

3.3 床版コンクリートの疲労被害則を用いた損傷評価の検討

3.3.1 概要

平面モデルによる検討では、床版を細かく要素分割し、それぞれの要素単位でコンクリート部分に着目して仮定する疲労被害側に則って損傷させることで、版の損傷仮定を表現できる可能性が確認できた。また、実橋の床版損傷を模擬するには解析的にも荷重載荷位置が移動することによる応力変化等の影響を考慮する必要があることが示唆された。

本節では、平面モデルでの検討を元に、3次元のモデルによるコンクリート系の床版の疲労損傷過程を解析的に評価できる手法の検討を行う。

3次元モデルでは、2次元と異なり、移動荷重の影響で床版コンクリートに発生する応力の方向は3次元的に変化するため解析で疲労過程を支配させる被害則も3次元的な応力等の変化が考慮されるものとする必要がある。また2次元モデル同様にひびわれの進展による破壊の進展過程の再現性とコンクリートの不均一性を考慮してモデル化する必要があるが、本検討では、対照実験に位置づけた内部鋼材に鉄筋のみが配置された昭和39年道路橋示方書準拠のRC床版の輪荷重走行試験供試体をモデル化した。支間方向に25分割、長さ方向に45分割、厚さ方向に5分割して1要素100×100×38mmのソリッド要素としている。モデルの概要を図3.3-1に示す。

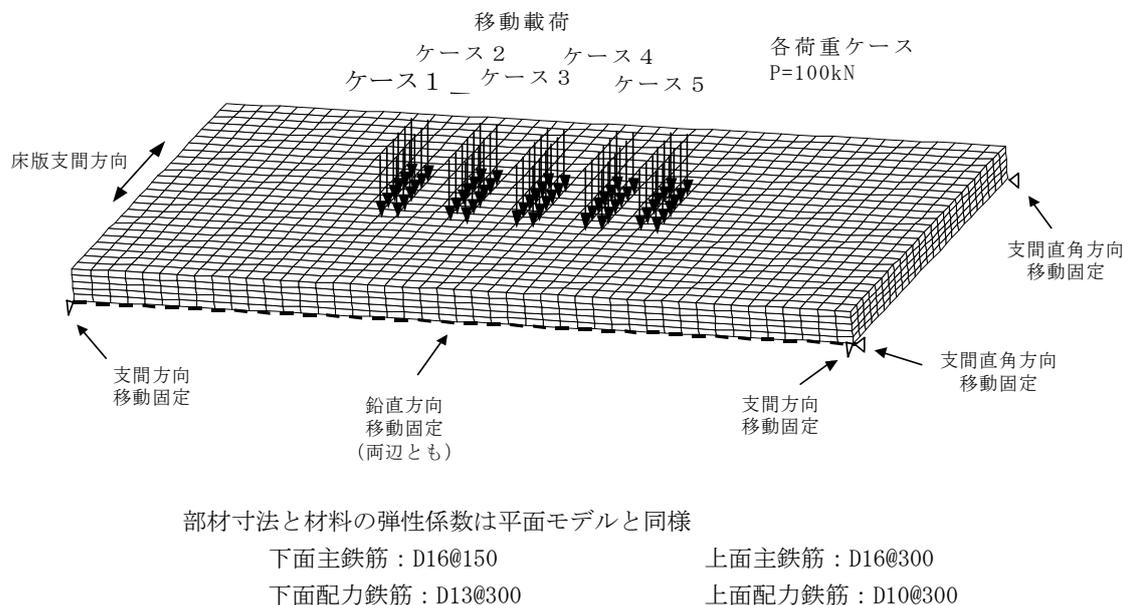


図 3.3-1 立体解析モデル

荷重は図 3.3-1 に示す位置に、節点集中荷重とし 5 カ所を順次載荷（以下の荷重ケース 1～5）し、得られる応答から荷重移動 1 回あたりの床版の応答を算出する。

内部鋼材の鉄筋は埋め込み鉄筋要素でモデル化し、平面モデル解析と同様に付着切れは考慮していない。境界条件は、床版両長辺側の最下段節点を鉛直方向に移動固定した。解析では、平面モデルの場合と同様、疲労破壊したと判定された要素の弾性係数を初期値に対して全方向に 1/10 に低下させてひびわれを生じた床版部分の剛性低下を模擬した。

3.3.2 疲労破壊条件の設定

実際の床版コンクリートの内部では、応力状態が 3 次元的に変動するため、その影響の蓄積が疲労現象と関連づけられるとした場合、解析モデルによる疲労過程の模擬においても 3 次元的に複雑に変化する主応力などの応答を被害則に考慮する必要がある。3 次元的に変化する応答変化とその回数を用いて疲労被害則を検討した類似の例がなく、本研究では、複数の被害則を設定して既往の輪荷重走行試験結果と解析結果の比較考察を行った。

2 章でレビューしたように材料の疲労に関しては荷重の影響が一方に卓越する条件に対して発生応力とその繰返し回数で整理されることが多い。しかし床版構造に対する移動荷重の影響の場合、荷重の移動に伴って床版各部で主応力の方向も 3 次元的に変化するため応答の影響をある方向成分のみに着目して評価することは適切でない可能性が大きい。

本研究では、荷重の移動に伴う床版コンクリートの各部の直応力、主応力の応力成分、要素単位での弾性ひずみエネルギーなどをコンクリート要素単位での履歴量がある値になるとそのコンクリート要素が疲労破壊する（累積被害則）ととらえる物理量として仮定して、種々の累積被害則を設定し、それらに基づく 3 次元数値解析結果と実験結果との比較を行った。具体的には以下の通りである。

- ①直応力を変動量とした場合： 3.2 に示す、土木学会式を用いる
3.2 で示す、Cornelissen らの提案式³⁾を用いる
- ②弾性ひずみエネルギーの場合：一移動載荷あたりの着目した物理量の変動量(S)がその大きさに応じて一定のべき乗則に従った影響度で繰返し回数(N)分だけ損傷度として蓄積されるとした被害則（いわゆる S-N 線図）を設定

弾性ひずみエネルギー量を変動量とした場合の S-N 線図の設定は、コンクリート標準示方書の形状を基本として、縦軸に上記直応力成分や弾性ひずみエネルギーを用いた疲労破壊条件を仮定し、横軸を疲労寿命（繰返し回数）の対数とした。

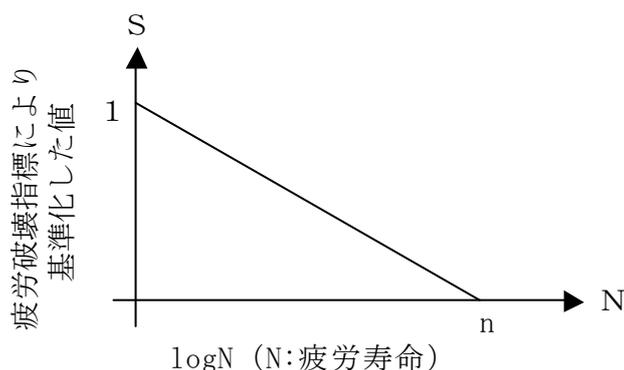


図 3.3-2 弾性ひずみエネルギー量を変動量とした場合の S-N 線図

平面モデルでは、床版コンクリートのコンクリート要素部分の内、破壊基準に達したもののから要素の弾性係数を低減することで破壊の影響を表現したが、3次元モデルの場合も基本的な考え方は同じとし、設定した破壊基準に達した要素から要素の剛性を低下させることでひびわれの発生などの影響を模擬する。

なお、疲労に影響する物理量の変化として着目する応力変化などについて方向成分毎に独立して扱くと、ある方向では破壊基準に達するもののそれ以外の方向では破壊基準に達していないという現象が生じる。本研究では要素の疲労破壊などの物理的な特性や性状の変化を方向別に独立に扱う場合と要素単位で評価する場合の両方について検討を行った。

本研究でコンクリート要素の疲労破壊の条件として検討した主なケースを表 3.3-1 に示す、応力度を基本としたケース（Cornelissen の 1 ケース）と、ひずみエネルギーを基本としたケース（エネルギー算出式で 2 ケース、エネルギー量算出において全応力振幅量を考慮したケースと、引張り応力を考慮したケース、破壊基準値は圧縮破壊を基準としたケースと、引張り破壊を基準としたケース）の合計 6 ケースである。

表 3.3-1 計算ケース

ケース	弾性係数低下の条件	S-N 線図の傾き
①	引張応力度	-*1
②	垂直応力度による全弾性ひずみエネルギー*2	8
③	垂直応力度とせん断応力度による全ひずみエネルギー*2	8
④	引張応力度とせん断応力度による全ひずみエネルギー*2	8
⑤	引張応力度とせん断応力度による全弾性ひずみエネルギー*2	8
⑥	引張応力度とせん断応力度による全弾性ひずみエネルギー*3	8
⑦	主引張応力による全弾性ひずみエネルギー*3	8

*1 cornelissen らの式を使用した。

*2 ひずみエネルギーの基準値 24N/mm^2 とした。

*3 ひずみエネルギーの基準値を 2.5N/m^2 とした。

破壊と関連づける物理量としては座標系の取り方等には依存しないスカラー量（エネルギー量など）とすべきであり、垂直応力度に着目したケースでは、座標の取り方にも依存して結果がことなるため破壊と関連づける物理量としては必ずしも適切でないと言えるが本研究では被害則として着目すべき物理量を類推するために解析ケースに加えて評価した。

また圧縮側と引張側で損傷度としての考慮の有無を変えたケースを設定したが、コンクリート圧縮強度と引張強度の差を考慮すると引張破壊に必要なエネルギーと圧縮破壊に必要なエネルギーには大きな差異があると考えられることも反映させたものである。

ケース①は、床版の輪荷重走行試験中において、床版上面側でもコンクリートにひび割れが発生することから、主に圧縮を受ける領域でも、圧縮応力による疲労が累積し、それに引張応力の影響も加わることにより、コンクリートに疲労破壊が生じる可能性があるため設定したものである。圧縮応力の影響も考慮したコンクリートの S-N 線図には、3.2 で示した Cornelissen らにより提案された式を用いた。

ケース②は、コンクリートの破壊は変形（体積変化）が主因と仮定した場合であり、圧縮および引張応力度により生じるひずみエネルギー振幅相当を疲労破壊の指標とした。この場合、応力変動分は直応力成分($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)のみによるものとした。

ケース③は、ケース②に加えてせん断変形による影響を考慮した。

ケース④は、ケース③から圧縮応力度の影響を除いた。

ケース⑤は、コンクリートの破壊が引張応力度による変形(伸び)が主因と仮定した。

以上のケース②～⑤では S-N 線図をコンクリート圧縮強度 24N/mm^2 と設定し仮定した。

ケース⑥は、ケース④と同様に、コンクリートの破壊は引張応力とせん断応力度による変形が主因と仮定しているが、S-N 線図の設定でケース④と異なり、コンクリート強度を引張強度相当の 2.5N/mm^2 とした。

ケース⑦は、主引張応力変化量によるひずみエネルギーがコンクリートの破壊の主因と仮定した場合である。ケース②～⑤ですべてあるいは一部の応力成分を用いた場合と比較すると、主引張応力に寄与するすべての応力成分を取り入れ、主引張応力によるひずみエネルギー振幅のみがコンクリートの破壊に寄与すると仮定した形となっていると思われる。

本モデルはソリッド要素数が約 5600 個となっており、モデル形状と荷重載荷位置の対称性から、総ソリッド要素数の約 1/4 の回数の計算ですべての要素が破壊したと判定される。そのため、解析は 1300 ステップまで実施することとした。

各ケースでの計算仮定は 3.3.3 以降に詳細を示す。

3.3.3 3次元モデルの解析結果

1) ケース①

本ケースでは、破壊基準を「コンクリート要素は引張応力度と圧縮応力度の変動の累積で破壊する」とする。

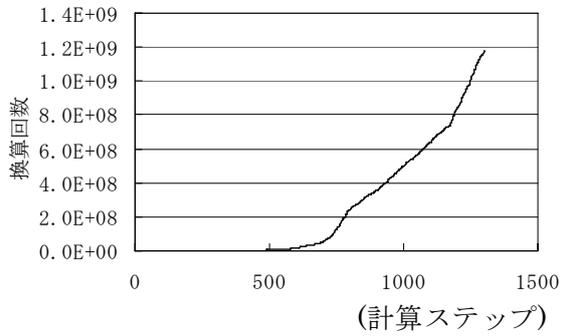
本ケースの破壊基準は、次式の Cornelissen らの疲労曲線³⁾を準用した。ただし、本検討の解析では式中の ± 1.45 の項は無視している。

$$\log N = 9.46 - 7.71 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ct}} - 3.37 \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_c} \pm 1.45 \quad \dots \quad (\text{式 3.3-1})$$

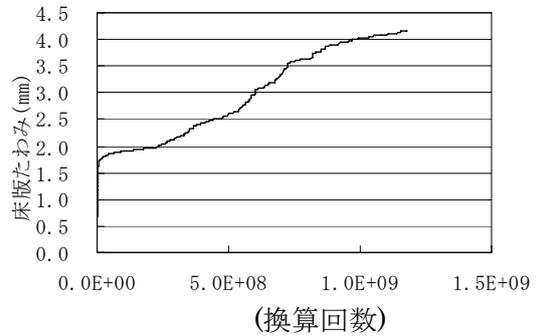
この疲労破壊基準は、一軸のシリンダー試験の結果から導かれたものであり、床版のような複雑に変化する多軸応力下に対する適用性は不明である。ただし応力の発生軸毎にそれぞれ独立して疲労ダメージが蓄積することで破壊に至るのであれば、応力方向があまり変化しない部分の要素などでは実現象に近い結果が得られる可能性があるものと考えた。

なお荷重載荷位置によってそれぞれの要素の発生応力の向きが複雑に変化するため、本検討では要素毎に発生応力を直交する3方向成分に分離し、方向毎に独立に破壊基準を適用する。そしていずれかの方向の累積損傷度が1に達したときにそのコンクリート要素が破壊したものとして全ての方向に対して弾性係数を一様に低下させて次ステップに移行するとした計算を行った。

計算結果と、換算回数との関係を図 3.3-3 に示す。

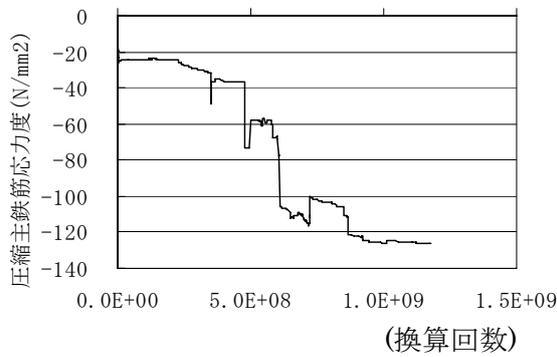


計算ステップと換算回数

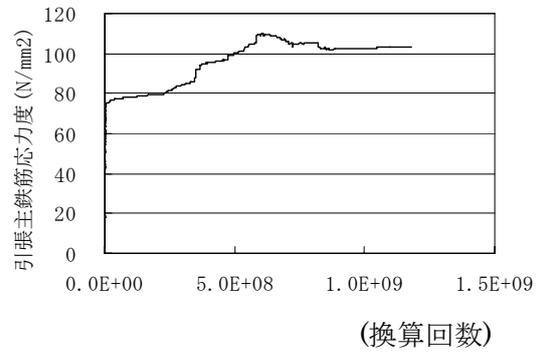


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

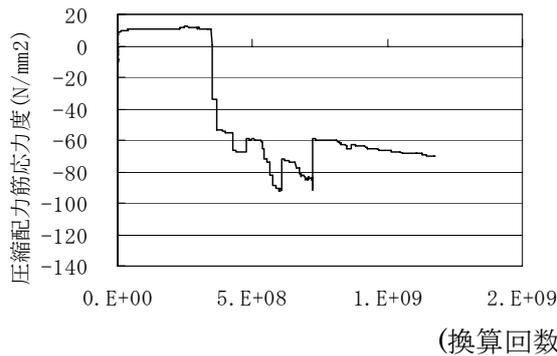


換算回数と上面主鉄筋応力度

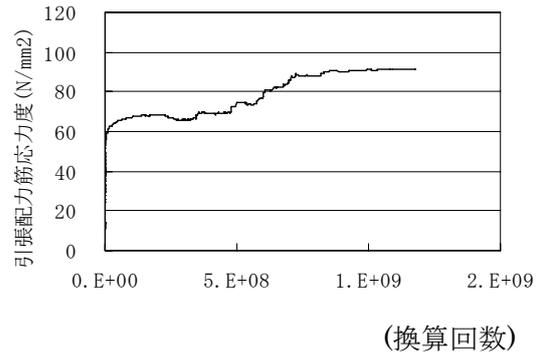


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-3 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。図は左端の床版最下層から右にむかって上層の要素を示している。右端が最上面の層である。図中黒色の要素「■」がその計算ステップで初めて破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊していた要素を示している。

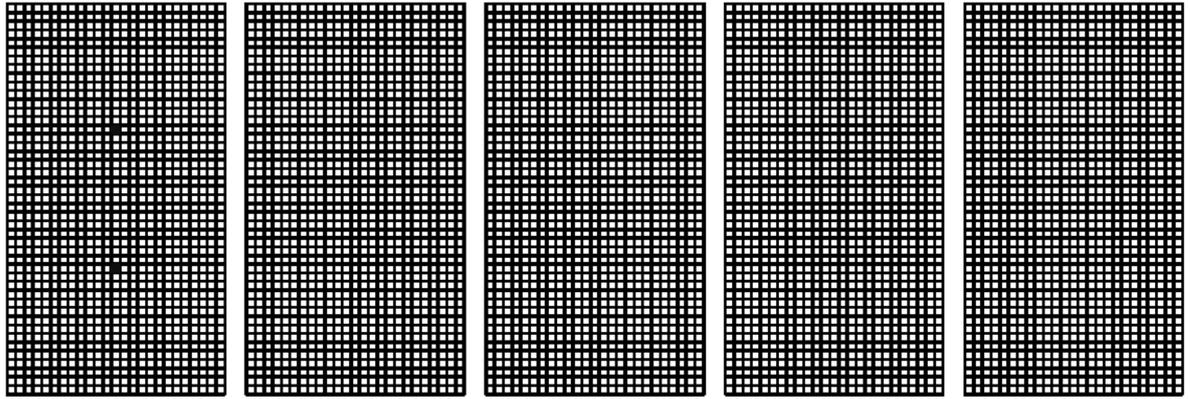


図 3.3-4(1) 計算ステップ 1

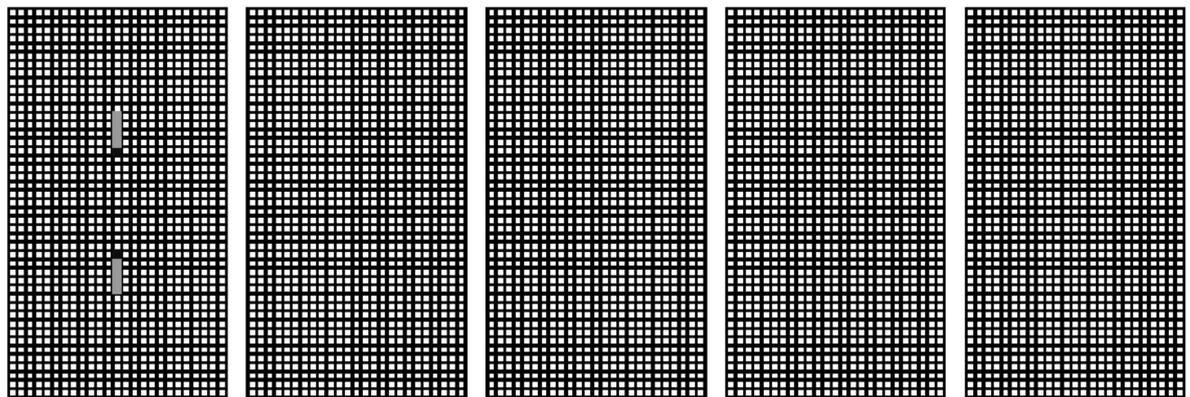


図 3.3-4(2) 計算ステップ 5

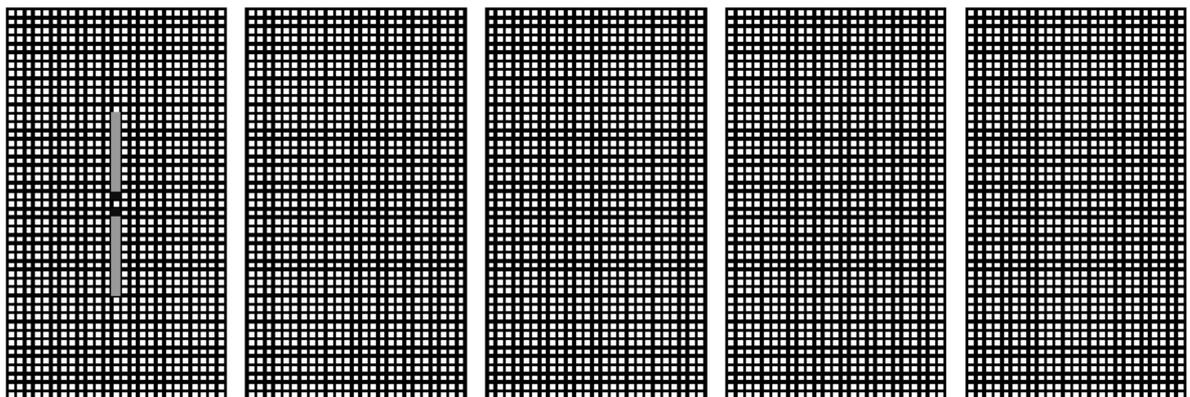


図 3.3-4(3) 計算ステップ 10

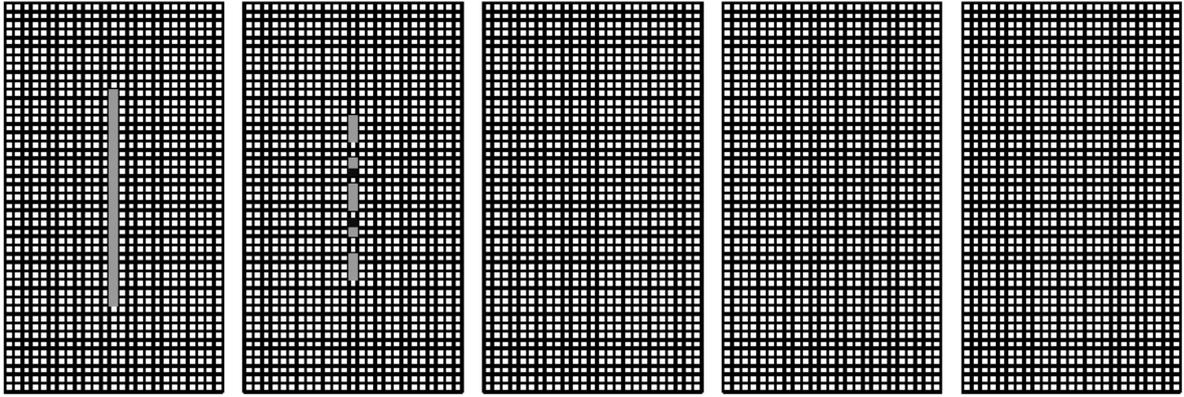


図 3.3-4(4) 計算ステップ 20

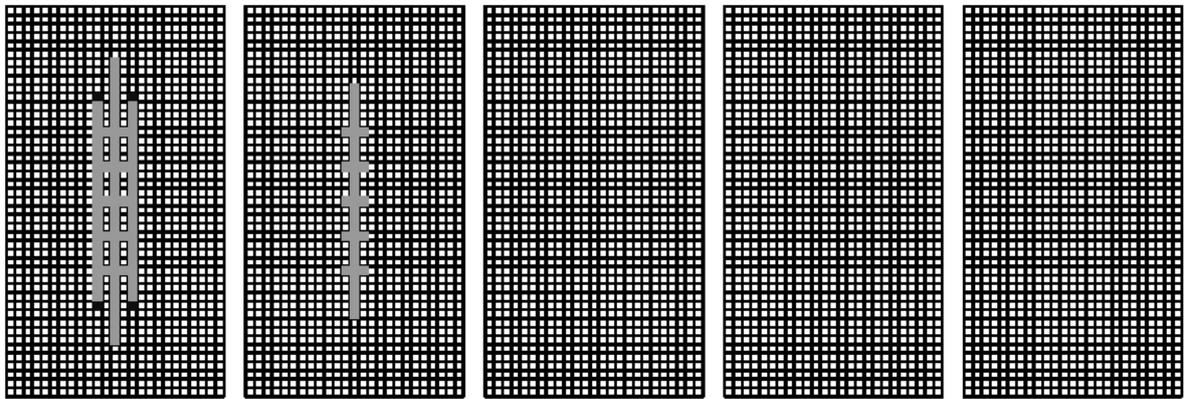


図 3.3-4(5) 計算ステップ 50

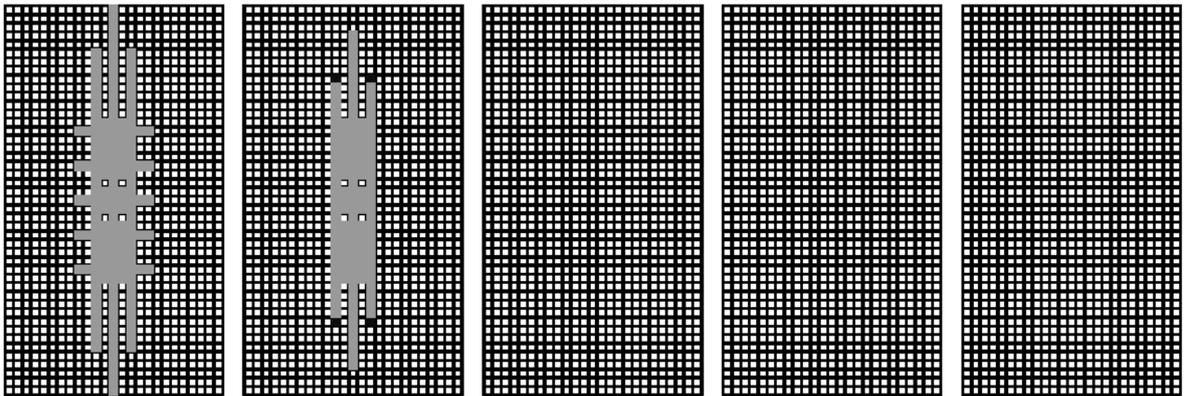


図 3.3-4(6) 計算ステップ 100

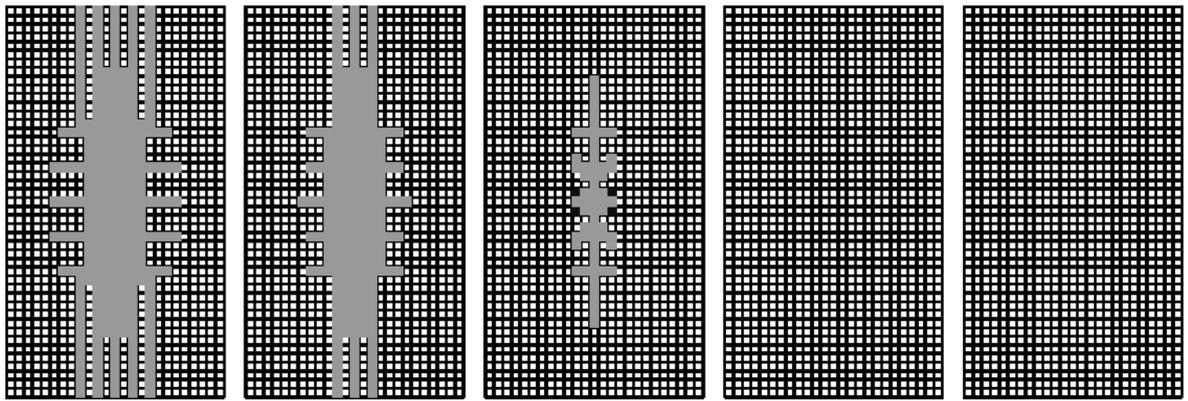


図 3.3-4(7) 計算ステップ 200

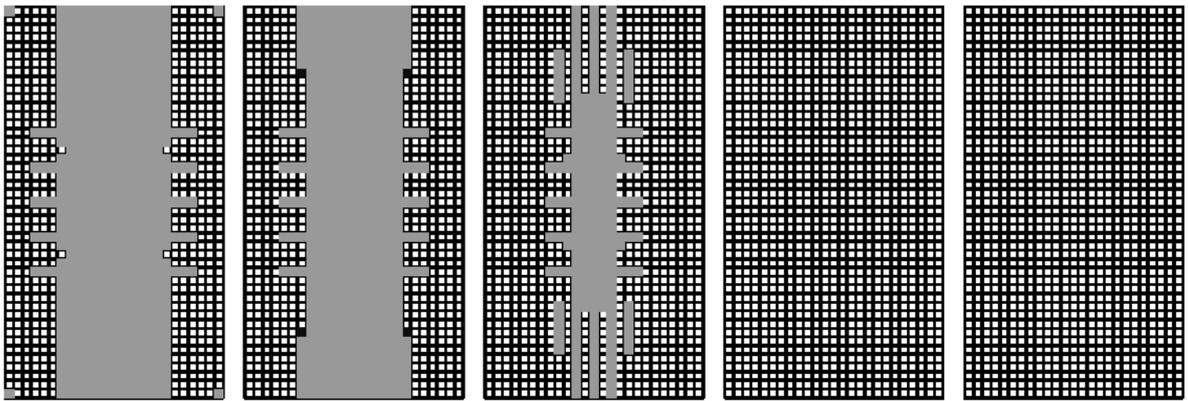


図 3.3-4(8) 計算ステップ 400

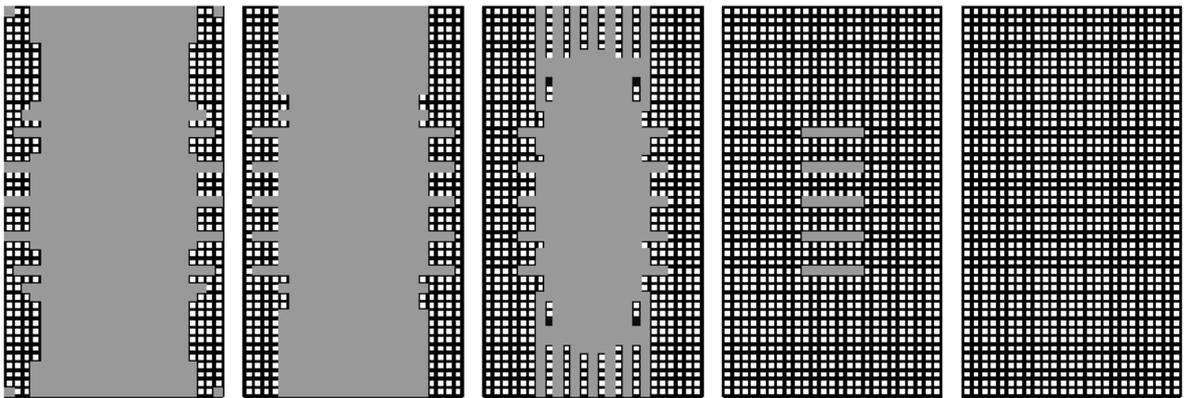


図 3.3-4(9) 計算ステップ 600

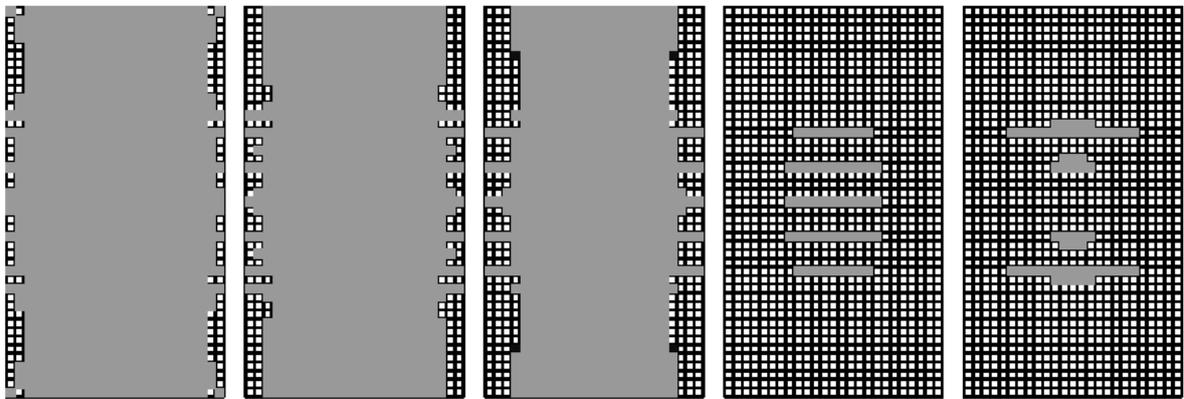


図 3.3-4(10) 計算ステップ 800

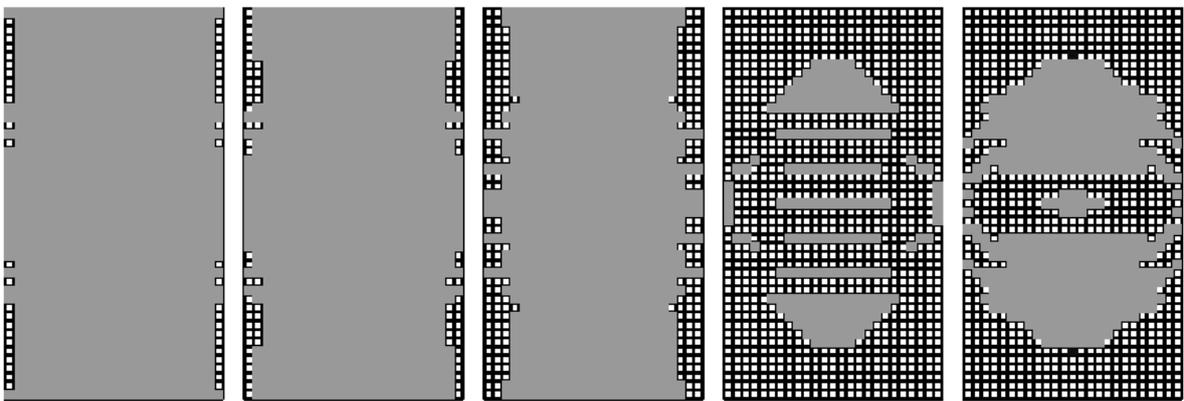


図 3.3-4(11) 計算ステップ 1000

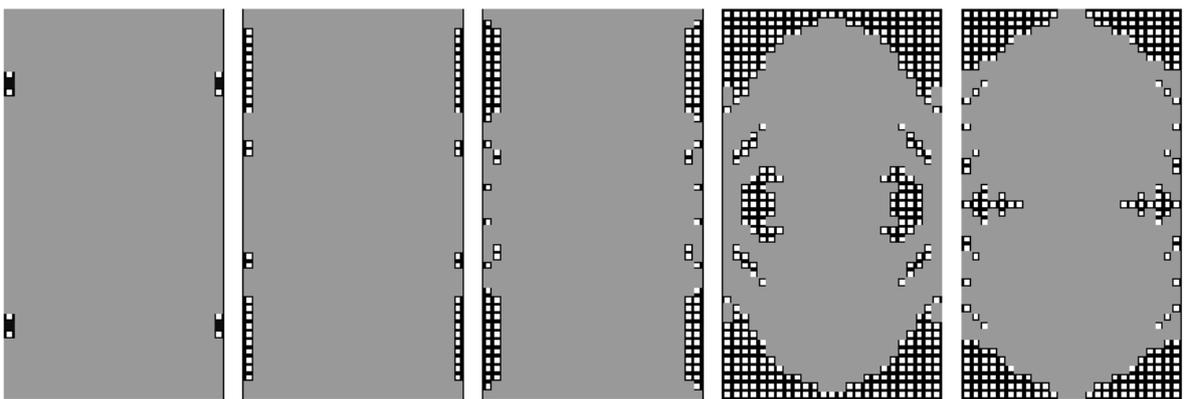


図 3.3-4(12) 計算ステップ 1300

以上のおり、要素の破壊は、床版下面からはじまり徐々に上方に向かって拡大していく結果となった。

しかし、床版のたわみは輪荷重走行試験と異なり、初期のたわみが急増する段階の後には最終段階まで増加速度が低下する段階を経ないまま全体の破壊まで推移した。

2) ケース②

本ケースは、破壊基準としてコンクリート要素は体積変化の累積で破壊するとした。これはコンクリート要素への疲労ダメージの蓄積が発生応力の方向にかかわらず、結果として要素内部のコンクリート材料にどれだけの体積変化を生じさせたのかに関係すると捉えたものであり、要素の微視的な構造が応力の変化に応じて変形・変位させられるためにその要素に投入されたエネルギーがひび割れやコンクリート要素内の疲労破壊につながる劣化に消費されると考えたものである。実際のモデルでは次式のようにエネルギー量を定式化して荷重の移動に伴う変化量を累積させている。

要素のひずみの変化によるエネルギー量 $U_{\delta t}$ は

$$U_{\delta t} = \frac{1}{2}\sigma_{\delta x}\varepsilon_{\delta x} + \frac{1}{2}\sigma_{\delta y}\varepsilon_{\delta y} + \frac{1}{2}\sigma_{\delta z}\varepsilon_{\delta z} \dots \dots \text{(式 3.3-2)}$$

よって、荷重を 1→2→3→4→5 と載荷した場合の累積変化エネルギー量 ΣU は、

$$\begin{aligned} \Sigma U &= 2 \times (U_{2-1} + U_{3-2} + U_{4-3} + U_{5-4}) \dots \dots \text{(式3.3-3)} \\ U_{2-1} &= \frac{1}{2}(U_{x2} - U_{x1})(\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}) + \frac{1}{2}(U_{y2} - U_{y1})(\varepsilon_{y2} - \varepsilon_{y1}) + \frac{1}{2}(U_{z2} - U_{z1})(\varepsilon_{z2} - \varepsilon_{z1}) \\ U_{3-2} &= \frac{1}{2}(U_{x3} - U_{x2})(\varepsilon_{x3} - \varepsilon_{x2}) + \frac{1}{2}(U_{y3} - U_{y2})(\varepsilon_{y3} - \varepsilon_{y2}) + \frac{1}{2}(U_{z3} - U_{z2})(\varepsilon_{z3} - \varepsilon_{z2}) \\ U_{4-3} &= \frac{1}{2}(U_{x4} - U_{x3})(\varepsilon_{x4} - \varepsilon_{x3}) + \frac{1}{2}(U_{y4} - U_{y3})(\varepsilon_{y4} - \varepsilon_{y3}) + \frac{1}{2}(U_{z4} - U_{z3})(\varepsilon_{z4} - \varepsilon_{z3}) \\ U_{5-4} &= \frac{1}{2}(U_{x5} - U_{x4})(\varepsilon_{x5} - \varepsilon_{x4}) + \frac{1}{2}(U_{y5} - U_{y4})(\varepsilon_{y5} - \varepsilon_{y4}) + \frac{1}{2}(U_{z5} - U_{z4})(\varepsilon_{z5} - \varepsilon_{z4}) \dots \dots \text{(式3.3-4)} \end{aligned}$$

ここで、() 内は変化量であり、全て同符号 (+) とする。

このエネルギー量 ΣU が最大の要素から破壊するとして、解析を進める。

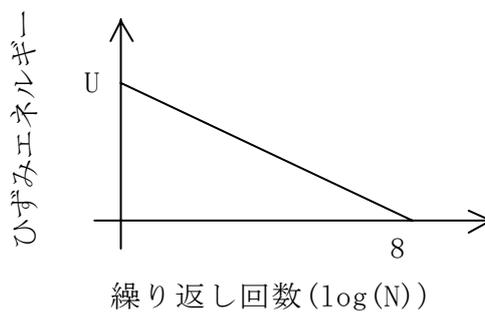
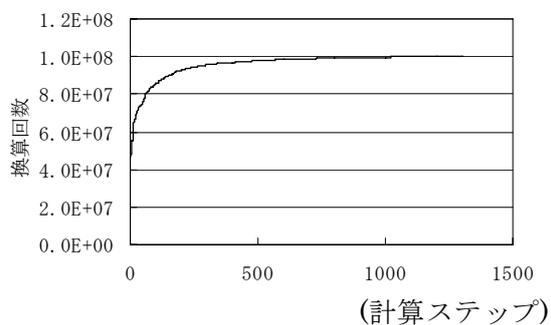


図 3.3-5 解析で使用了した疲労曲線

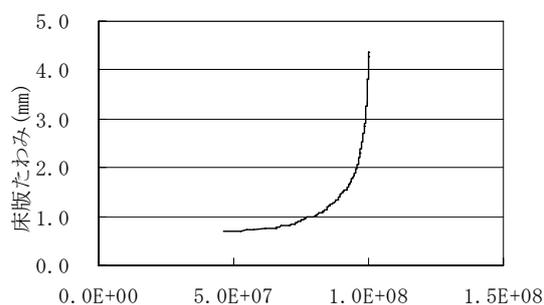
ここで、U の破壊基準はコンクリートの一般的な設計基準強度とした。

$$U = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon = \frac{1}{2E}\sigma^2 = \frac{24^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.01125 \text{ (N/mm}^2\text{)} \dots \dots \text{(式 3.2-5)}$$

計算結果と、換算回数との関係を図 3.2.6 に示す。

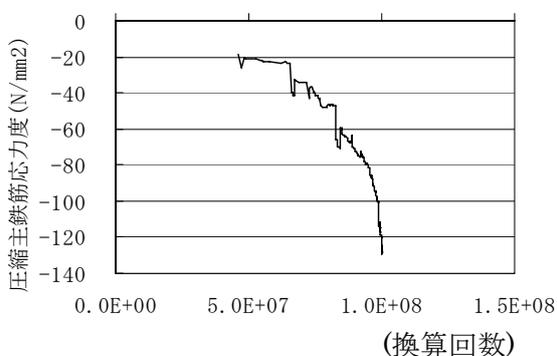


計算ステップと換算回数

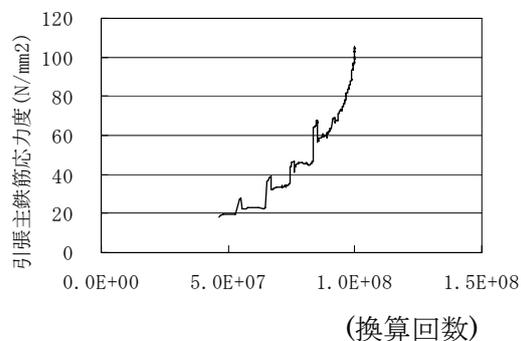


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

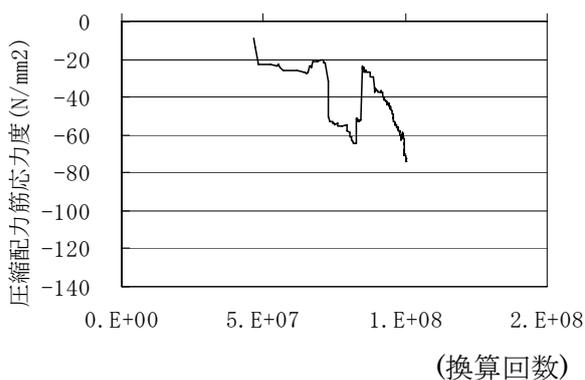


換算回数と上面主鉄筋応力度

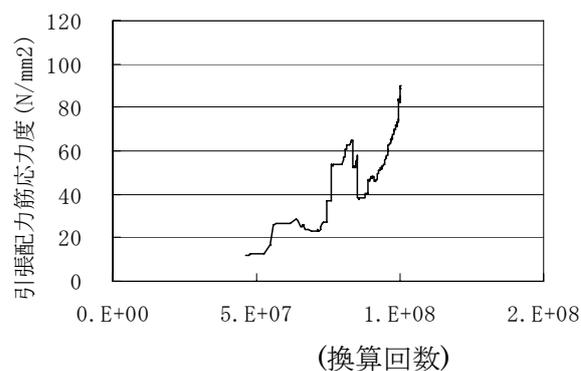


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-6 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

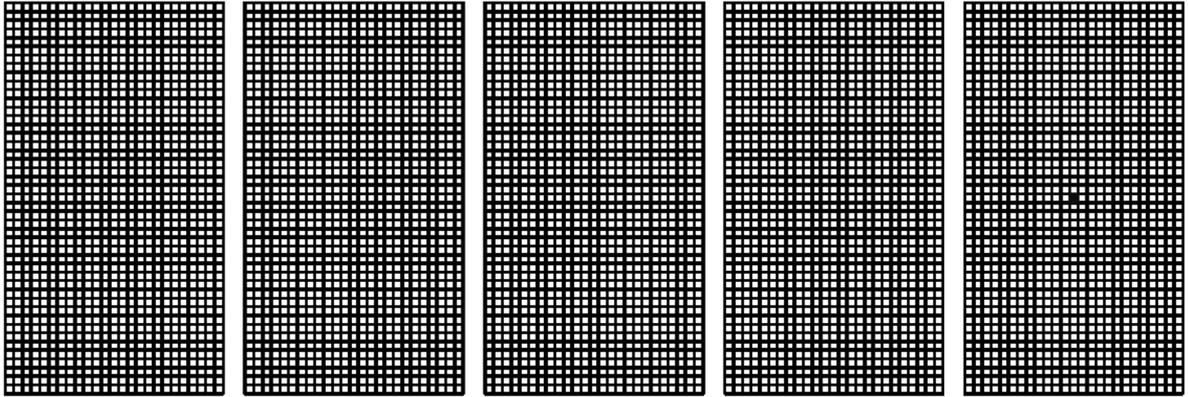


図 3.3-7(1) 計算ステップ 1

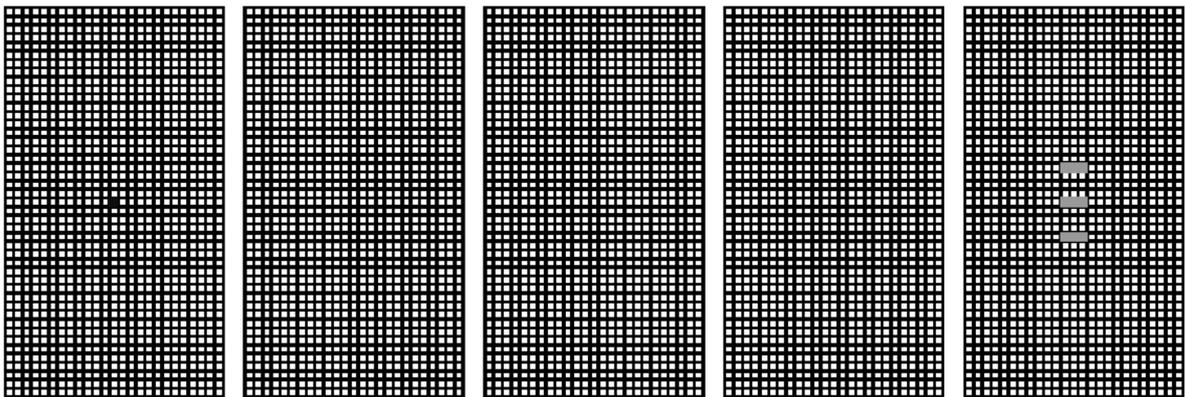


図 3.3-7(2) 計算ステップ 5

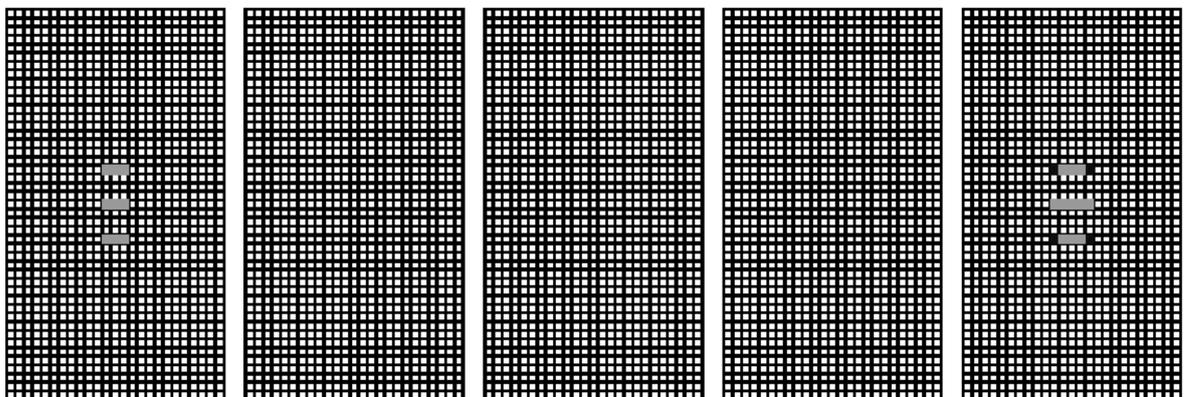


図 3.3-7(3) 計算ステップ 10

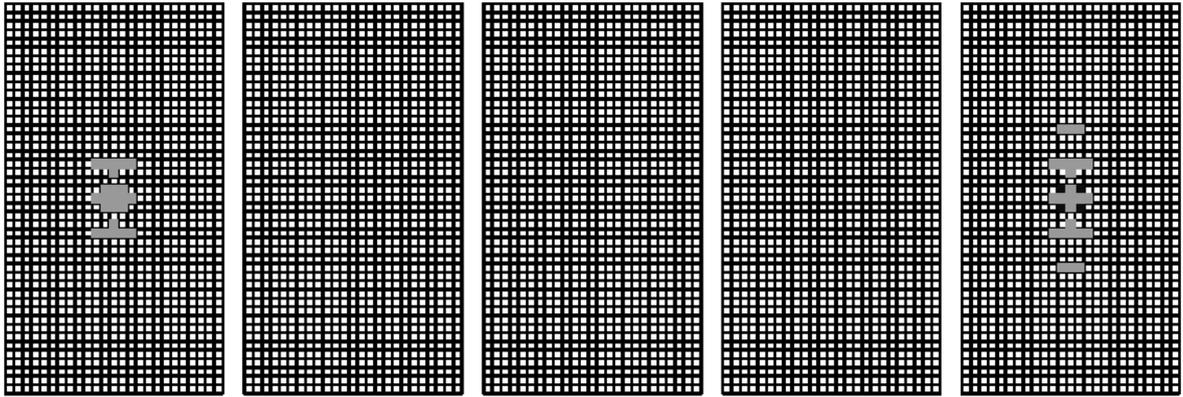


図 3.3-7(4) 計算ステップ 20

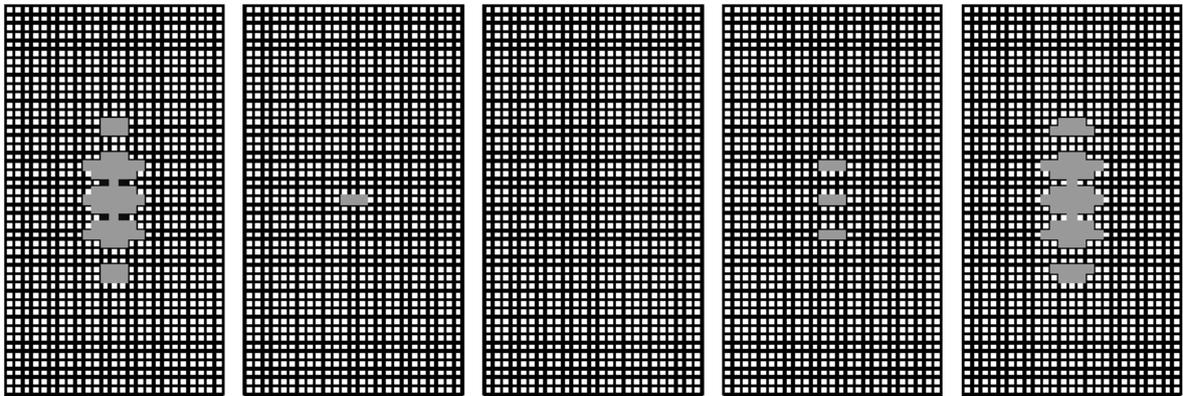


図 3.3-7(5) 計算ステップ 50

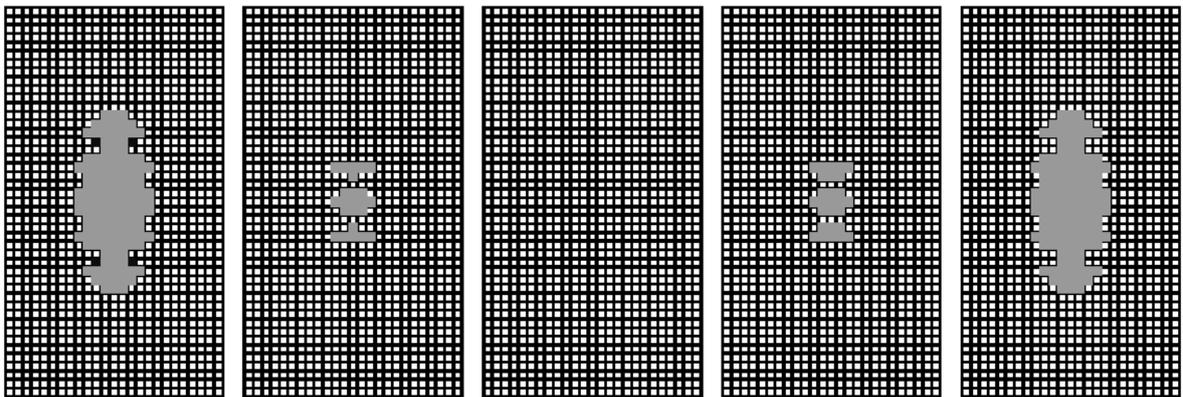


図 3.3-7(6) 計算ステップ 100

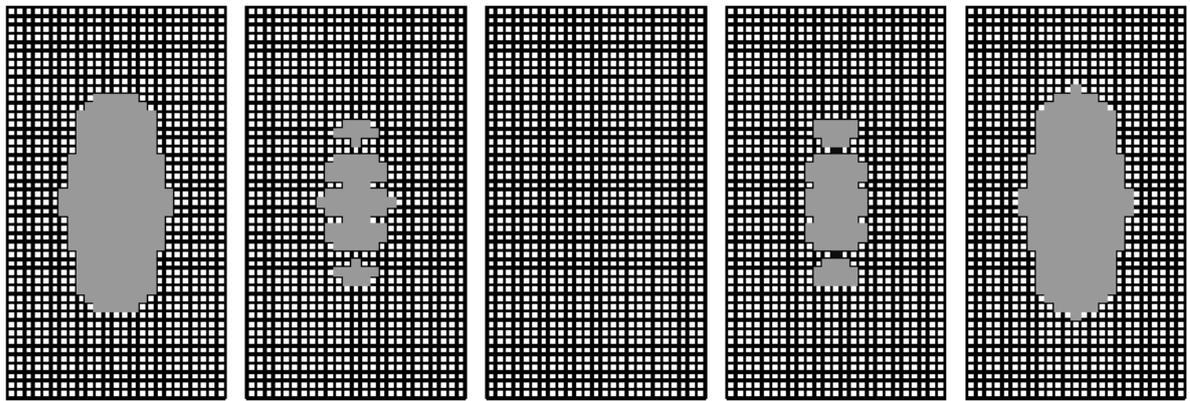


図 3.3-7(7) 計算ステップ 200

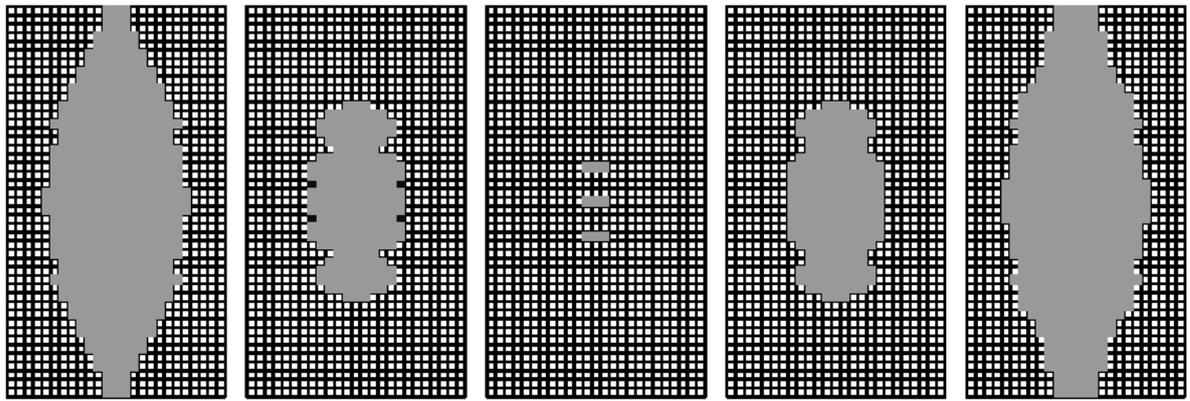


図 3.3-7(8) 計算ステップ 400

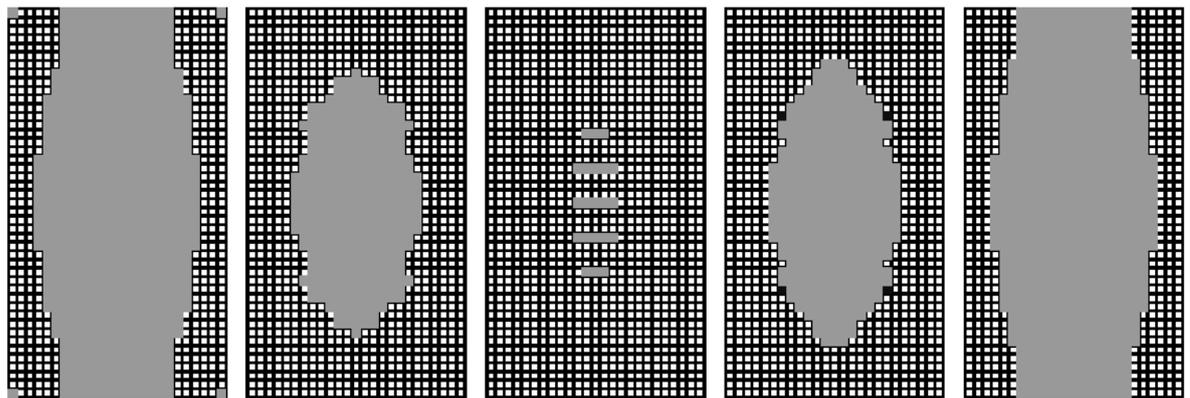


図 3.3-7(9) 計算ステップ 600

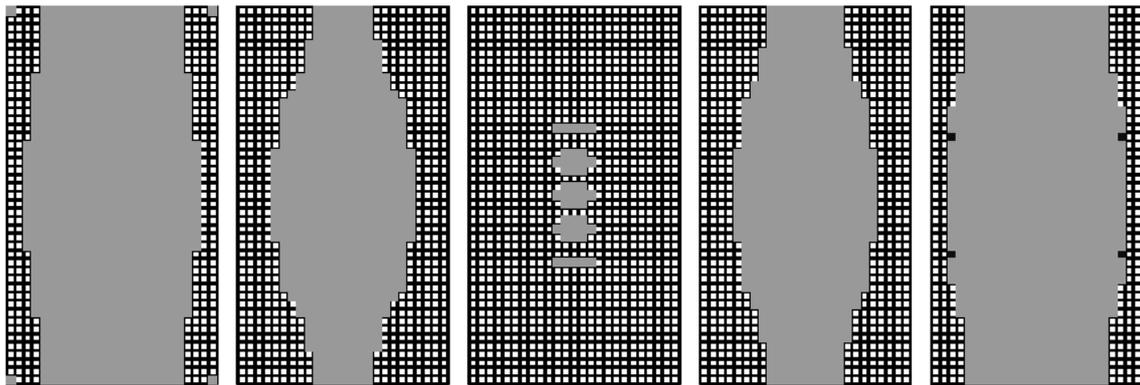


図 3.3-7(10) 計算ステップ 800

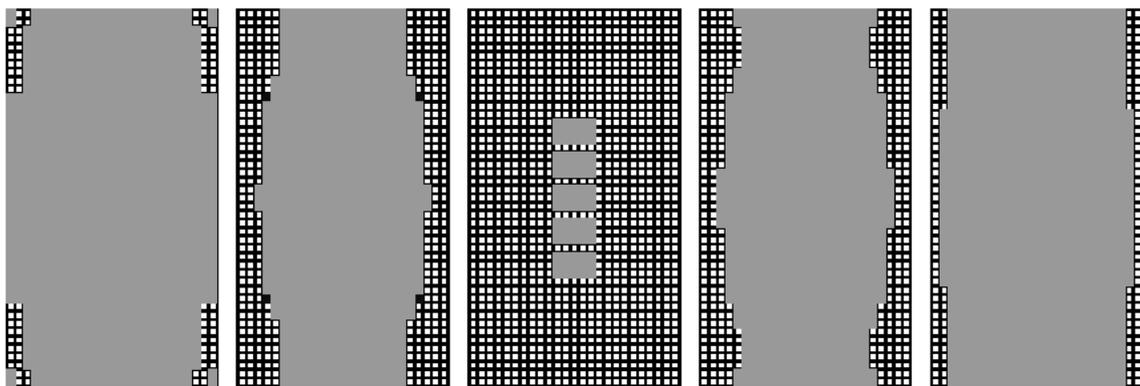


図 3.3-7(11) 計算ステップ 1000

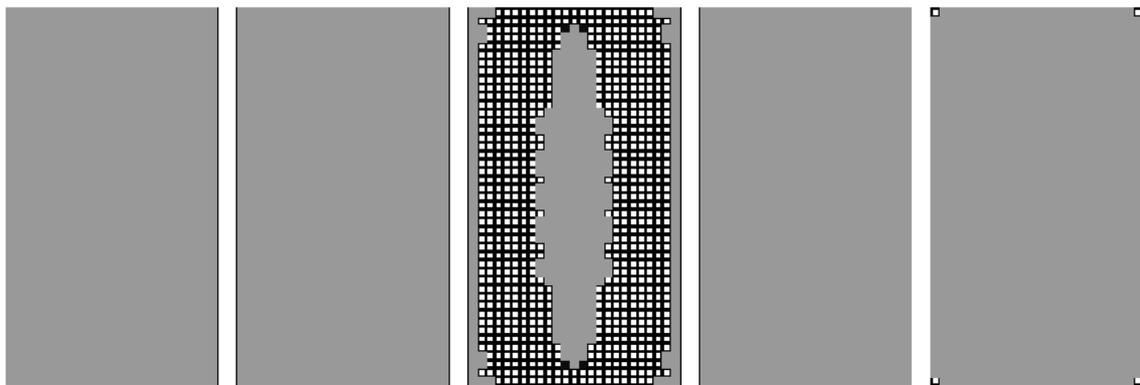


図 3.3-7(12) 計算ステップ 1300

以上より、このケースでは、疲労ダメージの蓄積として評価するエネルギーの累積を、全応力量（圧縮、引張）から算出し、圧縮方向と引張方向ともに同じ破壊基準とした。解析では圧縮側（床版上面）と引張側（床版下面）でほとんど同じ速度で要素の破壊が進行する結果となった。実際の疲労損傷過程と比較すると、少なくとも引張側と圧縮側では要素に同じ体積ひずみ履歴が与えられても引張側が先行して破壊していることとなり、コンクリート要素の疲労には圧縮方向のひずみ変化と引張方向へのひずみ変化で影響度に相違があることが伺える。

3) ケース③

本ケースは、ケース②が垂直応力度による要素のひずみのみにより体積変化に伴う状態変化を着目したのに対し、体積変化だけで捉えた場合は考慮されないせん断応力度による要素変形も考慮したものであり、垂直応力度とせん断応力度のそれぞれによって生じる要素変形と関連づけた要素のエネルギー変化量の累積によって破壊するものとした。

要素の弾性ひずみとエネルギーの関係より、エネルギー量 U_{δ_i} を以下のように設定した。

$$U = \frac{1}{2E}(\sigma_{\delta_x}^2 + \sigma_{\delta_y}^2 + \sigma_{\delta_z}^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_{\delta_y}\sigma_{\delta_z} + \sigma_{\delta_z}\sigma_{\delta_x} + \sigma_{\delta_x}\sigma_{\delta_y}) + \frac{1}{2G}(\tau_{\delta_{yz}}^2 + \tau_{\delta_{zx}}^2 + \tau_{\delta_{xy}}^2) \dots \text{(式 3.3-10)}$$

よって、荷重を 1→2→3→4→5 と載荷した場合の累積変化エネルギー量 ΣU は、

$$\Sigma U = 2 \times (U_{2-1} + U_{3-2} + U_{4-3} + U_{5-4}) \dots \text{(式 3.3-11)}$$

$$U_{2-1} = \frac{1}{2E} \left\{ (\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1})^2 + (\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})^2 + (\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1})^2 \right\} \\ - \frac{\nu}{E} \left\{ (\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})(\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1}) + (\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1})(\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1}) + (\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1})(\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1}) \right\} \\ + \frac{1}{2G} \left\{ (\tau_{yz_2} - \tau_{yz_1})^2 + (\tau_{zx_2} - \tau_{zx_1})^2 + (\tau_{xy_2} - \tau_{xy_1})^2 \right\} \\ U_{3-2} = \frac{1}{2E} \left\{ (\sigma_{x_3} - \sigma_{x_2})^2 + (\sigma_{y_3} - \sigma_{y_2})^2 + (\sigma_{z_3} - \sigma_{z_2})^2 \right\} \\ - \frac{\nu}{E} \left\{ (\sigma_{y_3} - \sigma_{y_2})(\sigma_{z_3} - \sigma_{z_2}) + (\sigma_{z_3} - \sigma_{z_2})(\sigma_{x_3} - \sigma_{x_2}) + (\sigma_{x_3} - \sigma_{x_2})(\sigma_{y_3} - \sigma_{y_2}) \right\} \\ + \frac{1}{2G} \left\{ (\tau_{yz_3} - \tau_{yz_2})^2 + (\tau_{zx_3} - \tau_{zx_2})^2 + (\tau_{xy_3} - \tau_{xy_2})^2 \right\} \dots \text{(式 3.3-12)}$$

U_{4-3} 、 U_{5-4} についても同様に算出する。

ここで、() 内は変化量であり、全て同符号 (+) とする。

このエネルギー量 ΣU が最大の要素から破壊するとして、解析を進める。

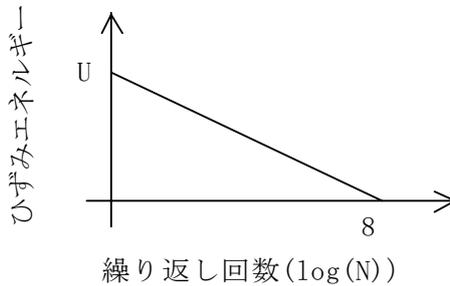
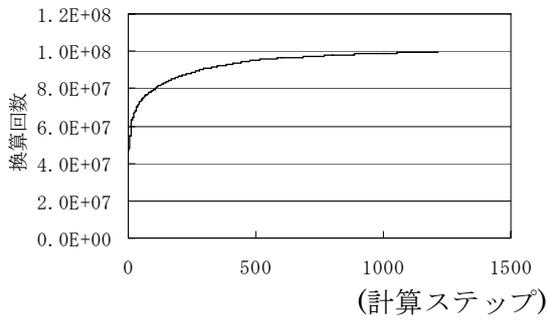


図 3.3-8 解析で使用了した疲労曲線

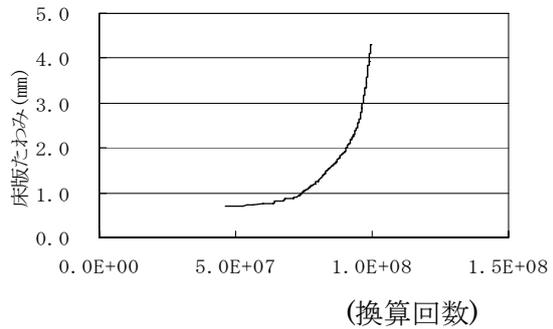
ここで、 U の破壊基準はコンクリートの一般的な設計基準強度とした。

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E} \sigma^2 = \frac{24^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.01125 \text{ (N/mm}^2\text{)} \dots \text{(式 3.3-13)}$$

計算結果と、換算回数との関係を図 3.3-9 に示す。

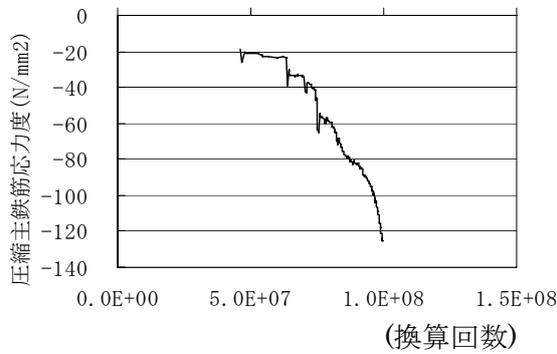


計算ステップと換算回数

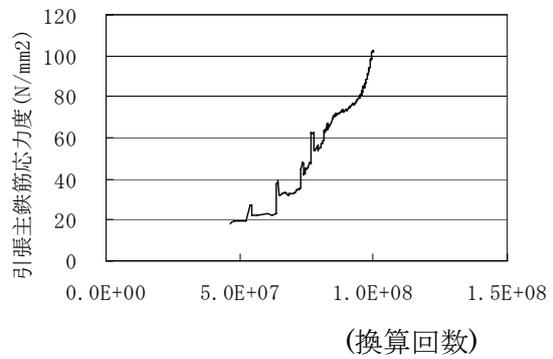


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

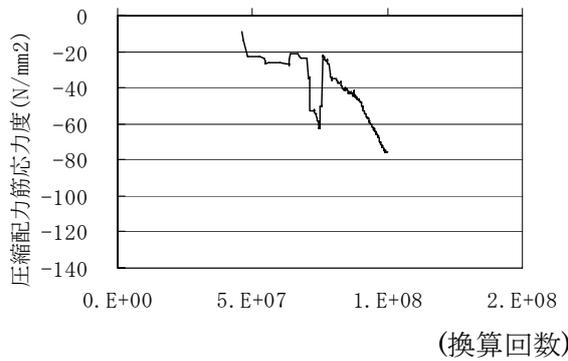


換算回数と上面主鉄筋応力度

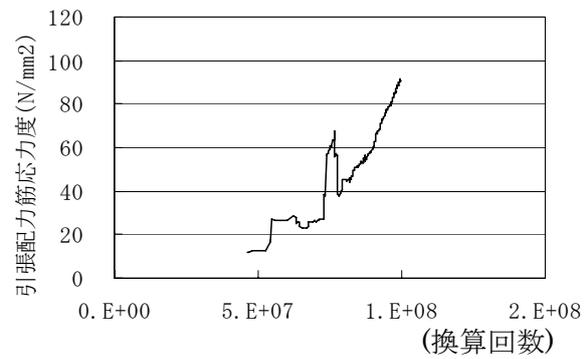


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-9 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

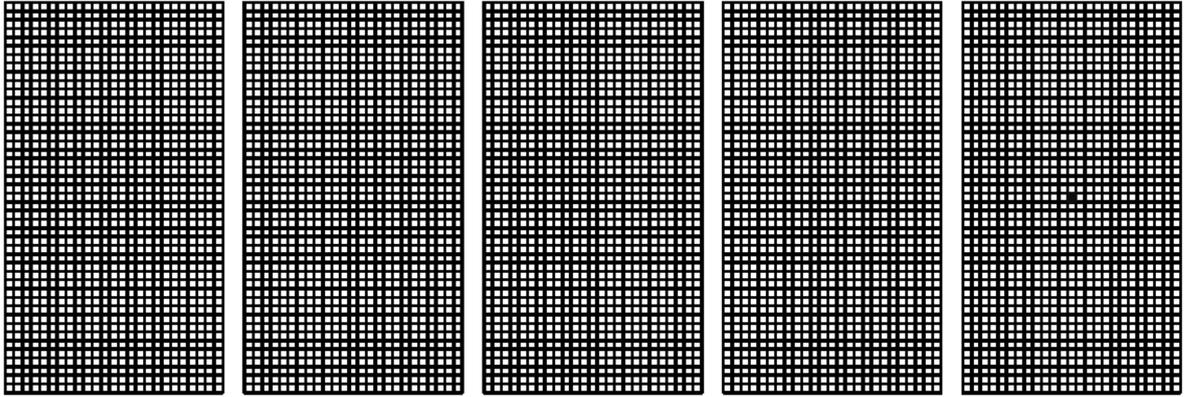


図 3.3-10(1) 計算ステップ 1

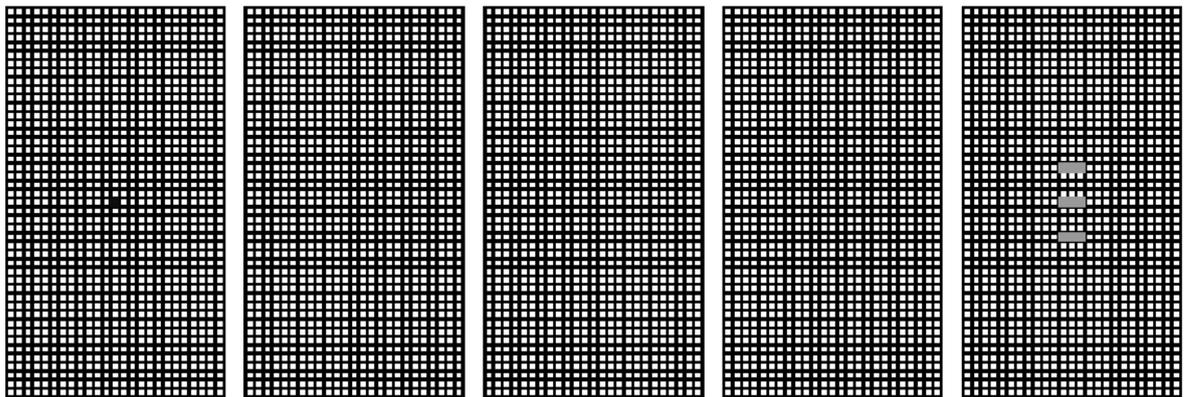


図 3.3-10(2) 計算ステップ 5

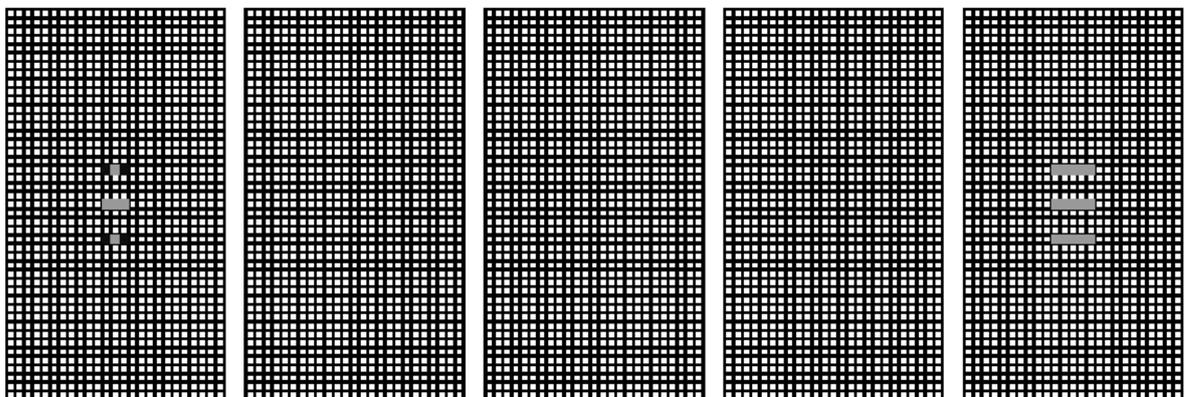


図 3.3-10(3) 計算ステップ 10

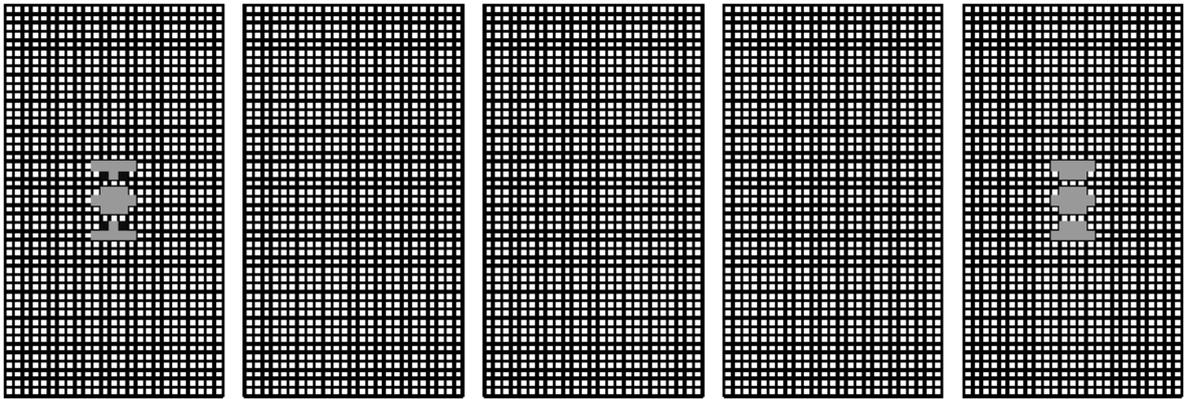


図 3.3-10(4) 計算ステップ 20

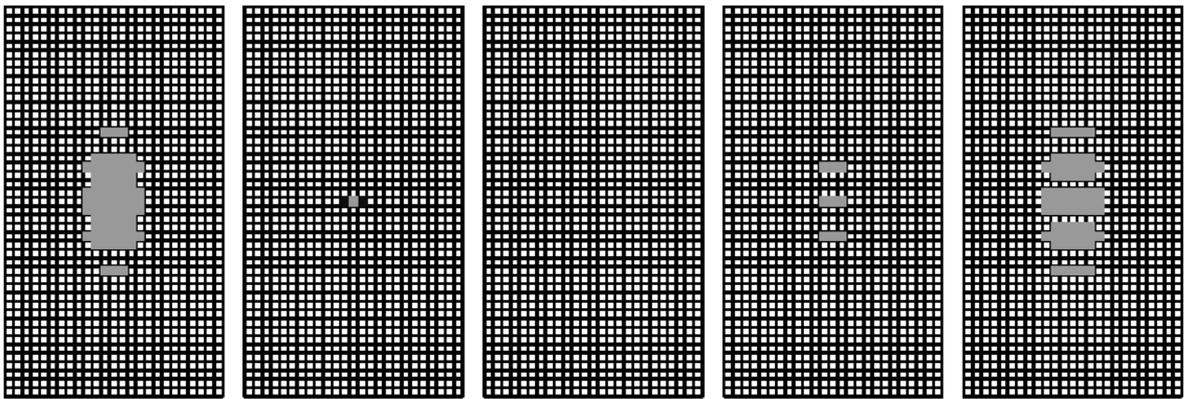


図 3.3-10(5) 計算ステップ 50

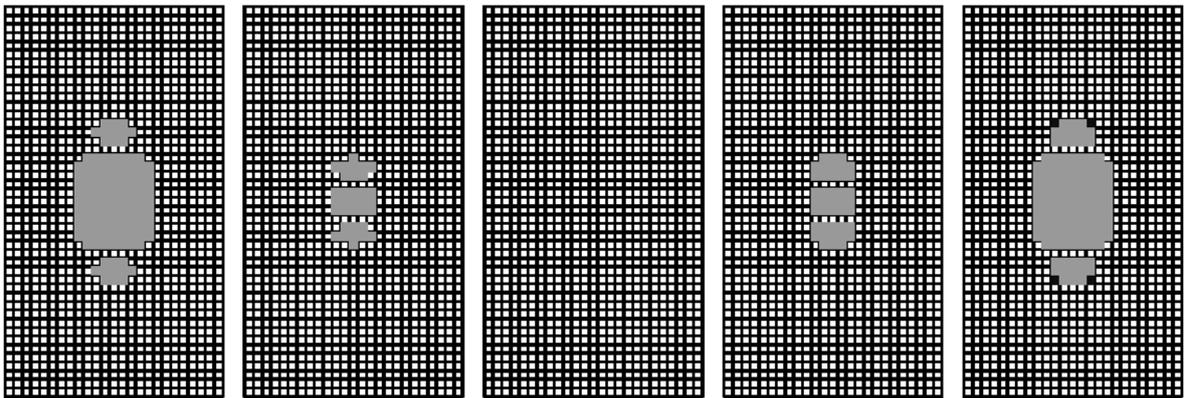


図 3.3-10(6) 計算ステップ 100

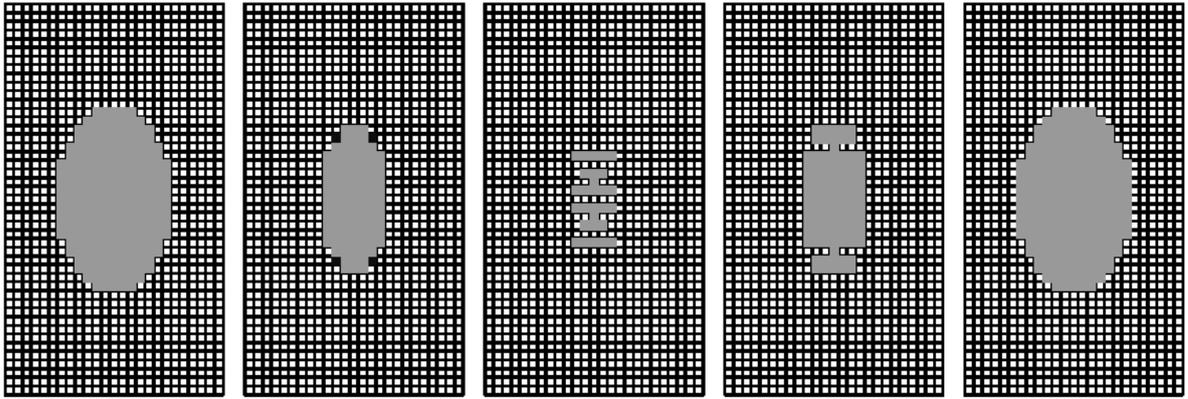


図 3.3-10(7) 計算ステップ 200

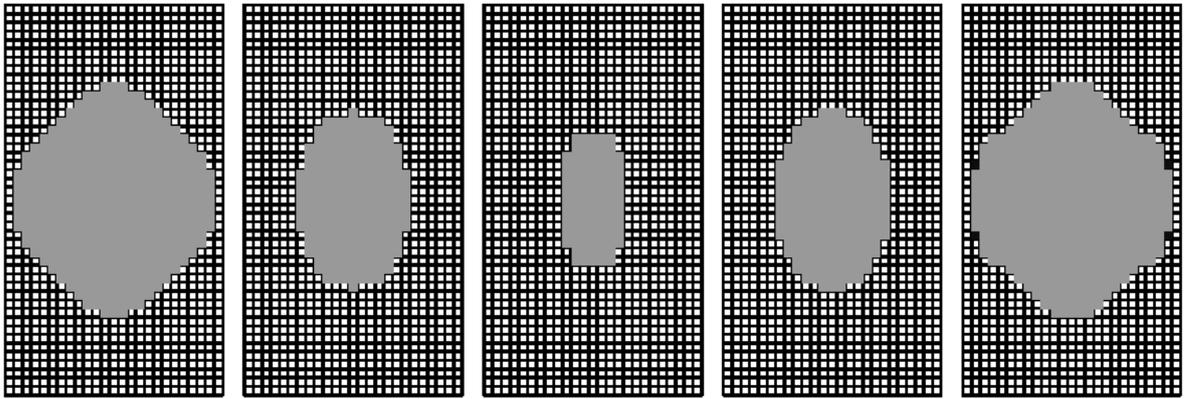


図 3.3-10(8) 計算ステップ 400

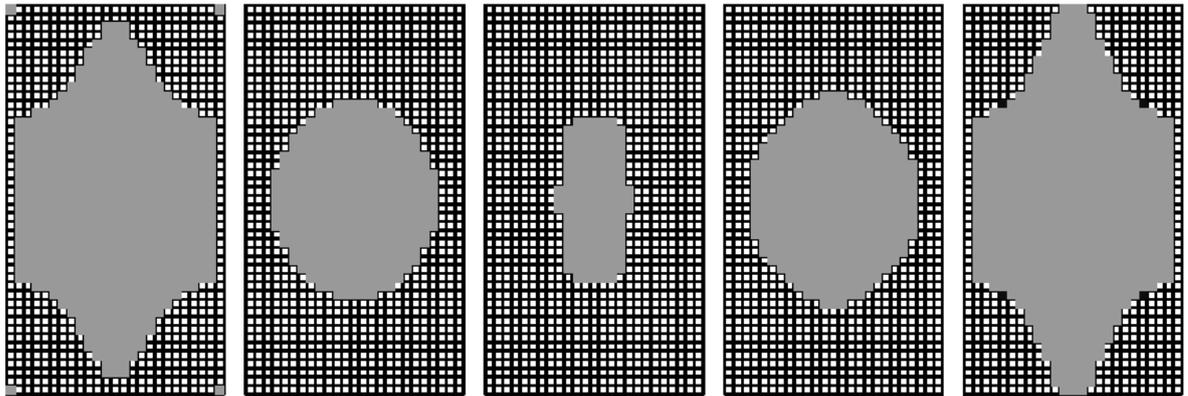


図 3.3-10(9) 計算ステップ 600

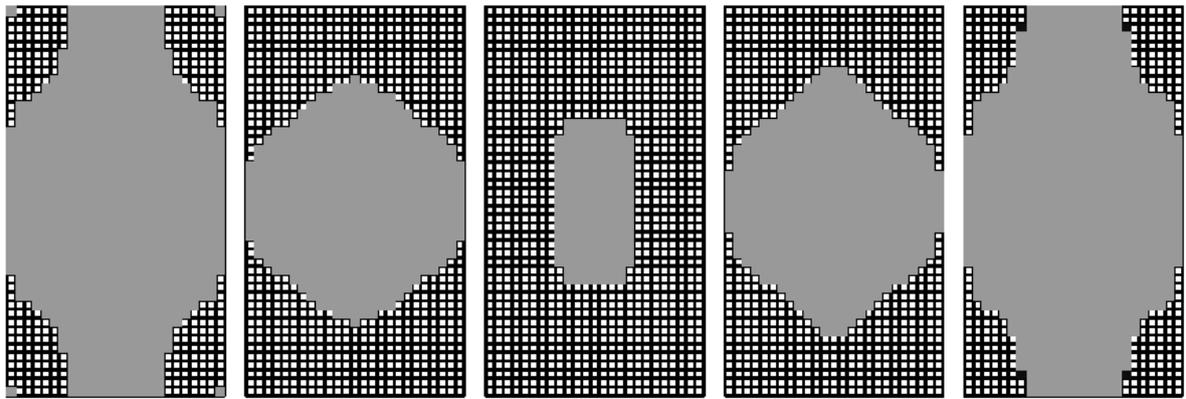


図 3.3-10(10) 計算ステップ 800

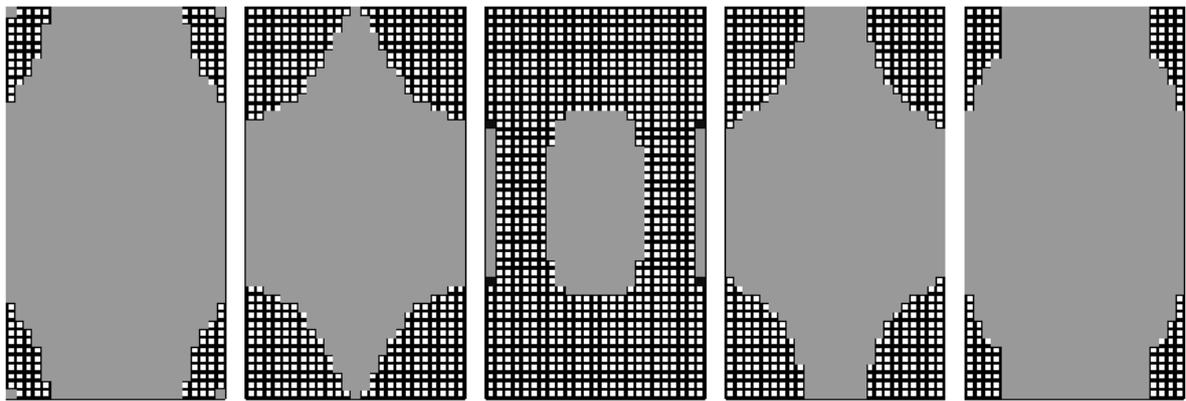


図 3.3-10(11) 計算ステップ 1000

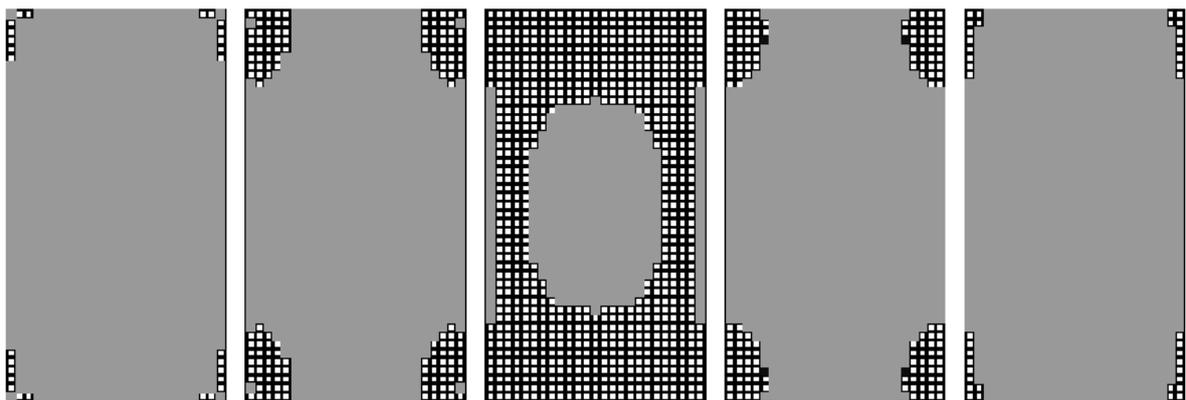


図 3.3-10(12) 計算ステップ 1300

以上より、本ケースもケース②同様、損傷度は基本的に圧縮側と引張側と同様になるため、床版下面と床版上面の損傷度が同じになり、上面、下面同様に損傷したと考えられる。

4) ケース④

本ケースは、ケース③と同様に、垂直応力度とせん断応力度のそれぞれによって生じる要素の変形と関連づけて要素のエネルギー変化量の累積に応じて要素に疲労ダメージが蓄積して破壊に至るとしたものであるが、圧縮方向の応力には要素の破壊につながるダメージが蓄積することなく抵抗できると仮定して引張側の影響のみをダメージとして蓄積させて破壊させる。つまり、引張応力とせん断応力によるエネルギーの累積が引張せん断破壊につながるとして解析を進める。次式のように定義する。

エネルギー量 U_{δ_i} を次式のように定義する。

$$U = \frac{1}{2E}(\sigma_{\delta_x}^2 + \sigma_{\delta_y}^2 + \sigma_{\delta_z}^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_{\delta_y}\sigma_{\delta_z} + \sigma_{\delta_z}\sigma_{\delta_x} + \sigma_{\delta_x}\sigma_{\delta_y}) + \frac{1}{2G}(\tau_{\delta_{yz}}^2 + \tau_{\delta_{zx}}^2 + \tau_{\delta_{xy}}^2) \dots \text{(式 3.3-14)}$$

よって、荷重を 1→2→3→4→5 と載荷した場合の累積変化エネルギー量 ΣU は、
 $\Sigma U = 2 \times (U_{2-1} + U_{3-2} + U_{4-3} + U_{5-4}) \dots \text{(式 3.3-15)}$

$$U_{2-1} = \frac{1}{2E} \left\{ (\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1})^2 + (\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})^2 + (\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1})^2 \right\} \\ - \frac{\nu}{E} \left\{ (\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})(\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1}) + (\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1})(\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1}) + (\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1})(\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1}) \right\} \\ + \frac{1}{2G} \left\{ (\tau_{yz_2} - \tau_{yz_1})^2 + (\tau_{zx_2} - \tau_{zx_1})^2 + (\tau_{xy_2} - \tau_{xy_1})^2 \right\} \dots \text{(式 3.3-16)}$$

U_{3-2} 、 U_{4-3} 、 U_{5-4} についても同様に算出する。

ここで () 内は変化量であり、全て同符号 (+) とする。ただし、ここではエネルギーの算出に際し、垂直応力度の変化により引張応力度と引張ひずみが同時に生じた場合に、破壊に寄与するエネルギーが要素に蓄積されると考える。そのため、3軸の応力状態を考慮して応力度に対応するひずみを下式の関係より求めた上でエネルギーを算出し、エネルギー変化量 ΣU の累積値が最大の要素から破壊するものとして解析を行う。

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) \dots \text{(式 3.3-17)}$$

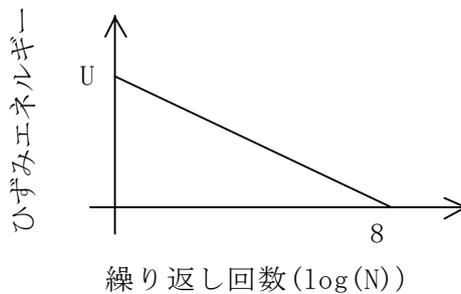
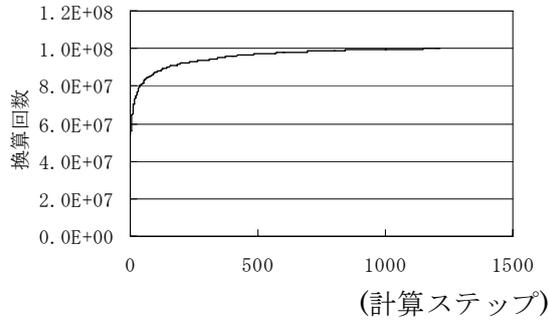


図 3.3-11 解析で使した疲労曲線

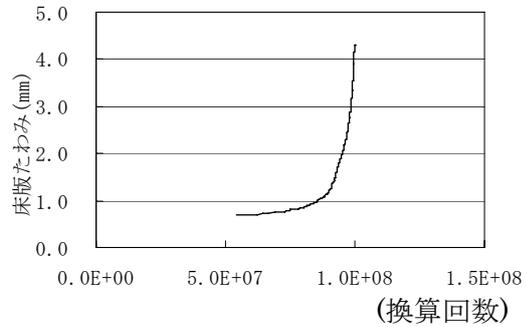
ここで、 U の破壊基準はコンクリートの一般的な設計基準強度とした。

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E} \sigma^2 = \frac{24^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.01125 \quad (\text{N/mm}^2) \cdots (\text{式 3.3-18})$$

計算結果、換算回数との関係を図 3.3-12 に示す。

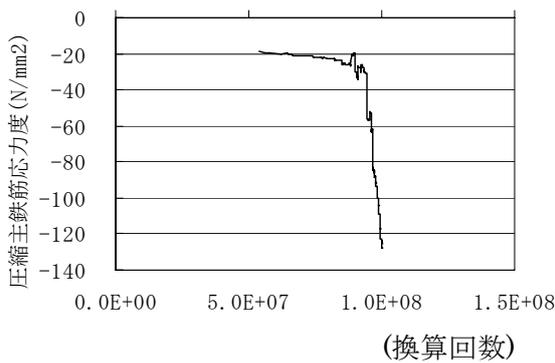


計算ステップと換算回数

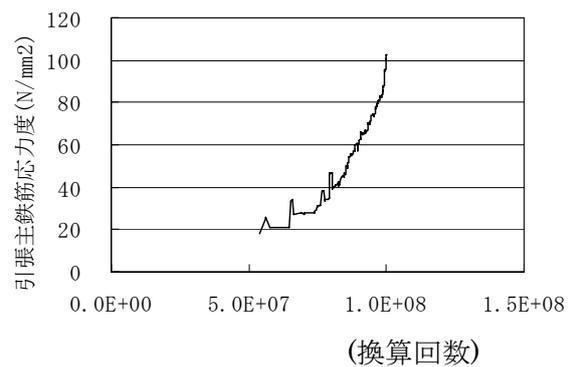


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

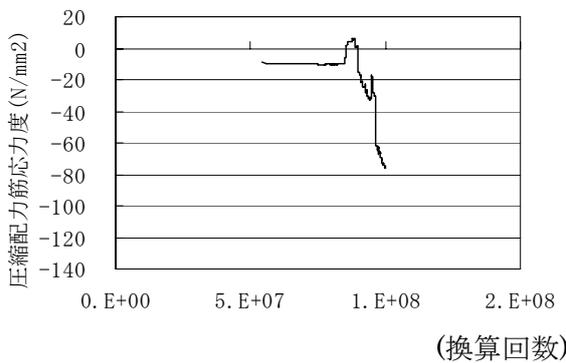


換算回数と上面主鉄筋応力度

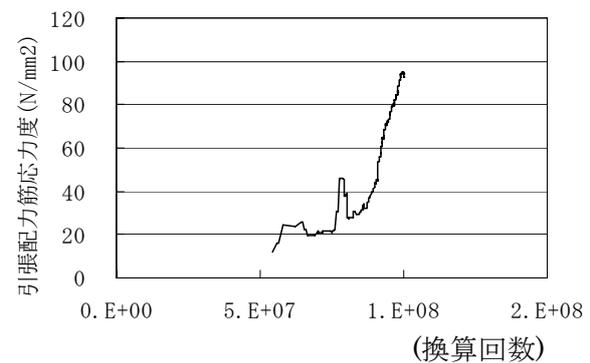


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-12 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

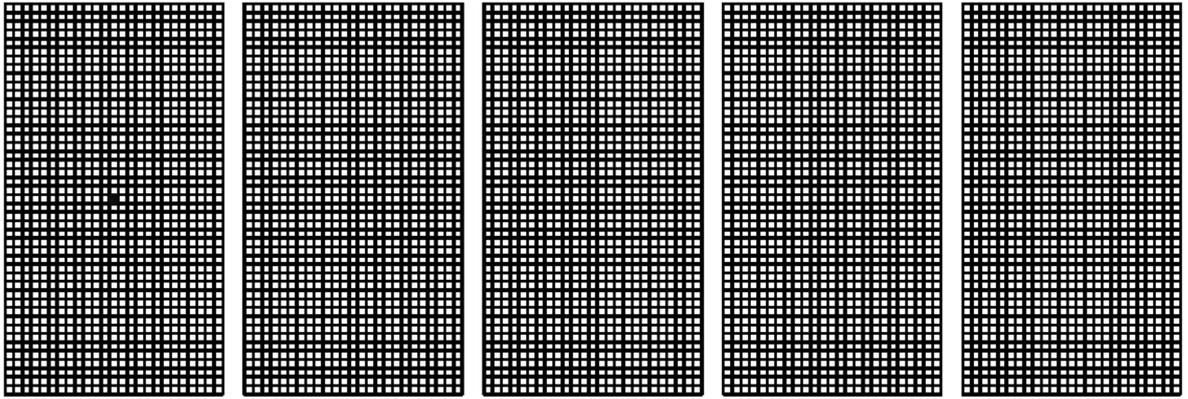


図 3.3-13(1) 計算ステップ 1

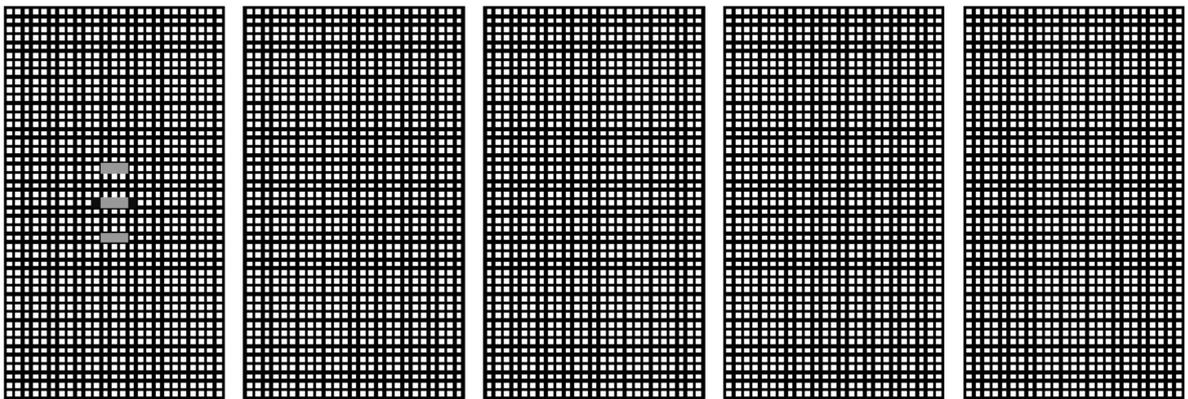


図 3.3-13(2) 計算ステップ 5

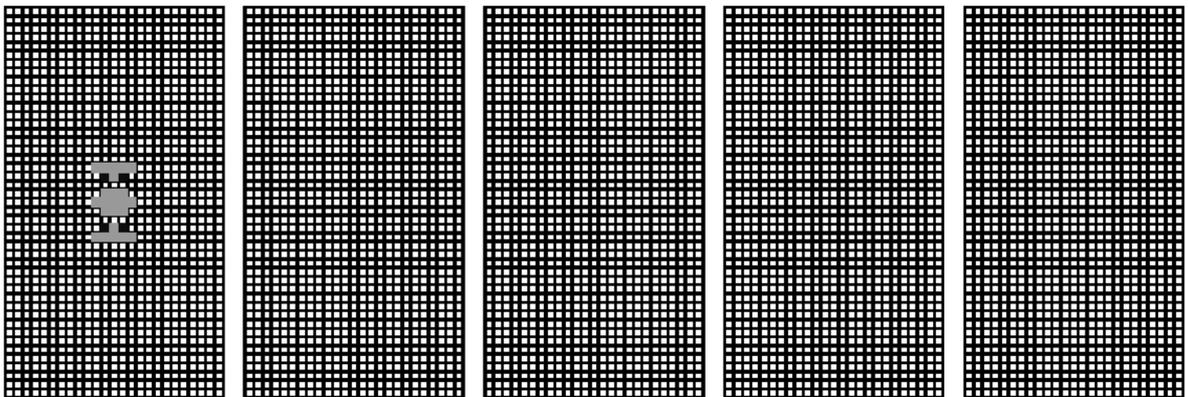


図 3.3-13(3) 計算ステップ 10

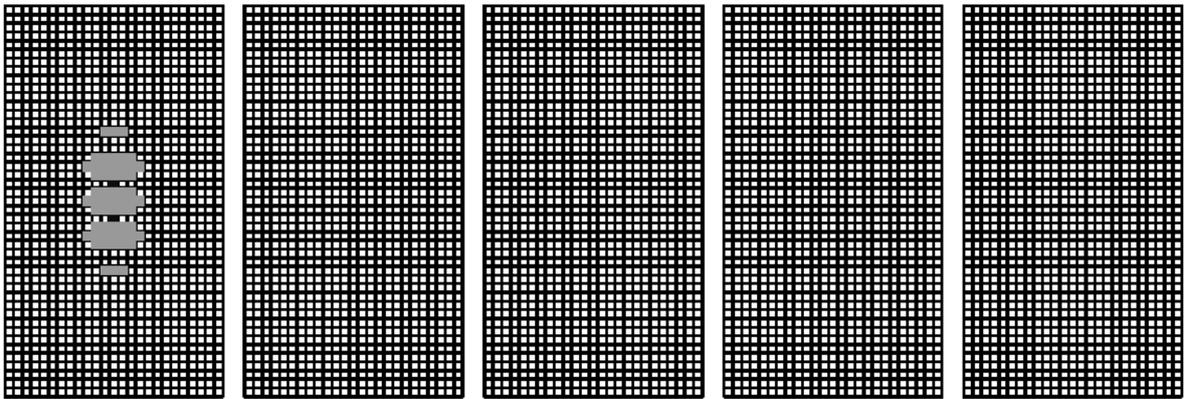


図 3.3-13(4) 計算ステップ 20

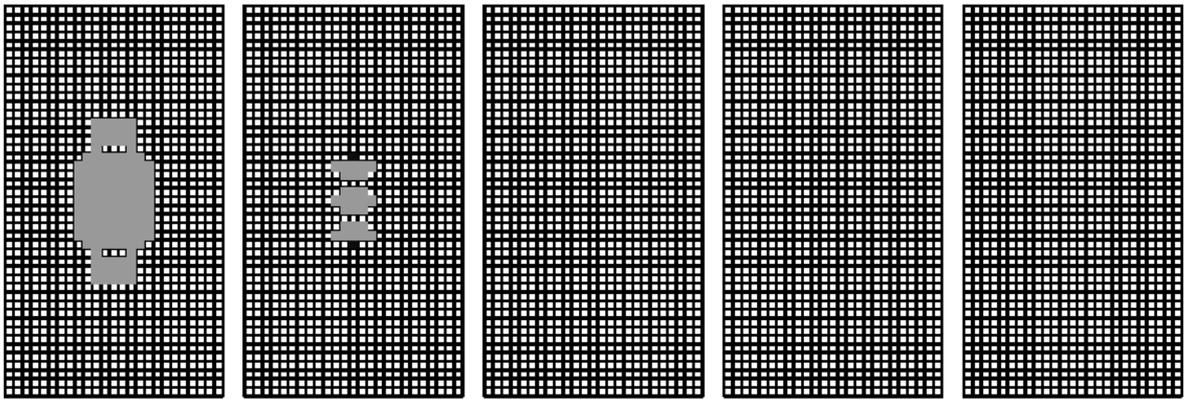


図 3.3-13(5) 計算ステップ 50

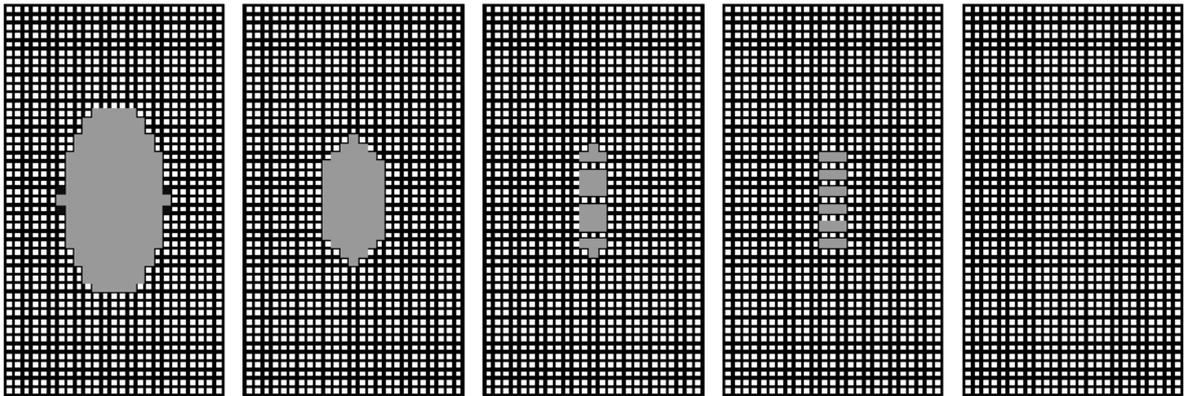


図 3.3-13(6) 計算ステップ 100

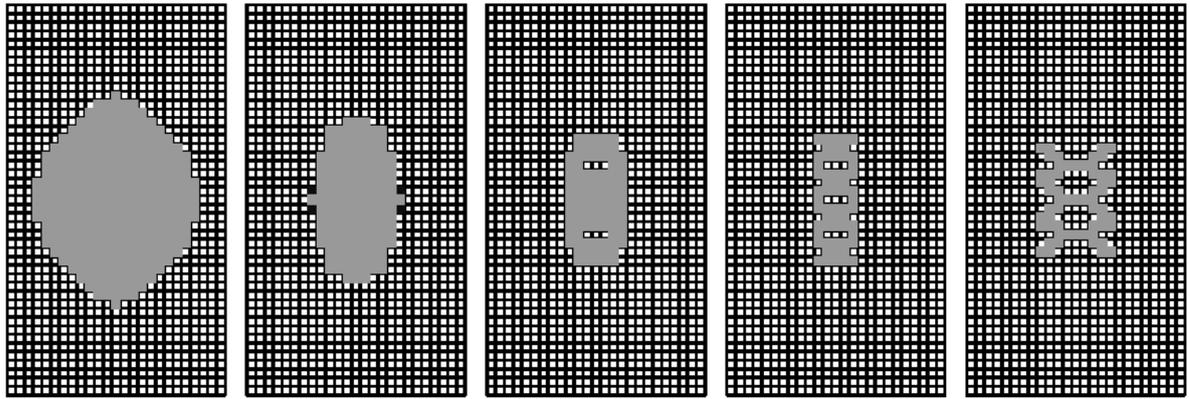


図 3.3-13(7) 計算ステップ 200

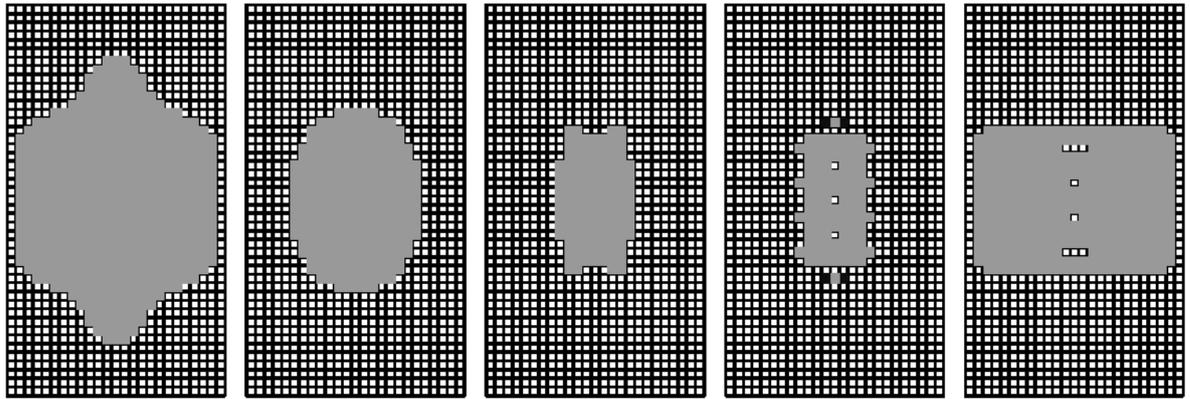


図 3.3-13(8) 計算ステップ 400

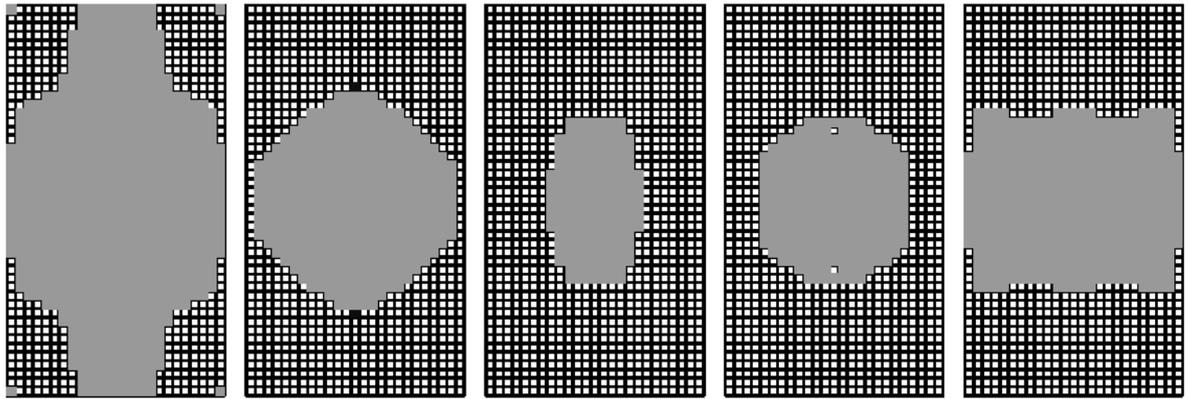


図 3.3-13(9) 計算ステップ 600

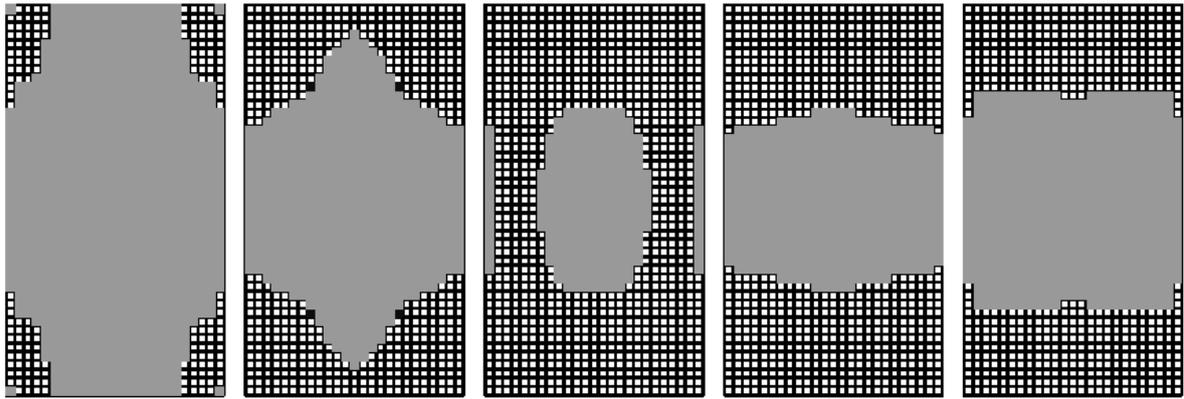


図 3.3-13(10) 計算ステップ 800

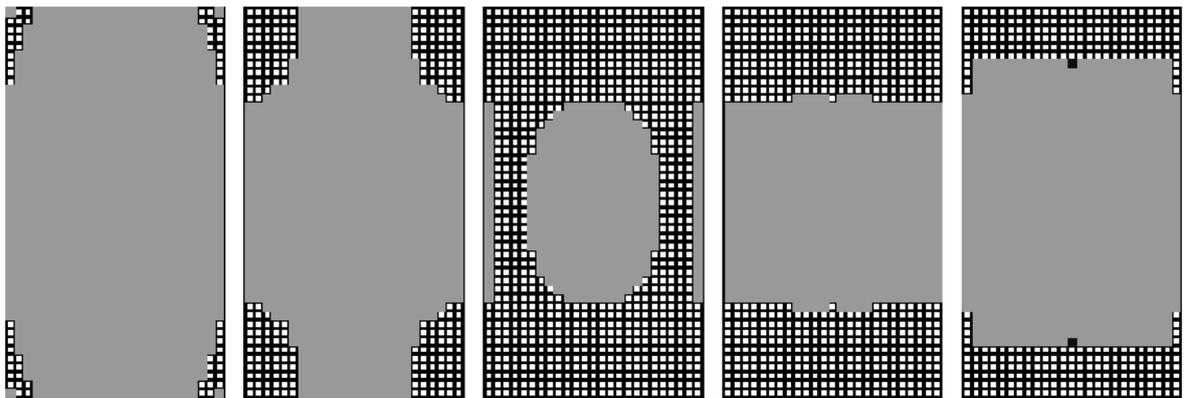


図 3.3-13(11) 計算ステップ 1000

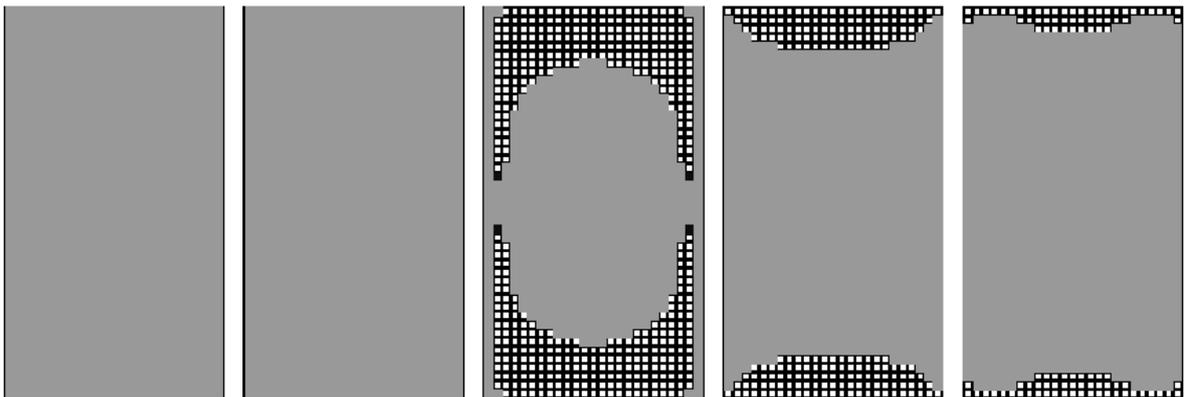


図 3.3-13(12) 計算ステップ 1300

以上より、要素の破壊は実橋や輪荷重走行試験で見られるように下面が先行して拡がっていく傾向を示すが、下面の破壊が十分に拡がる前に上面側の破壊が急速に進展し、途中段階より最終段階まで床版の板厚中央付近より上下面の破壊が先行する特異な様相を呈した。

5) ケース⑤

本ケースは、ケース②～④が要素の垂直応力度に伴うひずみを全て考慮したのに対して、引張ひずみに伴う体積変化のみを考慮したものである。

要素のひずみによる単位体積あたりの弾性ひずみエネルギー量 $U_{\delta t}$ は以下で表される。

$$U_{\delta t} = \frac{1}{2} \sigma_{\delta x} \varepsilon_{\delta x} + \frac{1}{2} \sigma_{\delta y} \varepsilon_{\delta y} + \frac{1}{2} \sigma_{\delta z} \varepsilon_{\delta z} \quad \dots \text{(式 3.3-19)}$$

よって、荷重を 1→2→3→4→5 の順で載荷した場合のエネルギー変化量 ΣU は、以下より得られる。

$$\Sigma U = 2 \times (U_{2-1} + U_{3-2} + U_{4-3} + U_{5-4}) \quad \dots \text{(式 3.3-20)}$$

$$\begin{aligned} U_{2-1} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x_2} - \sigma_{x_1}) (\varepsilon_{x_2} - \varepsilon_{x_1}) + \frac{1}{2} (\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1}) (\varepsilon_{y_2} - \varepsilon_{y_1}) + \frac{1}{2} (\sigma_{z_2} - \sigma_{z_1}) (\varepsilon_{z_2} - \varepsilon_{z_1}) \\ U_{3-2} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x_3} - \sigma_{x_2}) (\varepsilon_{x_3} - \varepsilon_{x_2}) + \frac{1}{2} (\sigma_{y_3} - \sigma_{y_2}) (\varepsilon_{y_3} - \varepsilon_{y_2}) + \frac{1}{2} (\sigma_{z_3} - \sigma_{z_2}) (\varepsilon_{z_3} - \varepsilon_{z_2}) \\ U_{4-3} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x_4} - \sigma_{x_3}) (\varepsilon_{x_4} - \varepsilon_{x_3}) + \frac{1}{2} (\sigma_{y_4} - \sigma_{y_3}) (\varepsilon_{y_4} - \varepsilon_{y_3}) + \frac{1}{2} (\sigma_{z_4} - \sigma_{z_3}) (\varepsilon_{z_4} - \varepsilon_{z_3}) \\ U_{5-4} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x_5} - \sigma_{x_4}) (\varepsilon_{x_5} - \varepsilon_{x_4}) + \frac{1}{2} (\sigma_{y_5} - \sigma_{y_4}) (\varepsilon_{y_5} - \varepsilon_{y_4}) + \frac{1}{2} (\sigma_{z_5} - \sigma_{z_4}) (\varepsilon_{z_5} - \varepsilon_{z_4}) \end{aligned} \quad \dots \text{(式 3.3-21)}$$

ここで、各 () 内は変化量であり、その変化により引張応力度と引張ひずみが同時に生じた場合に、破壊に寄与するエネルギーが要素に蓄積されると考え、エネルギー量 ΣU の累積値が最大の要素から破壊するものとして解析を行う。

$\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ ($E_c = 2.5 \times 10^4 \text{ (N/mm}^2)$) のコンクリートを想定し、コンクリートの S-N 線図にはひずみエネルギーを用いて以下のように仮定した。

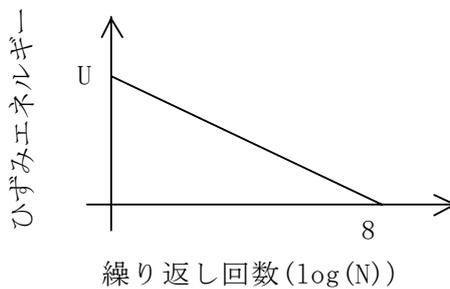
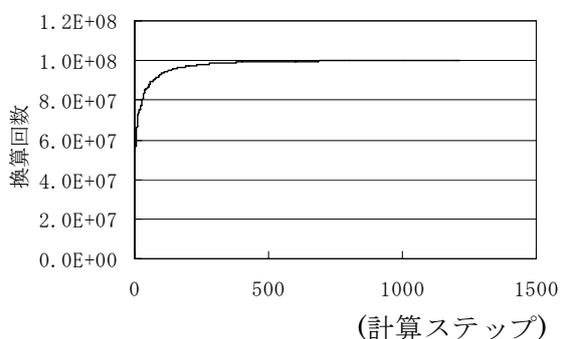


図 3.3-14 解析で使用した疲労曲線

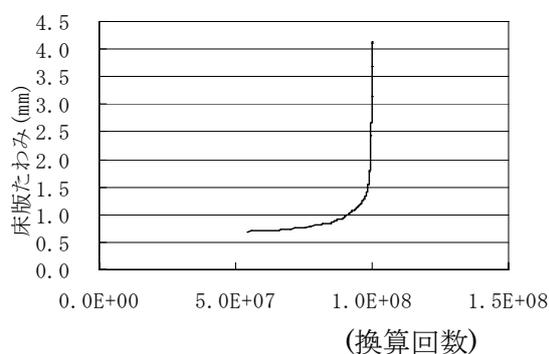
ここで、 U の破壊基準はコンクリートの一般的な設計基準強度とした。

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E} \sigma^2 = \frac{24^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.01125 \text{ (N/mm}^2) \quad \dots \text{(式 3.3-22)}$$

計算結果、換算回数との関係を図 3.3-15 に示す。

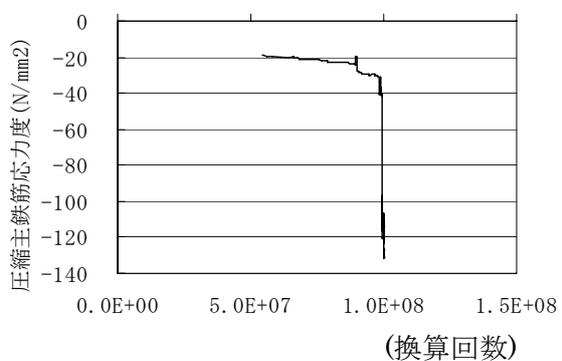


計算ステップと換算回数

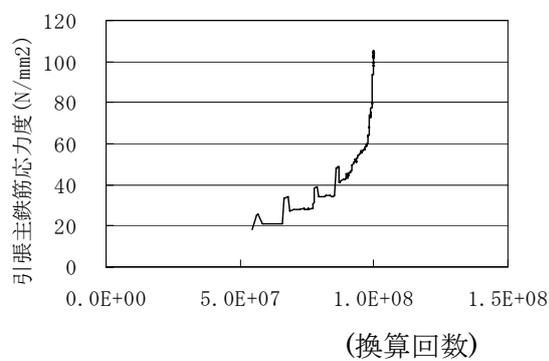


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

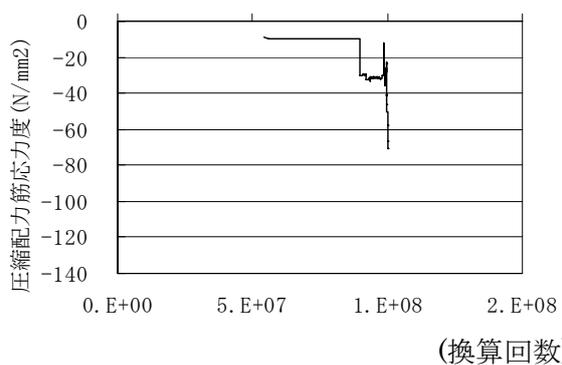


換算回数と上面主鉄筋応力度

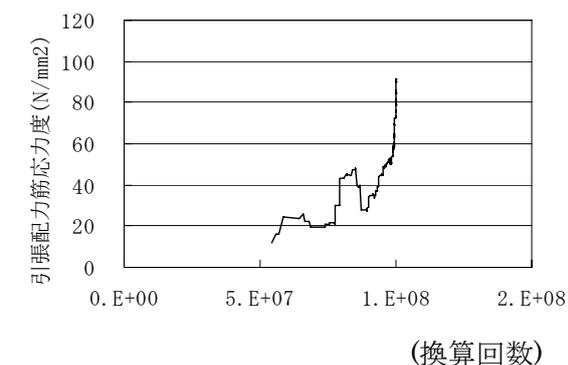


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-15 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

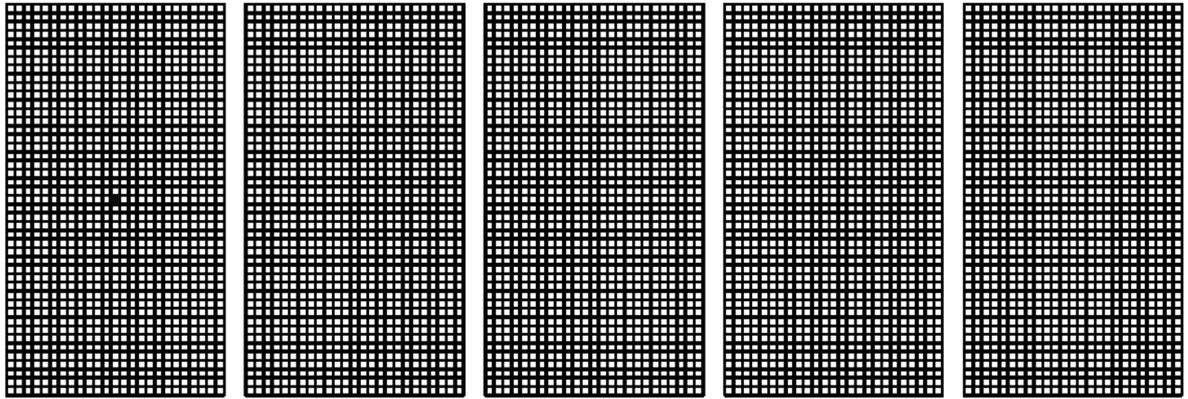


図 3.3-16(1) 計算ステップ 1

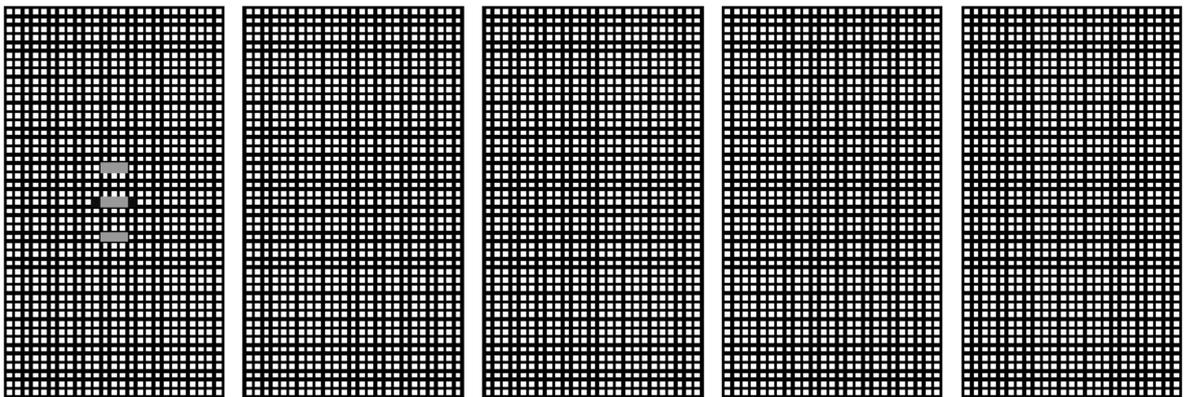


図 3.3-16(2) 計算ステップ 5

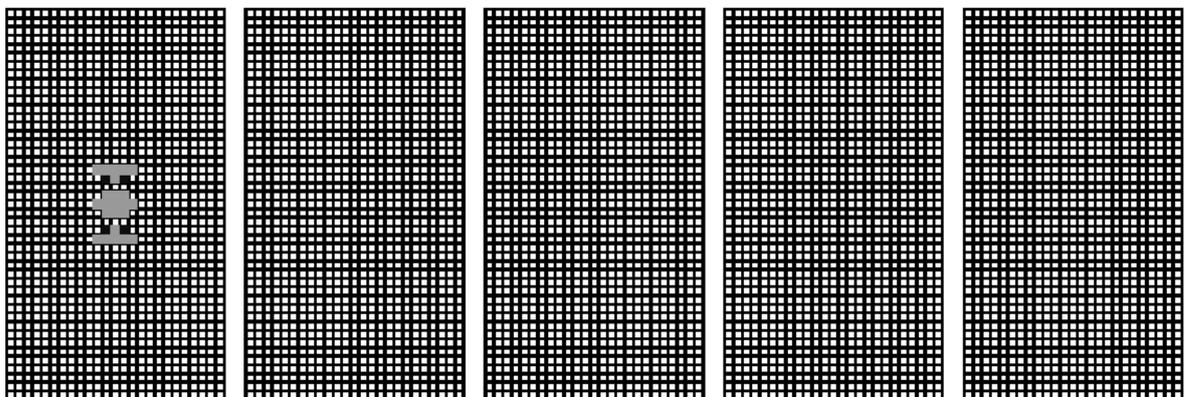


図 3.3-16(3) 計算ステップ 10

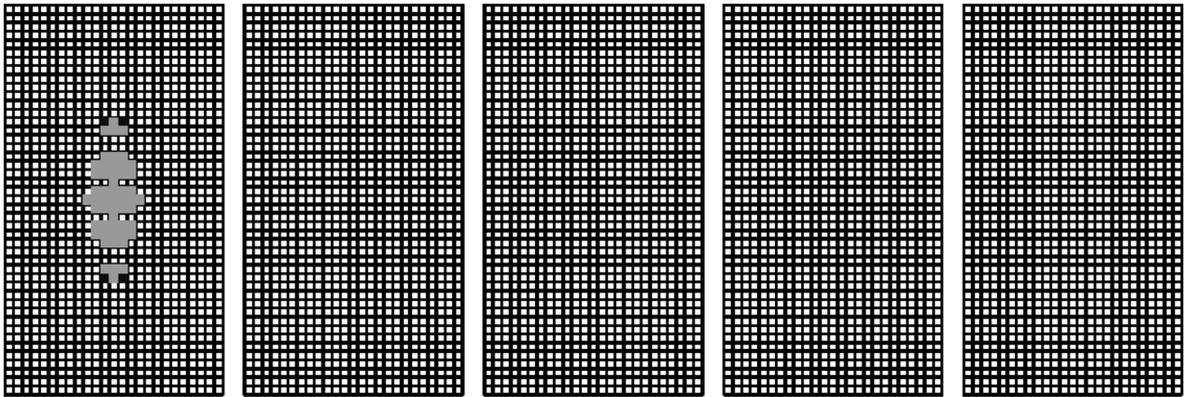


図 3.3-16(4) 計算ステップ 20

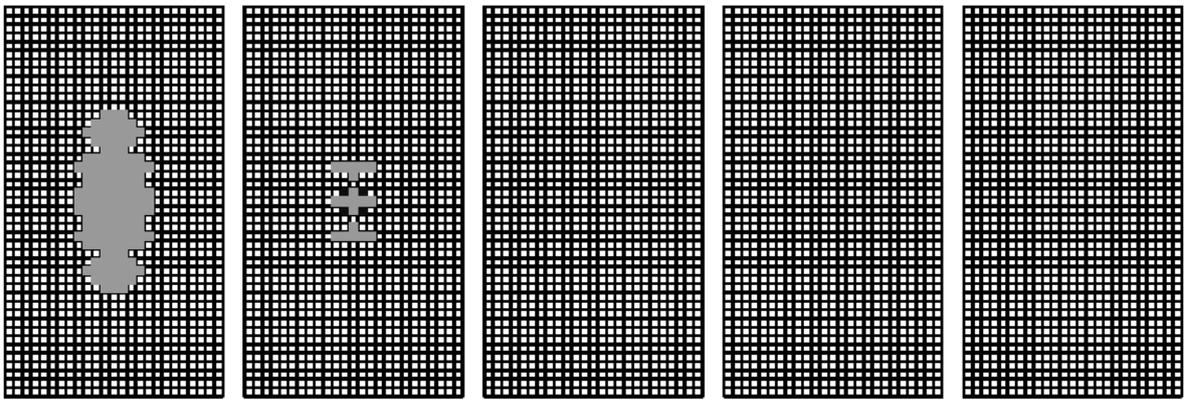


図 3.3-16(5) 計算ステップ 50

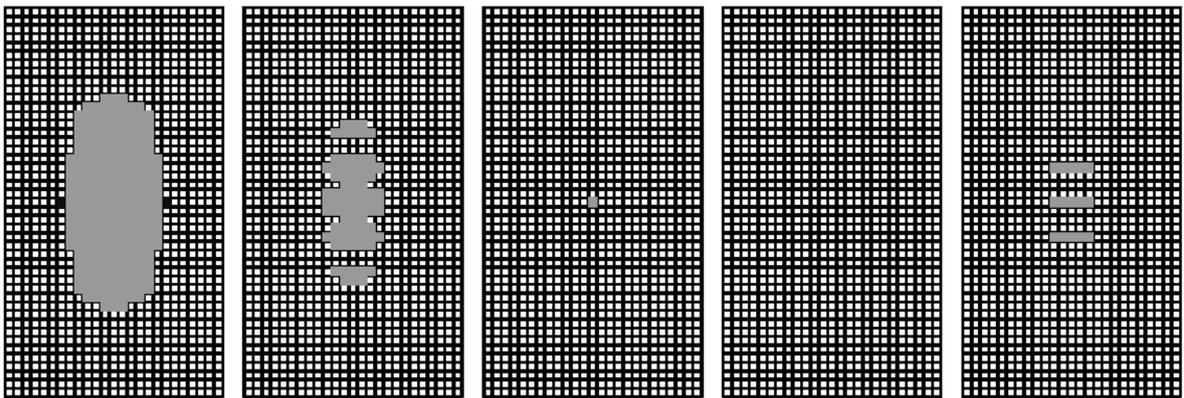


図 3.3-16(6) 計算ステップ 100

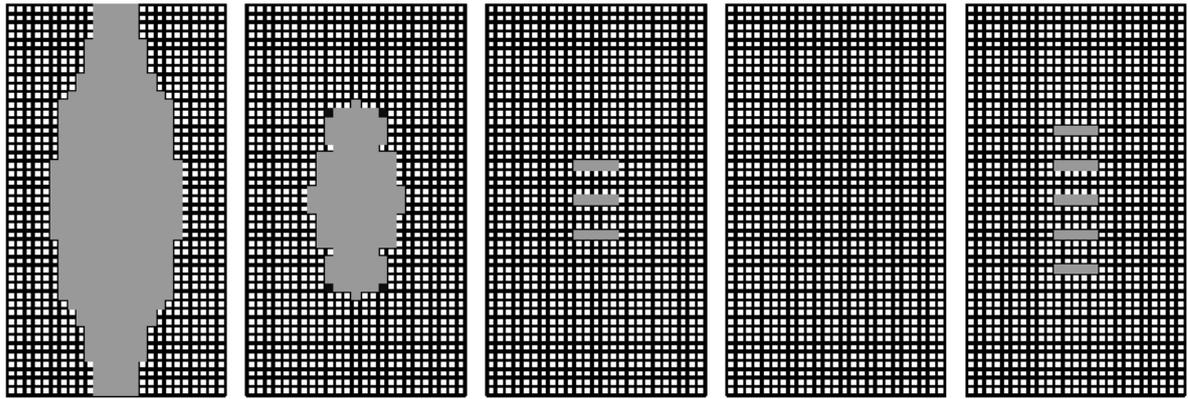


図 3.3-16(7) 計算ステップ 200

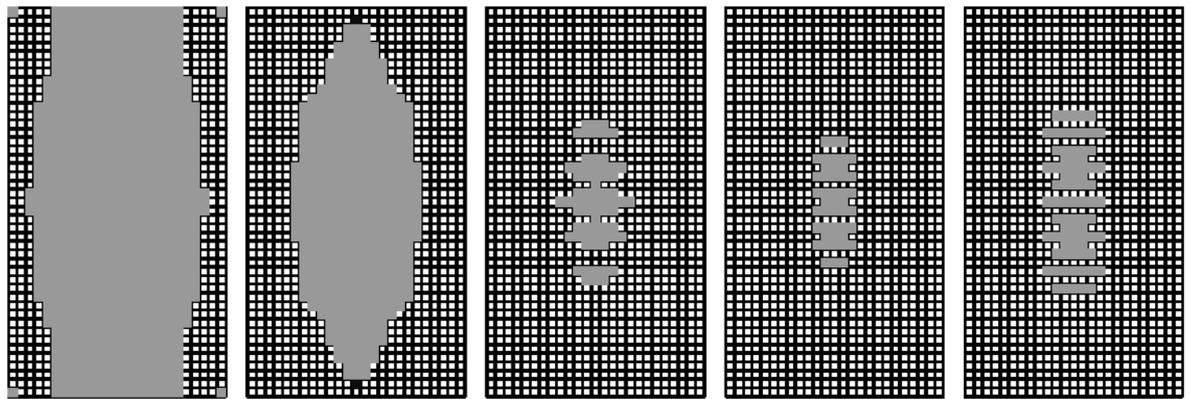


図 3.3-16(8) 計算ステップ 400

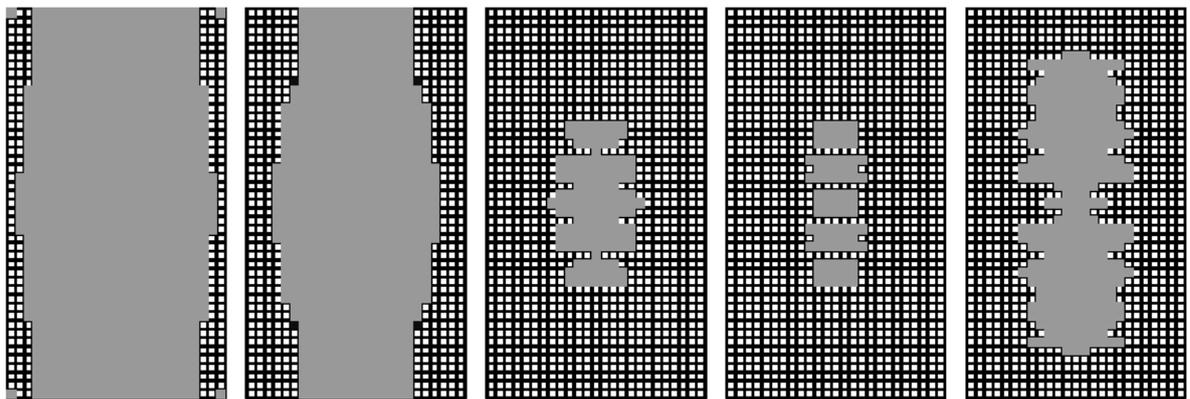


図 3.3-16(9) 計算ステップ 600

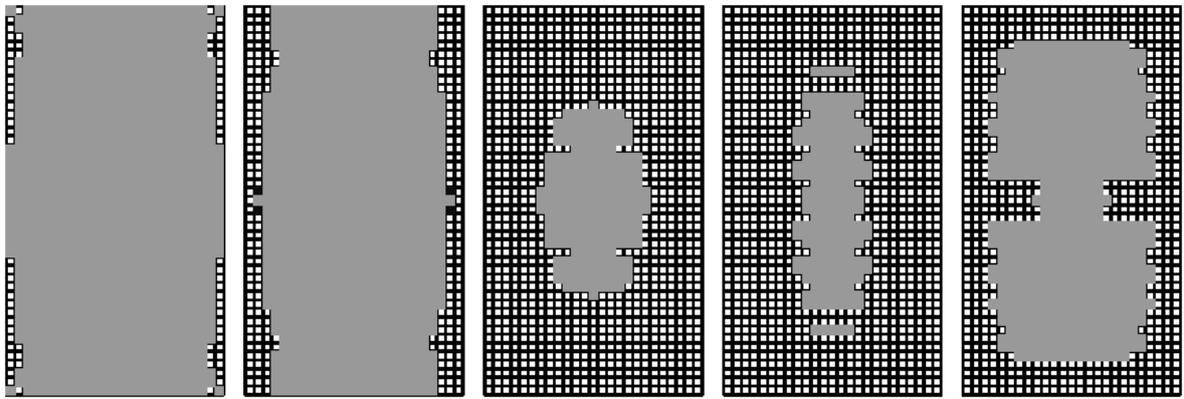


図 3.3-16(10) 計算ステップ 800

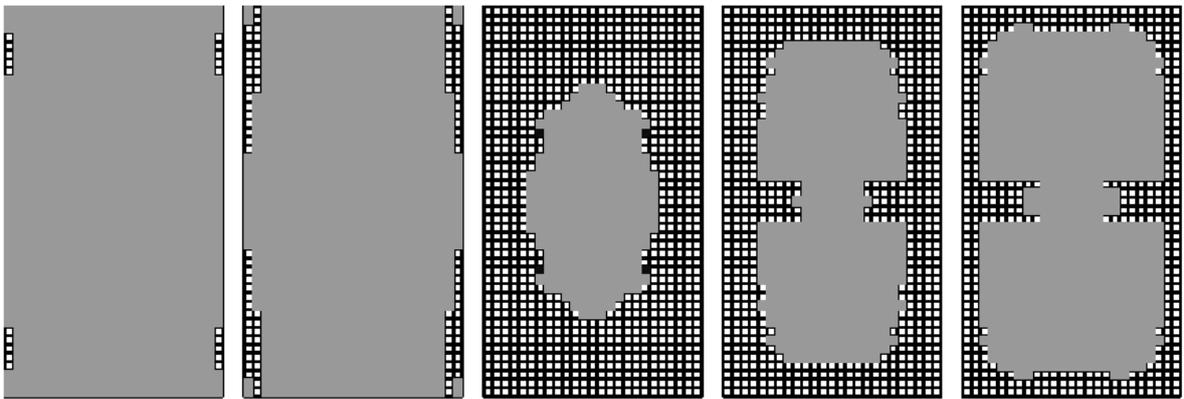


図 3.3-16(11) 計算ステップ 1000

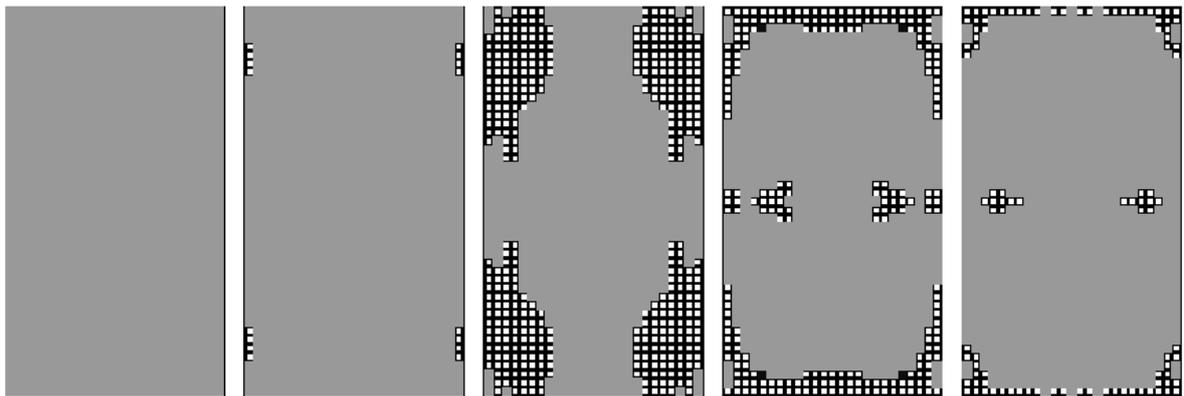


図 3.3-16(12) 計算ステップ 1300

以上より、本ケースでは要素の破壊は、実橋や輪荷重走行試験で見られるように下面が先行して拡がっていく傾向を示すが、ケース④同様に、下面の破壊が十分に拡がる前に上面側の破壊が急速に進展し、途中段階より最終段階まで床版の板厚中央付近より上下面の破壊が先行した。

6) ケース⑥

本ケースは、基本的な解析仮定はケース⑤と同じとし、疲労曲線の縦軸の値Uのみを変化させた。(破壊基準は引張り破壊とした)

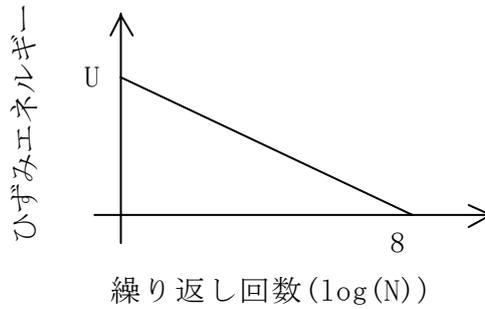
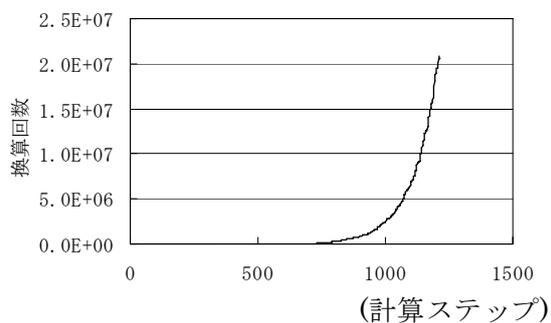


図 3.3-17 計算で仮定した疲労曲線

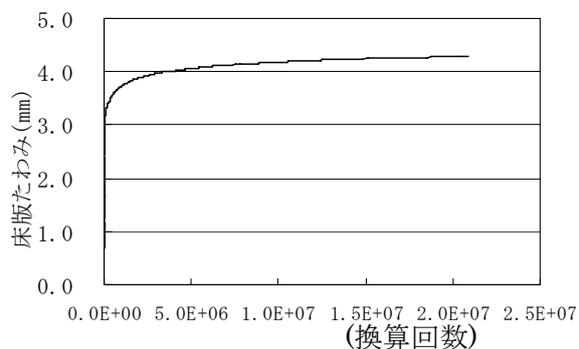
ここで、ここで、Uの破壊基準はコンクリートの引張強度とした。

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E} \sigma^2 = \frac{2.5^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.000125 \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots \quad (\text{式 3.2-23})$$

計算結果、換算回数との関係を図 3.3-18 に示す。

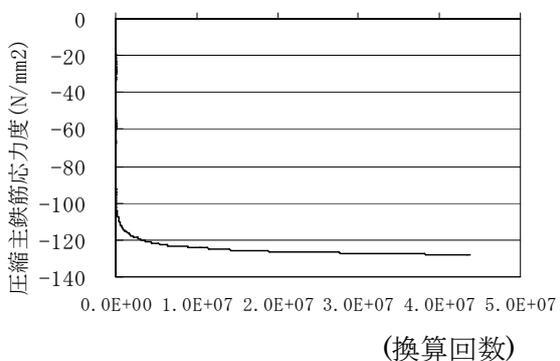


計算ステップと換算回数

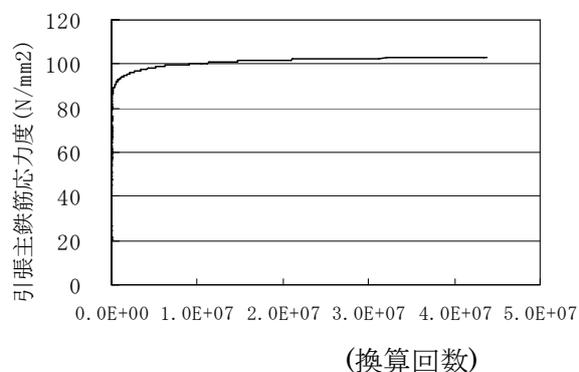


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

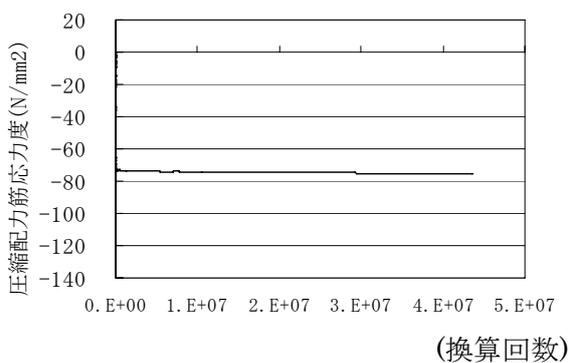


換算回数と上面主鉄筋応力度

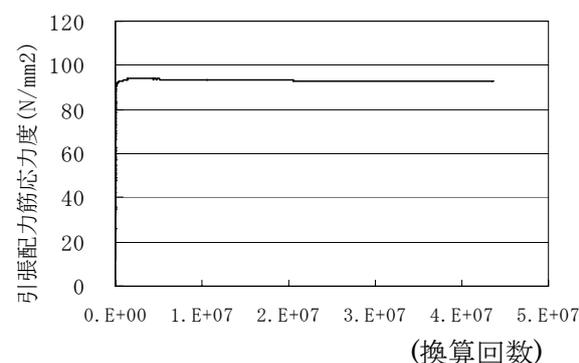


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-18 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

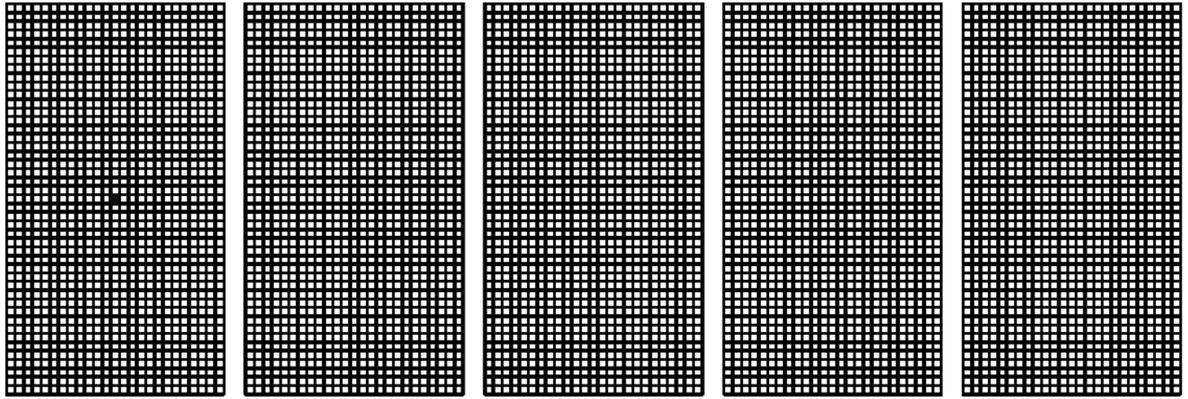


図 3.3-19(1) 計算ステップ 1

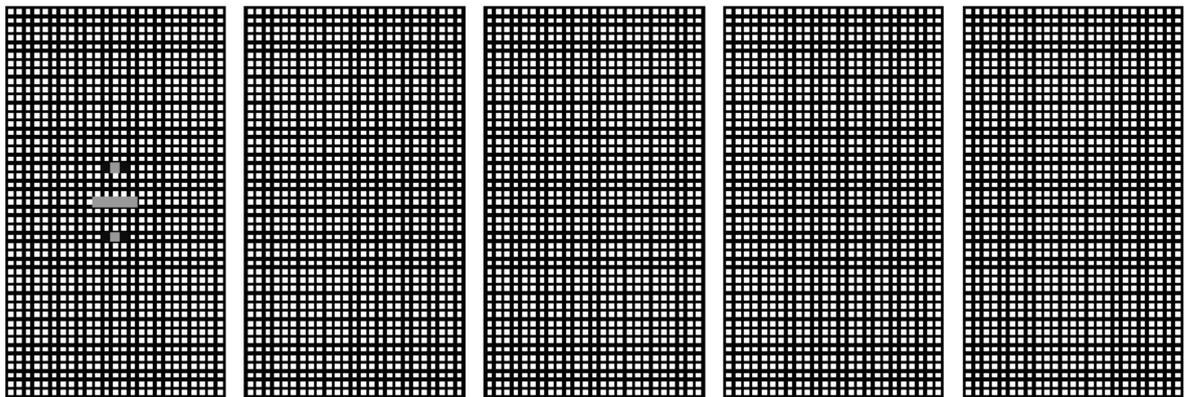


図 3.3-19(2) 計算ステップ 5

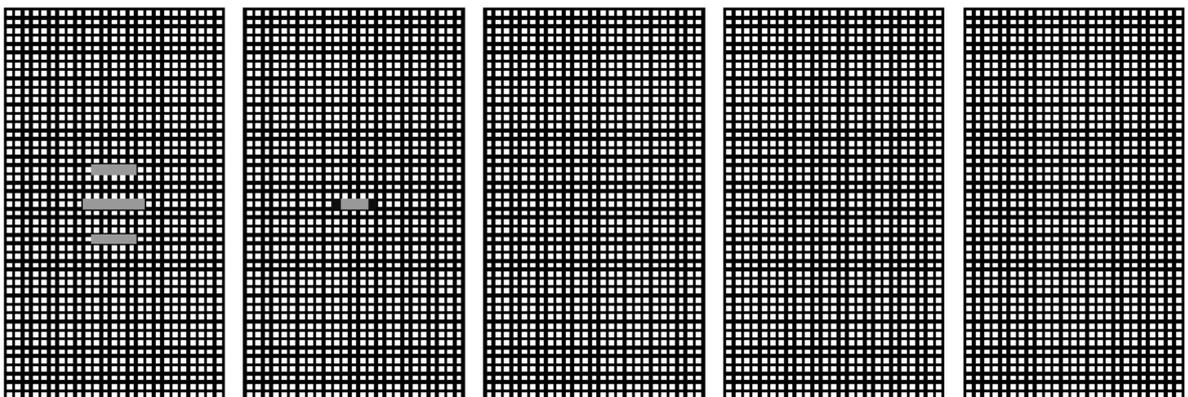


図 3.3-19(3) 計算ステップ 10

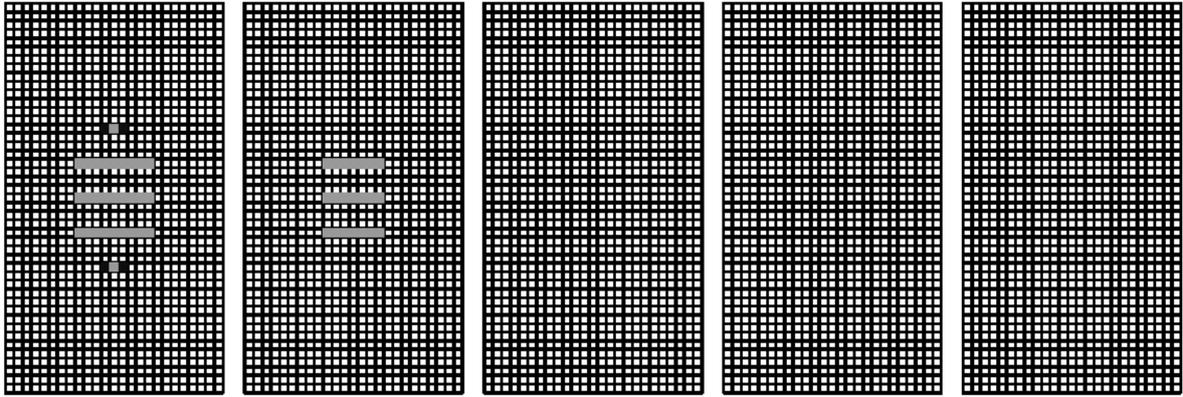


図 3.3-19(4) 計算ステップ 20

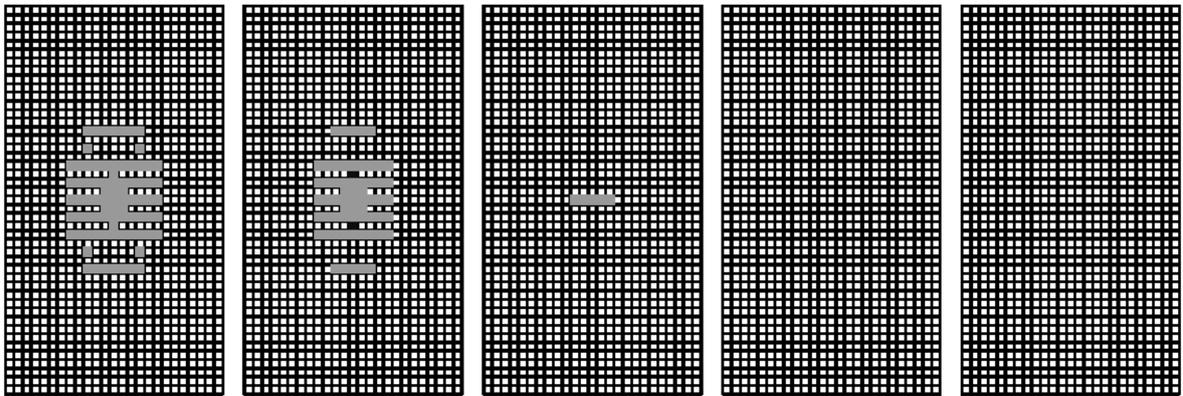


図 3.3-19(5) 計算ステップ 50

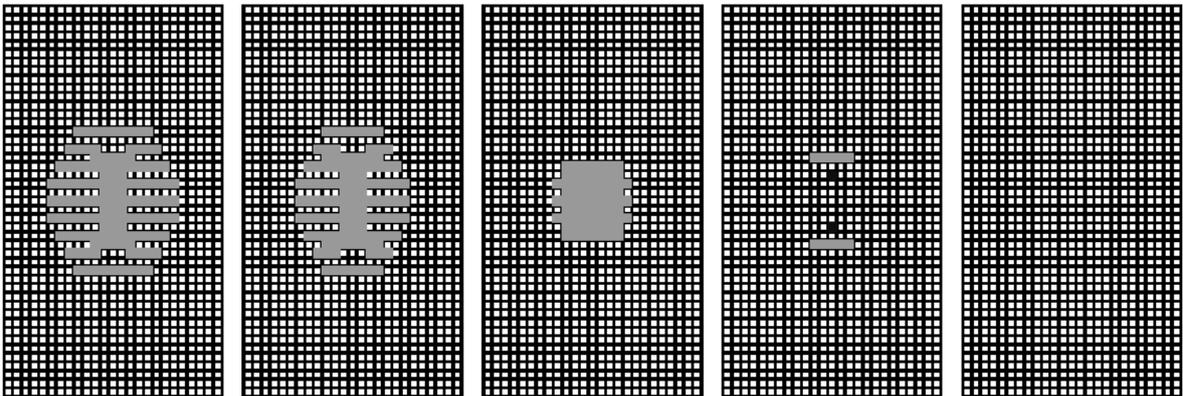


図 3.3-19(6) 計算ステップ 100

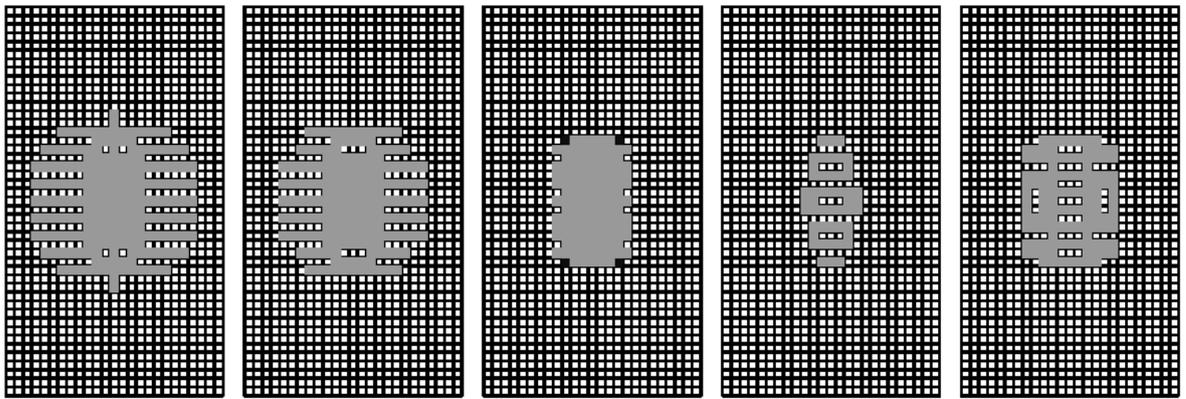


図 3.3-19(7) 計算ステップ 200

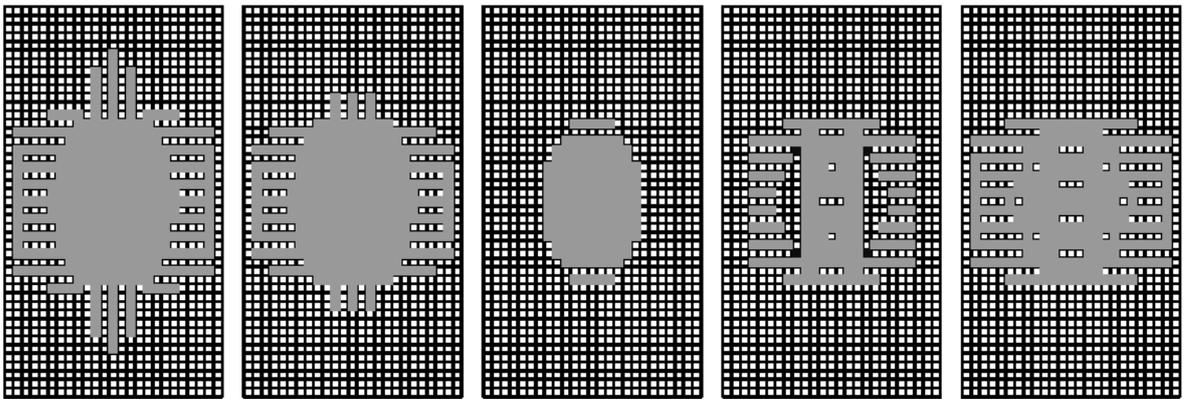


図 3.3-19(8) 計算ステップ 400

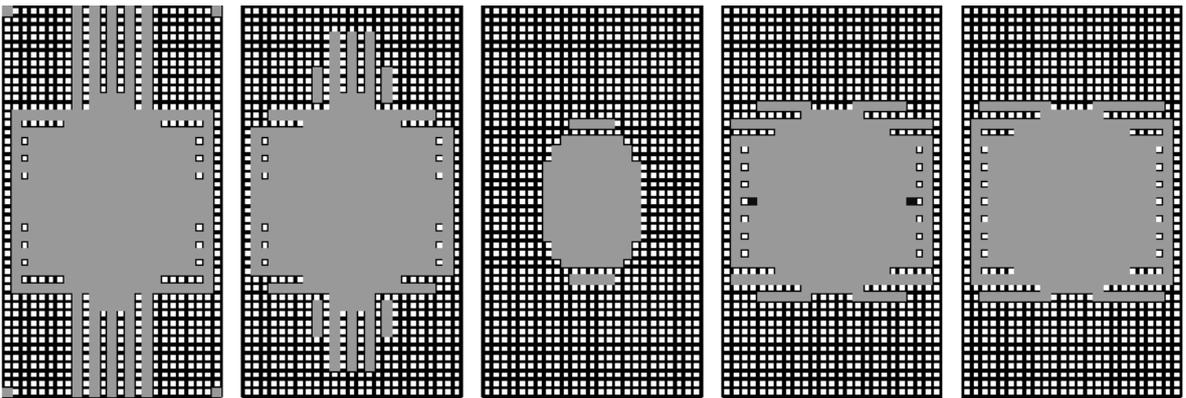


図 3.3-19(9) 計算ステップ 600

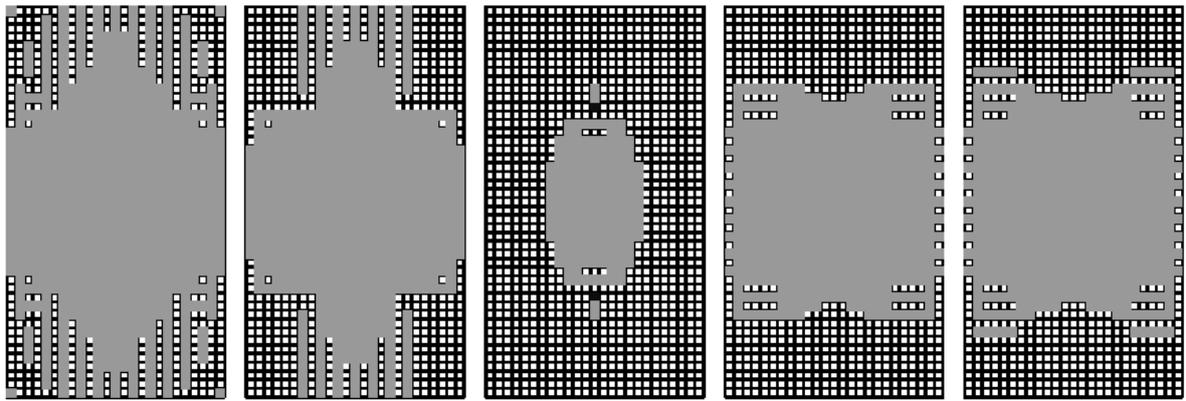


図 3.3-19(10) 計算ステップ 800

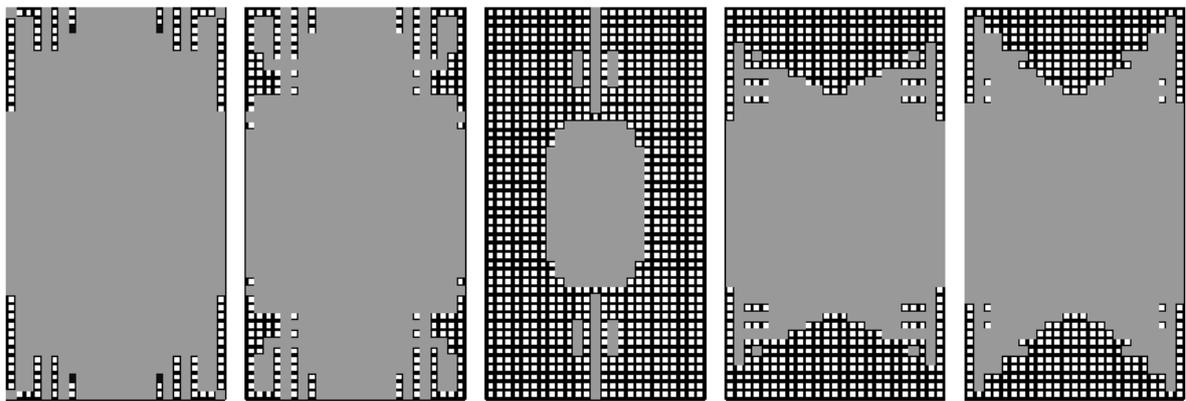


図 3.3-19(11) 計算ステップ 1000

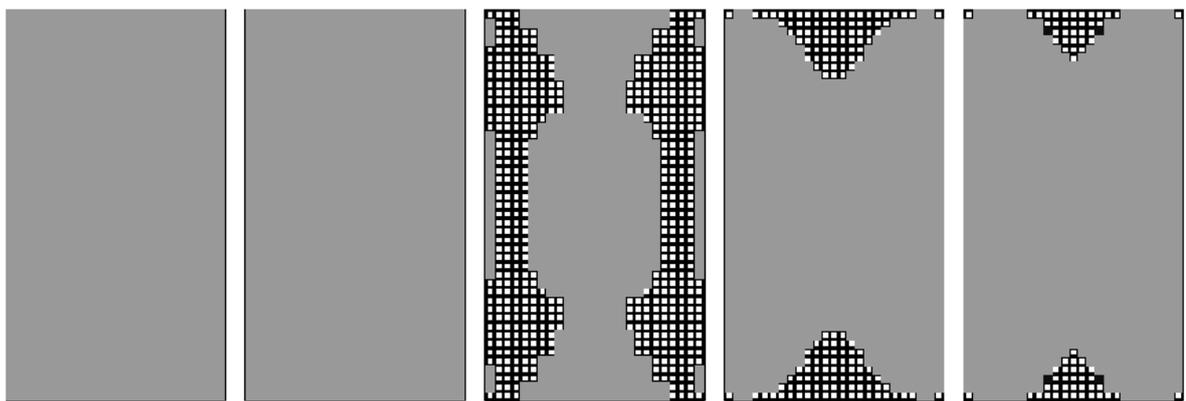


図 3.3-19(12) 計算ステップ 1300

以上より、⑤の累積被害則の破壊基準を圧縮強度から引張強度へ替えただけのケースであるが、計算ステップと換算回数の関係が平面モデルでの解析と近くになった。ただし、感度を変えただけでは⑤と動揺に要素の損傷の過程は、実験よりは早期に床版上面の破壊が進行することとなった。

7) ケース⑦

本ケースは、要素が主引張ひずみに伴う体積変化の累積で破壊するとしたものである。

要素の主ひずみによる単位体積あたりの弾性ひずみエネルギー量 U は以下で表される。

$$U = \frac{1}{2}\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \frac{1}{2}\sigma_{22}\varepsilon_{22} + \frac{1}{2}\sigma_{33}\varepsilon_{33} \quad \dots \text{(式 3.3-24)}$$

よって、荷重を 1→2→3→4→5 の順で載荷した場合のエネルギー変化量 ΣU は、以下より得られる。

$$\Sigma U = 2 \times (\text{Max}(U_i) - \text{Min}(U_i)) \quad (i = 1 \sim 5) \quad \dots \text{(式 3.3-25)}$$

ここで i は載荷位置で

$$U_i = \frac{1}{2}(\sigma_{11-i})(\varepsilon_{11-i}) + \frac{1}{2}(\sigma_{22-i})(\varepsilon_{22-i}) + \frac{1}{2}(\sigma_{33-i})(\varepsilon_{33-i}) \quad \dots \text{(式 3.3-26)}$$

ここでは主引張応力度と引張ひずみが同時に生じた場合に、破壊に寄与するエネルギーが要素に蓄積されると考え、エネルギー量 ΣU の累積値が最大の要素から破壊するものとして解析を行う。主引張応力度に対応するひずみは、3軸の応力状態を考慮して以下の関係をもとに算出する。

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E}(\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})) \quad \dots \text{(式 3.3-27)}$$

引張強度が 2.5N/mm^2 のコンクリートを想定し、コンクリートの S-N 線図にはひずみエネルギーを用いて以下のように仮定した。

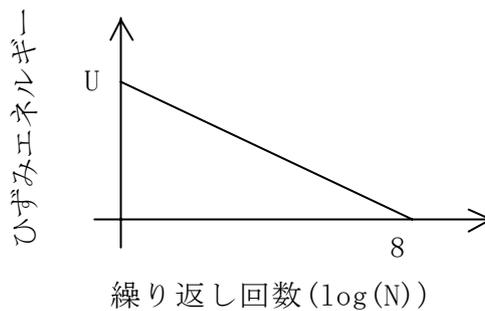
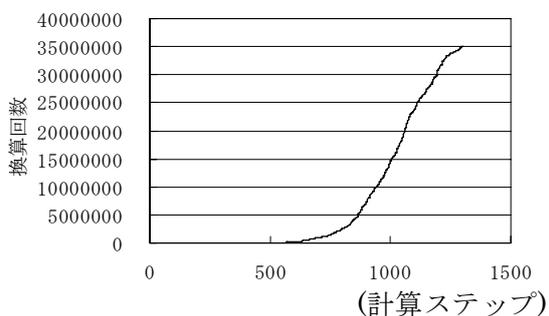


図 3.3-20 解析で使した疲労曲線

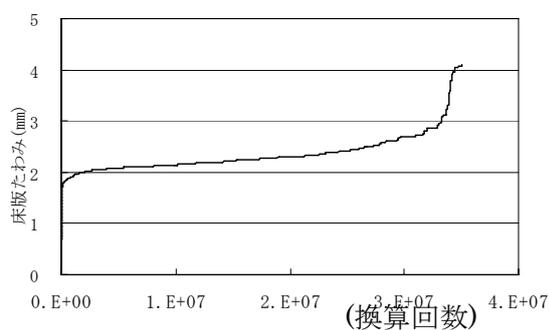
ここで、 U の破壊基準はコンクリートの引張強度とした。

$$U = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon = \frac{1}{2E}\sigma^2 = \frac{2.5^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.000125 \quad (\text{N/mm}^2) \quad \dots \text{(式 3.3-28)}$$

計算結果、換算回数との関係を図 3.3-21 に示す。

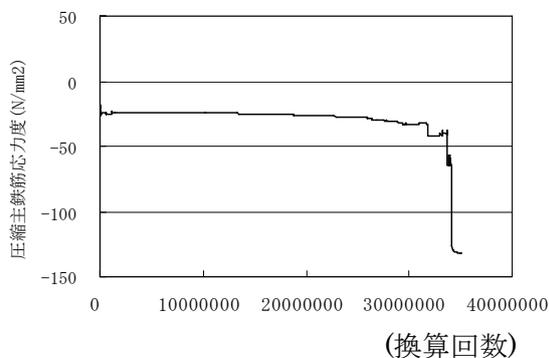


計算ステップと換算回数

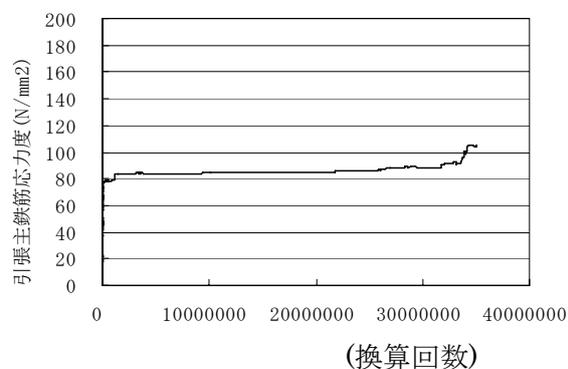


換算回数と床版たわみ

(1) たわみ

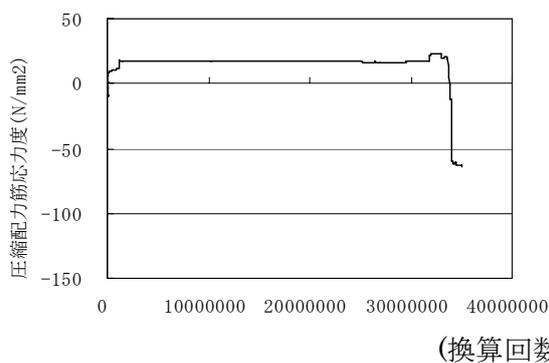


換算回数と上面主鉄筋応力度

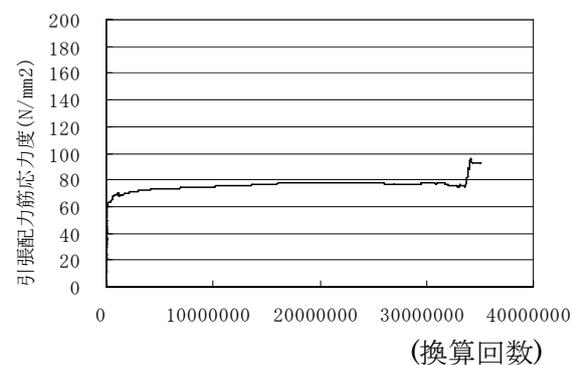


換算回数と下面主鉄筋応力度

(2) 主鉄筋の応力度



換算回数と上面配力鉄筋応力度



換算回数と下面配力鉄筋応力度

(3) 配力筋の応力度

図 3.3-21 計算結果と換算回数

以下に、計算ステップ毎の要素の破壊状況を示す。

なお、黒色の要素がその計算ステップで破壊に達した要素、灰色の要素がそれ以前の計算ステップで既に破壊させた要素である。

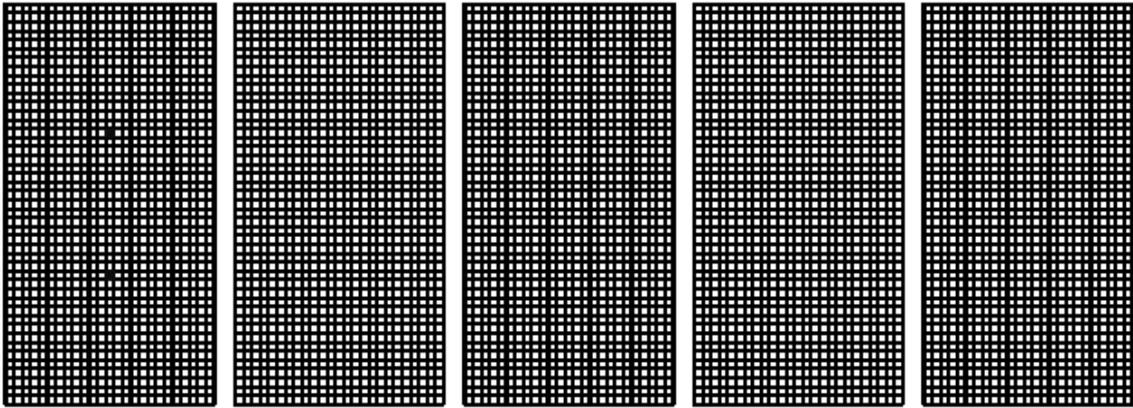


図 3.3-22(1) 計算ステップ 1

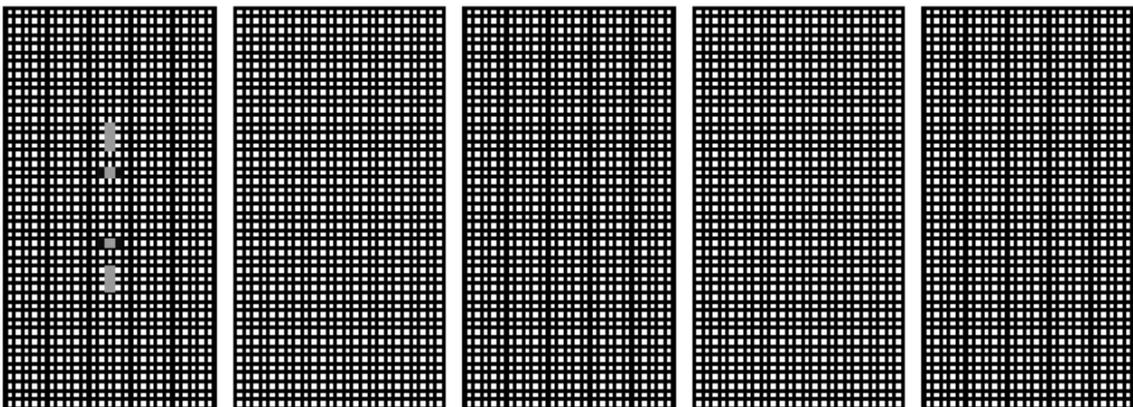


図 3.3-22(2) 計算ステップ 5

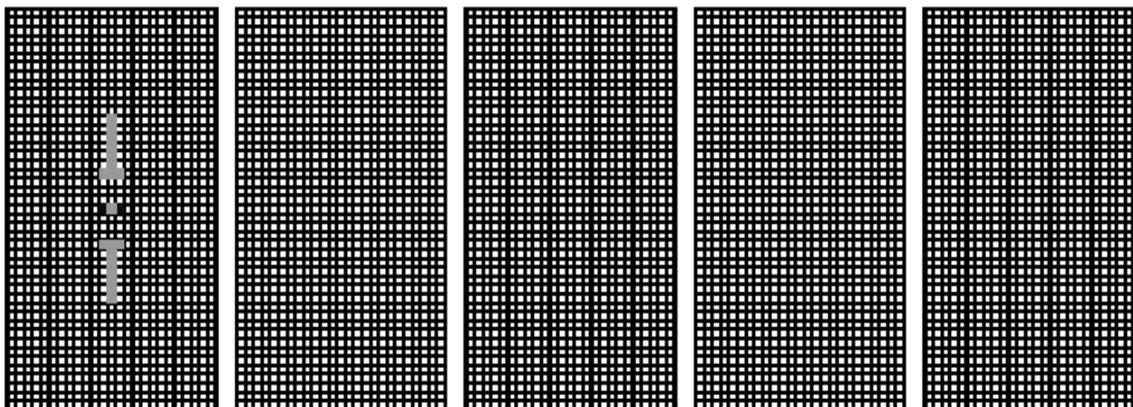


図 3.3-22(3) 計算ステップ 10

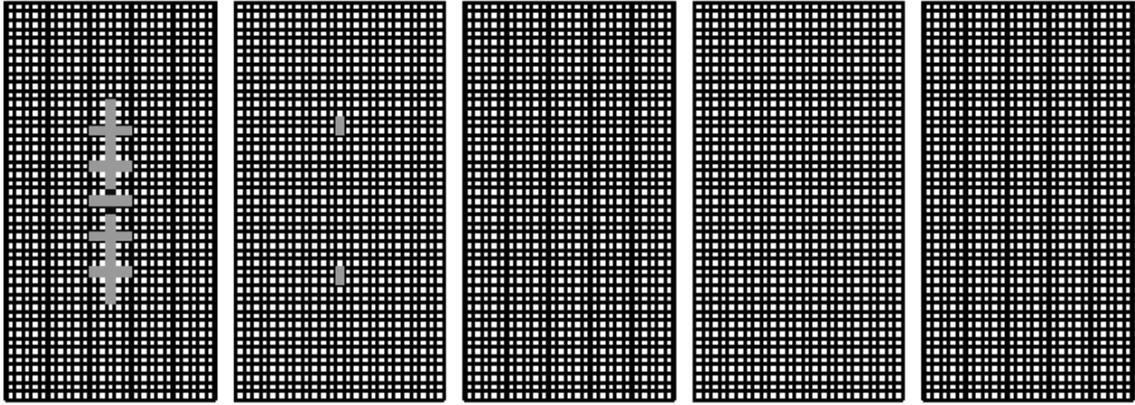


図 3.3-22(4) 計算ステップ 20

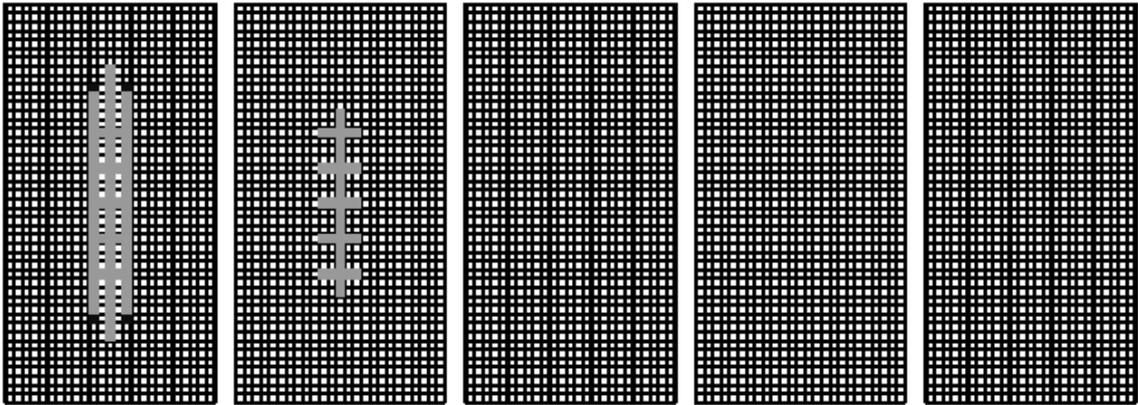


図 3.3-22(5) 計算ステップ 50

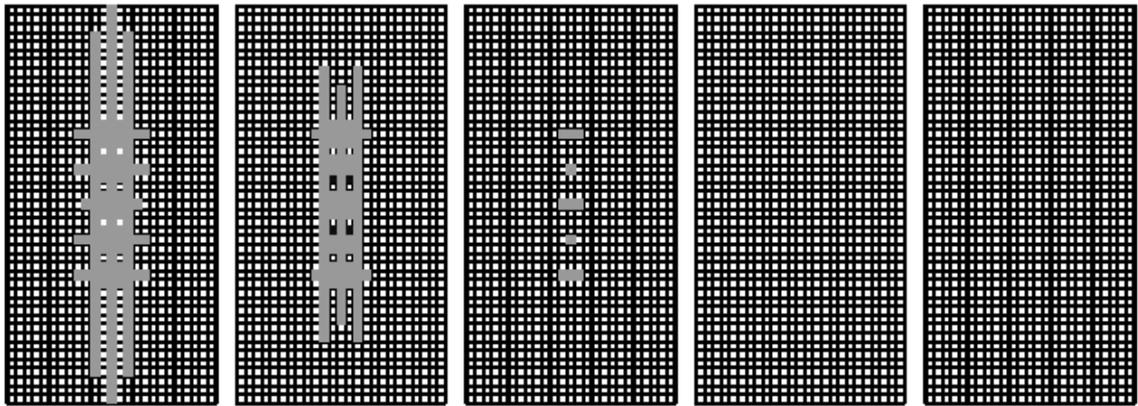


図 3.3-22(6) 計算ステップ 100

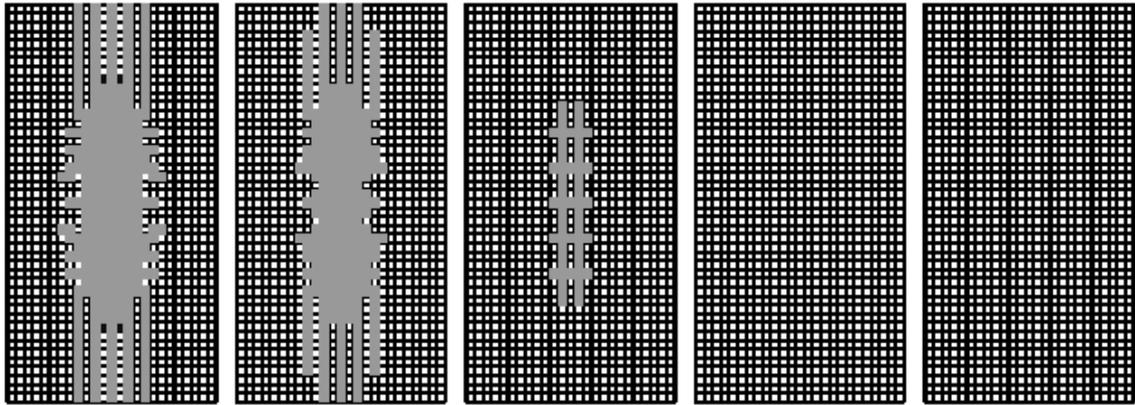


図 3.3-22(7) 計算ステップ 200

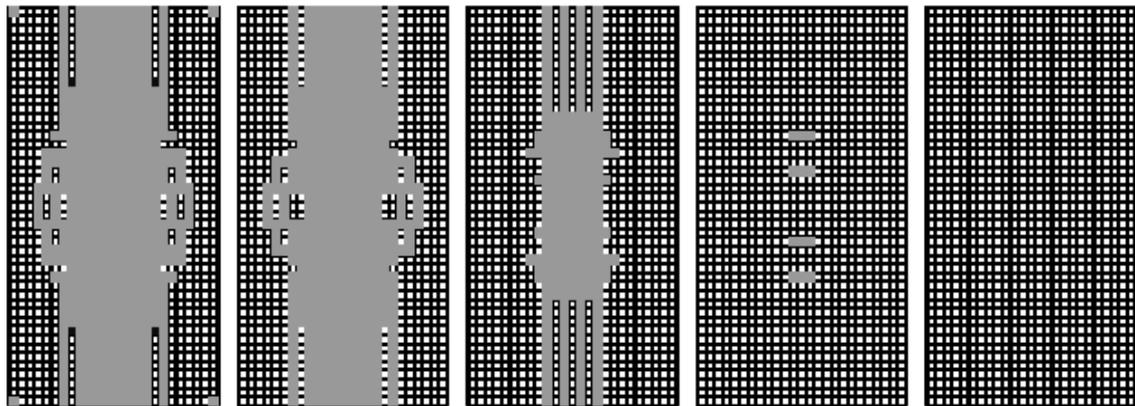


図 3.3-22(8) 計算ステップ 400

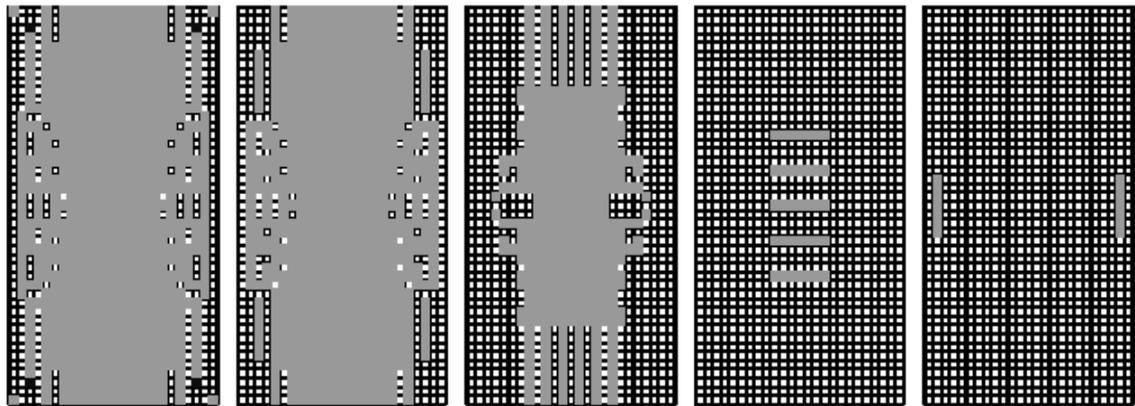


図 3.3-22(9) 計算ステップ 600

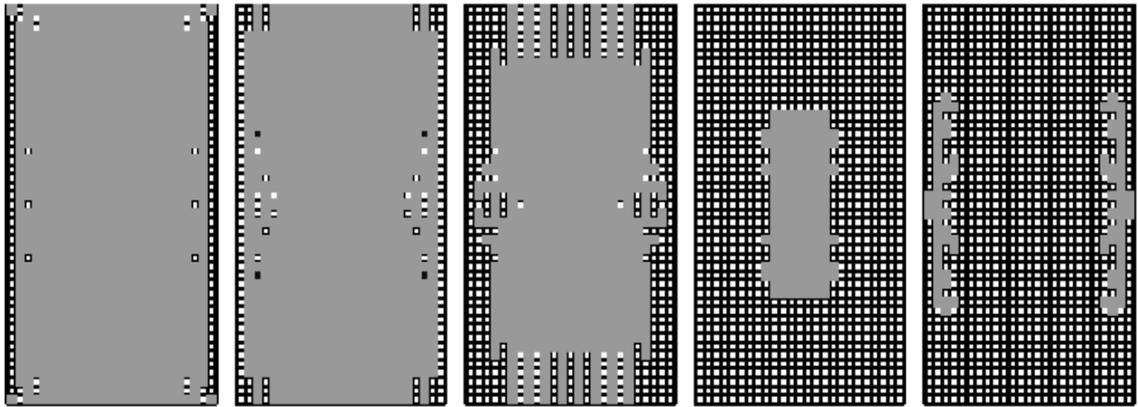


図 3.3-22(10) 計算ステップ 800

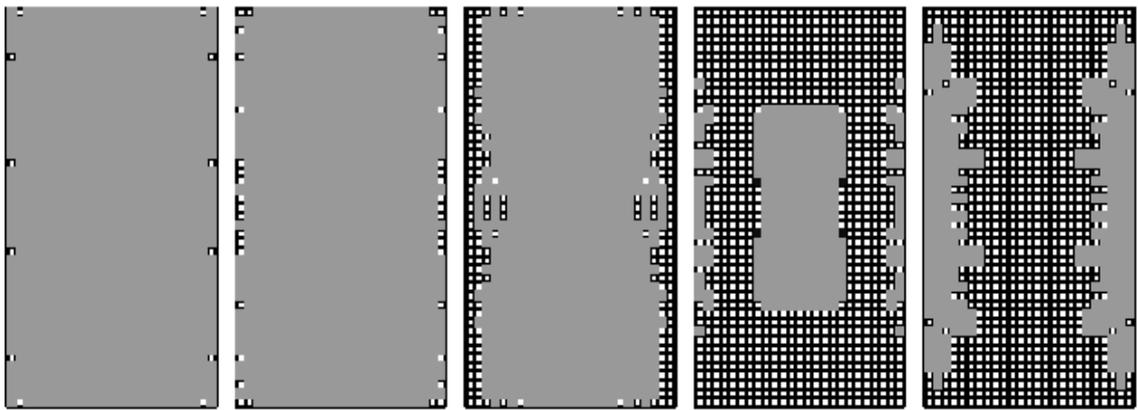


図 3.3-22(11) 計算ステップ 1000

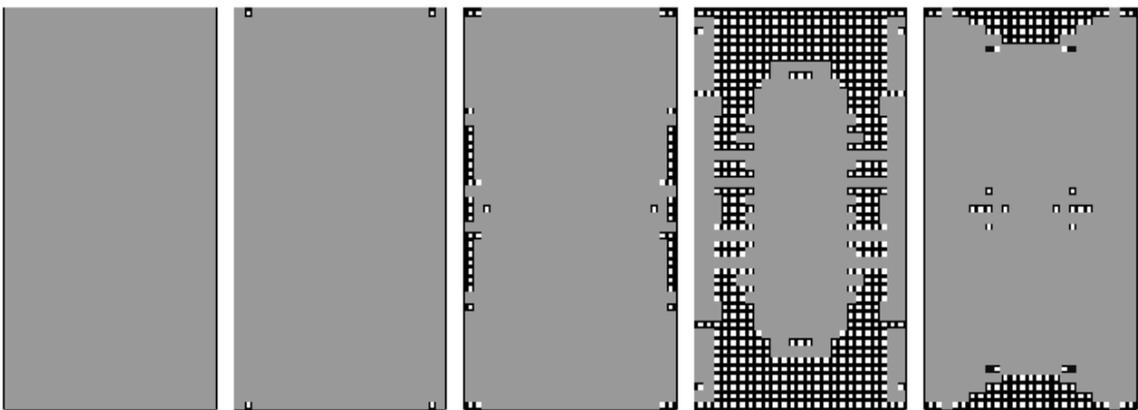


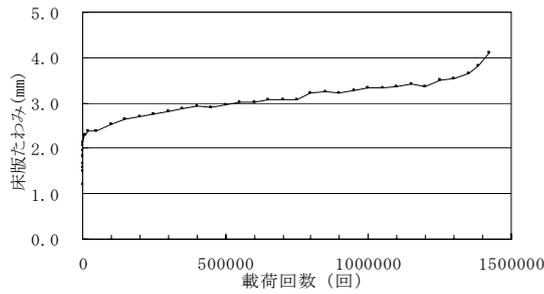
図 3.3-22(12) 計算ステップ 1300

以上より、本ケースはケース②とエネルギー量の累積の仕方のみが異なる条件であるが、床版たわみ、要素の損傷過程など、最も実験結果に近い傾向となった。

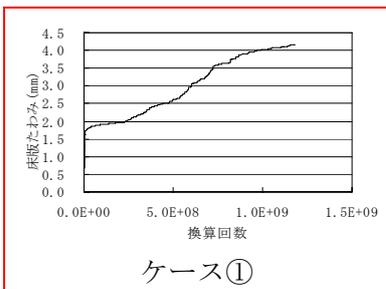
3.3.4 各疲労被害則の比較

1) 床版たわみの変化傾向

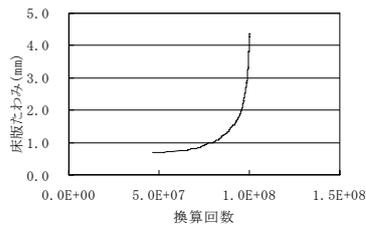
床版たわみの変化傾向について試験結果と解析結果を比較すると、輪荷重走行試験の供試体でみられるような、荷重載荷直後に床版たわみが急激に増加し、その後緩やかな増加を続けた後に再び増加傾向を示すといった傾向を示したものは、ケース①、⑦である。



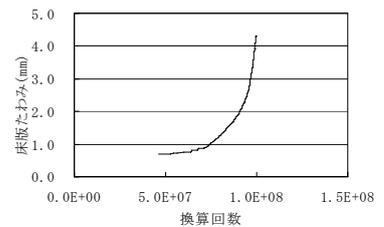
輪荷重走行試験結果



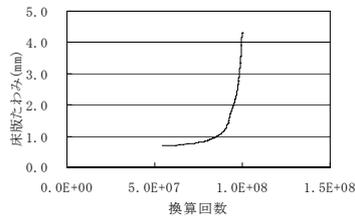
ケース①



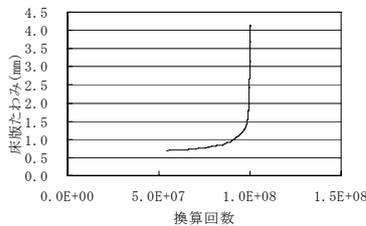
ケース②



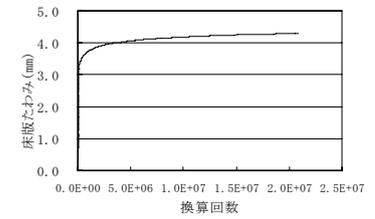
ケース③



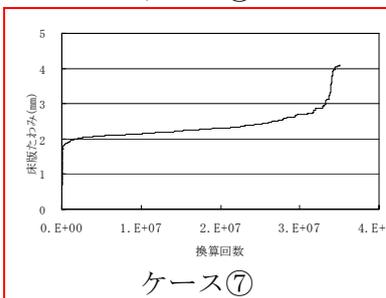
ケース④



ケース⑤



ケース⑥

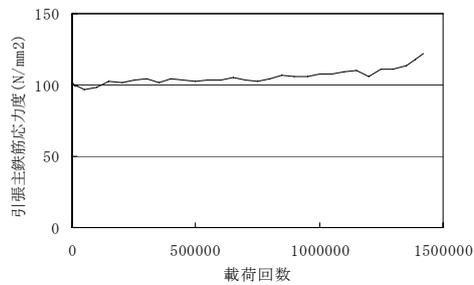


ケース⑦

図 3.3-23 床版たわみの変化

2) 引張主鉄筋応力度

引張鉄筋応力度について比較すると、輪荷重走行試験の供試体で計測されているように、荷重開始直後に急激に増加し、その後床版コンクリートの破壊範囲が拡大している間もほぼ一定の値で推移したものは、ケース①、⑥、⑦であった。



輪荷重走行試験結果

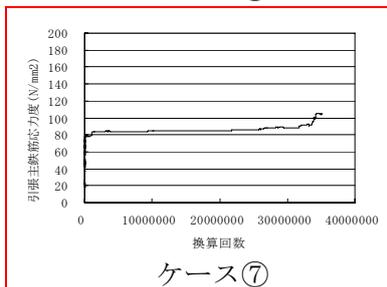
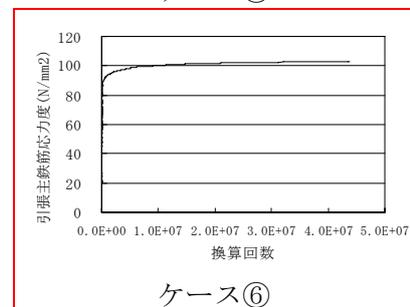
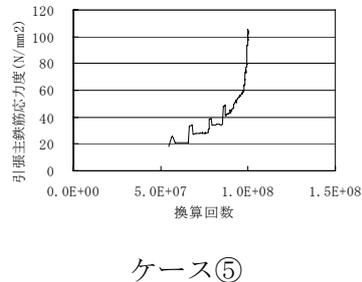
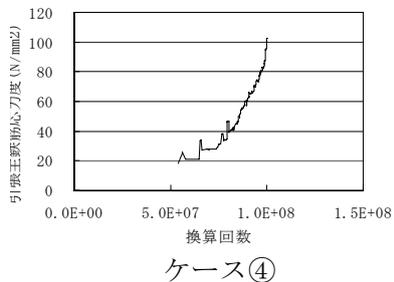
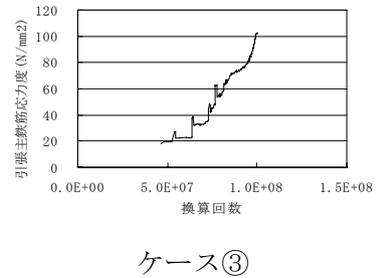
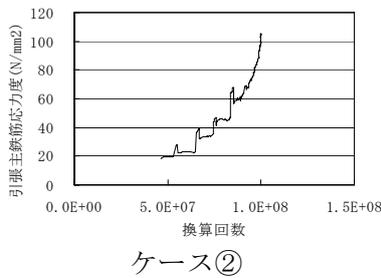
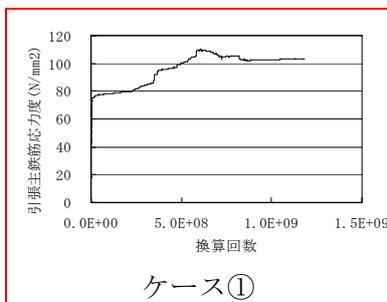
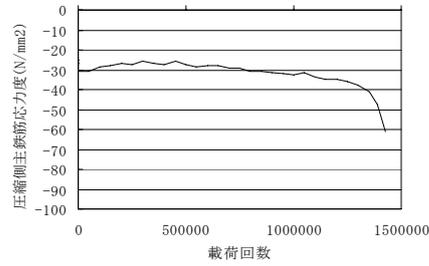


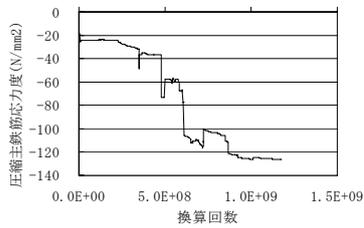
図 3.3-24 引張主鉄筋応力度

3) 圧縮主鉄筋応力度

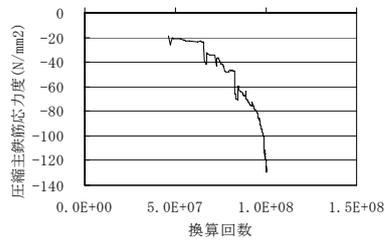
圧縮主鉄筋応力度について比較すると、輪荷重走行試験結果と同じように载荷開始直後より破壊過程の末期まではほぼ一定の値で推移したのはケース⑦であった。



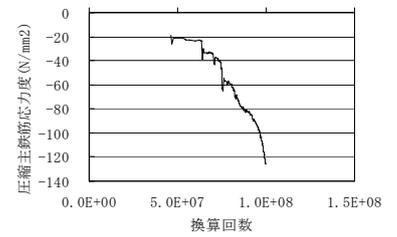
輪荷重走行試験結果



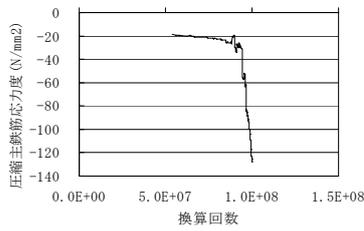
ケース①



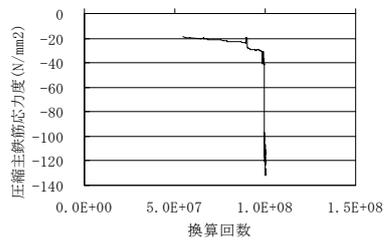
ケース②



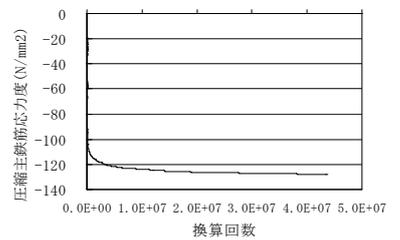
ケース③



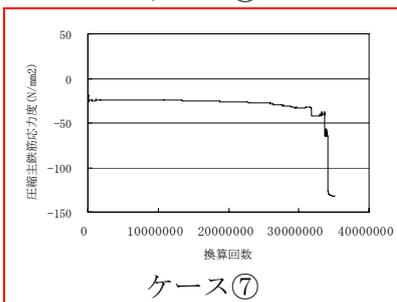
ケース④



ケース⑤



ケース⑥



ケース⑦

図 3.3-23 圧縮側主筋応力度の変化

4) 引張配力鉄筋応力度

引張配力鉄筋応力度について比較すると、輪荷重走行試験と同様に床版の破壊が進行した最終段階まではほぼ一定の値で安定して推移したものは、ケース⑥、⑦であった。ケース①は初期の段階では比較的安定しているが圧縮主鉄筋同様、比較的ケース⑥、⑦に比べて早い段階で不安定な挙動を示す。

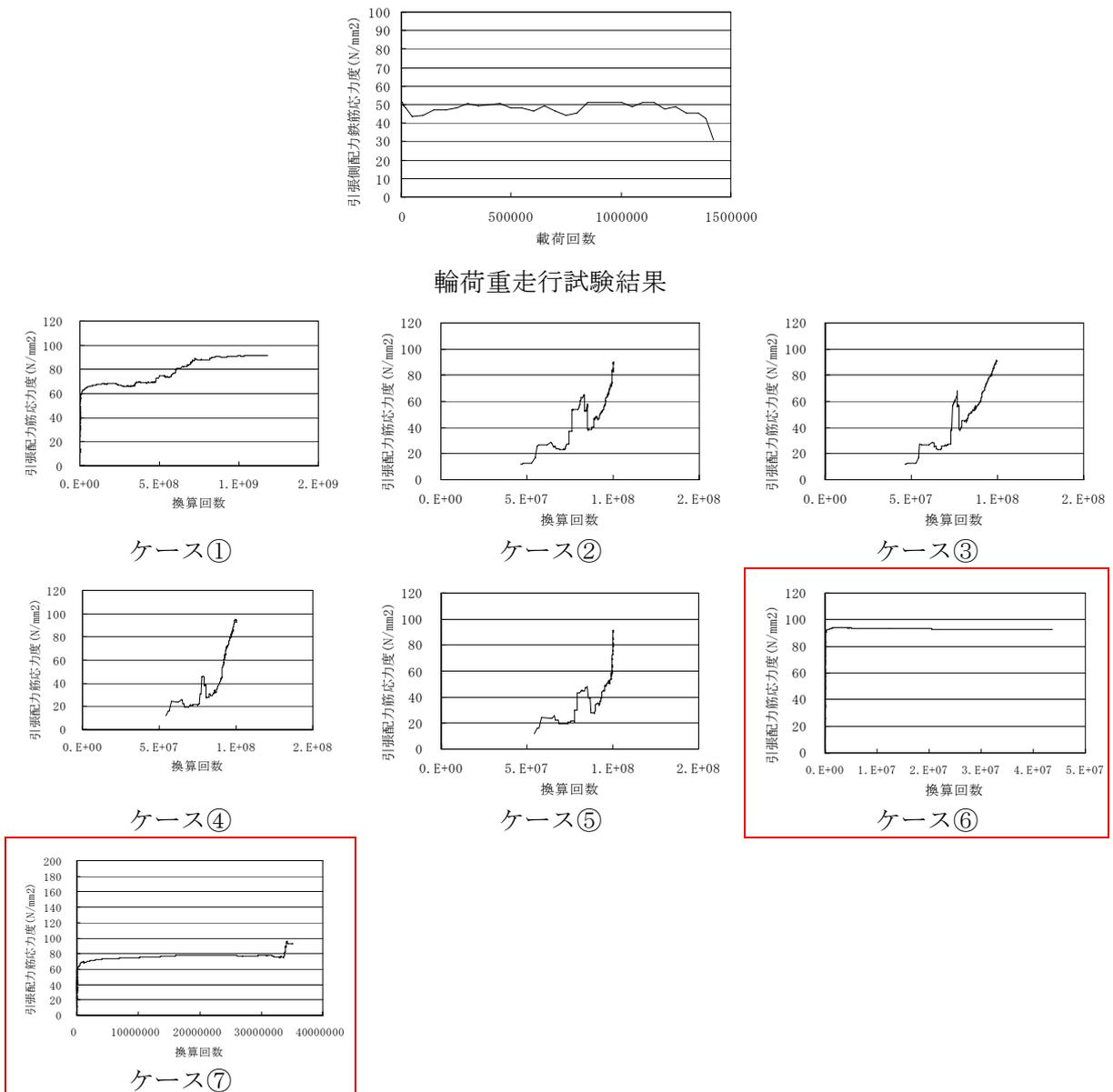


図 3.3-24 引張側配力筋応力度の変化

5) 圧縮配力鉄筋応力度

圧縮配力鉄筋応力度については、応力値の小さな域での変動である。輪荷重走行試験同様に载荷開始直後より破壊直前の損傷過程末期まで大きな変動がない推移したものは、ケース⑥、⑦のみであった。ケース⑦の応力値の符号は異なるが、値が小さいことで応力変動の推移という観点で同様と判断した。

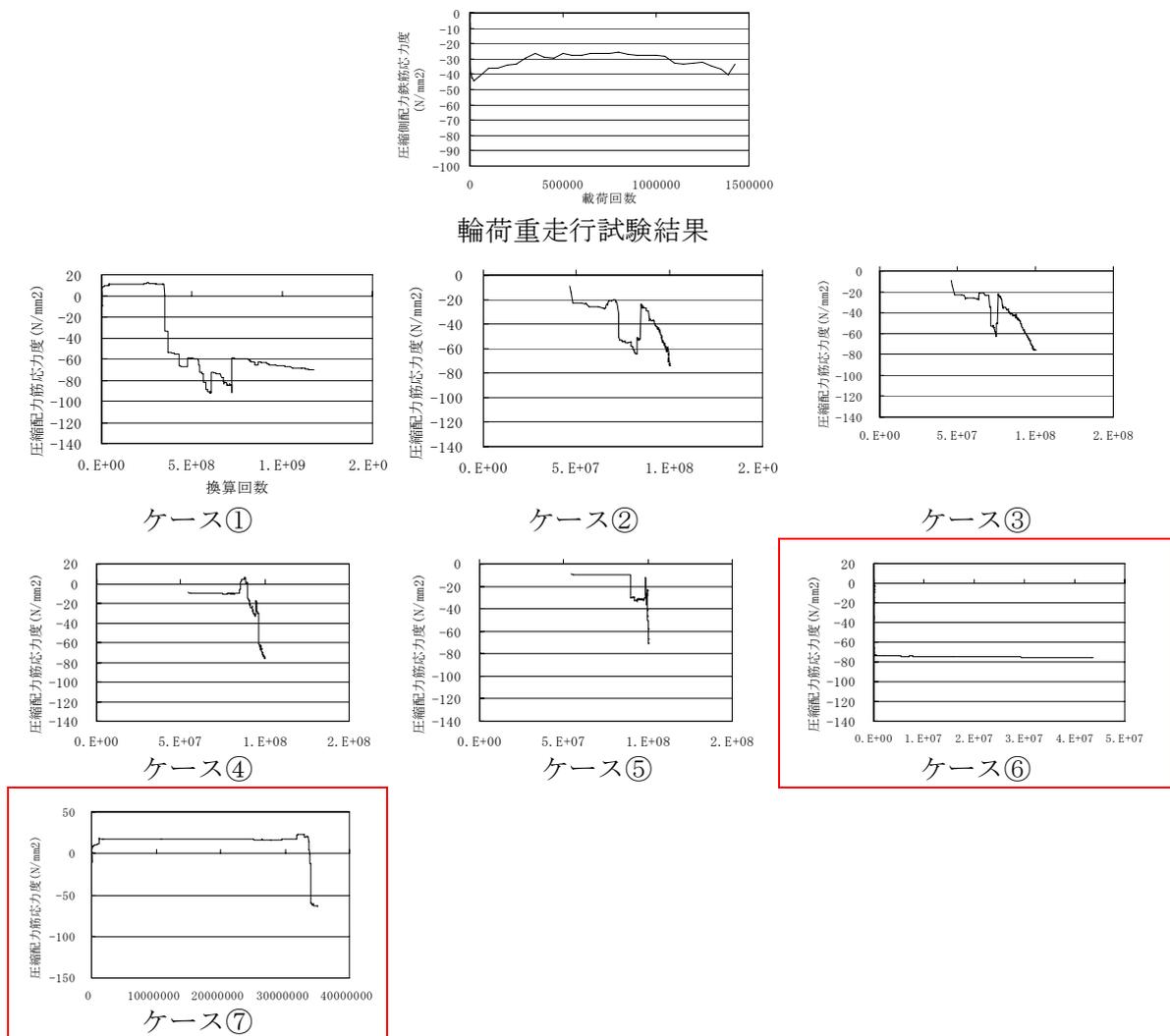


図 3.3-25 圧縮側配力筋応力度の変化

6) ひび割れ領域発生状況（破壊要素の発生状況）

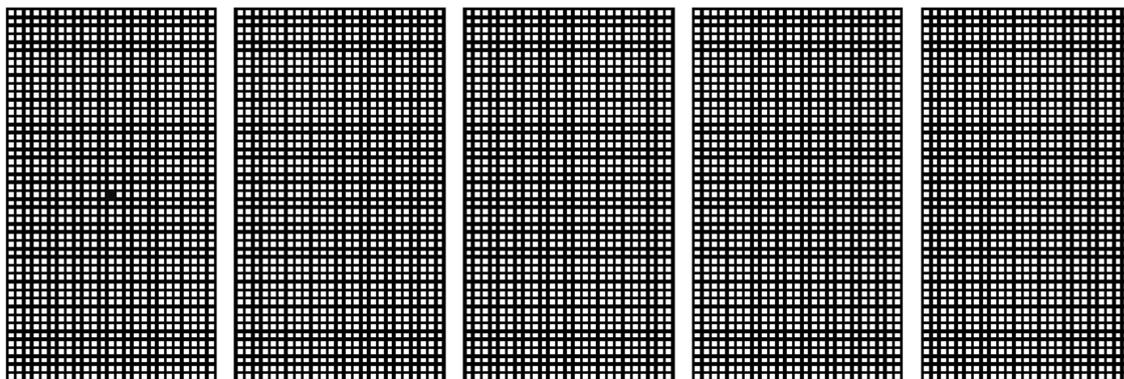
本検討での解析では破壊基準に達したコンクリート要素の弾性係数を低下させているが、これは実際の床版において、ひびわれの発生した床版コンクリート部分のある範囲の力学的特性が床版全体の挙動にあたる影響を模擬したものと捉えており、その拡がりや密度はひび割れ密度やひびわれ深さとある程度整合しているものと考えている。

ひび割れが生じたとみなせる領域の発生状況について、床版たわみ等が比較的輪荷重走行試験の結果と類似した挙動を示す解析結果が得られたケース①、⑦について比較考察する。

ステップ1で、ケース①では床版下面中央で破壊が生じているが、ケース⑦は中央からやや離れた位置ではじめにコンクリート要素の破壊が生じている。これはケース①では荷重が移動する間に累積するエネルギー量を、荷重載荷点の移動量ごとエネルギー量の合計としたのに対し、ケース⑦は、最大のエネルギー量と最小のエネルギー量の差によるエネルギー量としたことの相違が関係している可能性がある。

ケース⑦において床版中央で最初に破壊が生じるのは、荷重載荷範囲が床版中央位置から対称な範囲にあり、中央から隣接する両側の載荷位置に荷重が作用する際に交番するせん断応力度によるひずみエネルギーの影響が考えられる。

ケース①



ケース⑦

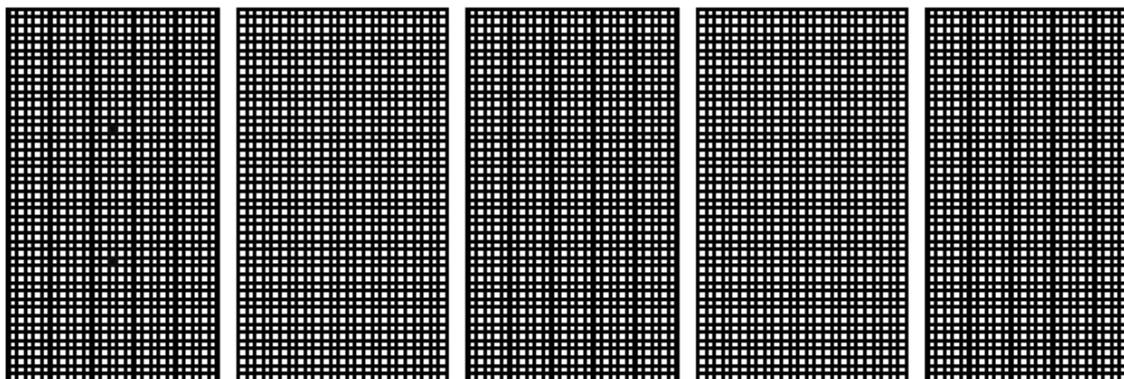
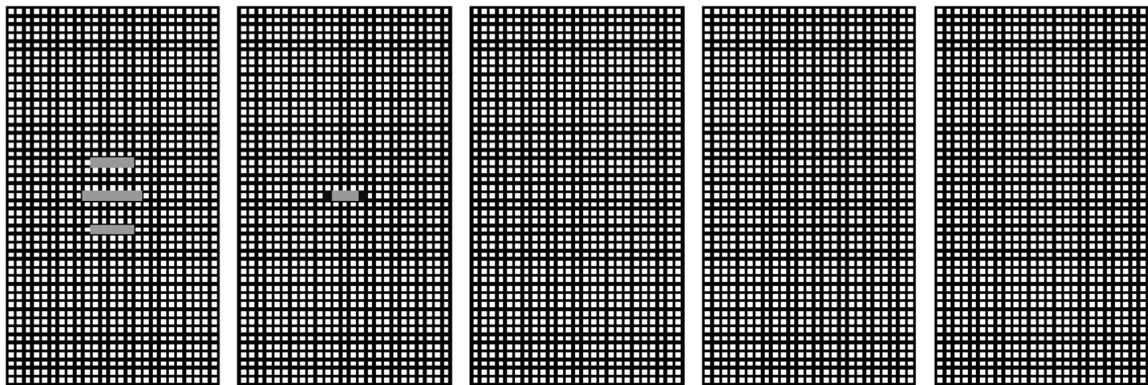


図 3.3-26 ひび割れ状況（ステップ1）

ステップ10（要素が10個破壊した段階）の解析結果では、ケース①のひび割れ発生状況はステップ1では引張応力度の変動振幅が卓越する輪荷重直下の床版下面側で破壊が先行している。また最下層での損傷範囲の拡大と並行して下から2層目の要素にもひび割れが生じており、最下層のコンクリートが破壊したことで構造系が変化し、輪荷重による応力変動が破壊部の直上のコンクリートで大きくなったことによると考えられる。これは実床版ではひびわれが上方（床版内部の深さ方向）へ進展していく現象に対応するものと考えられる。尚、図では解析における要素ごとの損傷を着色しており、要素の損傷の主たる要因となった振幅方向まで表現できていない。よって要素の損傷の列は実際のひび割れの方向を示すものではない。ケース⑦はケース①に比べてやや狭い幅で最下層の破壊範囲の広がりが卓越する傾向になっている。

ケース①



ケース⑦

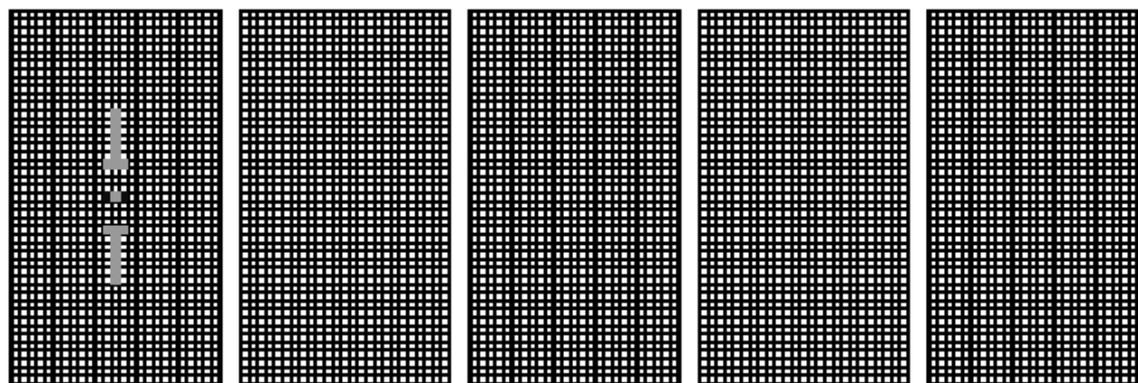


図 3.3-27 ひび割れ状況（ステップ10）

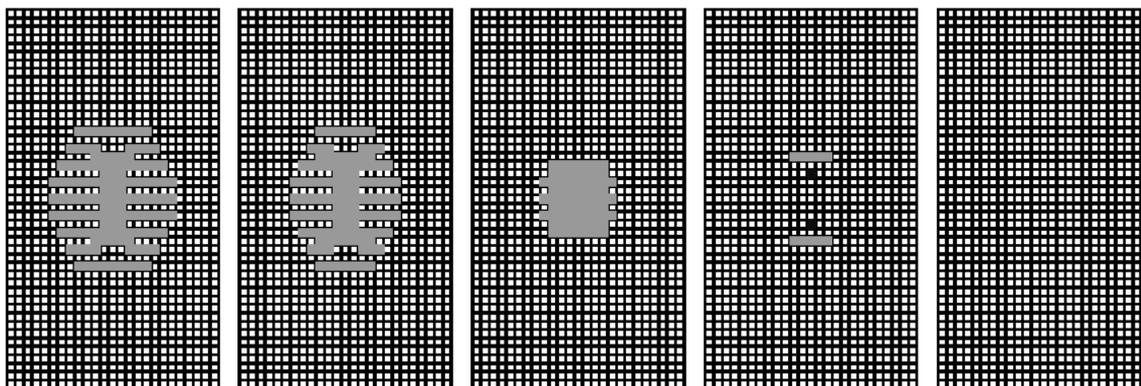
ステップ 100（コンクリート要素の破壊数 100 個段階）のモデルの状況を以下に示す。ケース①⑦ともに、床版中央付近で最下層から破壊が先行し、最下層での周辺への拡大と並行して上方への破壊範囲の拡大が生じている。

ただし、ケース①とケース⑦では水平と上方への破壊速度の関係に相違がみられ、ケース①では中央部の破壊が進むが最下層でも破壊領域の面積的な広がり⑦よりも小さい。

一方で、ケース⑦では早期に荷重位置ライン上の床版最下層要素の破壊領域が縁境界に達し、上方への破壊の進行はケース①に比べてやや遅れる傾向がある。

ケース⑦は主引張によるひずみエネルギーによりひび割れが生じると仮定しているため、床版下面側でのひび割れ発生が先行しているのに比べて、ケース①では引張応力度のみが影響するとしているため要素の破壊で直下のコンクリートの有効断面が損なわれた要素では大きな引張応力が生じることとなり破壊が上方へも早く進行しているものと考えられる。

ケース①



ケース⑦

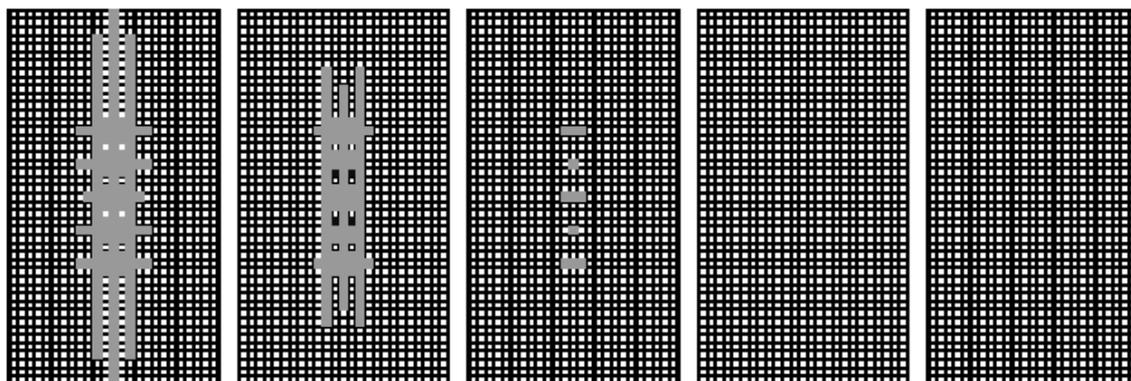
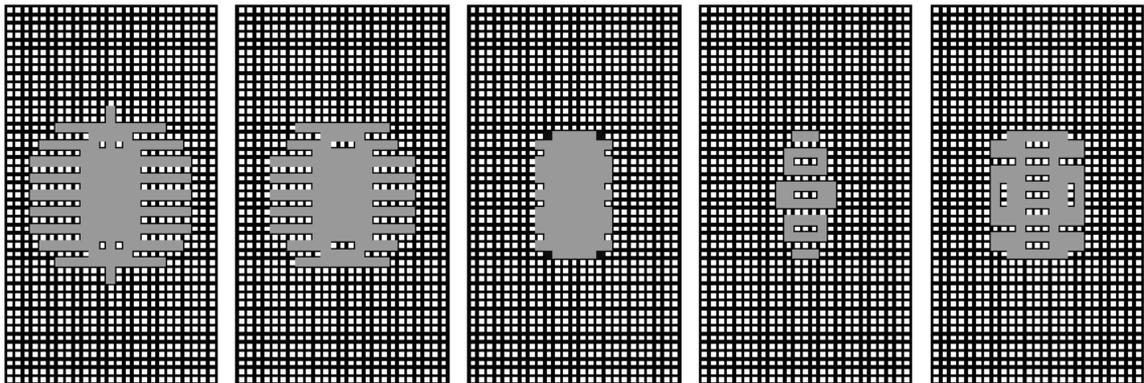


図 3.3-28 ひび割れ状況（ステップ 100）

ステップ 200(コンクリート要素の破壊 200 個段階)でのモデルの状況を以下に示す。ステップ 100 段階での傾向がさらに顕著となっており、ケース①では下面側のひび割れが限られた範囲で発生する一方で、上面側でも下面側と同程度の範囲でひび割れが発生しており、中間層の破壊領域が上下層より少なくなっている。これに対してケース⑦では下面でひび割れ領域が拡大しているが、上面側での要素の破壊は生じていない。

ケース①



ケース⑦

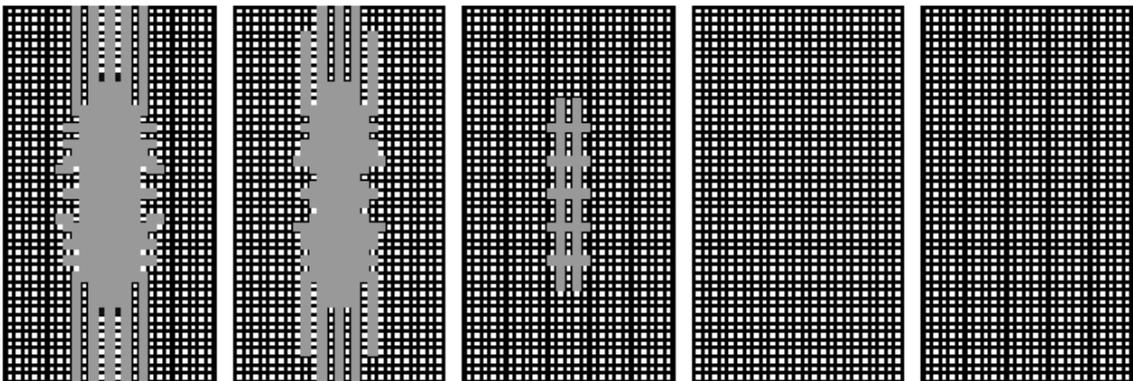


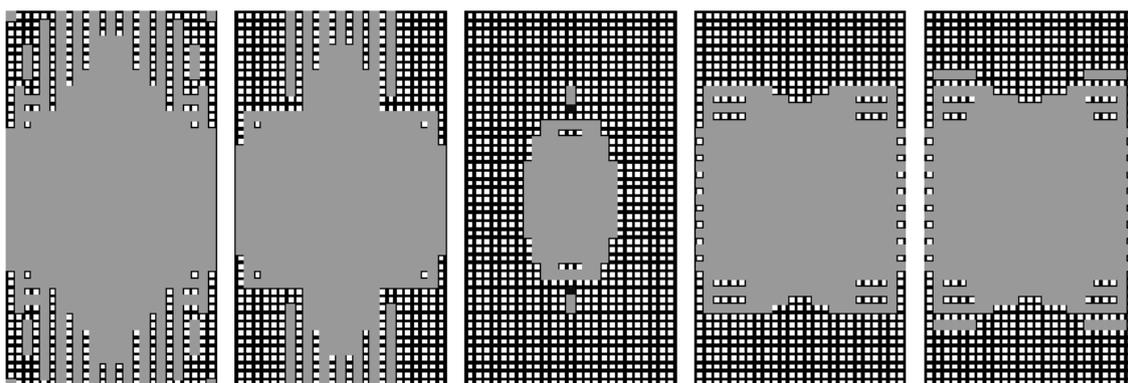
図 3.3-29 ひび割れ状況 (ステップ 200)

ステップ 800（コンクリート要素の破壊 800 個段階）でのモデルの状況を以下に示す。ケース①ではステップ 200 段階でみられた破壊進行の傾向がさらに顕著なものとなり、床版上下面でひび割れがほぼ全域に拡大する一方で、床版厚方向の中間層の破壊領域は中央部に限られ、その範囲も上下の層に比べて小さくなっている。

輪荷重走行試験における床版の破壊性状は、ひび割れによって床版としての機能寄与が損なわれる範囲は下層で大きく上方に行くほど小さくなる傾向があり、ケース①はその点で実験とは乖離がみられる。

ケース⑦では、基本的に床版下面側より破壊が拡大する傾向は一貫している。ただし最上層では荷重位置でない周辺部の破壊が先行して現れている。輪荷重走行試験においても、床版上面では最終段階において荷重位置以外に少し離れて供試体縁部に近い範囲でひび割れが生じている。これは、供試体の浮き上がりを防止するために、回転拘束を与えないように、支持桁を固定したため、床版上面に引張が生じたものであり、解析においても鉛直方向には両辺（両長辺）で固定としているため、ケース⑦の最上層でも同位置で破壊が生じている。

ケース①



ケース⑦

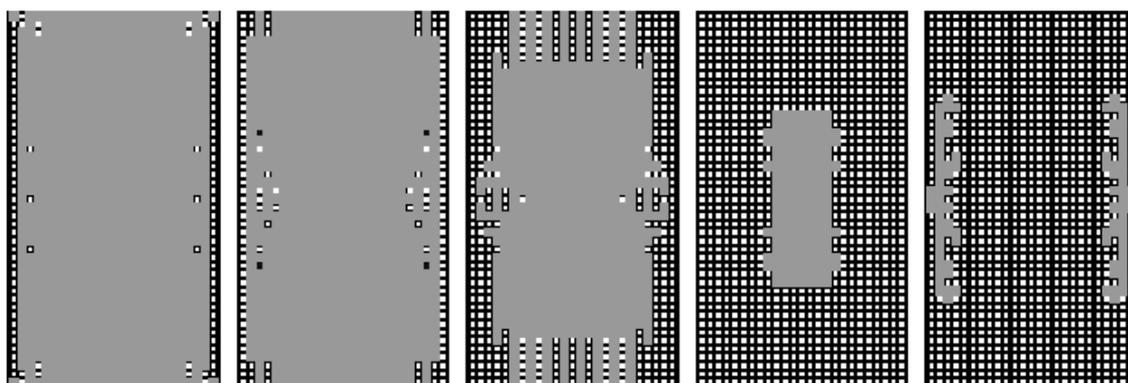


図 3.3-30 ひび割れ状況（ステップ 800）

以上、様々な破壊基準を仮定して解析的にコンクリート床版の疲労損傷過程を模擬的に表現することを検討したが、輪荷重走行試験結果に比較的近いと考えられる破壊過程が得られたのは主引張応力によるひずみエネルギーの変化が蓄積することのみが各要素の疲労破壊に寄与すると仮定したケースであった。

特にケース⑦では、他案に対して最も輪荷重走行試験の測定結果と近い破壊進展の傾向が得られたと考えられる。

破壊基準の定量的評価については知見がなく、本検討ではあくまで床版コンクリートの破壊領域の広がりと共に現れるたわみ変化や内部鋼材の応力変化の傾向の相似性でもって輪荷重走行試験との比較を行った。したがって今後、着目したコンクリート要素の破壊による疲労損傷の進展過程の定量的な検証が必要である。

R C床版について、床版コンクリートを細かい要素で分割した解析モデルを用いて、それぞれの要素に荷重の繰り返しに伴う応答に関連づけた疲労ダメージの要因となる物理量を設定するとともにそれらの蓄積に対して破壊基準を設けることで、輪荷重走行試験でみられる床版全体の損傷過程（たわみ、ひび割れ、鉄筋応力）を擬似的に再現できる可能性があることが示された。

3.3.5 疲労被害則の適用性の検討

(1)概要

前項までの3次元FEM解析モデルを用いたRC床版の移動荷重の繰り返しによる損傷過程の解析的評価手法のうち、比較的实验結果と整合する損傷過程が得られた主引張りずみエネルギー振幅と関連づけて疲労によるダメージの蓄積が生じるとした方法によって、床版厚、支間長等が異なる床版を対象に適用性のより詳細な検討を行う。

実務で床版の疲労耐久性評価に用いるにあたっては、少なくとも種々の条件が異なる床版の疲労耐久性についての相対評価ができることが必要である。そのためここでは過去の輪荷重走行試験の結果から、適用基準の相違やプレストレスの導入などの構造条件の違いと疲労耐久性の関係を明らかにするなどの目的で行われ、疲労耐久性の相対的な関係が推定されているものを選び、上記の3次元モデル解析による方法で疲労損傷過程を再現し実験結果との比較を行う。

文献等から得られた輪荷重走行試験結果では、それぞれの破壊判定基準が明確でなく、ここでは輪荷重走行試験の最終載荷回を破壊と仮定した。輪荷重走行試験では通常床版コンクリートの破壊が進みたわみが急増して載荷の継続が困難になった時点が最終載荷回となるため、解析では輪荷重走行試験結果のたわみの急増と、鉄筋応力度が急激な変化が生じた時点を破壊として比較対象とした。

(2) 検討ケース

検討では表 3.3-4、表 3.3-5 に示す、輪荷重走行試験の詳細が把握できる床版供試体を対象とする。①～④は 2 章に諸元等を示した旧土木研究所の輪荷重走行試験機による一定荷重載荷試験が行われたものと同じである。(①：RC39-3、②：RC39-5、③：RC39-4、④：RC47-1)

⑤、⑥は大阪大学の輪荷重走行試験機による一定荷重載荷試験の結果である。

表 3.3-4 対象床版

供試体		床版厚	幅 (支間)	長さ	荷重	適用示方書
		(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	
①	RC39-105	190	2800 (2500)	4500	105	昭和39年 道示
②	RC39-167	〃	〃	〃	167	〃
③	RC39-196	〃	〃	〃	196	〃
④	RC47	200	〃	〃	210	昭和48年 道示
⑤	N1 ^{*1}	180	2000 (1800)	3000	210	〃
⑥	DR1 ^{*2}	190	2000 (1800)	3000	142	昭和39年 道示

*1 「道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性」平成 3 年 12 月阪神高速道路公団、阪神高速道路管理技術センター

*2 「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」昭和 59 年 11 月 松井繁之

表 3.3-5 対象床版諸元

供試体		コンクリート			引張側 主鉄筋	圧縮側 主鉄筋	引張側 配力鉄筋	圧縮側 配力鉄筋
		E_c	σ_c	σ_t	径、間隔 (有効高さ)	径、間隔 (有効高さ)	径、間隔 (有効高さ)	径、間隔 (有効高さ)
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
①	RC39-105	1.62×10^4	13.6	1.44	D16@150 (160)	D16@300 (30)	D16@300 (146)	D10@300 (43)
②	RC39-167	2.34×10^4	31.1	2.49	〃	〃	〃	〃
③	RC39-196	2.39×10^4	29.7	2.69	〃	〃	〃	〃
④	RC47	2.31×10^4	29.9	2.92	D19@125 (160)	D19@250 (40)	D16@100 (142)	D16@200 (58)
⑤	N1 ^{*1}	2.79×10^4	54.2	3.88 ^{*3}	D16@100 (150)	D16@200 (30)	D16@125 (134)	D16@250 (54)
⑥	DR1 ^{*2}	2.00×10^4	29.0	2.54 ^{*3}	D16@90 (160)	D16@180 (30)	D13@250 (145.5)	D13@400 (44.5)

*3： σ_c を用いて文献内で算出された値。

供試体①～⑥を対象とした解析は、同じ床版に異なる載荷荷重が作用した場合に、解析で評価される疲労寿命がどのように変化するかの確認をする。実際の試験供試体①～③はそれぞれ床版コンクリートなどの材料特性は若干の相違があるが、解析では傾向に大きく影響しないと判断して簡便のためにすべて同一の材料特性とした。（ $E_c=2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_t=2.5 \text{N/mm}^2$ ）

供試体④は供試体①～③と支間長が等しく床版厚が異なった供試体である。このため、④を対象とした解析では、試験と同じ荷重を作用させ、供試体①～③と同様の弾性係数等の値を使用して、床版厚の相違が解析結果から推定される疲労耐久性にどのような相違となって現れるかを検討した。

供試体⑤、⑥は、適用示方書が異なり配筋量に相違がある。このためこれらを対象にした解析では、従来道路橋示方書で行われてきた配筋量の増加措置が解析上疲労耐久性にどのような効果として反映されるかを検討した。

解析モデル、破壊基準、被害則の詳細を下記に示す。

床版支間方向に 25 分割、橋軸方向に 45 分割、厚さ方向に 5 分割し、1 要素 $100 \times 100 \times 38 \text{mm}$ としたソリッド要素を用いて計算した。荷重は、図 3.3-31 に示す位置に、節点集中荷重とし 5 箇所を順次載荷してそのとき得られる応答から 1 回の荷重移動あたりの床版の応答を算出する。鉄筋は埋め込み鉄筋要素を用いてモデル化しているが、付着切れや付着の劣化などの特性の変化は考慮していない。境界条件は、橋軸側（両側）の最下段節点を鉛直方向に移動固定した。

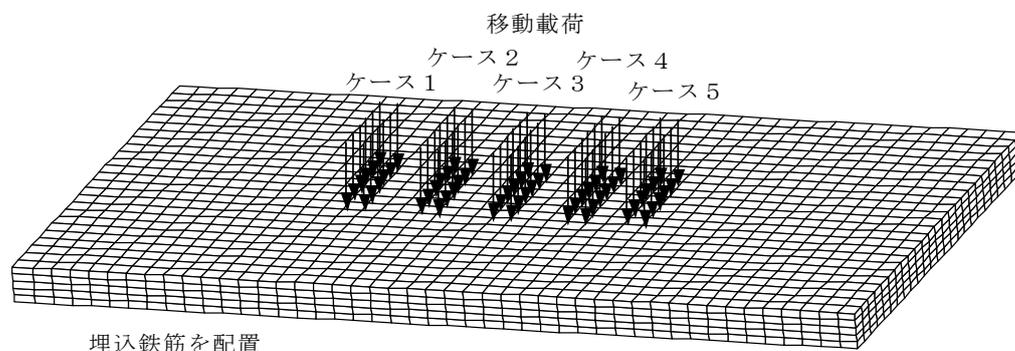


図 3.3-31 解析モデル

要素の累積疲労被害則には前項の検討に用いた主引張応力変化量による歪みエネルギーがコンクリートの破壊の主要因と仮定した場合である⑦を採用した。

要素のひずみやゆがみの変化によるエネルギー量 $U_{\delta t}$ の算出方法を下記に示す。

$$U = \frac{1}{2E} (\sigma_{\delta x}^2 + \sigma_{\delta y}^2 + \sigma_{\delta z}^2) - \frac{\nu}{E} (\sigma_{\delta y} \sigma_{\delta z} + \sigma_{\delta z} \sigma_{\delta x} + \sigma_{\delta x} \sigma_{\delta y}) + \frac{1}{2G} (\tau_{\delta yz}^2 + \tau_{\delta zx}^2 + \tau_{\delta xy}^2)$$

3軸の応力状態を考慮して応力度に対応するひずみを下式の関係より求めた上でエネルギーを算出し、エネルギー変化量 ΣU の累積値が最大の要素から破壊するものとして解析を行う。疲労破壊したと想定した要素の弾性係数を初期値の1/10(3方向とも)としてひび割れが発生した床版部分の剛性低下を模擬した。

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

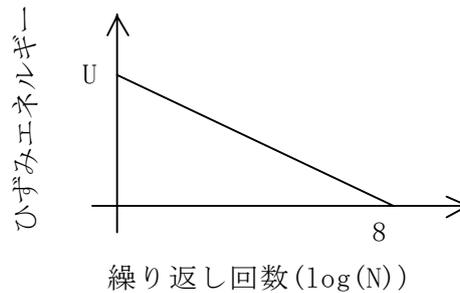


図 3.3-32 解析で使用した S-N 線図

$$U = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon = \frac{1}{2E}\sigma^2 = \frac{24^2}{2 \times 2.5 \times 10^4} = 0.01125 \quad (\text{N/mm}^2) \dots \text{(式 3.3-29)}$$

ここで、Uの破壊基準はコンクリートの引張強度とした。

なお、①～④の実験と⑤⑥の実験では用いられた輪荷重走行試験機が異なっており、諸元に示した供試体の平面寸法以外にも、載荷板の形状や大きさ、接地圧特性などの細部で条件が異なっており繰り返し回数や載荷荷重による単純な比較はできない面がある。解析結果と実験結果の比較検討においては主として定性的な傾向について評価することから、これらの詳細については反映していない。因みに載荷板の大きさは、土木研究所の試験機で200mm、大阪大学の試験機で120mmである。

(3) 解析結果

a) 載荷荷重の相違の影響

供試体①～③の輪荷重試験は、同じ設計基準に従う供試体でそれぞれ載荷荷重レベルだけが異なる一定荷重の繰り返し移動載荷試験となっている。試験結果は載荷荷重レベルの増加に伴って疲労寿命が短くなる傾向が顕著であるが、解析結果においても、試験結果と同様に載荷荷重が大きい程、疲労寿命を短く評価する結果となり、試験と同様の傾向が得られた。

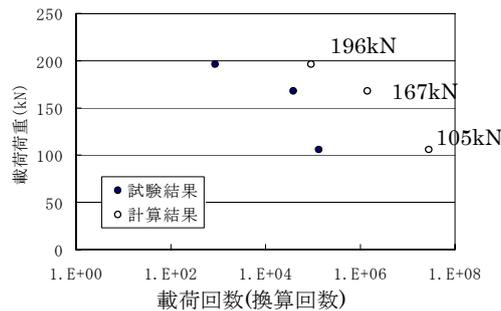


図 3.3-33 異なる載荷荷重を受ける RC39 の破壊時載荷回数

なお、RC 床版の疲労寿命について、版としての押し抜きせん断耐力に着目して P_{sx} との関係 (式 2.3-1 参照) で評価する手法が一般化されているが、比較対象とした輪荷重走行試験結果と解析結果を P_{sx} との関係で整理したものを図 3.3-34 に示す。

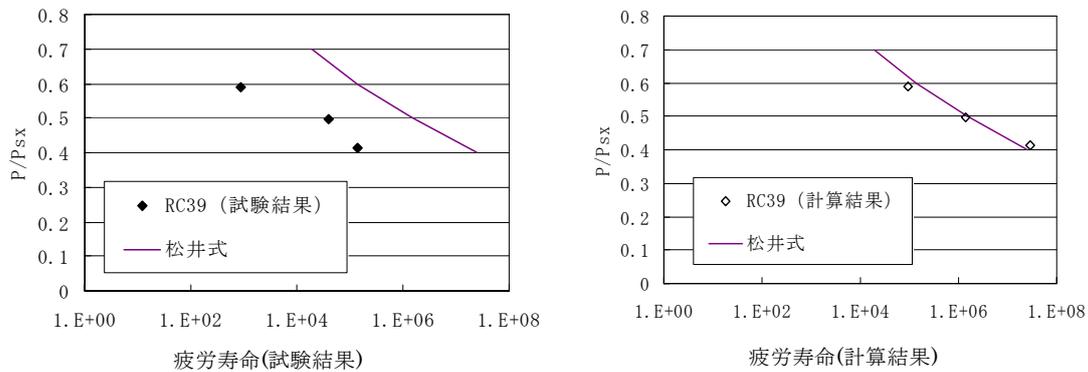


図 3.3-34 異なる載荷荷重を受ける RC39 の破壊時載荷回数と松井式

b)床版厚の影響

供試体④ (RC47) は供試体①～③と適用基準が異なり、床版厚が増加している。床版厚の効果のみを抽出するには、本来同じ荷重で床版厚のみが異なる条件の比較が望ましい。しかし適当な試験結果がないためここでは供試体④と①～③の結果を比較する。ここで供試体④は適用示方書が異なるため供試体①～③とは配筋量も異なっている。解析に用いる弾性係数および引張強度は、供試体①～③の解析と同様である。

解析結果と試験結果を載荷荷重で整理した結果を以下に示す。

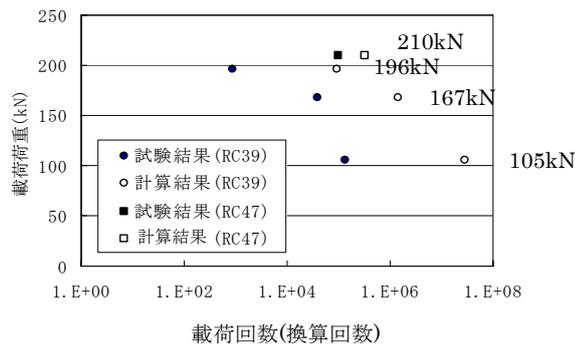


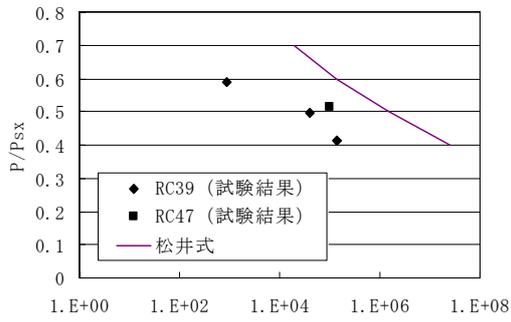
図 3.3-35 供試体①～④の破壊回数と載荷荷重の関係

図 3.2-68 に示すとおり、試験結果、解析結果ともに破壊までの載荷回数は一致しないものの、試験と解析のそれぞれ同士の間では、床版厚が小さい RC39 (供試体①～③) と比較して床版厚の厚い RC47 床版 (供試体④) では大幅に疲労寿命は長くなる結果となっている。

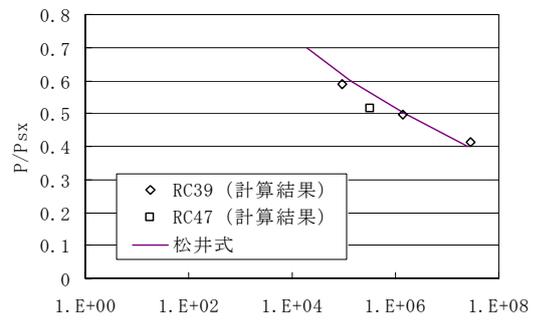
なお、解析では 210kN で載荷した RC47 の疲労寿命が RC39 の 196kN 載荷の結果と 167kN 載荷の間となっているのに対して試験結果は RC47 床版の疲労寿命が 167kN 載荷 RC39 床版よりも長いという相対関係となっている。これは、解析では RC39 床版と RC47 床版のコンクリート強度を同じとして計算したが、供試体の材料試験結果では、RC47 の供試体の強度が RC39 の供試体のものと比較して 10%程度大きかったことも原因と考えられる。また床版厚以外にも供試体①～③と④では配筋条件も異なっており厳密な比較は困難である。

図 3.2-36 に P_{sx} による評価式で疲労寿命を推定した結果との比較を示す。

P_{sx} を用いた整理では、RC47 床版の疲労寿命は 167kN を載荷した RC39 床版よりも短くなると予測されるが、試験では逆の結果となっている。この理由は不明であるが材料強度などのばらつき等が影響していることも考えられる。一方、解析結果より推定される疲労寿命は、 P_{sx} を用いて予測される疲労寿命の大小関係とよい一致を示している。



[疲労寿命(試験結果)]



[疲労寿命(計算結果)]

図 3.3-36 異なる床版厚の RC 床版の破壊時載荷回数と松井式

c) 床版支間の相違の影響

供試体⑤ (N1)、供試体⑥ (DR1)は、支間長、床版厚、配筋が供試体①～④とは異なる床版である。

また供試体⑤は供試体④と同じ設計基準 (S48 道路橋示方書) 準拠であり、供試体⑥は供試体①～③と同じ設計基準 (S39 道路橋示方書) に準拠して作成されたものである。

なお供試体⑤に対応する解析では、弾性係数に文献の数値を用い、コンクリート引張強度は 5.0N/mm^2 とした。これは、材料試験結果より求められた他の床版の引張強度が概ね圧縮強度の $1/10$ 程度であるのに対し、文献中で圧縮強度 (54.2N/mm^2) より算出された引張強度 (3.88N/mm^2) が約 $1/14$ と小さくなっていたためである。

また、床版支間以外に供試体の長さ (床版支間直交方向長) も供試体⑤⑥と供試体①～④では異なっている。解析では、要素寸法が解析結果に与える影響については不明であるが要素破壊数が計算ステップと連動するため換算回数による破壊速度の比較に配慮して鉄筋を除くコンクリート部分の要素分割数を供試体①～④と同じとした。

供試体⑤ (N1) について、載荷荷重と疲労寿命の関係を①～③ (RC39 床版) と比較して示す。

試験結果からは載荷荷重 105kN で載荷した RC39 (供試体①) と 167kN で載荷した RC39 (供試体②) の中間の疲労耐久性を有するものと推定されるが、解析結果でも、疲労寿命の相対関係は同様である。

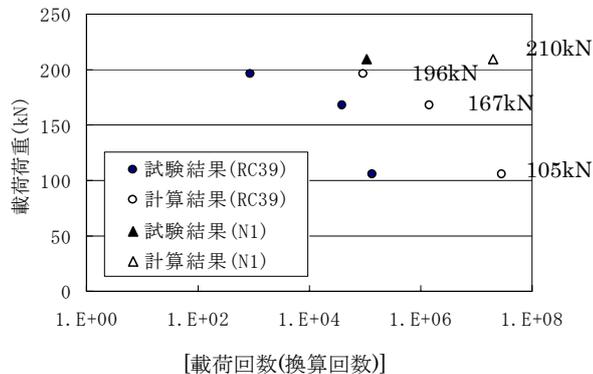


図 3.3-37 疲労寿命の相対関係

P_{sx} で整理した試験結果と解析結果の関係を以下に示す。 P_{sx} による整理でも、載荷荷重を用いた場合の整理と同様の疲労寿命の相対的な大小関係が得られた。

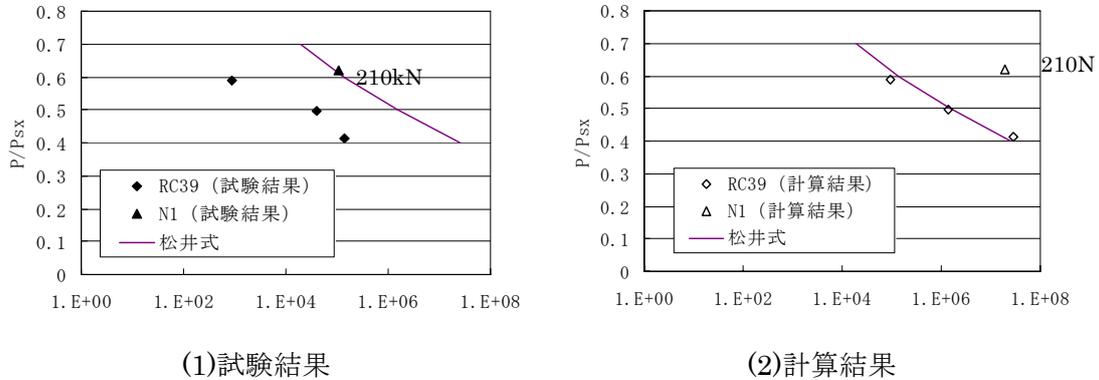
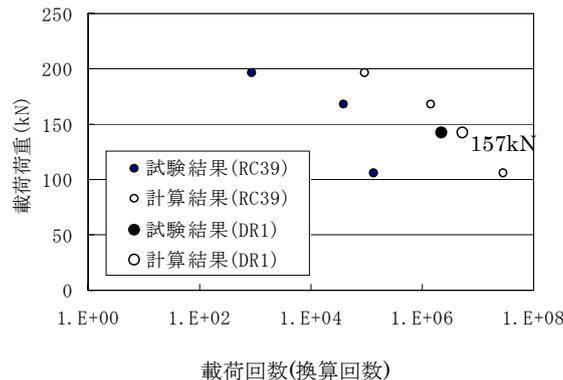


図 3.3-38 P_{sx} で整理した疲労寿命の試験結果と解析結果の関係

RC39 供試体（供試体①～③）と DR1（供試体⑥）について、載荷荷重と疲労寿命の関係を示す。

試験結果では DR1（供試体⑥）の疲労寿命は供試体①～③より長くなっているが、解析では 167kN, 196kN で載荷した RC39（供試体②③）より長いという関係は一致するものの、105kN で載荷した RC39（供試体①）よりは短寿命の結果となった。この不一致の原因は明確でないが、供試体①の材料特性が解析で設定した他の供試体とほぼ整合する標準的な値と比較してコンクリート強度が著しく低いなどの乖離があることが影響し、試験結果の疲労寿命が過少である可能性が考えられる。



P_{sx} で整理した試験結果と解析結果の関係を以下に示す。解析結果より推定される疲労寿命の相対的な大小関係は、 P_{sx} を使用した場合と同様の傾向となっており、 P_{sx} による床版の疲労寿命の推定とある程度一致した結果が得られることが示された。

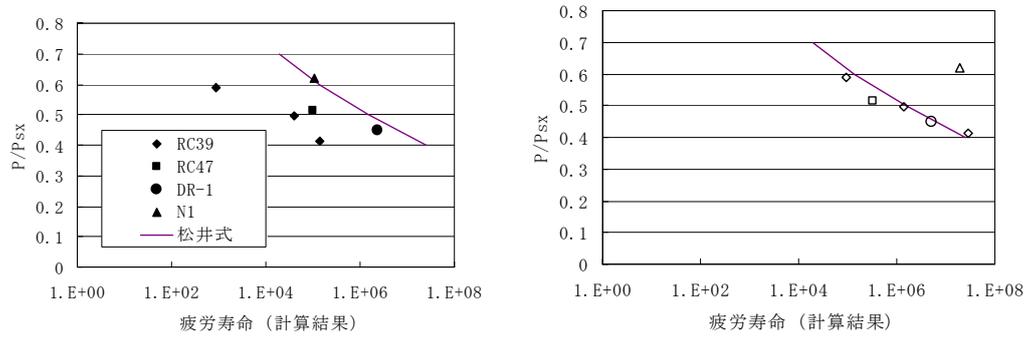


図 3.3-40 P_{sx} と疲労寿命の関係

4) まとめ

本項で実施した各 RC 床版の解析結果と試験結果について、載荷荷重および P_{sx} で処理すると下図の通りとなる。

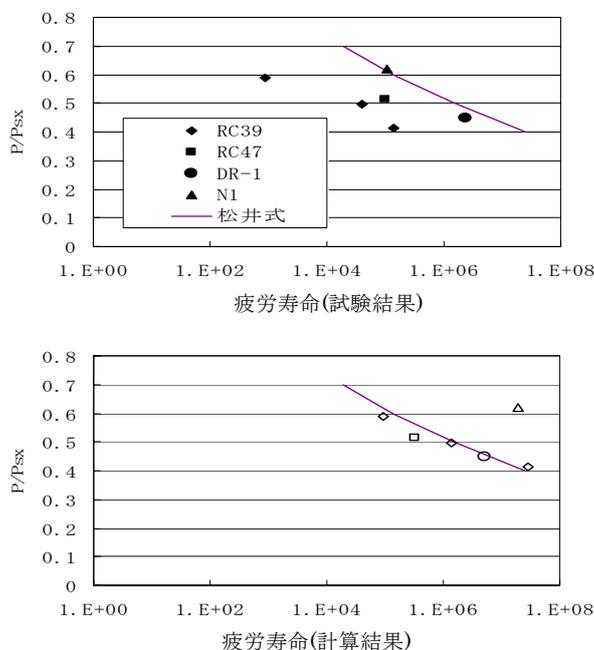


図 3.3-41 RC 床版の解析結果と試験結果の疲労寿命

これまでの各床版について実施した疲労寿命の大小関係の比較を行った。試験結果については、試験のばらつき等も考えられることから、 P_{sx} も参考とした。

その結果、各床版の試験から得られた寿命の相対的な大小関係と大きく異なってはならず、また、 P_{sx} により予測される床版の疲労寿命とほぼ同様に疲労寿命を推定する結果が得られたことより、本解析手法により推定される各床版の疲労寿命の大小関係の評価はほぼ妥当なものと思われる。上図で、N1 (供試体⑤) の解析結果より推定される疲労寿命のみ突出しているのは、材料強度が大きかったことから、引張強度を他の 2 倍程度に上げて解析を行った結果と考えられる。

これらから本解析手法によって、RC 床版に関しては、ある程度荷重、床版厚、支間長等が異なる床版についても、疲労による床版損傷の過程と破壊に至るまでの寿命の相対関係が解析的に推定できる可能性の高いことが示された。

なお、土木研究所の輪荷重走行試験機による実験結果が、大阪大学のものによる結果と比べると P_{sx} で整理された松井の予測式とある傾向をもって乖離しているように見受けられる。この原因については明確でないが先に述べたように両者の試験装置では供試体の平面寸法や載荷板の形状や接地特性は同じでなく、それらが影響している可能性があるが詳細は確認できていない。