

## 3.2 疲労被害則の適用によるコンクリート床版の耐久性評価法の検討

### 3.2.1 コンクリートの疲労耐久性

コンクリートは、繰り返し応力の影響によって疲労破壊が生じることが知られており、その定式化について多くの研究が行われてきた。

既往の研究の多くは、円柱や角柱形状の供試体に対して繰り返し圧縮応力を作用させる条件で実験的に疲労耐久性を評価しようとしたものであり、繰り返し応力の大きさと回数との関係であるいわゆる S-N 線式による定式化が試みられてきた<sup>1)</sup>。

コンクリート標準示方書(2002年、構造性能照査編、土木学会)においても、主として圧縮応力を受ける場合の実験結果をもとに、コンクリートの設計疲労強度  $f_{rd}$  を、疲労寿命  $N$ 、永久荷重による応力度  $\sigma_p$ 、設計強度  $f_d$  から以下によって求められるとしている<sup>2)</sup>。

$$f_{rd} = k_{1f} f_d (1 - \sigma_p / f_d) \left( 1 - \frac{\log N}{K} \right) \quad \dots \text{(式3.2-1)}$$

ただし、 $N \leq 2 \times 10^6$

ここに、

$f_{rd}$ : コンクリートの圧縮、曲げ圧縮、引張り及び曲げ引張りの設計疲労強度

$N$ : 疲労寿命

$\sigma_p$ : 永久荷重による応力度

$K$ : 普通コンクリートで継続してしばしば水で飽和される場合、及び軽量骨材コンクリート  
の場合は  $K = 10$ 、その他一般の場合は  $K = 17$  とする

$k_{1f}$ : 圧縮及び曲げ圧縮の場合  $k_{1f} = 0.85$ 、引張り及び曲げ引張の場合  $k_{1f} = 1.0$

$f_d$ :  $f'_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$  に対する各設計強度を上限とする

また、コンクリートの材料係数  $\gamma_c$  は、一般に疲労限界に対して 1.3 とする

なお、曲げ引張応力や引張応力の影響に対しては、実験結果のばらつきが大きく、定式化は困難であるとしながらも、同示方書では静的強度のばらつきの大きさも考慮すると、特性値  $f_d$  を適切に評価することで上式によって構造物設計レベルでは疲労耐久性の評価が可能であるとしている。

また、普通コンクリートの圧縮疲労強度に関する既往の実験データを参考にして、最小応力と静的強度の比  $S_{\min}$ 、最大応力と静的強度の比  $S_{\max}$ 、応力振幅と静的強度の比  $S_r$  と疲労寿命  $N$  (回数) の関係は、 $N$  が  $2 \times 10^6$  回以内では、ほぼ次式によりあらわすことが出来るとしている。

$$\log N = 17 \frac{1 - S_{\max}}{1 - S_{\min}} = 17 \left( 1 - \frac{S_r}{1 - S_{\min}} \right) \quad \dots \text{(式 3.2-2)}$$

一方、Cornelissen と Reinhardt は、コンクリートシリンダーに単軸の引張・圧縮の交番応力を作用させた疲労実験を行い、図 3.2-1 のような疲労曲線関係を得ている。そして全結果から次式のような S-N 曲線式を提案している<sup>3)</sup>。

$$\log N = 9.46 - 7.71 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ct}} = 3.37 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} \pm 1.45 \quad \dots \text{(式3.2-3)}$$

ただし、上式は90%信頼区間を示す。

ここに、

$\sigma_{\max}$ : 引張最大応力

$\sigma_{ct}$ : 静的引張強度

$\sigma_{\min}$ : 圧縮最大応力

$\sigma_c$ : 静的引張強度

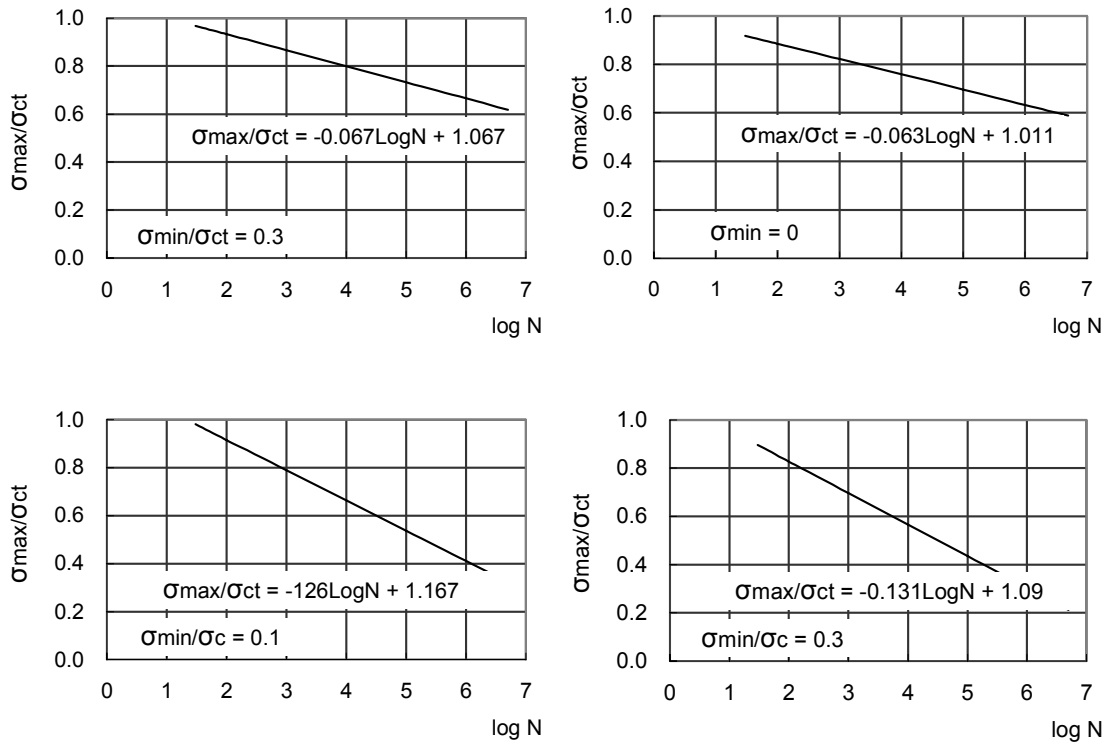


図 3.2-1 Cornelissen と Reinhardt のコンクリート交番疲労曲線式より作図

以上のように、現在までコンクリート部材の疲労耐久性が、部材に生じる繰り返し応力（あるいは断面力）とその回数に応じるいわゆるマイナー則に従うと捉えた評価法が種々提案されてきている。

しかし、これらの評価の中では、コンクリート部材に疲労による劣化の過程でコンクリートに徐々にひびわれが発達していくという現象は陽には評価されておらず疲労による破壊の発生・進展のメカニズムとの関係は明らかでない。

### 3.2.2 鋼材の疲労耐久性

鋼材の疲労耐久性については、荷重の繰返しに起因して鋼材に生じる応力変化の繰返しによって鋼材に亀裂が発生・進展する現象と捉えられている<sup>45)</sup>。

鋼材はコンクリートに比べて均質な材料であるが、微視的にはさまざまな不均一性を有しており、材料的不連続や微小な空洞や亀裂、溶接部などの形状的不整も要因となって応力集中が生じ、それらの箇所から亀裂が進展していくものと考えられている。これらの現象過程をできるだけ忠実に評価しようとする試みとして、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析の手法などがあるが、一般には材料の不整や微小な空洞などの実際の材料の状態を忠実に再現することは困難な場合も多く、構造物の設計においては、部材の公称応力で整理された繰返される応力変動の大きさの影響がその回数に応じて蓄積され、その値がある程度以上になると破壊が生じるとする累積損傷被害則（マイナー則）の考え方で評価されることが一般的である。

亀裂の進展過程を亀裂の始点となる欠陥から破壊力学の考え方を適用して表現する場合には、欠陥や破壊した部位に直接作用する微視的な応力状態がより現実に近い形で考慮されると考えられるが、公称応力に対して継手形式毎にあらかじめ求められた破壊基準である疲労設計曲線にあてはめて疲労耐久性を評価する手法では、実際の亀裂進展メカニズムや実際に亀裂部位でその進展に関わっている応力状態を直接的には評価していない。しかし実構造物や実際の鋼材では、溶接ビードの形状や残留応力の程度などがさまざまな要因で大きくばらつく一方、着目箇所に生じる応力も自動車荷重などのばらつきや複雑な構造系の挙動に起因してその方向も大きさも極めて複雑に変化する。このため疲労耐久性を評価するにあたって詳細な応力状態と疲労現象の関係を関連づけても、実際の構造物における再現性には限界があり結果的に実構造物の疲労耐久性の精度の高い評価とはならない。

このような理由もあり、少なくとも道路橋に用いられる鋼部材については、できるだけ精度よく溶接継手部などの鋼部材に生じる繰返し発生応力を見積もり、それらをすでに明らかになっている公称応力に対して定義された疲労強度等級と対比することで疲労耐久性を評価することが合理的と考えられる。

### 3.2.3 コンクリートと鋼材の一体性の疲労耐久性

コンクリート系の床版には様々な鋼材が配置され、それらが床版コンクリートと一体となって機能することで床版の性能が発揮される。

床版内部に鉄筋やグラウトなどで付着が確保された PC 鋼材のみが配置された床版の場合には、過去の輪荷重走行試験や実橋の損傷実績からも、床版が破壊の最終段階に至るまで鋼材は概ね床版コンクリートと一体で挙動しており、コンクリートとの一体性が喪失した場合の床版の耐荷力や耐久性については知見がない。また当初一体化していた鋼材と床版コンクリートの結合が喪失していく過程を耐久性設計で見込みそれを考慮することは、困難が予想される。このため本研究では床版コンクリートと鋼材の一体性については少なくとも、鋼材との一体化されたコンクリート部分や鋼材単体の疲労耐久性に比べて長期の耐久性がある場合を検討の対象とすることとした。

鋼コンクリート合成床版の場合には、鉄筋や PC 鋼材以外に種々の形式の内部鋼材や底鋼板が配置されるが、これらについても疲労耐久性の最終段階まで確実に機能することを期待する鋼材と床版コンクリートの一体化機構については、それが保持された状態を仮定し、それらが確実に期待されない場合には、当初よりそれを無視した系として構造をとらえるなど疲労耐久性の評価に危険側の影響を及ぼさない条件を仮定することを前提として検討を行うこととした。

### 3.2.4 単位コンクリート要素に着目した疲労解析手法の基礎的検討

#### (1) 概要

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と鋼部材、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、それぞれに対して疲労耐久性を評価することで床版全体の疲労耐久性の評価に結びつける方法の検討あたって、コンクリートの疲労耐久性についての取り扱いを検討する。

ここでは、床版コンクリートの各部分で応力変動の繰返しによって疲労破壊に至る影響（ダメージ）が蓄積し、その蓄積がある破壊基準に達することでその部分の破壊が生じるものと仮定する。なおここでいうコンクリート部分の破壊は実際の床版ではひびわれの発生に相当するものであるが、ここではそのような仮定で床版の応力等の変動履歴を蓄積させることで実床版にみられるようなひびわれによるコンクリート部分の破壊が徐々に床版全体に広がっていく現象が解析的に表現できるかどうかの基礎的な検証を行う。

検証は、一般的なRC床版を対象に、床版支間方向と床版方向の2方向それぞれについて床版中央断面の平面FEM解析モデルを作成して行った。

#### (2) 解析方法

##### 1) 概要

解析方法と手順は以下のとおりである。

- ①要素分割されたコンクリート床版モデルに移動荷重を模して、位置を変えて荷重載荷を行って移動荷重の載荷によるコンクリート要素に生じる応力変化量（ $\Delta\sigma$ ）を算出し、その値を要素毎に積算する。
- ②各要素について、いわゆる累積損傷被害則（マイナー則）の考え方を準用して積算された変化量の合計がある値になった時点でその要素が破壊するものとする。
- ③②で破壊した（実構造物ではその領域がコンクリートのひびわれによって損傷を生じたことに対応）とみなされた要素について解析モデルの弾性係数を低下させる。（これは実現象では疲労によってひびわれが生じたある領域の床版コンクリートの力学的特性を模擬することを意図したものである。）
- ④③で破壊した要素の弾性係数を低下させたモデルに対して、位置を変えた荷重載荷を行ってさらに移動載荷による応力変化量を各要素に疲労損傷度として蓄積させる。
- ⑤以下②～④の繰り返し（図 3.2-2～3）。

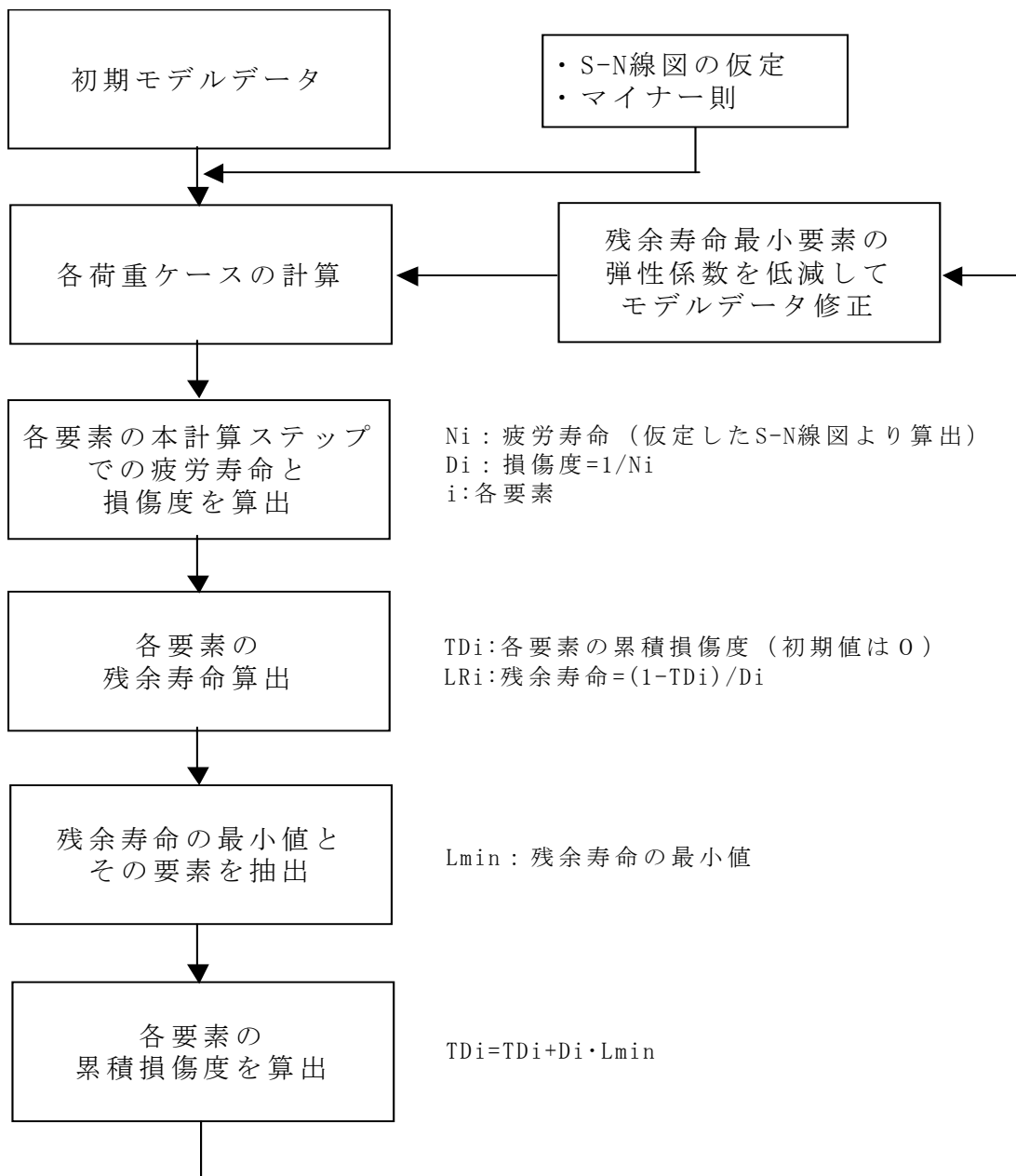


図 3.2-2 解析概要

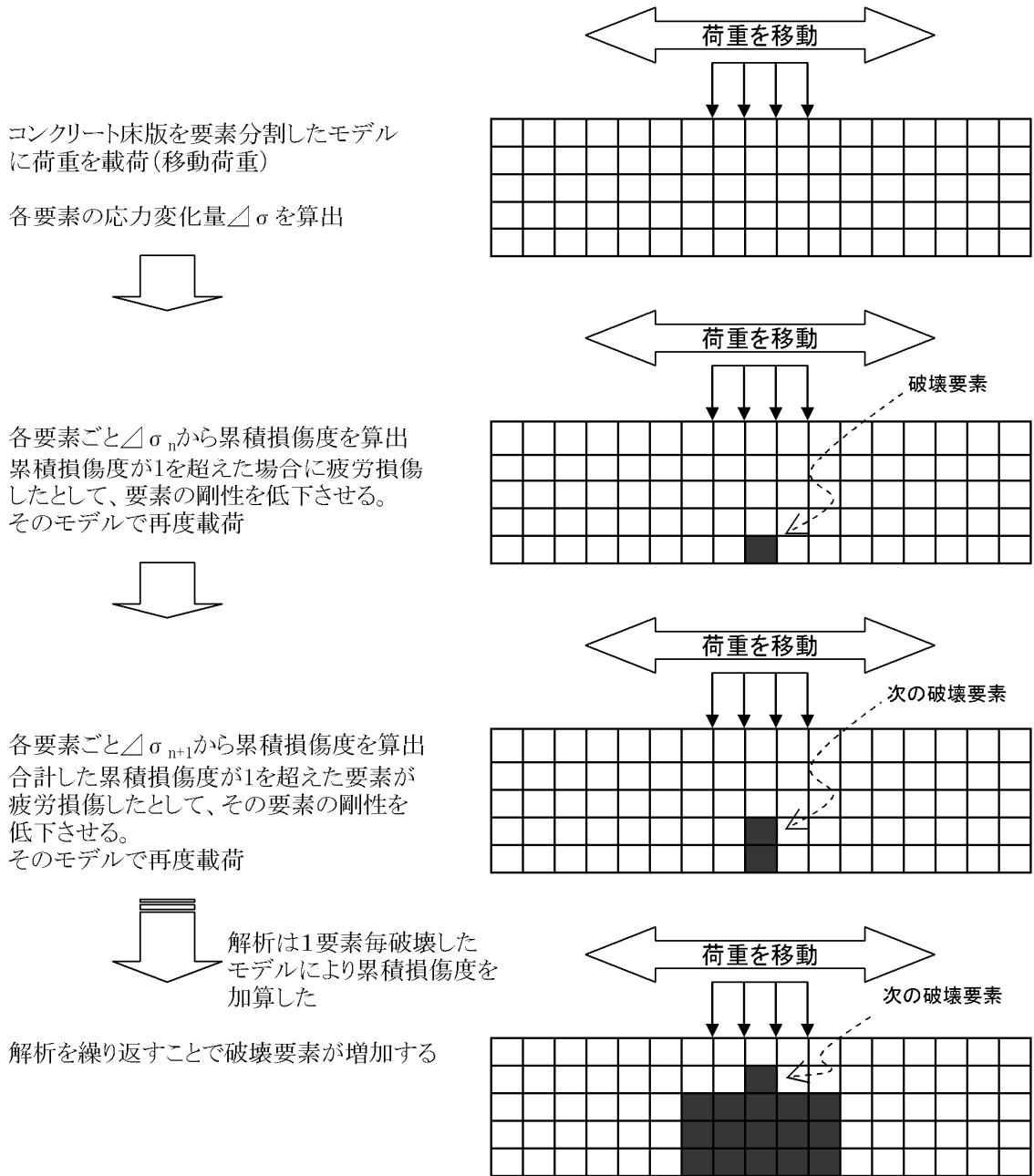


図 3.2-3 解析イメージ

実際の床版ではひびわれが徐々に進展していくのに対して、要素単位で弾性係数の低下によってコンクリートの損傷を模擬させる解析モデルでは、ある要素が破壊する都度その前後で解析モデルの構造系が急変し、徐々にひびわれが進展し連続的に構造が変化すると考えられる疲労損傷の進展過程とは異なる。また実際のひびわれはその向き・長さ・幅等の形態によっても床版全体に対する剛性低下などの特性変化への寄与は異なると考えられる。

そのため本解析手法によるコンクリート要素の破壊は、実際のひびわれそのものを忠実に表現したものではなく、ひびわれの進展によって床版コンクリートの破壊（剛性が低下した領域の拡大）が進展する過程の構造特性を離散的に逐次模擬したものと捉えるべきである。

そして、実際の床版においてもひびわれが生じた部分のコンクリートは完全に抵抗を失うわけではなく周囲の拘束の影響などもあってある程度版の剛性にも寄与していると考えられることから、解析モデルでも破壊基準に達したコンクリート要素の弾性係数は完全にゼロとするのではなく、実際にひびわれを生じた床版コンクリートのある領域の剛性の低下を考慮したみかけの弾性係数としてある値を与えることが適当であると考えられる。なお、どの程度の弾性係数の低下を見込むべきかについては知見がなく、本検討では健全な場合の 1/10 に低下することとした。

本検討は線形解析で行ったため、要素を破壊しない状態での移動荷重の繰り返し载荷では解析上、载荷位置が同じであれば算出される計算応力等は全く同じになる。したがって解析上、次の要素が破壊基準に達するまでの载荷回数（残余寿命）は1回の移動载荷によって蓄積されるダメージの蓄積量（応力変動など）から単純に求めることができる。このため、実際の解析では要素破壊によって状態が変化した床版構造状態のそれぞれに対して1回の移動载荷による影響を算出して次の要素破壊までに必要な移動载荷回数（＝当該応力変動の繰り返しにより残余寿命が最小のものの破壊までに必要な繰り返し载荷回数）を求めている。

本検討では、このようにダメージの蓄積量と破壊基準の関係から算出される当該ステップで次のステップに移行するまでに必要となる移動载荷回数を換算载荷回数と呼ぶ。

## 2) 解析モデル

解析は、ソリッド要素を用いた有限要素解析（以下「FEM 解析」という。）とし、解析ソフトには、3次元汎用プログラムソフトである『DIANA』を用いた。

まず基礎的検討として、床版支間方向および床版支間直角方向それぞれの床版中央断面の損傷過程について、平面モデルによる解析を行う。モデル化の対象は輪荷重走行試験結果がある床版供試体でありモデル化した断面は図 3.2-4 に示す位置である。

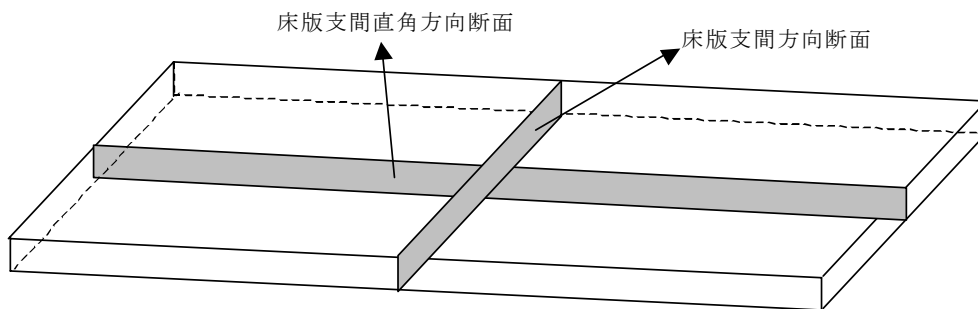


図 3.2-4 平面解析のモデル化位置



FEM 解析モデルの要素の大きさは、少なくとも床版コンクリートの 3 方向の応力状態の違いによる部位毎の差が表現できること、弾性係数の低下で表現する要素の破壊によって実際のひび割れの進展による破壊の進行過程が定量的に表現できることを考慮するとある程度以下のサイズに分割することが必要である。一方、ひび割れの進展による破壊を考えた場合、コンクリートの不均一性の大きな要因である骨材の寸法より大幅に小さい要素分割を行ってもひび割れによるコンクリートの破壊の進展過程の模擬という観点からの精度が向上するとは考えにくい。これらのことを考慮して粗骨材の最大寸法程度で、かつ版としての中立軸や鉄筋位置にそれに該当する要素が配置できる程度の要素分割の細かさを目安とした。実際には床版を厚さ方向に 5 層に分割した大きさの立方体で床版全体を要素分割した。

なお、鉄筋はコンクリート要素中に埋め込み要素としており、鉄筋とコンクリートは完全付着条件となっている。

### 3) 荷重載荷条件

荷重の載荷は、実験や実橋では連続的な移動荷重となるが、解析上は連続的に載荷することが困難であるため、荷重の移動に伴う各要素の応答の振幅がとれる程度の間隔で解析モデルの格点位置に対応した離散的載荷を行った。

### (3) 対照実験

解析結果は旧土木研究所で行われた昭和 39 年道路橋示方書に準拠した RC 床版供試体による一定荷重載荷の輪荷重走行試験結果との比較により考察を行う。

比較対象とした輪荷重走行試験の供試体と試験結果の例 (RC39-3) (載荷荷重 105kN) を図 3.2-5~10 に示す。これは 2 章に示した RC39-3 供試体の試験結果<sup>6)</sup>である。

本試験は、途中で繰返し荷重の載荷を停止し、静的な状態で除荷時および載荷時の床版たわみおよび鉄筋ひずみ測定を実施し、その差から載荷荷重分の値を求めているが、解析では、残留たわみ等の非線形性は考慮せず要素の弾性係数のみを順次修正したモデルを作成して、荷重を作用させる線形計算の繰返しであることから、解析結果とは載荷荷重分の値を比較する。載荷荷重は 105kN とした。

表 3.2-1 RC39 供試体の主な諸元

	供試体寸法	支間	主鉄筋(mm)		配力筋(mm)	
	(mm)		(mm)	呼び径	間隔	呼び径
RC39-1,3~9	2800×4500×190	2500	D16	150(300)	D13	300(300)
RC39-2					D10	150(300)

( )内は圧縮鉄筋の値

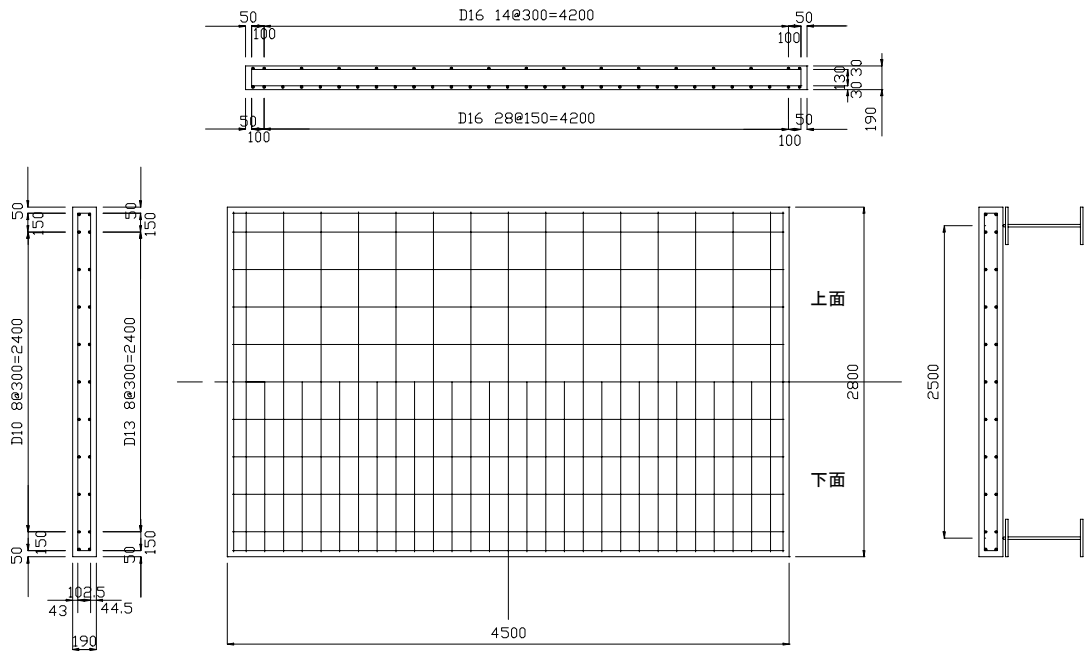


図 3.2-5 実験供試体

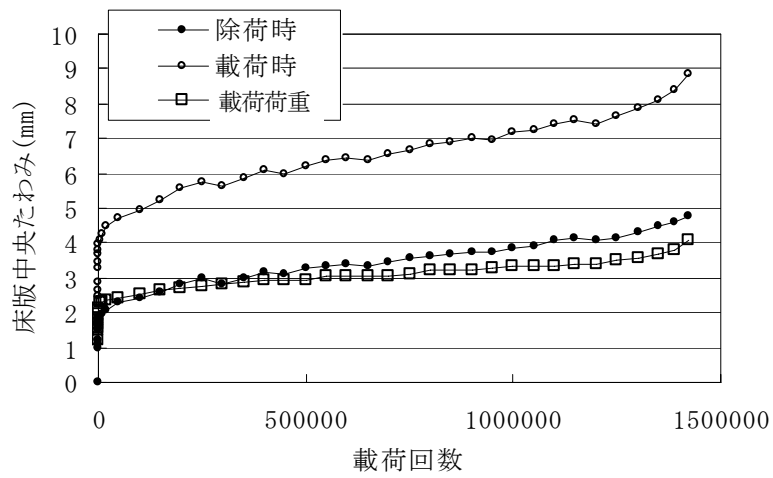


図 3.2-6 床版中央たわみ測定結果 (RC39-3 载荷荷重 105kN)

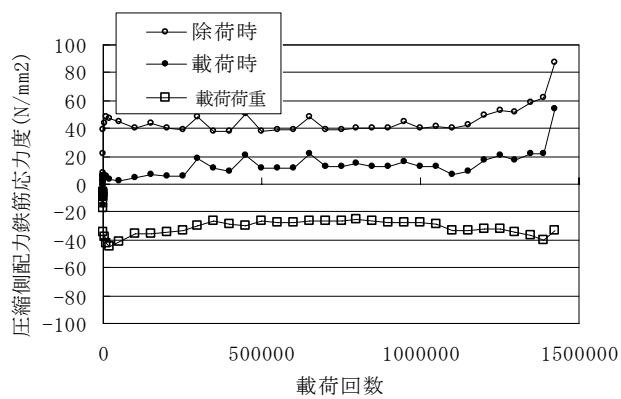
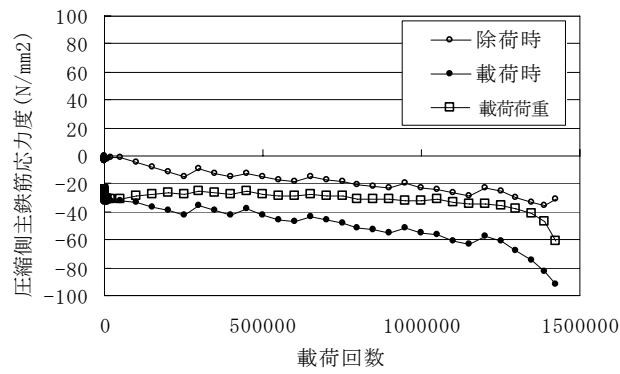
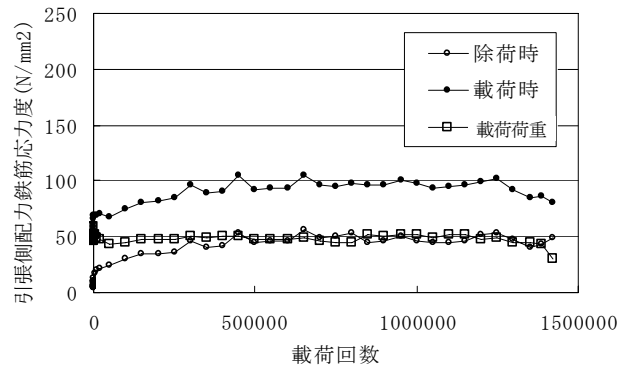
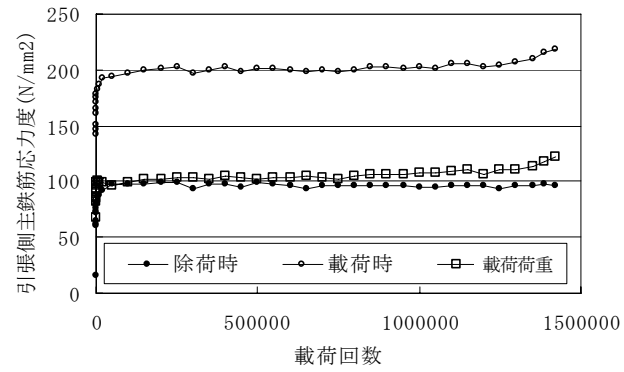


図 3.2-7 鉄筋応力度測定結果 (RC39-3 載荷荷重 105kN)

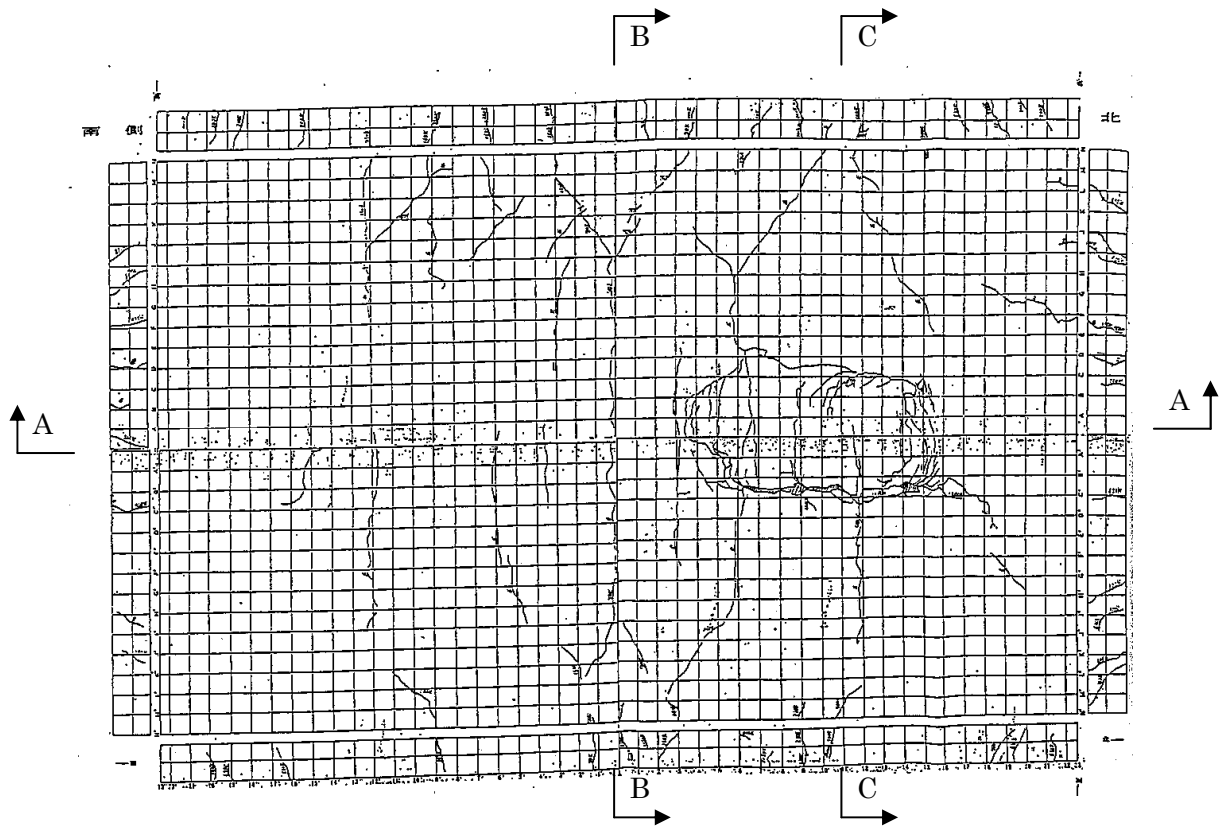


図 3.2-8 床版上面ひび割れ状況 (実験終了時)

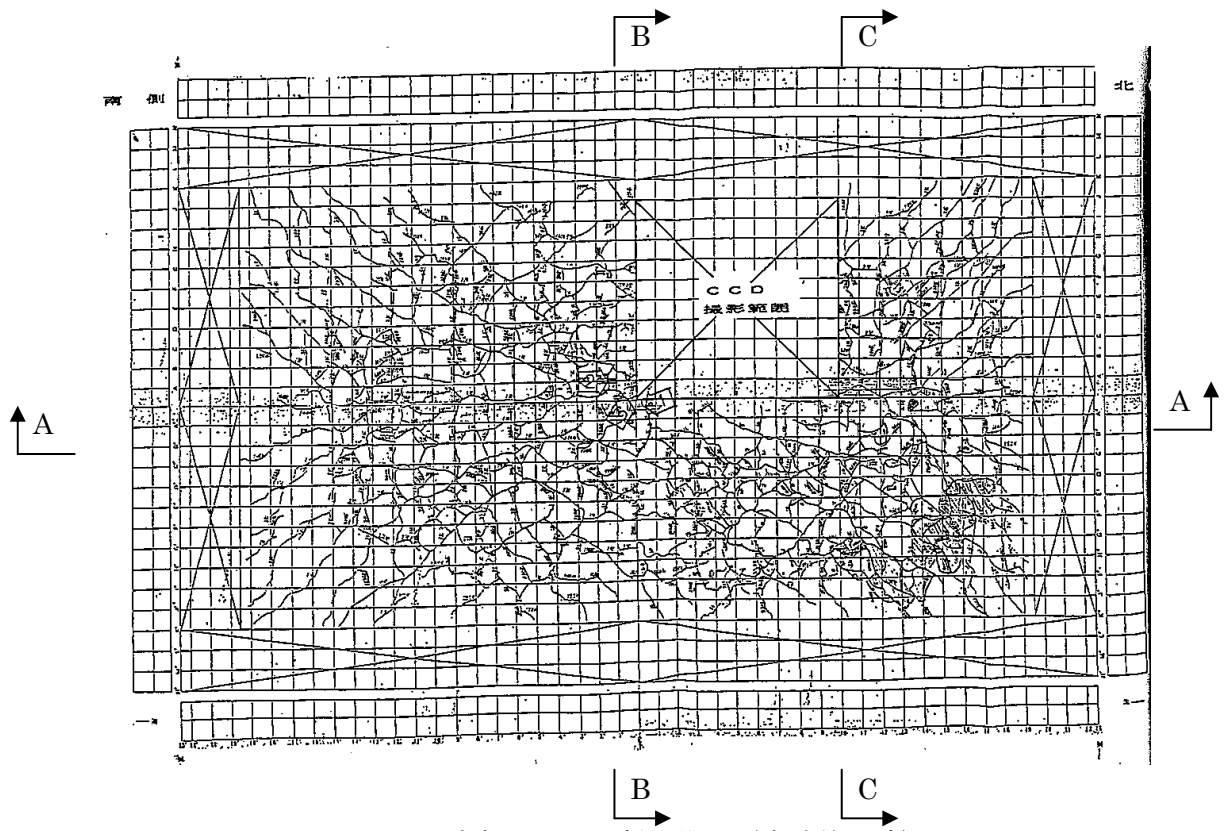


図 3.2-9 床版下面ひび割れ状況 (実験終了時)

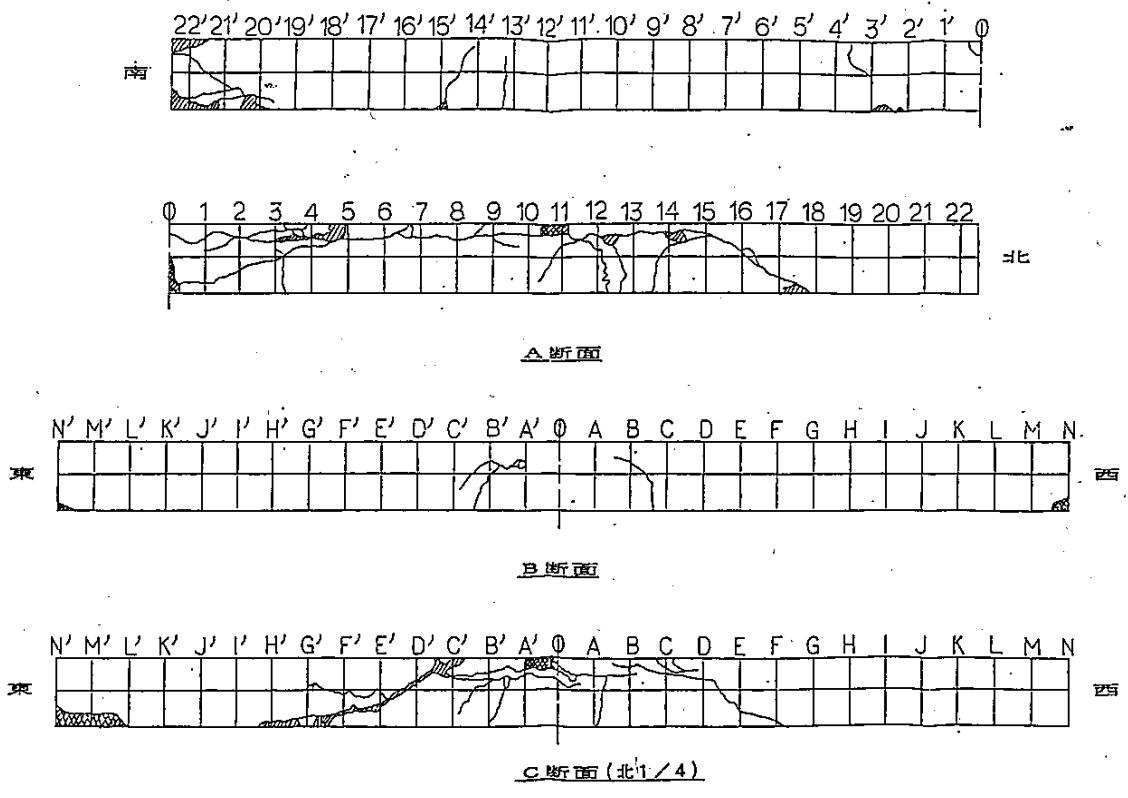


図 3.2-10 試験後のひび割れ状況 (床版断面)

比較対照とする移動輪荷重走行試験結果の主な特徴は以下の通りである。

- ①床版中央のたわみは、試験開始直後に急激に増加し、その後、緩やかに増加する段階が長く続いた後、最終段階ではやや増加傾向が早くなる。
- ②床版下面にある引張側主鉄筋の応力度は、試験開始後に急激に増加し、その後はほぼ一定の値をとっている。試験の最終段階でやや増加する。
- ③床版上面にある圧縮鉄筋ではほとんど変化がないか傾向が一様でない。
- ④試験後のひびわれの状況は、床版上面側は床版支間方向のひびわれが生じるがその範囲と量は限定的である。一方、下面側ではほぼ全域にひび割れが発生しており、載荷位置に近いところでひびわれ密度は大きい傾向がある。
- ⑤試験後に切断して確認された床版内部の状況は、ひびわれが台形状に生じており、徐々に床版下面からひび割れが上方へ進展したことを伺わせる。ただし、最上面よりも少し下方の床版内部でひびわれが水平方向に発達しており、これについては下からのひびわれの進展方向が変化したものか、この位置でも水平方向のひびわれが発生したのかは明確でない。
- ⑥最終段階では床版中央部で台形状にひびわれがほぼつながった状態となってその範囲の床版コンクリートが耐荷力にほとんど寄与できない状態となり、押し抜きせん断破壊の形態に近似した破壊面が形成されたものと推定される。
- ⑦床版内部の鉄筋は最終段階まで破断は生じていない。

## (4)解析結果と考察

### 1)一般

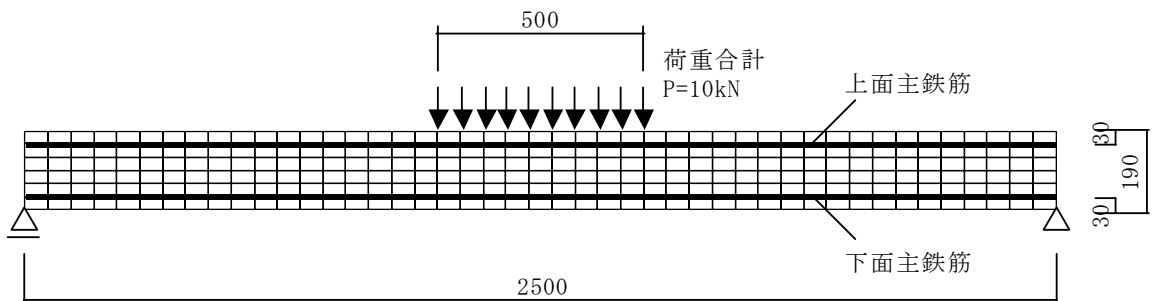
基礎的検討として、床版内の平面モデルによる解析結果から要素コンクリートの疲労破壊の進展に関して、実験結果における進展傾向との整合性を評価した。

今回はRC床版の解析であり、鉄筋に関してもコンクリート要素への埋め込み要素としている。よって、鋼コンクリート合成床版などで床版コンクリート内部に埋め込まれた鉄筋以外の各種の鋼材とコンクリートとの境界部で生じるような局所的な応力集中が生じない。このため鉄筋を埋め込んだ要素を含めて全ての部位で要素単位にその応答値でそのまま評価した。

### 2)床版支間方向モデルの解析結果

床版支間方向の解析モデルを以下に示す。本計算では要素厚を輪荷重の支間直角方向幅（200mm）とした。載荷荷重は計算の初期段階において床版下面に発生する最大引張応力度が  $3.0\text{N/mm}^2$  程度となるように  $10\text{kN}$  とした。輪荷重走行試験での荷重移動は支間直角方向のみであるため、本計算では荷重は移動させていない。

鉄筋は節点位置を通る曲げに抵抗しない棒要素としてモデル化した。このため、主鉄筋のみが本モデルではモデル化されており、鉄筋とコンクリート間の付着状態の変化などの特性は表現できていない。計算に使用した材料特性は下図に示した。



コンクリート弾性係数： $E_c=2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ （ひび割れ後 $E_c/10$ ）

鉄筋弾性係数： $E_s=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$

コンクリート部：要素厚 $t=200$

下面主鉄筋(D16@150)： $264.8\text{mm}^2$       上面主鉄筋(D16@300)： $132.4\text{mm}^2$

図 3.2-11 床版支間方向解析モデル

コンクリート要素の累積被害則には、コンクリート標準示方書（土木学会 2002 年制定、構造性能照査編）を参照して下式を用い、破壊条件に達した要素については弾性係数を初期値の  $1/10$  に低下させてモデルを再構築し、次のステップの計算を実施した。

$$\log N = 17 \frac{1 - S_{\max}}{1 - S_{\min}} \quad \dots \text{(式 3.2-1)}$$

ここで、 $N$ ：疲労寿命

$S_{max}$ ：最大応力と静的強度との比（ここでは最大応力として主引張応力を用い、静的強度を  $3.0\text{N/mm}^2$  とした）

$S_{min}$ ：最小応力と静的強度との比（ここでは完全な除荷を想定して  $0$  とした）

過去のコンクリートの疲労に関する研究では荷重の方向は一定であり、応力方向も一定という前提で、 $S-N$  の関係が整理されているが、今回の検討では、要素に破壊が生じると他の要素の主応力方向にも変化が生じる。したがって変化する主応力の影響をどのように被害則として取り込むのかについては新たに検討が必要である。

ここでは基本的検討として、応力振幅方向が一定方向の疲労被害則を参考にして、方向は無視した引張主応力の大きさのみに着目した解析としている。上式中で考慮される解析における主引張り応力は要素の最大引張り応力度とした。計算結果を図 3.2-12(a)～(g)に示す。

各解析ステップにおいて破壊条件に達したとして次のステップにおいて弾性係数を低下させた要素（○で記す）と、主引張応力度の矢線図を示している。

計算初期段階では荷重に近い位置の下面側の要素で主引張応力度が卓越し、それらが計算ステップの進行に従って先行的に破壊するため、破壊部は荷重直下の床版下面から徐々に周辺部と上方へ広がって行った。部分的に要素が損傷する（ひび割れが生じたとみなされる領域が増加する）ことで、その周辺の損傷していない要素では斜め方向に引張応力が発生している（30 ステップ目の主応力図参照）。この応力方向は、輪荷重走行試験後の切断面に見られており押し抜きせん断破壊状の破壊を生じさせる応力状態に近似している。



Step1

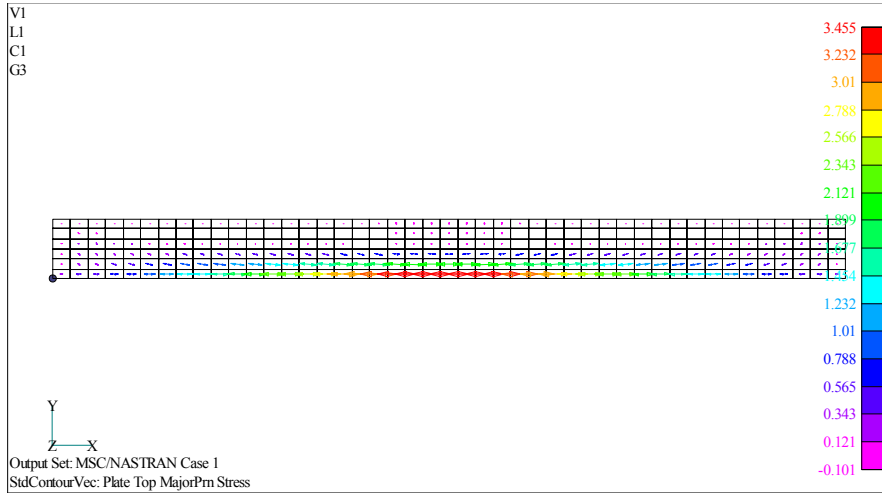
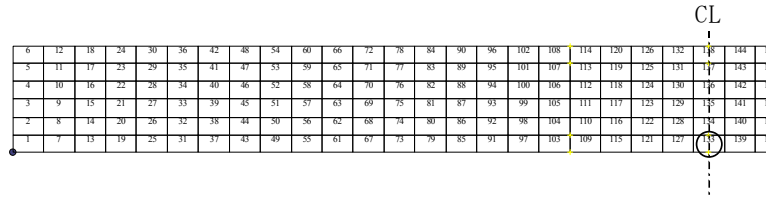


図 3.2-12(a) 床版支間方向の計算結果 (step1)

Step10

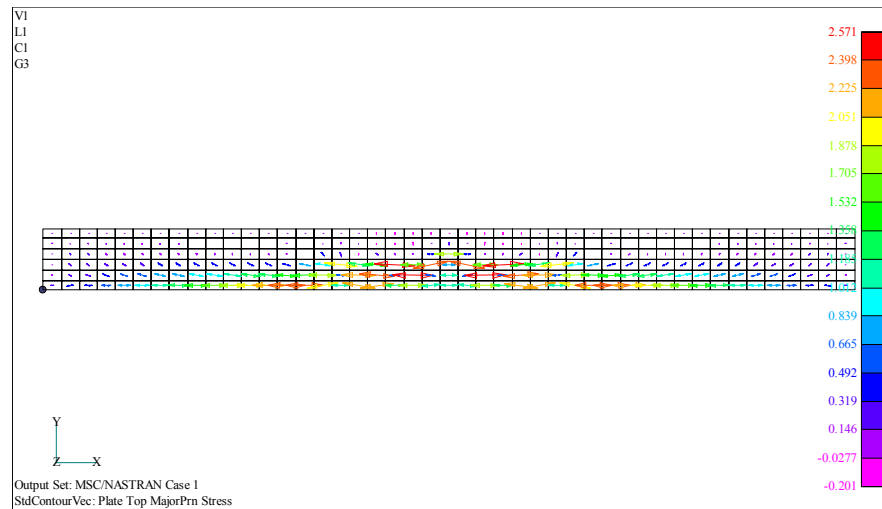
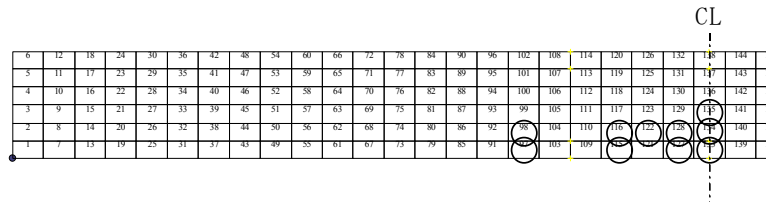


図 3.2-12(b) 床版支間方向の計算結果 (step10)

### Step20

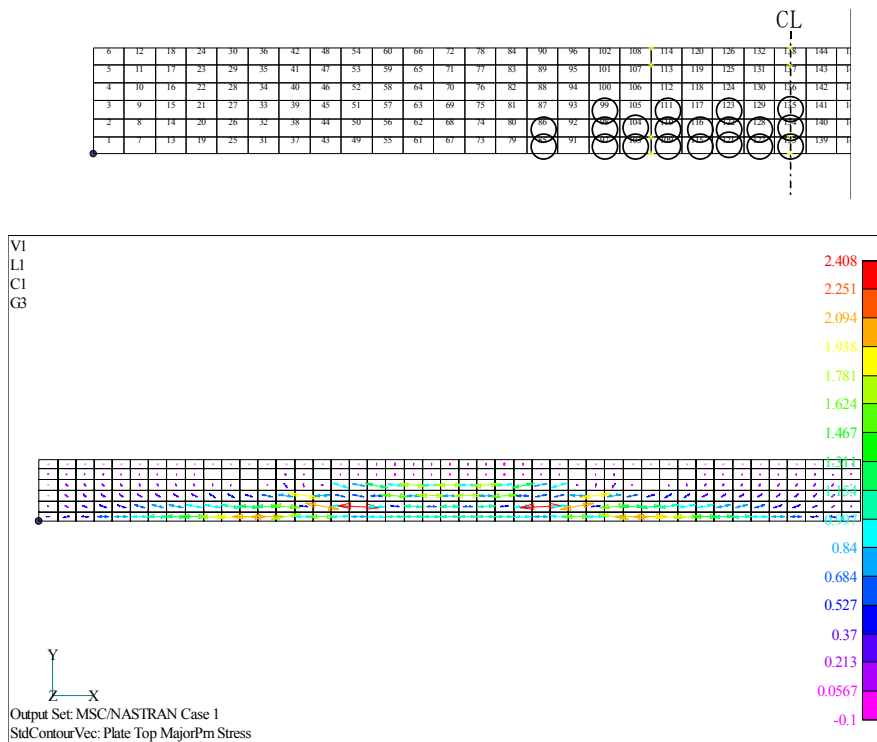


図 3.2-12(c) 床版支間方向の計算結果 (step20)

### Step30

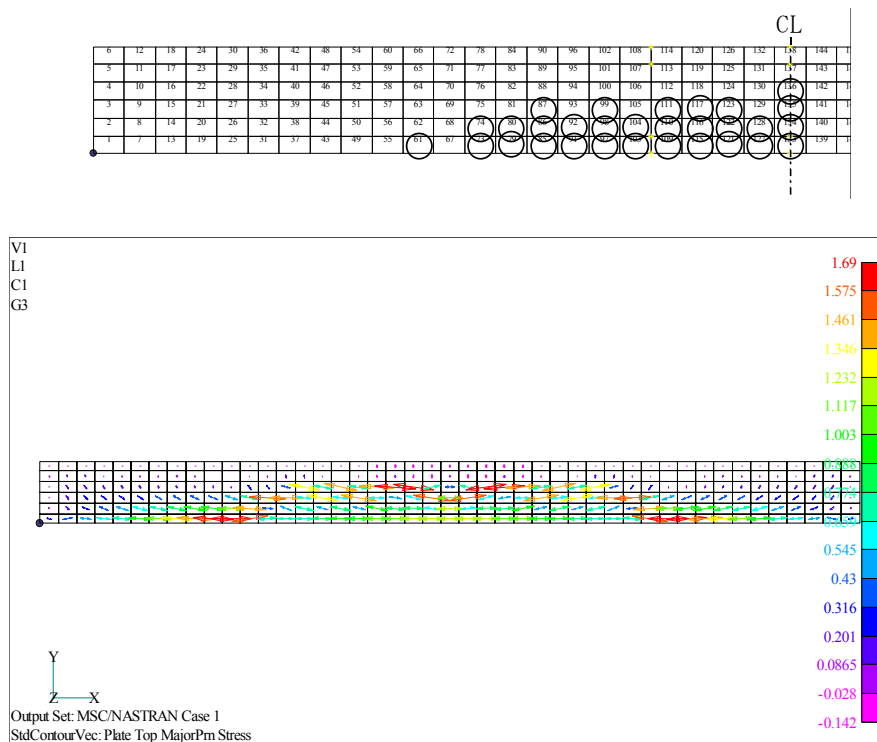


図 3.2-12(d) 床版支間方向の計算結果 (step30)

Step40

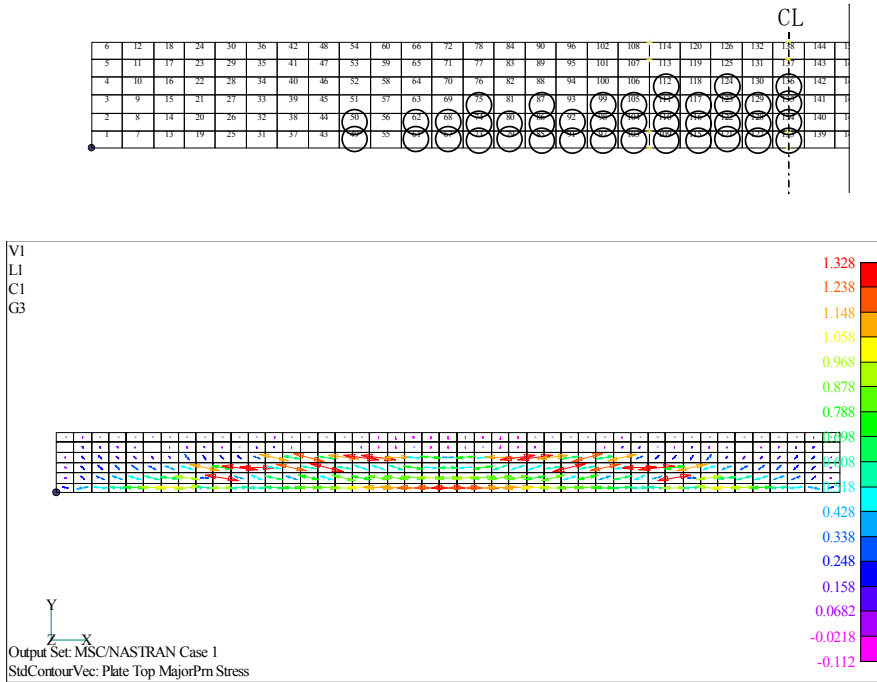


図 3.2-12(e) 床版支間方向の計算結果(step40)

Step50

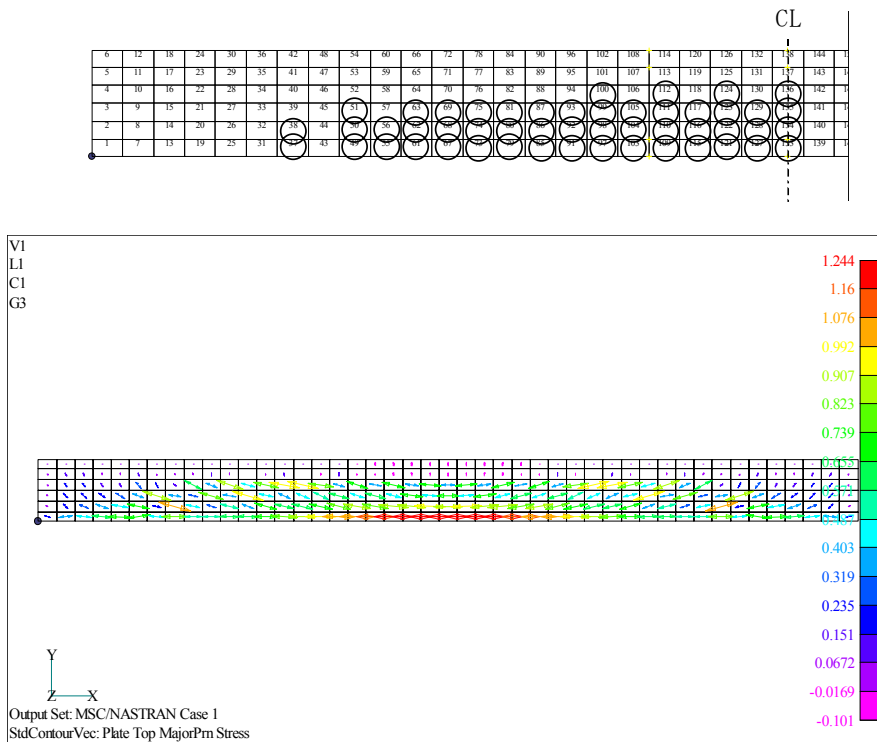


図 3.2-12(f) 床版支間方向の計算結果(step50)

## Step60

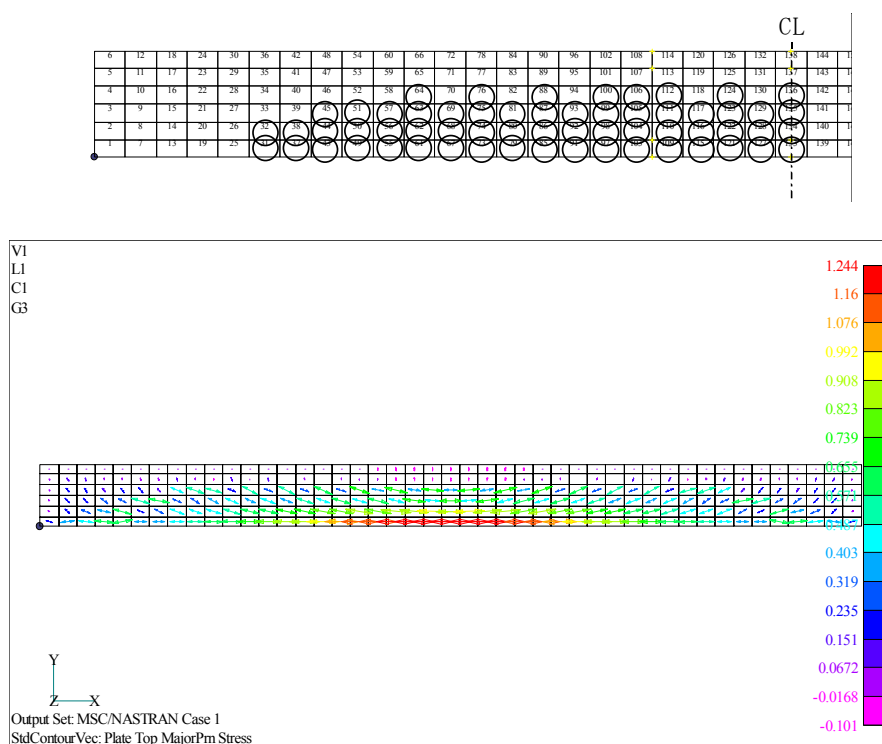


図 3.2-12(g) 床版支間方向の計算結果(step60)

解析では、実際の载荷における繰り返し回数だけの計算を行うわけではなく、一载荷によって生じる各要素の応力とその変動量から算出した累積損傷度を用いてその状態の床版に新たな破壊が生じて構造系が変化するまでに要する繰り返し回数を逆算するため、実際の解析は構造系の変化回数分だけ行う。そして各構造系毎に要した繰り返し载荷回数の累積として実現象の繰り返し载荷回数を求めている。本検討では解析結果を用いて算出した実载荷相当回数を換算回数と呼んでいる。

図 3.2-13 に解析ステップと S-N 換算回数のグラフを示すが、解析ステップ 50 (図 3.2-12(f)参照) までは換算回数が 0 回である。これはそれまで破壊した要素の応力が破壊基準値  $3.0\text{N/mm}^2$  を超えるためである。よって解析ステップ 50 を越えるまではいわゆる耐力以下の応力の繰り返しによって破壊が生じるとする疲労によって要素が破壊したのではなく、解析上は静的な破壊の結果であることが分かる。

解析ステップ 50 を越えた段階からは、1 回の载荷では破壊に達せず、複数回の载荷分のダメージの蓄積によって破壊基準に達していることから解析上設定した累積被害則に従って要素が疲労で破壊していることが分かる。

解析ステップ 60(図 3.2-12(g)参照)の例では、床版上面方向では応力度が引張の要素があり、本解析によれば、この後の载荷による破壊によっても新たに引張応力が卓越する要素が現れることで破壊がさらに上方に進展していくものと推定できる。

このように本解析法では、要素の破壊につれて生じる床版構造および耐荷力機構の変化が表現されることから、破壊過程のある状態を前提とした応力性状と関係づけて疲労耐久性を評価する手法と異なり、評価対象床版のひび割れ進行等の破壊進行に伴う耐荷力機構状態の変化の特徴（損傷が徐々に進行することで内部応力状態が変化し、材料の受ける応力振幅量に変化する特徴）も適切に解析結果に反映できる可能性があるものと考えられた。

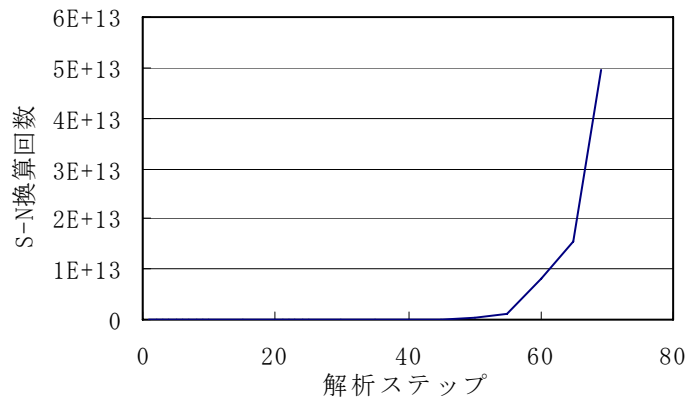


図 3.2-13 解析ステップと S-N 換算回数との関係（床版支間方向）

### 3) 床版支間直角方向モデルの解析結果

床版支間直角方向の計算モデルを図 3.2-14 に示す。本計算では輪荷重走行試験の荷重の移動の影響を模擬できるように荷重載荷位置を移動させて計算を行った。床版支間直角方向について断面を切り出した平面モデルの計算で 3 次元モデルと条件を合わせようとする、厳密には曲げモーメントの変曲点位置で支持条件をバネ支持とするなどの適切な配慮が必要であるが、ここでは、荷重が移動して繰返し作用することによって解析上応答の蓄積とそれらに関係づけた破壊基準によって要素の損傷がどのように進展するのかについての傾向を確認することが主眼であるため、単純に端部位置での支持とした。

鉄筋は支間方向の計算と同様、節点位置を通る曲げに抵抗しない棒要素としてモデル化した。本ケースでは配力鉄筋のみを計算モデルに含めている。

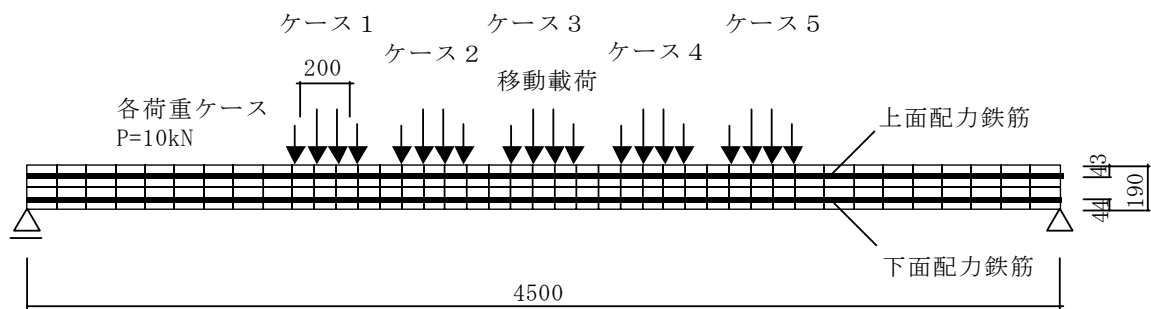
床版支間モデルと同様に、コンクリートの累積被害則には、「コンクリート標準示方書 構造性能照査編 2002 年制定（土木学会）」を参照して下式を用いた。破壊条件に達した要素については弾性係数を初期値の 1/10 に低下させてモデルを再構築し、次のステップの計算を実施した。

$$\log N = 17 \frac{1 - S_{\max}}{1 - S_{\min}} \quad \dots \text{(式 3.2-1)}$$

ここで、N：疲労寿命

S<sub>max</sub>：最大応力と静的強度との比（ここでは最大応力として主引張応力を用い、静的強度を 3.0N/mm<sup>2</sup>とした）

S<sub>min</sub>：最小応力と静的強度との比（ここでは完全な除荷を想定して 0 とした）



材料の弾性係数は支間方向と同様

コンクリート部：要素厚 $t=500$

下面配力鉄筋 (D13@300) :  $211.2\text{mm}^2$  上面配力鉄筋 (D10@300) :  $118.8\text{mm}^2$

図 3.2-14 床版支間直角方向解析モデル

計算結果を以下に示す。図 3.2-15 では対称性より各計算ステップの荷重ケース 1～3 の最大主応力の矢線図を示した。計算ステップの増加に連動している破壊要素の増加の状況は、複数点設けた載荷位置がある範囲に広く破壊領域が拡大していく結果となっており荷重載荷位置を移動させていることの影響と考えられる。これは輪荷重走行試験結果における荷重直下位置でのひびわれ発生範囲の広がり傾向が類似する。

### Step1

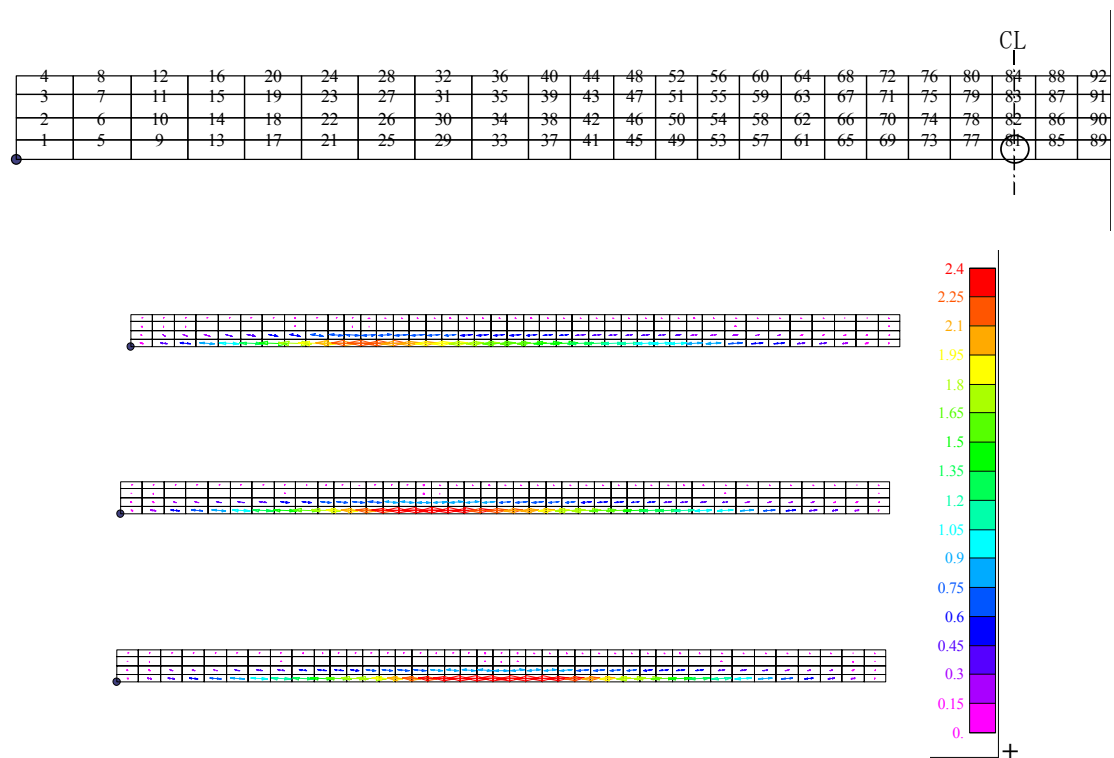


図 3.2-15(a) 床版支間直角方向の計算結果(step1)

Step10

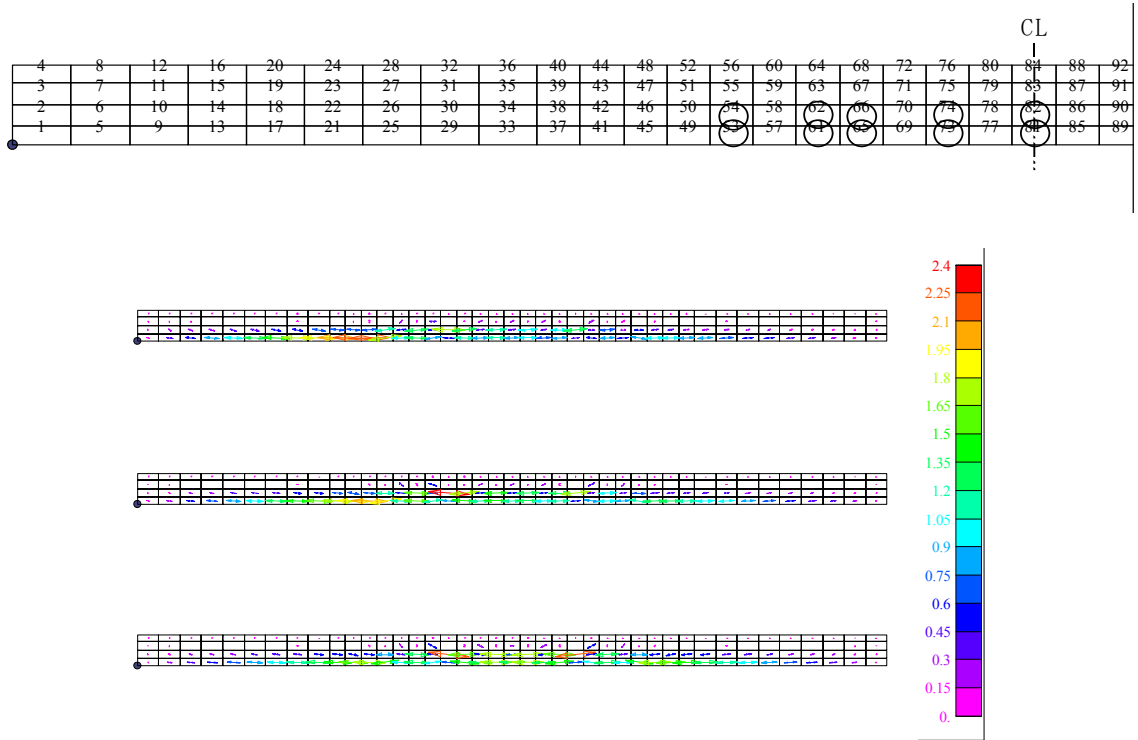


図 3.2-15(b) 床版支間直角方向の計算結果(step10)

Step20

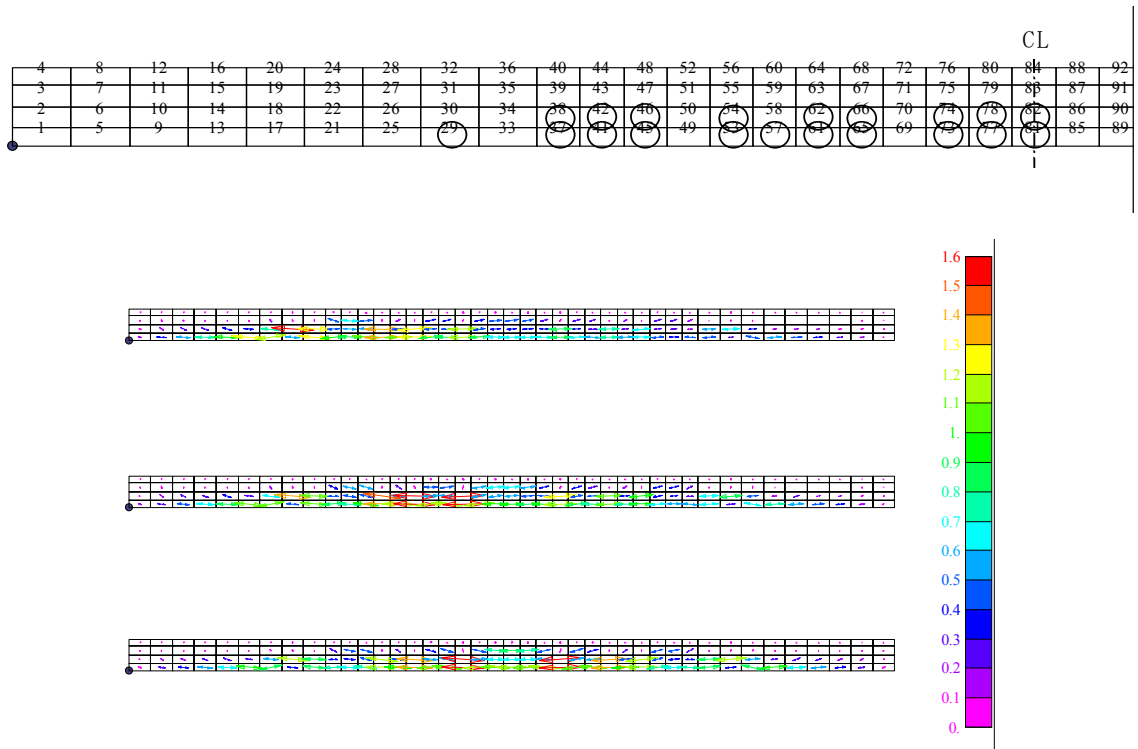


図 3.2-15(c) 床版支間直角方向の計算結果(step20)

Step30

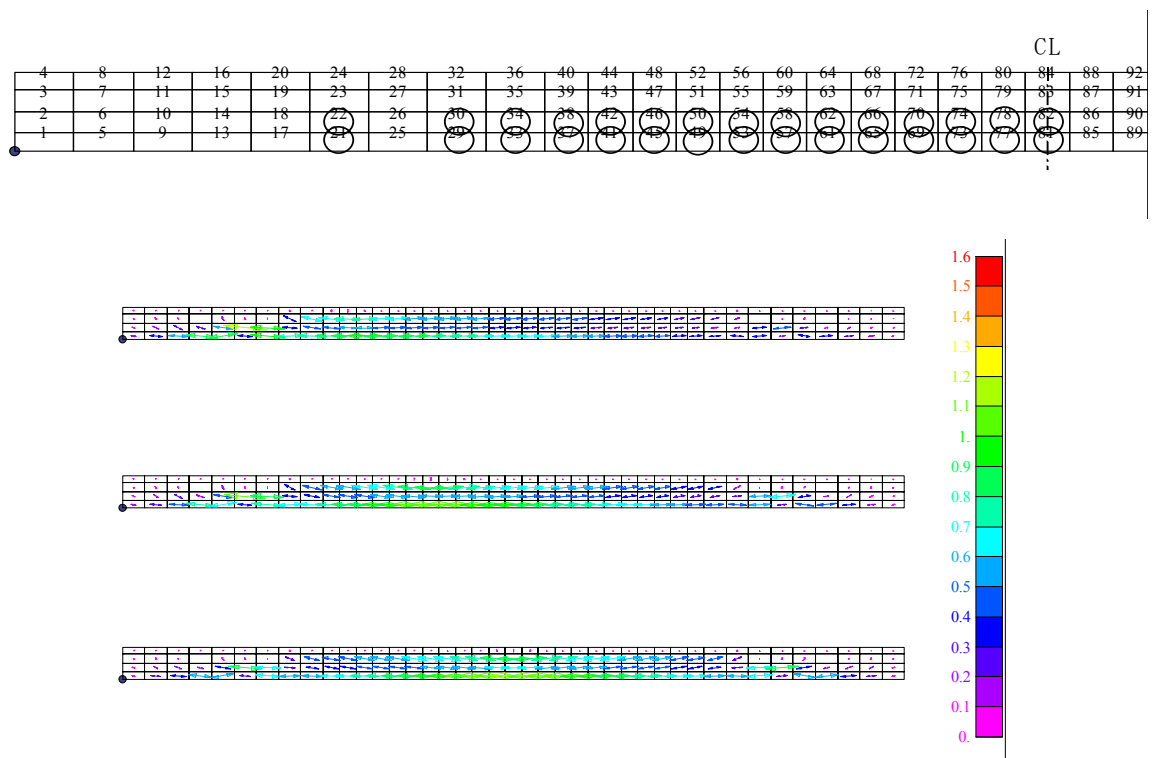


図 3.2-15(d) 床版支間直角方向の計算結果(step30)

Step40

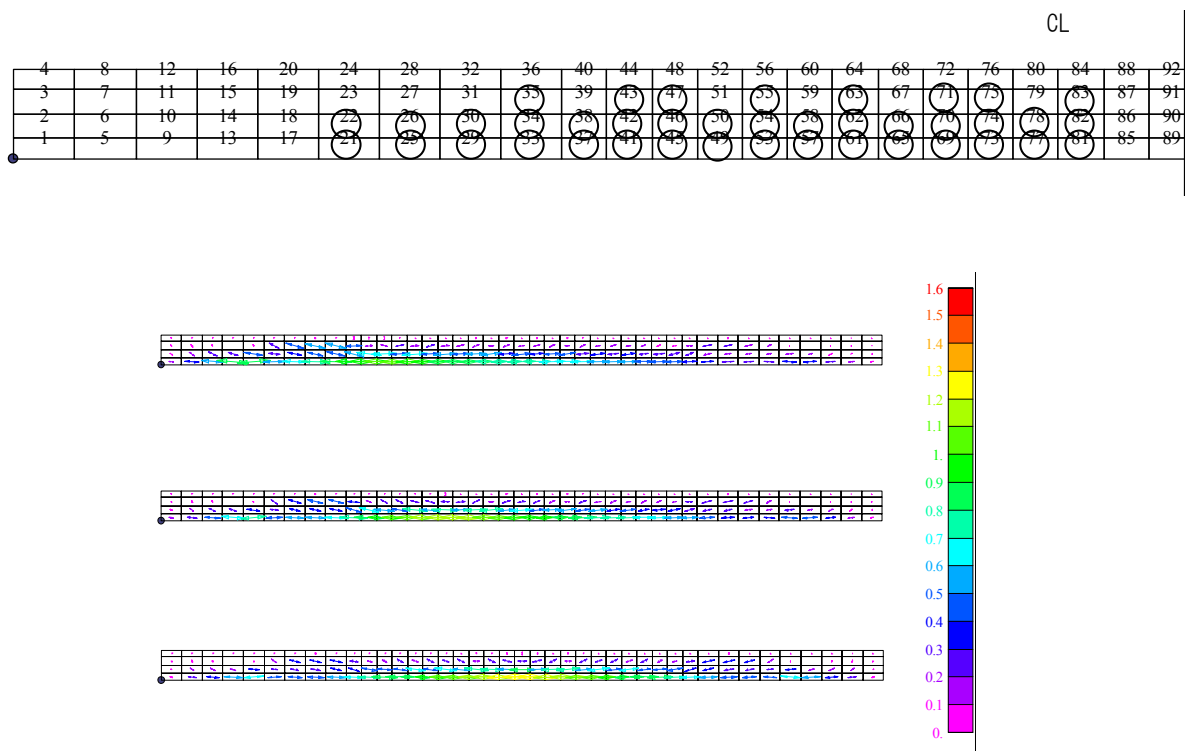


図 3.2-15(e) 床版支間直角方向の計算結果(step40)



Step48

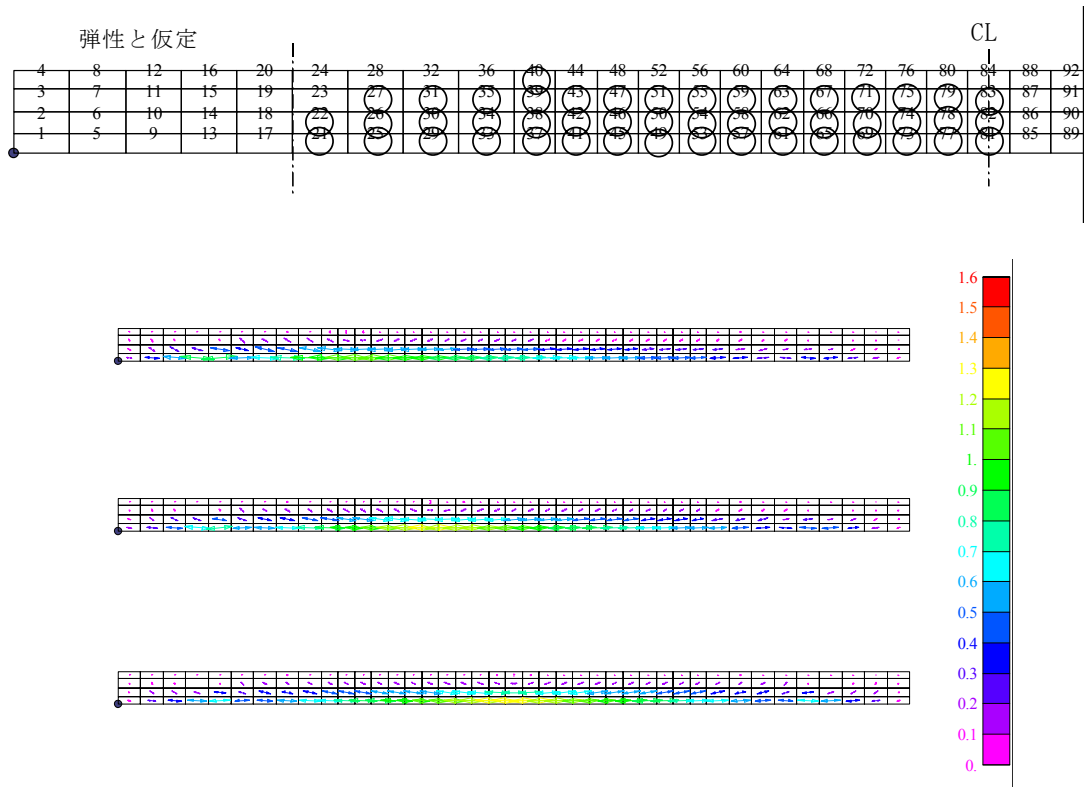


図 3.2-15(f) 床版支間直角方向の計算結果(step48)

床版支間直角方向での解析ステップと S-N 換算回数のグラフを図 3.2-16 に示す。床版支間方向に着目した解析同様、解析ステップ 40 (図 3.2-15(e)参照) 程度までは、換算回数が 0 回となっている。これは、それまで破壊した要素の応力が一度の移動载荷の中で計算される応力が破壊基準値  $3.0\text{N/mm}^2$  を超えるためであり、解析ステップ 40 を越えるまでは解析上疲労によって要素が破壊したのではなく、解析上静的に破壊基準値以上の応力による破壊が生じている。

解析ステップ 40 以降は、一回の移動载荷では破壊する要素がなく各要素で一移動载荷相当の応答量が複数回累積して破壊基準に達した要素が現れた時点でそれを破壊してモデルを再構築し次ステップの計算に移るといった計算手順が繰り返されており、各要素は解析上は疲労によって破壊している。

なお本ケースでは、解析ステップ 48 (図 3.2-15(f)参照) に示すように、床版上面の要素も疲労によって破壊しており、移動载荷と要素破壊による構造系の変化によって定点载荷やある構造状態を固定した場合の応力状態による評価方法では表現できない損傷の進行による影響も本解析によって考慮できる可能性があるものと考えられた。

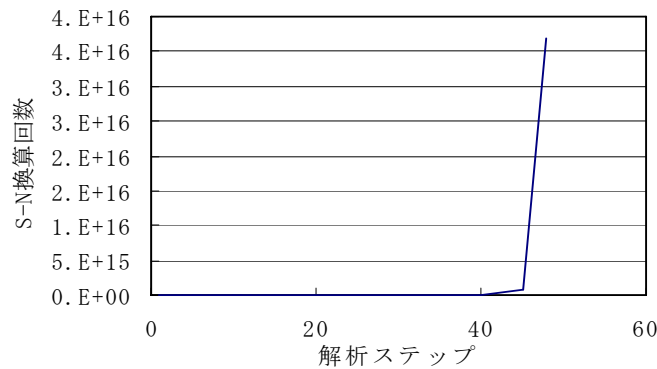


図 3.2-16 解析ステップと S-N 換算回数との関係 (床版支間直角方向)

#### 4) 平面モデル解析のまとめ

コンクリート床版の疲労による損傷の進展過程を定量的に評価できる手法を確立するために、床版コンクリートを細かく要素に分割し、それらが個別に応力の繰り返しの影響によって破壊するという破壊則を適用した解析を実施した。このような平面モデルによる解析で得られた結果は以下の通りである。

- ① 支間方向に着目したモデルの解析では、荷重の繰返しに伴い疲労破壊したと想定した要素の弾性係数を順次低下させた計算を行うことにより、床版下面の荷重直下の主引張応力度が卓越している断面から破壊する要素が増える現象がみられ、これらは供試体床版に対する輪荷重走行試験のひびわれの増加による床版の疲労損傷の進展と類似した傾向である。
- ② 支間直角方向に着目したモデルの解析では、繰返し荷重が移動して作用することにより、載荷位置の直下となる広い領域で床版下面側から要素の破壊が進行した。これは供試体床版に対する輪荷重走行試験のひびわれの増加による床版の疲労損傷の進展と類似した傾向である。

以上より、コンクリート床版の疲労耐久性の評価にあたって、床版コンクリートについては細かな要素に分割し、それぞれに疲労被害則を適用することで、コンクリート内部にひびわれが進展していく過程に近似した破壊の進行を表現できる可能性があることが示された。

特に、床版支間直角方向の解析では、荷重の移動の影響と順次要素破壊が生じて構造系が変化することの効果によって定点載荷では表現し得ない破壊進行の過程があらわれた。

次節以降では、これらを踏まえて本解析手法を 3 次元モデルに発展させ、解析的にコンクリート系の床版の疲労損傷の進展過程を擬似的に表現する手法について検討する。