊すると判定された要素については、それまでの累積疲労度及び方向別疲労度を一旦解除し、その後の輪荷重に対しては、あらたに累積する。

ここで、あらたに累積する際、後述のとおりヤング率 E を低減させた方向については疲労度及び方向別疲労度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、 FE 要素に相当する領域の変形はき裂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。

(2) コンクリート要素の破壊による剛性の低下

1) コンクリートが繰返し荷重により疲労すると、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、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、以下に示す 7 タイプに区別してモデル化することとした。

1)-1 1方向破壊のモデル化



(i)タイプ-x (ii)タイプ-y (iii)タイプ-z

図-4.6 破壊のモデル化 (1方向破壊)

表-4.1 破壊のモデル化 (1方向破壊)

	タイプ-x			タイプ-y			タイプ-z		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
ヤング係数	$E_c/10$	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-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		
		x	y	z
ヤング 係数				
		× : 1/10 に低減	○ : 低減なし	○ : 低減なし
せん断 弾性係数				
		× : 1/10 に低減	○ : 低減なし	× : 1/10 に低減
ポアソン比		x-y	y-z	z-x
		一定		

1)-2 2方向破壊のモデル化

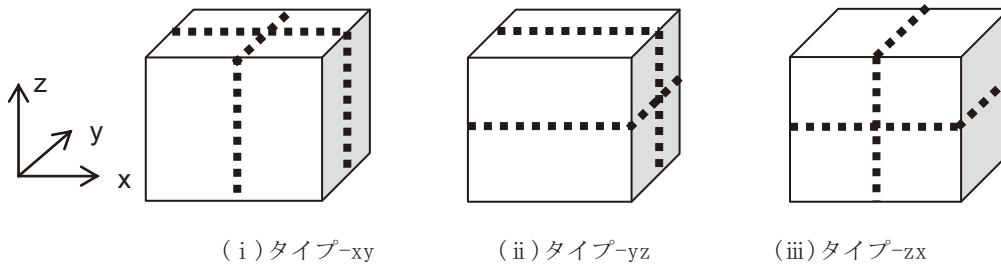


図-4.7 破壊のモデル化 (1方向破壊)

表-4.3 破壊のモデル化 (1方向破壊)

	(i)タイプ-xy			(ii)タイプ-yz			(iii)タイプ-zx		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
E	1/10	1/10	1	1	1/10	1/10	1/10	1	1/10
G	xy	yz	zx	xy	yz	zx	xy	yz	zx
	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
ν	xy	yz	zx	xy	yz	zx	xy	yz	zx
	一定(低減せず)								

表-4.4 破壊判定タイプ x y の剛性低下と方向別低減率

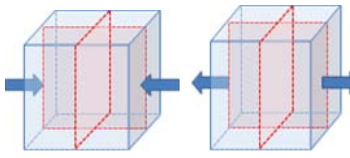
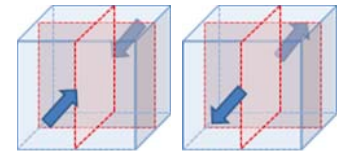
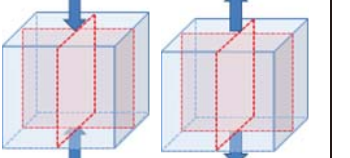
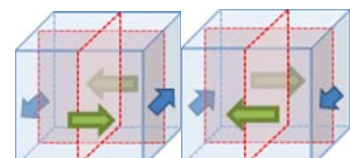
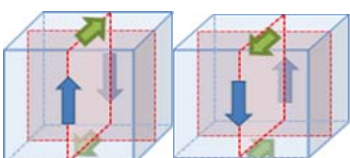
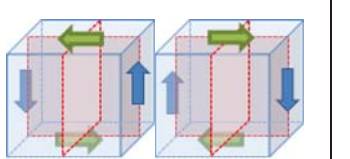
		タイプ-x y		
		x	y	z
ヤング 係数				
		× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	○ : 低減なし
せん断弾 性係数				
		× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減

表-4.5 破壊判定タイプ y z の剛性低下と方向別低減率

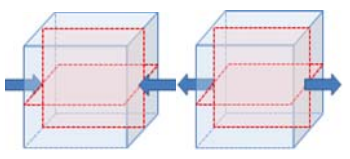
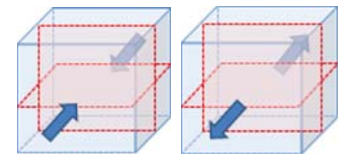
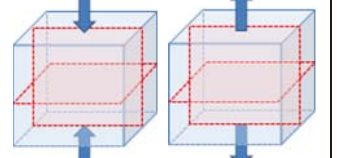
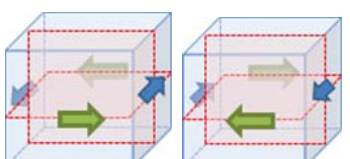
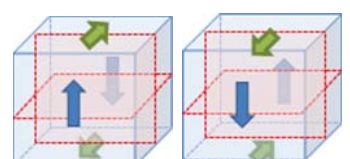
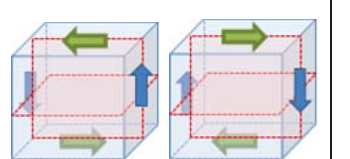
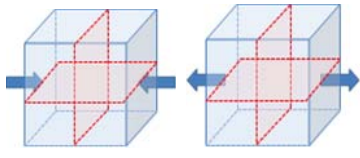
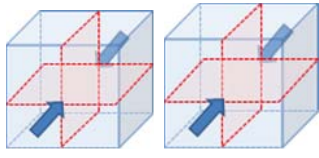
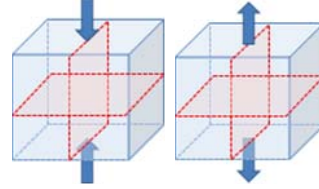
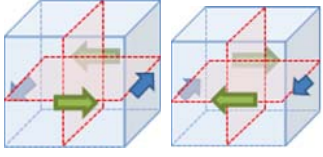
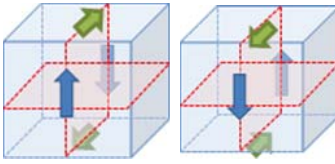
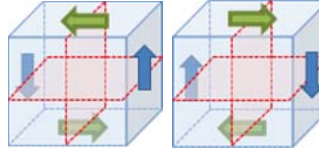
		タイプ-y z		
		x	y	z
ヤング 係数				
		○ : 低減なし	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減
せん断弾 性係数				
		× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減	× : 1/10 に低減

表-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		 <p>× : 1/10 に低減</p>	 <p>○ : 低減なし</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>

1)-3 3方向破壊のモデル化

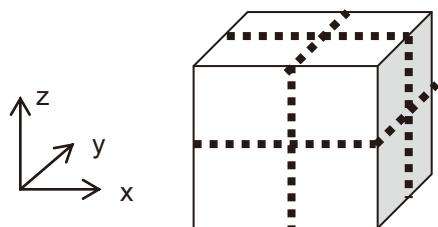


図-4.8 破壊のモデル化 (破壊タイプ-xyz)

表-4.7 破壊のモデル化 (3方向破壊)

(i)タイプ-xyz			
E	x	y	z
	1/10	1/10	1/10
G	xy	yz	zx
	1/10	1/10	1/10
ν	xy	yz	zx
	一定(低減せず)		

表-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		 × : 1/10 に低減	 × : 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

2) 鋼コンクリート合成床版における底鋼板上のコンクリート要素では、付着切れをモデル化するために、全方向のヤング係数とせん断弾性係数を 1/10 に低減することとした。

4.2.3 境界条件

- (1) 床版支間方向の支持条件は、鉛直(z)方向の変位のみを固定するピン支持を基本とする。
- (2) 橋軸端部では、輪荷重走行試験で設置される弾性ばりをモデル化し、弾性支持とする。

- (1) 基準床版と統一する。

表-4.9 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 (隅角部以外)	Mov.	Mov.	Fix.	Mov.	Mov.	Mov.
隅角部	下図の通り			Mov.	Mov.	Mov.

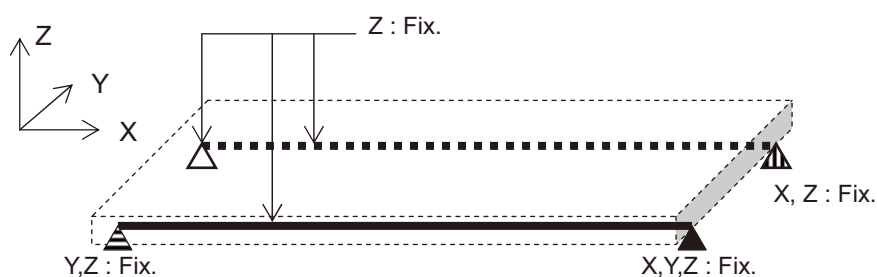


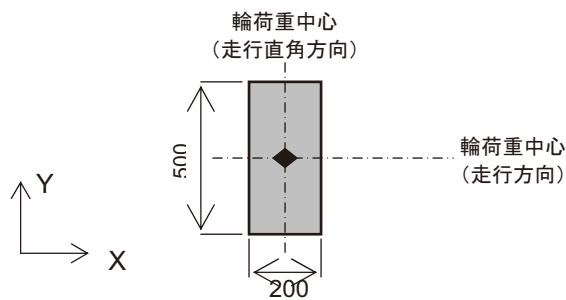
図-4.9 床版支間方向の支持条件 (構造モデルの最下層の節点)

- (2) 基準床版と統一する。

4.2.4 荷重条件

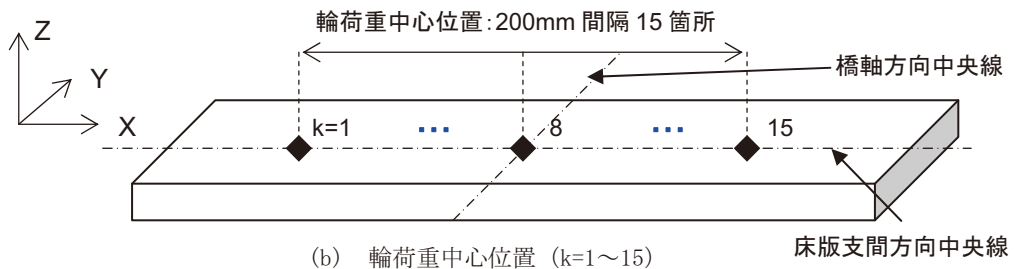
- (1) 載荷荷重は輪荷重の走行を模擬する。輪荷重の接地範囲を幅 500mm, 長さ 200mm の矩形とし, この範囲で等分布させる。
- (2) 荷重移動範囲は、輪荷重の走行を静的荷重の順次載荷で模擬することとし, 床版支間中央線上で, 床版中央より, 橋軸方向±1500mm の輪荷重走行範囲において, 200mm 間隔 15 箇所を順次載荷する。
- (3) 荷重強度は 157kN 一定載荷及び階段載荷とする。

- (1) 基準床版と統一する。詳細は下図のとおり。



(a) 等分布荷重の分布範囲 (車輪の接地範囲)

- (2) 基準床版と統一する。詳細は下図のとおり。



(b) 輪荷重中心位置 (k=1~15)

図-4.10 荷重条件

4.2.5 解析結果の整理

解析の結果は次の観点で整理する。

- 1) たわみの最大値とたわみ分布（輪荷重走行試験を実施している場合は、解析値と実験値を比較）
- 2) 解析におけるたわみの最大値とたわみ分布（輪荷重走行試験を実施している場合は、解析値と実験値を比較）
- 3) 解析における走行回数ごとの剛性低下要素の分布
- 4) 内部鋼材とひび割れの進展位置との関係

4.3 性能評価

(1) 現行基準（道路橋示方書，平成 24 年 3 月）で設計された床版が目標とする設計供用期間の丁度 100 年程度の耐久性を有しているものと仮定し、これと対象とする床版が設計で仮定する抵抗断面とは異なる状態に変化する限界の時点との相対関係により十分な期間を有していること、設計で想定したとおりの破壊形態であることを評価する。

- 1) RC 床版は、輪荷重 157kN（一定荷重）を繰返し載荷した解析において、上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。
- 2) 水平ひび割れの長さがおおよそ 300mm を超えた時点をも、設計で過程する抵抗断面とは異なる状態に変化する限界の時点とする。
- 3) 上記 2) で表せない独自の破壊形態がある場合は設計で仮定する抵抗断面とは異なる状態に変化する時点を明確にして評価すること。

- (1) 輪荷重の橋軸方向の載荷長さが 200mm で、床版内の応力分布が 45 度の角度、床版上面から水平ひび割れが発生する上段鉄筋までのかぶりが 50mm と仮定すると、リブ上端での応力分布範囲は 300mm となる。しかし、水平ひび割れの長さがおおよそ 300mm を超えると、かぶり部分のコンクリートは有効断面ではなくなり、水平ひび割れより下側の鋼材やコンクリートで抵抗する断面となり、有効高さが明らかに減少するため、設計で仮定する抵抗断面とは異なる状態に変化したと考えられる。