

3.5 解析精度に関する検討

3.5.1 概要

これまでの検討で、コンクリート系床版のコンクリートに着目して床版コンクリートがある程度細かな要素に分割した解析に、それぞれの要素に発生する応力と関連づけた疲労被害則を適用した場合に、床版コンクリートの疲労損傷のプロセスが近似できることから、床版のコンクリートの疲労を評価できるものと考えられた。

ただし、このような解析では、そのモデル化、応答の評価の方法によりその結果が大きく左右される。よって、ここでは、それらの影響が結果に及ぼす影響に関して検討した。検討では以下の項目に着目した。

①要素の大きさが解析結果に与える影響

FEM 解析によって、コンクリートを細かな要素に分割して要素単位に評価する解析手法では、要素分割の大きさによって評価される発生応力等の物理量に相違が生じる。また本検討における手法では、疲労破壊を表現するため要素単位で順次モデルの特性を変化させて計算を継続するため、解析結果は要素分割の大きさに影響する可能性がある。そこで要素分割の大きさが解析結果に及ぼす影響について検討する。

②内部鋼材のモデル化の影響

鋼コンクリート合成床版のように床版コンクリート内部に鉄筋以外の種々の鋼材が存在する場合には、それらの影響によって床版コンクリートに局所的な応力集中が生じる可能性がある。また鉄筋を用いる場合にも折り曲げ鉄筋をトラス上に配置するなど様々な提案がなされてきている。そのためコンクリートが要素単位で発生応力と密接に関連した物理量の蓄積で疲労破壊するとして疲労解析を行うにあたってはこれらの鋼材のモデル化の方法によっては結果が大きく異なる可能性がある。

そこで内部鋼材のモデル化の方法が解析結果に及ぼす影響について検討する。本節ではまず鉄筋のモデルの違いが解析結果に及ぼす影響について検討する。

鉄筋以外の様々な内部鋼材や底鋼板のモデル化の条件と解析結果の関係については別途4章に示す。

③累積被害則（べき乗則）の検討

本検討の解析的手法に用いる疲労被害則については、定性的な耐久性の長短の関係についてはある程度輪荷重走行試験との整合がとれることが確認できた。一方、実務設計に用いるにあたっては各種の条件、構造の床版について所定の耐久性があることを絶対的に評価できることが求められる。そのため解析において疲労耐久性の絶対値に支配的な影響を及ぼす被害則のべき乗則について解析結果との関係を検討する。

3.5.2 要素の大きさが解析結果に与える影響

解析との比較対象には、平成 17 年度に国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室にて実施した下記の RC 床版供試体による輪荷重走行試験結果を用いる。試験機の条件は基本的に過去に土木研究所で行われた試験⁶⁾と同じである。

(1) 輪荷重載荷試験

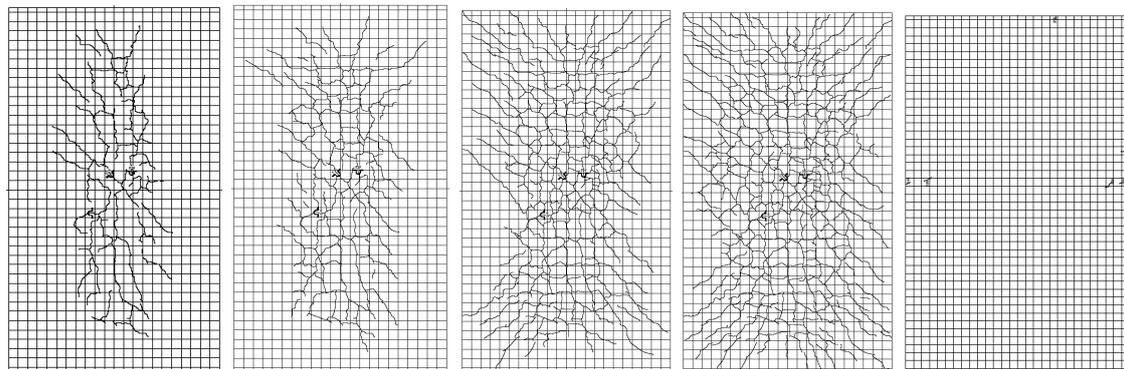
① 供試体の概要

表 3.5-1 供試体の概要

配筋	圧縮側 主鉄筋	D19 150(mm) ピッチ	
	圧縮側 配力鉄筋	D13 300(mm) ピッチ	
	引張側 配力鉄筋	D13 150(mm) ピッチ	
	引張側 主鉄筋	D19 150(mm) ピッチ	
		供試体A	供試体B
寸法	幅(mm)	2800	2800
	長さ(mm)	4500	4500
	厚さ(mm)	170	190
	支間(mm)	2500	2500
コンクリート材料	強度(N/mm ²)	28.26	29.74
	弾性係数(N/mm ²)	29.35	30.97
	ポアソン比	0.209	0.206
	割れつ強度(N/mm ²)	2.37	2.45
載荷荷重		80kN (1~4.5千回)	120kN (1~30千回)
		100kN (45千~175千回)	140kN (30千~360千回)
		120kN (175千~250千回)	

② 実験結果の概要

床版下面のひびわれ発生状況は次の通り。



下面 1000 回 下面 10000 回 下面 110000 回 下面 360000 回 上面 360000 回

図 3.5-1 損傷状況 (供試体 B)

載荷回数とたわみの変化は次の通り。

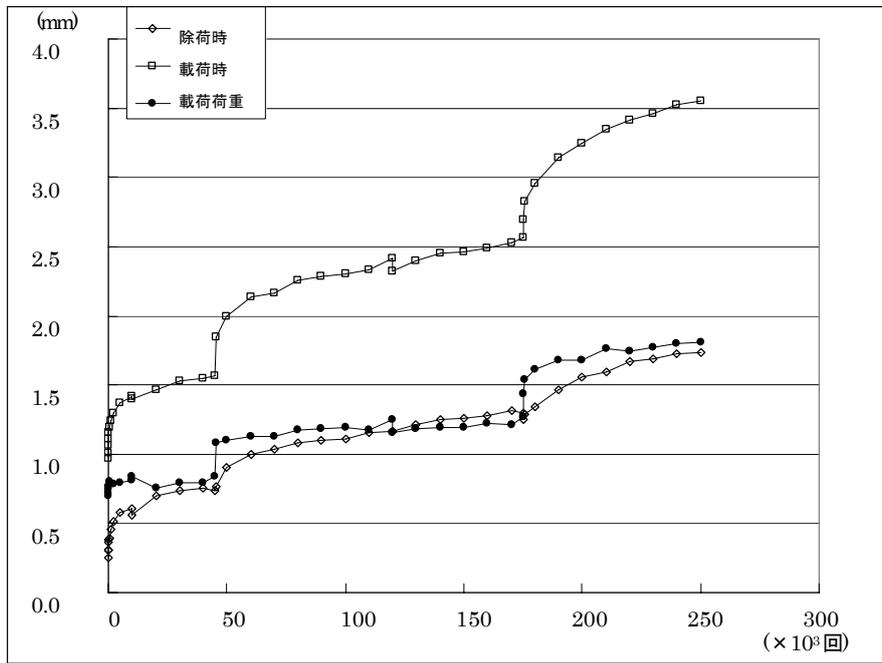


図 3.5-2 たわみの挙動 (供試体 A)

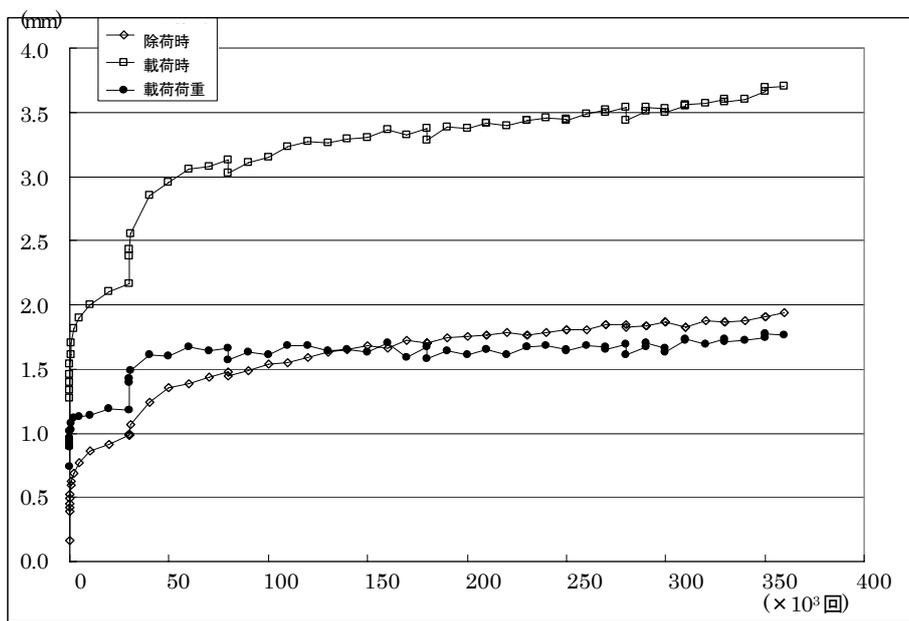


図 3.5-3 たわみの挙動 (供試体 B)

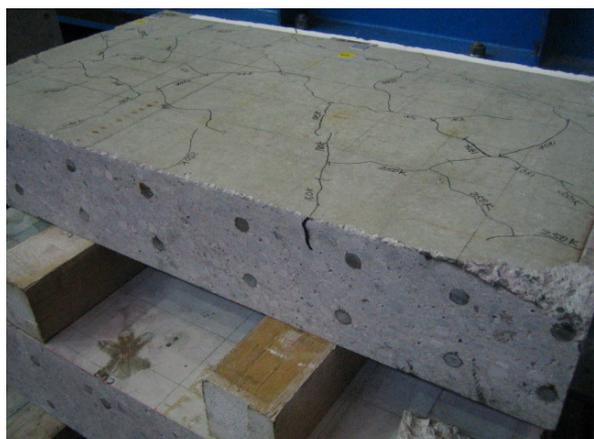


写真 3.5-1 (供試体 B)

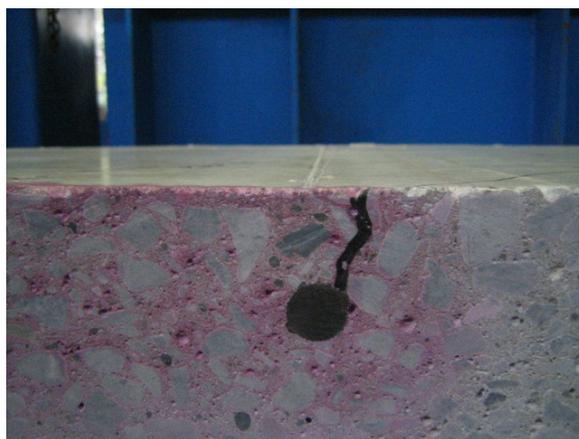


写真 3.5-2 (供試体 B)

本実験では静的には床版コンクリートが破壊しない程度の内部応力の繰り返しによる疲労の進展を確認するため比較的小さな荷重による载荷を行い最終的に破壊には至る前に実験を終了している。そのため実験終了時点で上面側にはひび割れもほとんどない。下面側のひび割れには角落ちが生じているものもみられる。

最大残留ひび割れ幅は実験終了時において供試体 A で 0.05mm、供試体 B で 0.16mm であった。

実験終了後の中央付近での切断面を上記写真に示すが、目視できる範囲では床版内部へのひびわれ深さは鉄筋かぶりの範囲にとどまっている。

(2) 解析結果

解析条件は、載荷荷重を 80kN (一定) とし、要素の平面寸法を、これまでと同等の 100mm × 100mm と平面要素分割数を2倍 (50mm × 50mm) と細かくした2ケースの比較を行う。

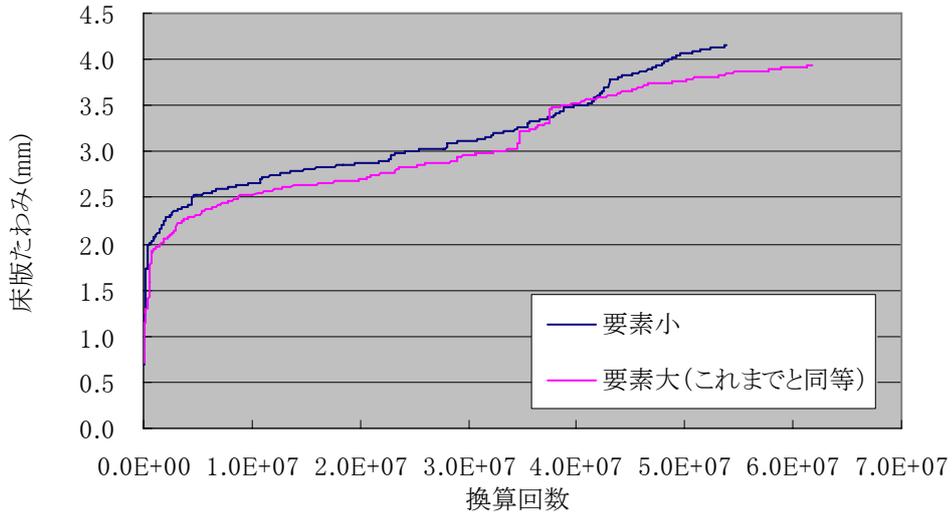


図 3.5-4 床版たわみの変化

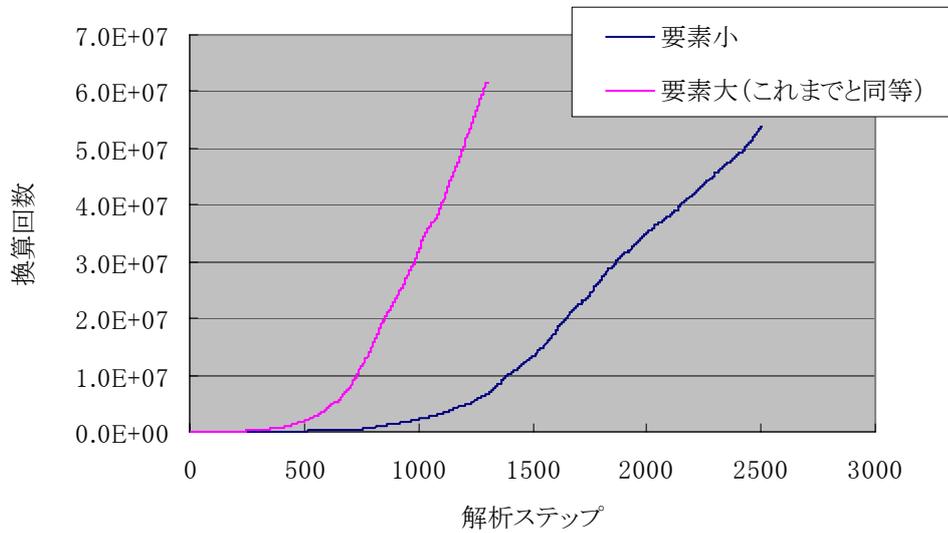


図 3.5-5 解析ステップと換算回数

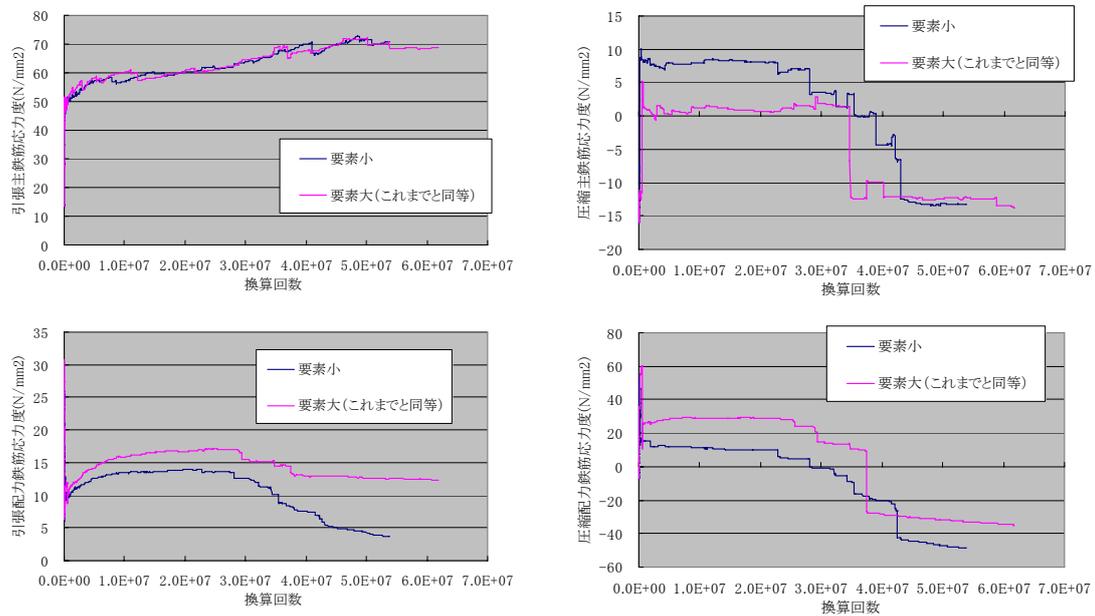


図 3.5-6 鉄筋応力度の変化

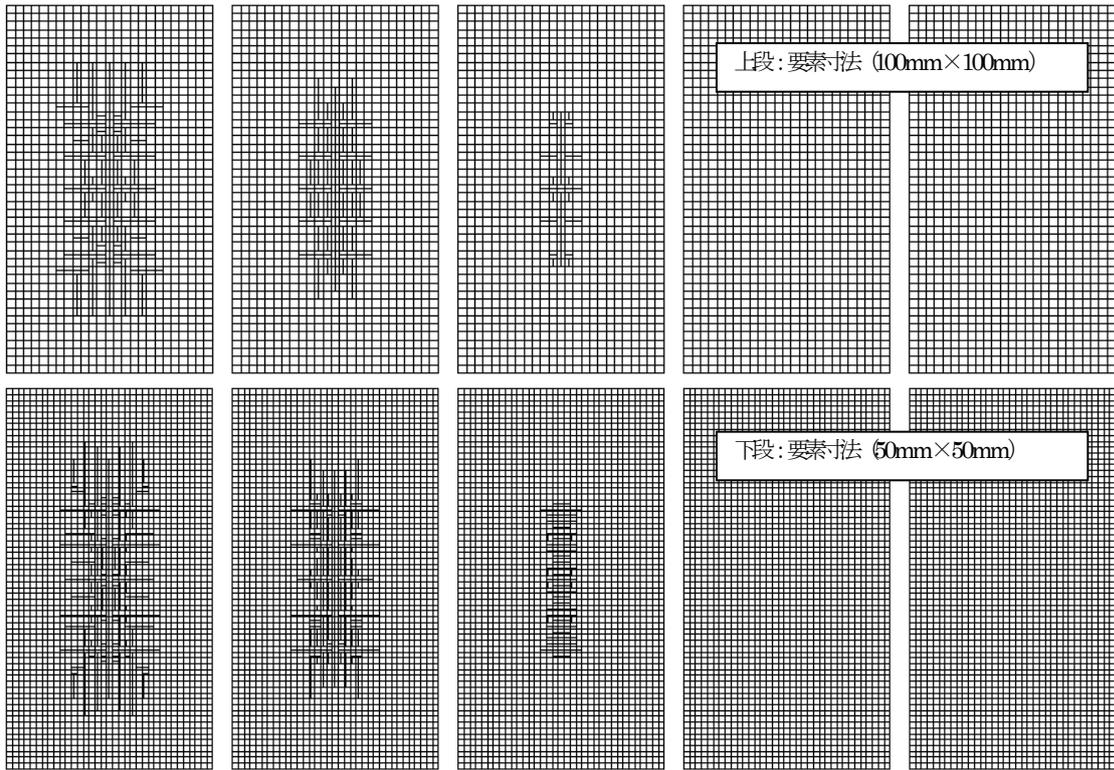


図 3.5-7(1) 換算回数 1.0×10^4 回相当 (上 : 127 ステップ、下 : 240 ステップ)

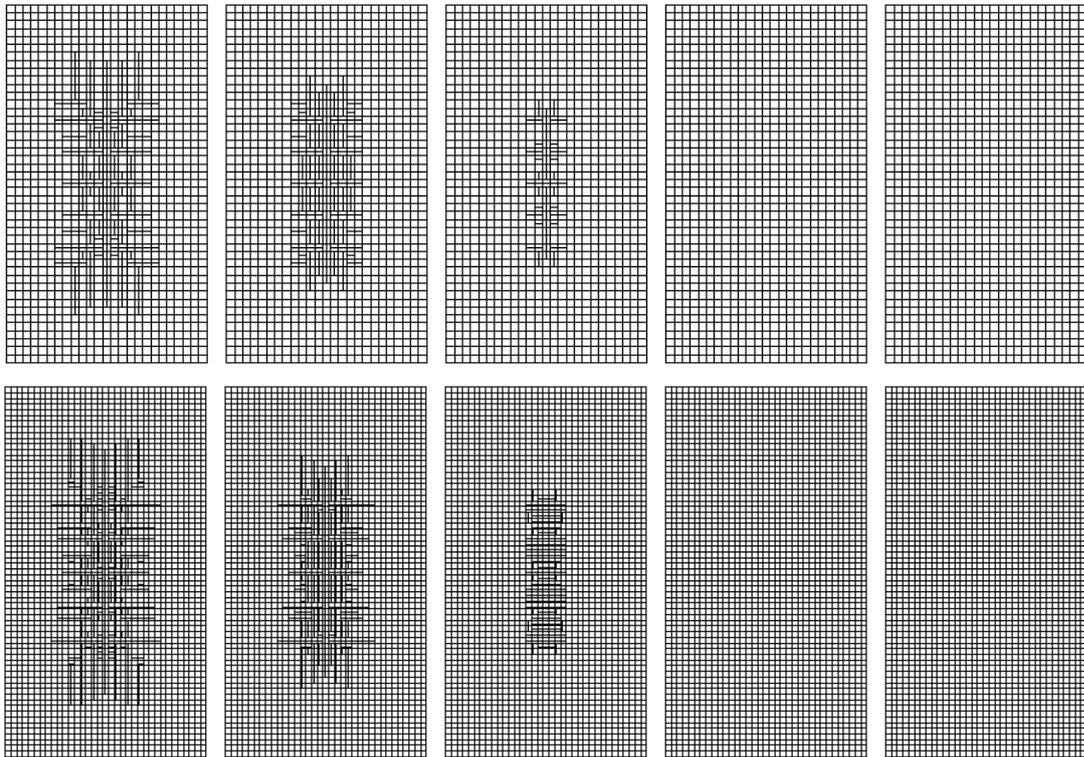


図 3.5-7(2) 換算回数 2.0×10^4 回相当 (上 : 141 ステップ、下 : 278 ステップ)

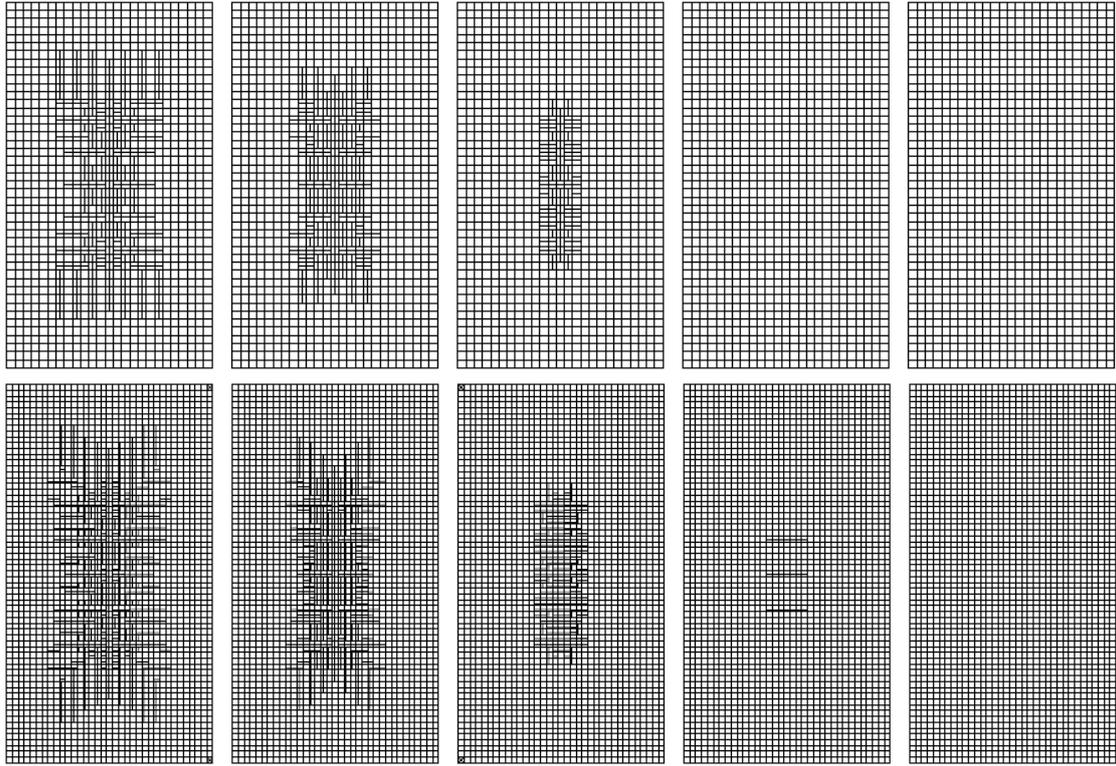


図 3.5-7(3) 換算回数 5.0×10^4 回相当 (上 : 170 ステップ、下 : 360 ステップ)

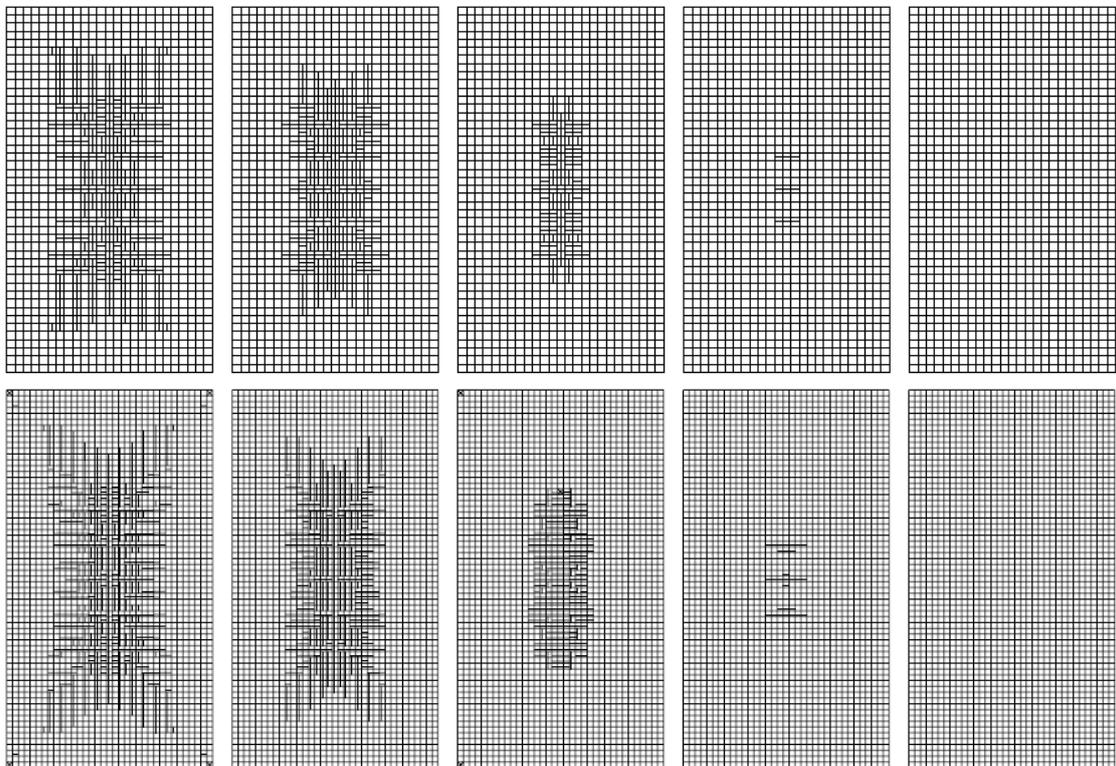


図 3.5-7(4) 換算回数 1.0×10^5 回相当 (上 : 194 ステップ、下 : 423 ステップ)

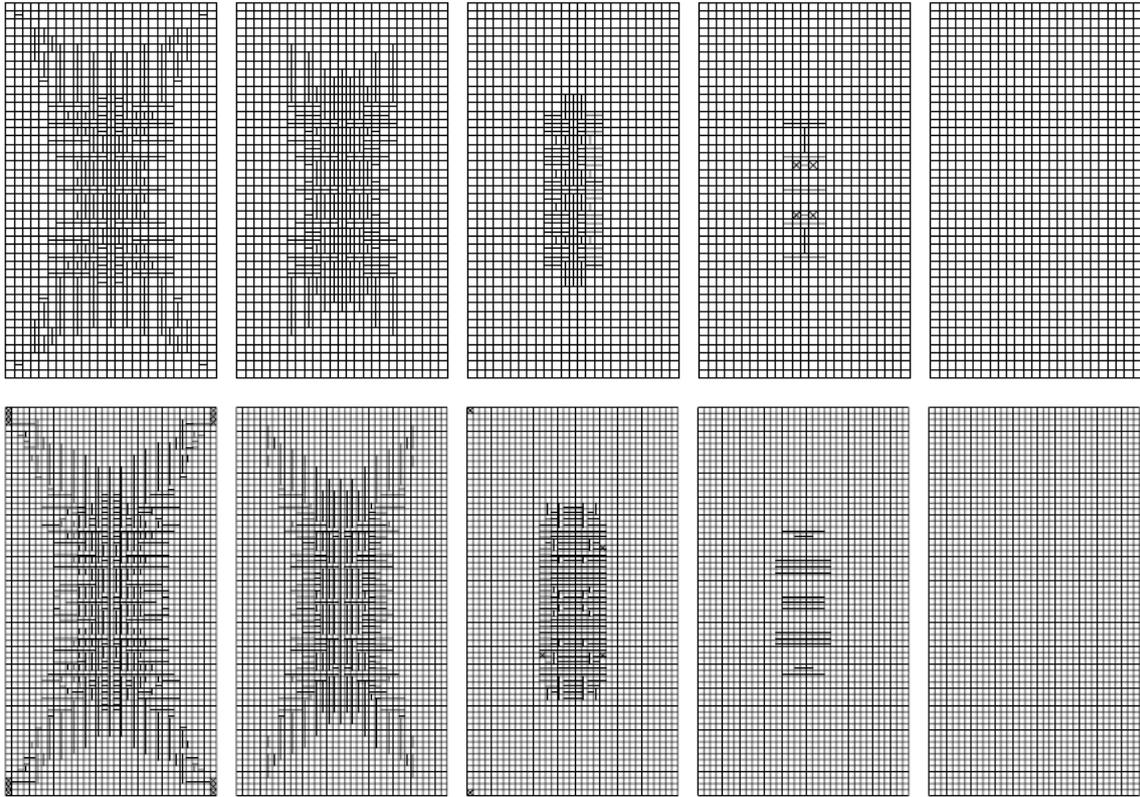


図 3.5-7(5) 換算回数 2.0×10^5 回相当 (上 : 251 ステップ、下 : 539 ステップ)

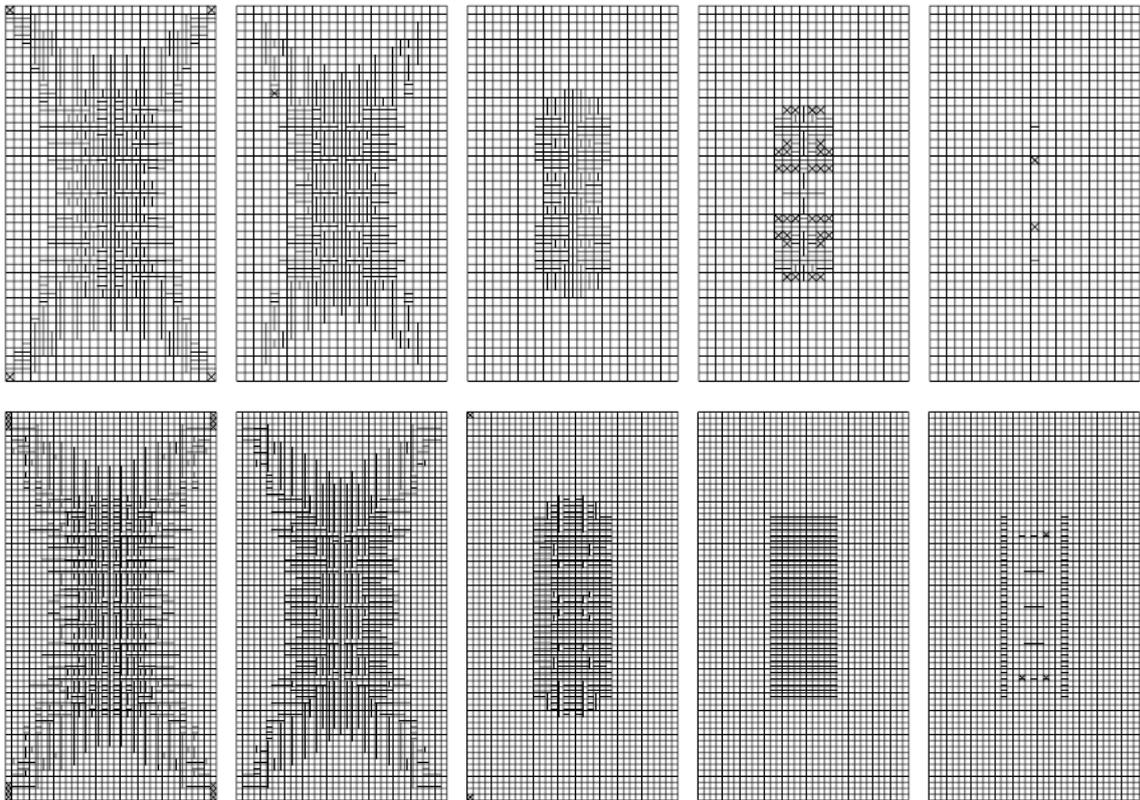


図 3.5-7(6) 換算回数 5.0×10^5 回相当 (上 : 339 ステップ、下 : 750 ステップ)

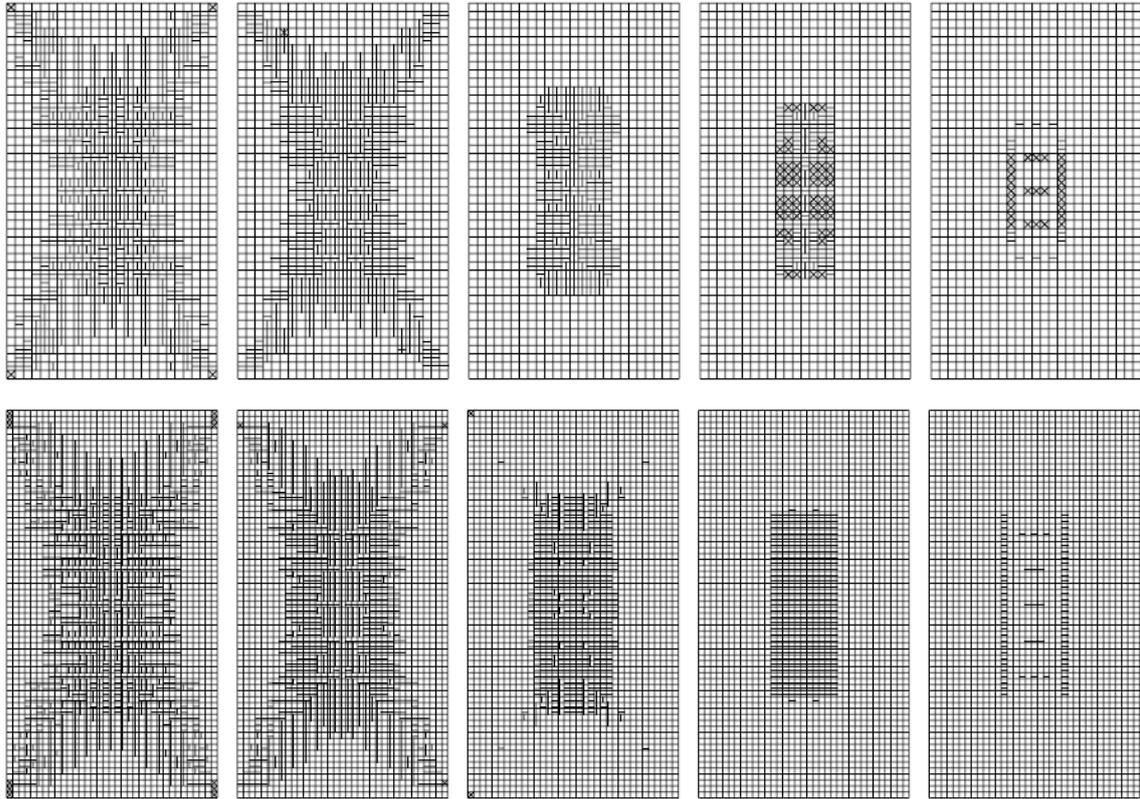


図 3.5-7(7) 換算回数 1.0×10^6 回相当 (上 : 419 ステップ、下 : 836 ステップ)

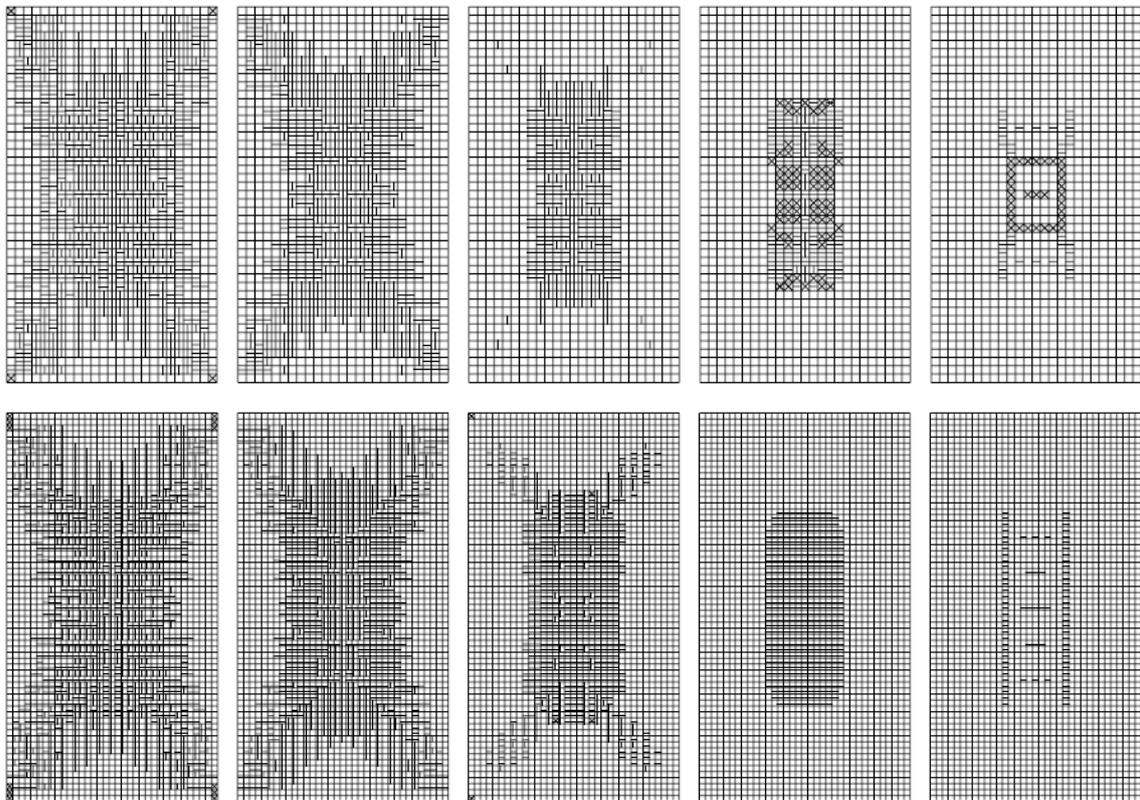


図 3.5-7(8) 換算回数 2.0×10^6 回相当 (上 : 508 ステップ、下 : 977 ステップ)

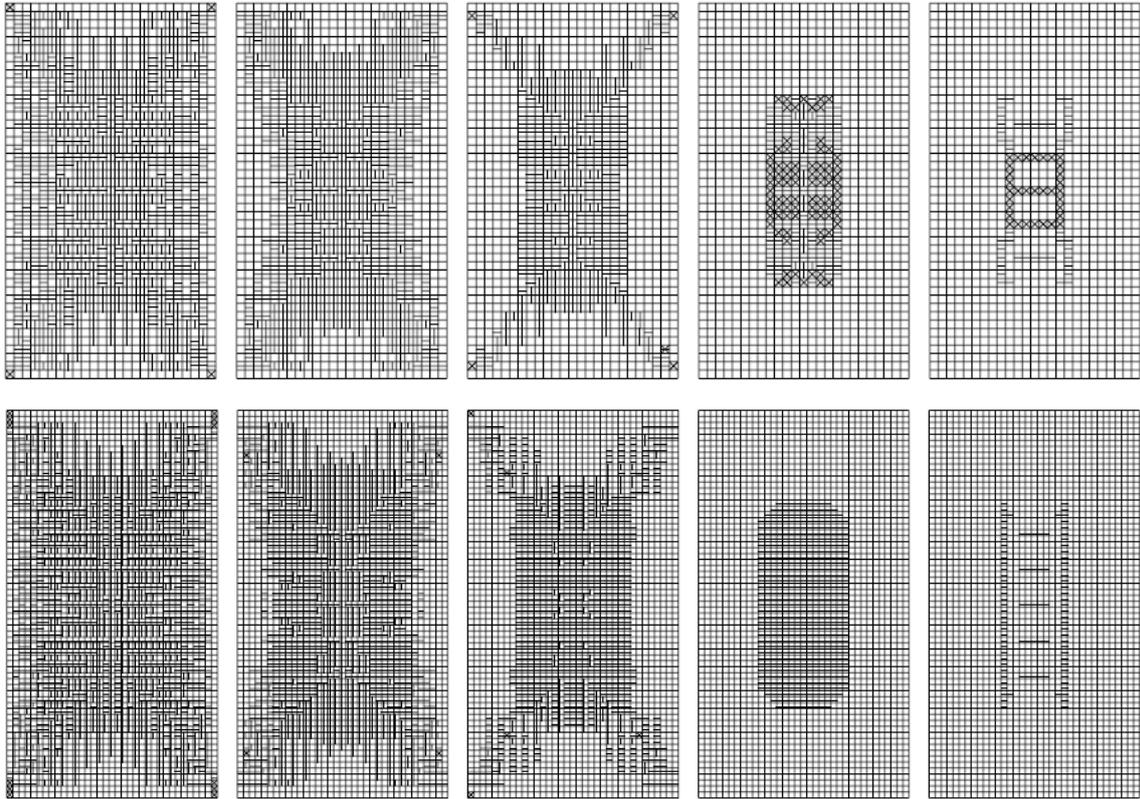


図 3.5-7(9) 換算回数 5.0×10^6 回相当 (上 : 624 ステップ、下 : 1266 ステップ)

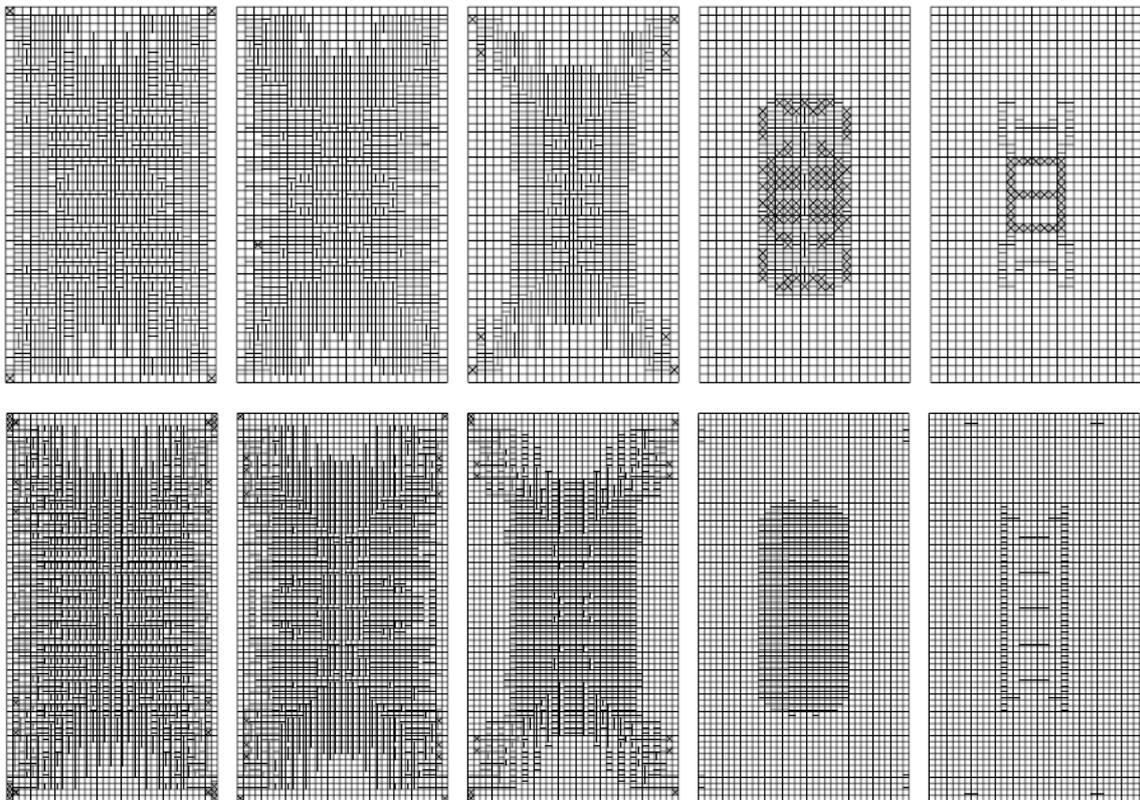


図 3.5-7(10) 換算回数 1.0×10^7 回相当 (上 : 734 ステップ、下 : 1390 ステップ)

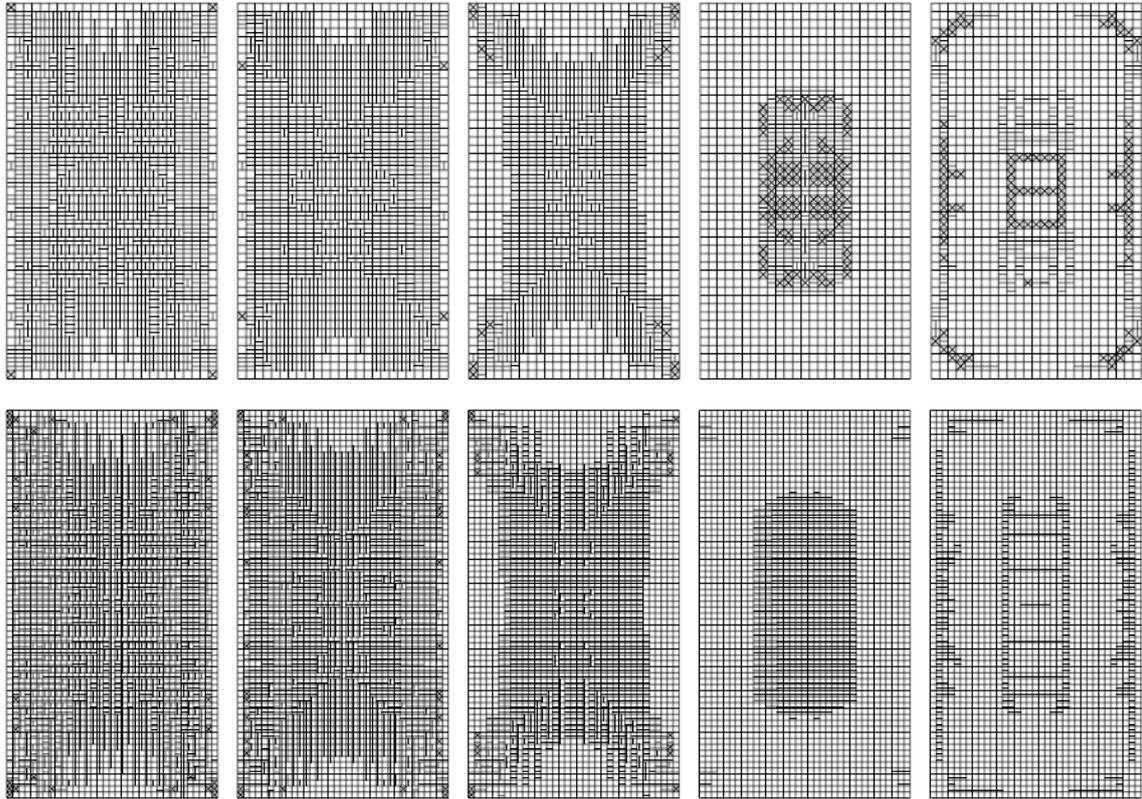


図 3.5-7(11) 換算回数 2.0×10^7 回相当 (上 : 851 ステップ、下 : 1648 ステップ)

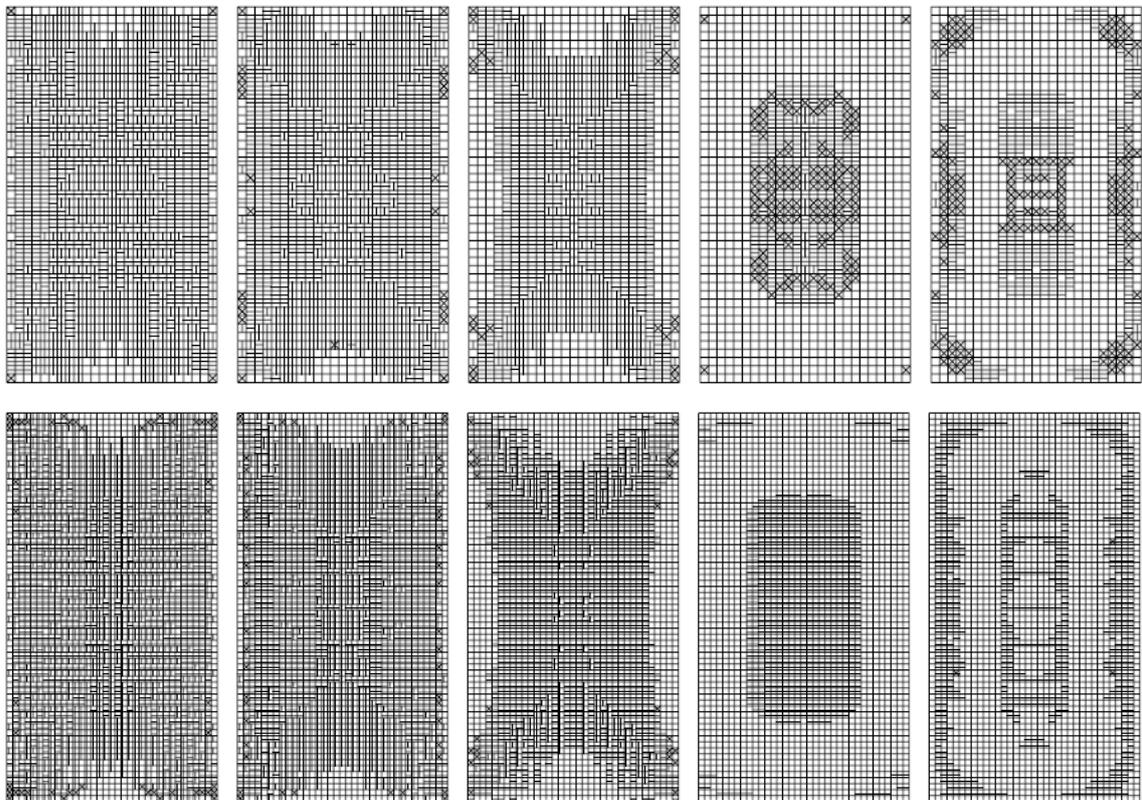


図 3.5-7(12) 換算回数 3.0×10^7 回相当 (上 : 986 ステップ、下 : 1868 ステップ)

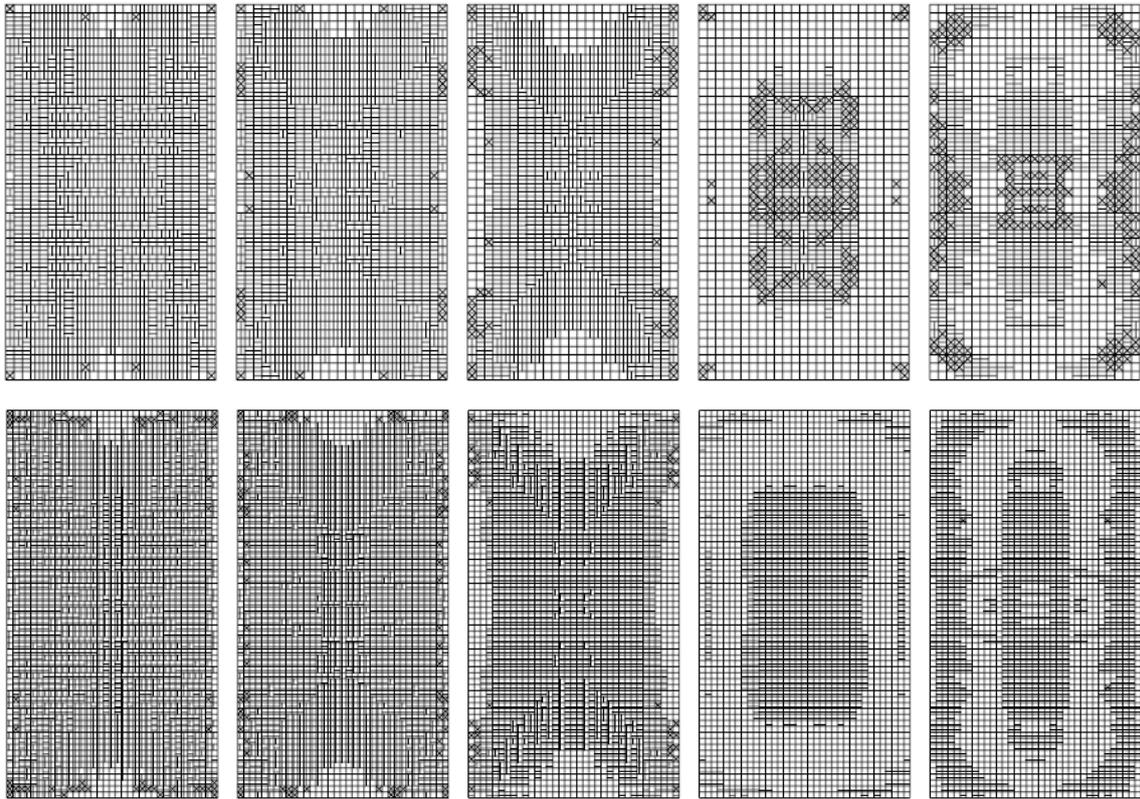


図 3.5-7(13) 換算回数 4.0×10^7 回相当 (上 : 1100 ステップ、下 : 2147 ステップ)

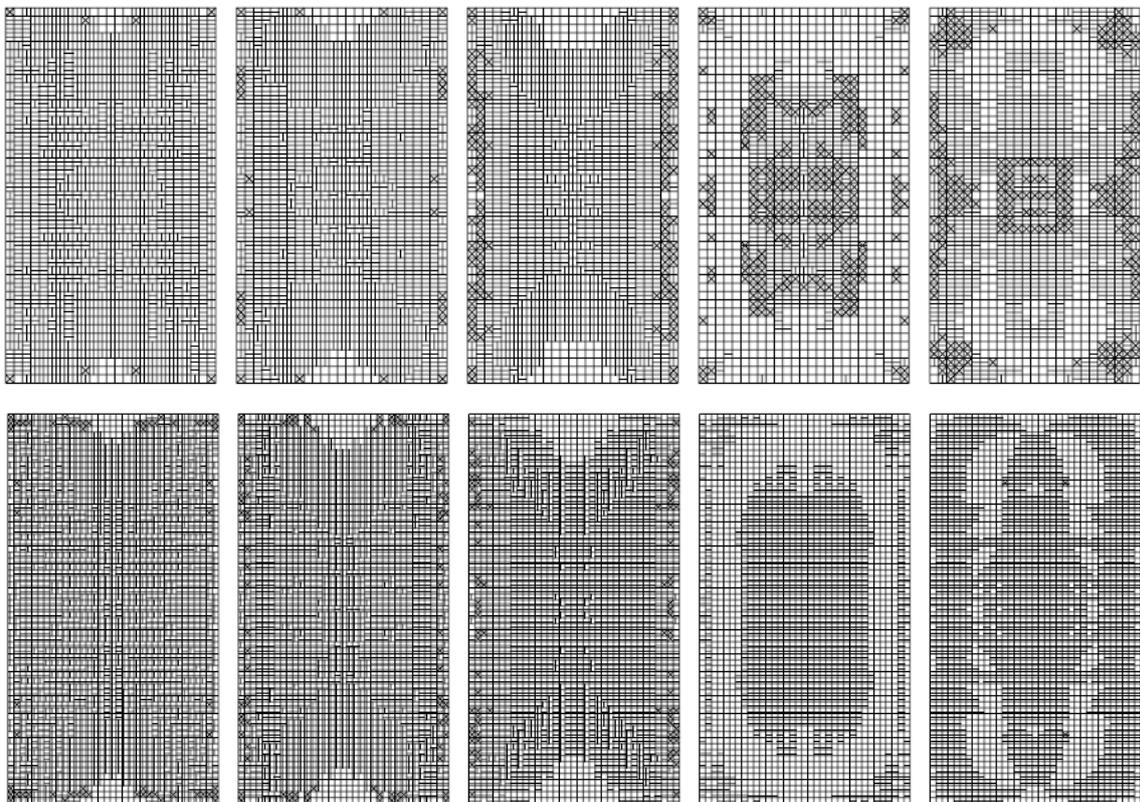


図 3.5-7(14) 換算回数 5.0×10^7 回相当 (上 : 1197 ステップ、下 : 2427 ステップ)

以上より、本検討の条件では、要素分割の相違によって解析上の疲労損傷過程や破壊時の性状に大きな差はなかった。

床版下面から徐々に破壊領域が広がっていく傾向も実験結果とは矛盾しない。実験では360,000回まで載荷しており、下面のほぼ全領域にひびわれが広がる一方で上面にはまだひびわれは生じていない段階で実験を終了している。解析で最下層がほぼ全面にひび割れる一方最上層の要素で破壊は生じていないのは2~30万回程度と考えられ、実験終了時点は解析のこの段階に概ね相当するものと考えられる。

3.5.3 内部鋼材のモデル化の影響

内部鋼材としての鉄筋のモデル化方法の違いが解析結果に与える影響について検討する。鉄筋のモデル化手法は、①埋め込み要素、②トラス要素、の2通りで作成したモデルで計算を行った。

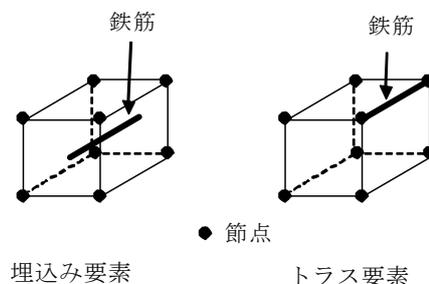


図 3.5-8 鉄筋要素

a) 解析条件

埋め込み鉄筋によるモデル化では、鉄筋位置は計算に用いる節点位置によらず入力でき、鉄筋剛性は鉄筋を含む要素（汎用 FEM 解析ソフト「DIANA」の例では mother element）に分配される。なお、本検討では鉄筋の付着切れを考慮しておらず完全付着条件である。

トラス要素によるモデル化では、鉄筋位置に節点を設ける必要があるため、下図に示すような6層からなるモデルを作成した。ソリッド要素と節点を共有しているため完全付着となる。トラス要素には、2節点6自由度の要素を用いた。

いずれのモデルも、上下それぞれに各2方向の鉄筋を1本ずつ入力した。トラス要素を用いた場合、高さ方向に床版の上下縁と各鉄筋位置のみでモデル化すると、中間層部分の要素の厚さが他と比較してかなり大きくなるため、上下の配力鉄筋間を2層に要素分割し、各層の厚さが極端に異ならないようモデル化した。平面的には、端部以外の各鉄筋間隔が150mm または 300mm であるため支間方向、直角方向とも 150mm 間隔で要素分割した。

モデルの支持は、埋め込み鉄筋を用いたこれまでのモデルと同様に、長辺方向の下端の節点で鉛直方向を移動固定し、5箇所荷重を作用させた。

コンクリートの疲労破壊条件も埋め込み鉄筋モデルの計算と同様、 $N=8$ としたこれまでの条件を使用した。

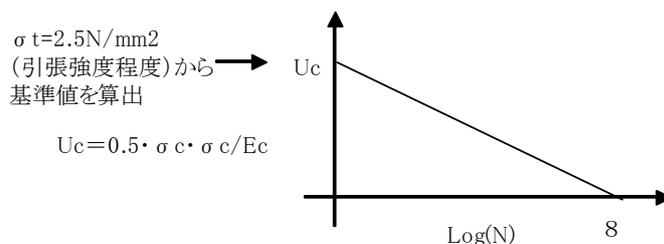


図 3.5-9 解析で用いた疲労曲線

表 3.5-3 コンクリートの疲労破壊条件表 要素分割の違い

	要素分割数			要素寸法	ソリッド要素数
	長辺方向	短辺方向	厚さ方向		
埋め込み鉄筋モデル	45	25	5	100×100×38	5625
トラス鉄筋モデル	32	18	6	150×150×(13~58)	3456

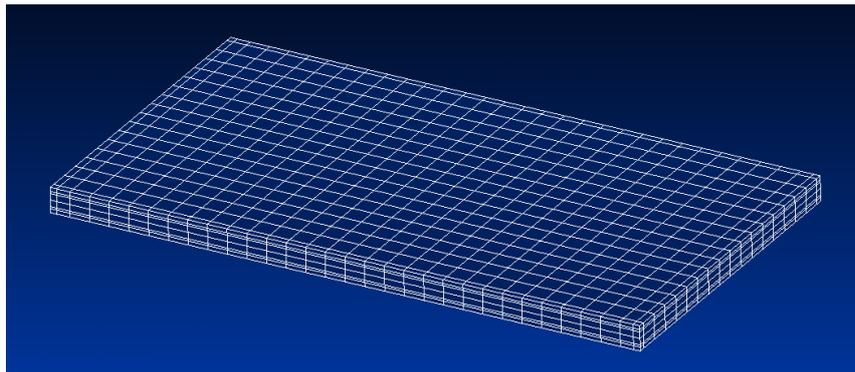


図 3.5-10 トラス要素を使用したモデル

表 3.5-4 鉄筋諸元

	有効高さ(mm)	径	間隔(mm)	弾性係数(N/mm ²)
上側主鉄筋	30	D16	300	2.0×10^5
上側配力鉄筋	43	D10	300	''
下側配力鉄筋	146	D13	300	''
下側主鉄筋	160	D16	150	''

b) 解析結果

鉄筋のモデル化について異なった方法で行った計算結果と、実験結果の比較を示す。
(RC39-8 (荷重 105kN))

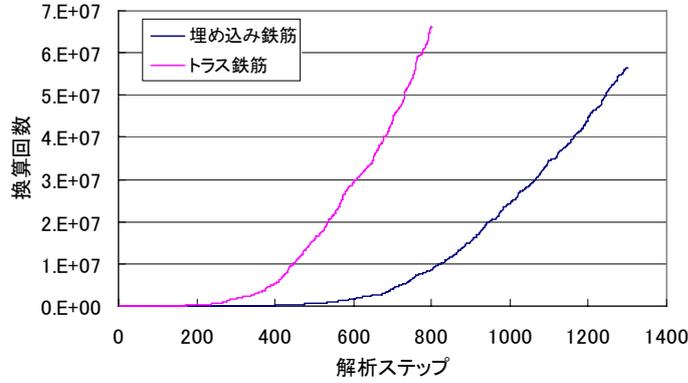


図 3.5-11 解析ステップと換算回数

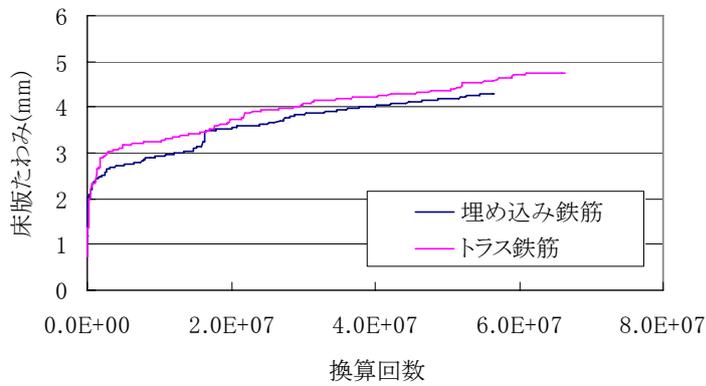
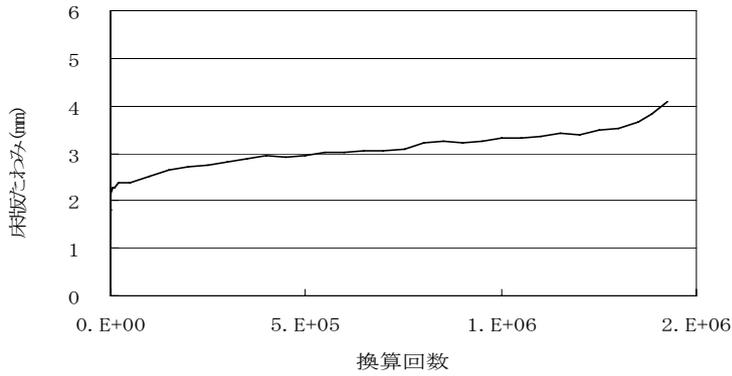
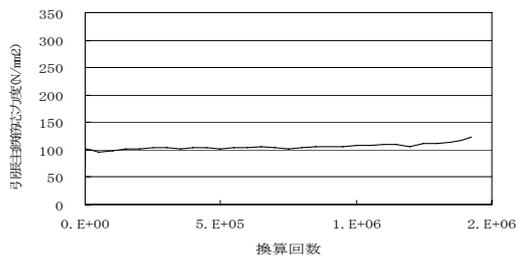
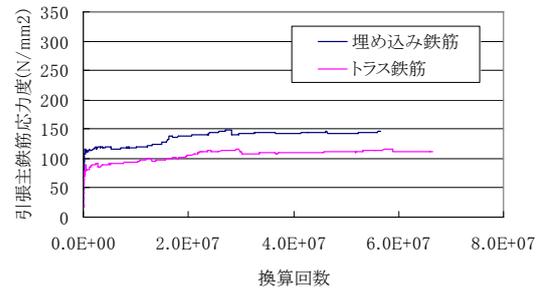


図 3.5-12 試験結果と計算結果の床版たわみ

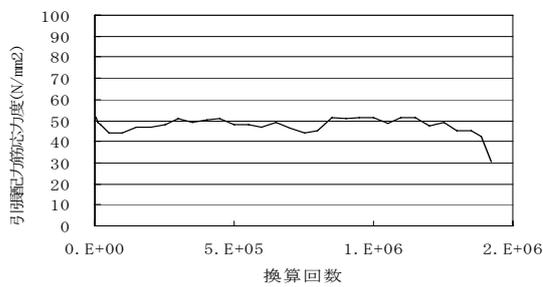


a)実験結果

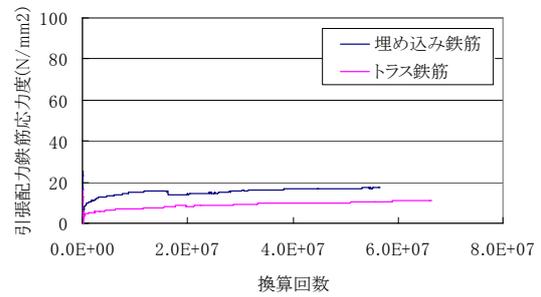


b)解析結果

図 3.5-13 引張主鉄筋応力度の変化

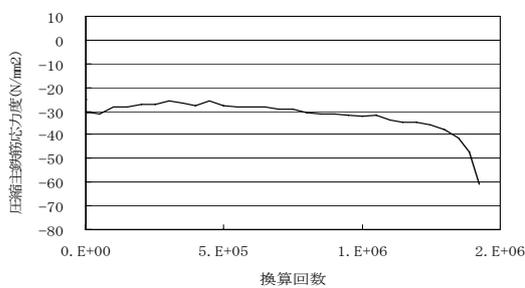


a)実験結果

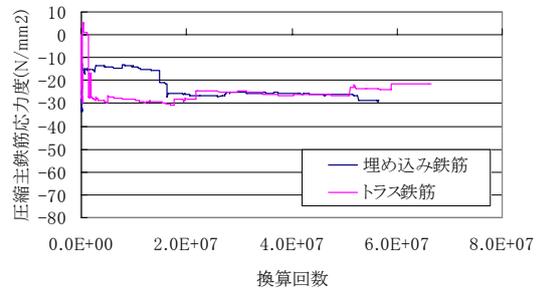


b)解析結果

図 3.5-14 引張配力鉄筋応力度の変化

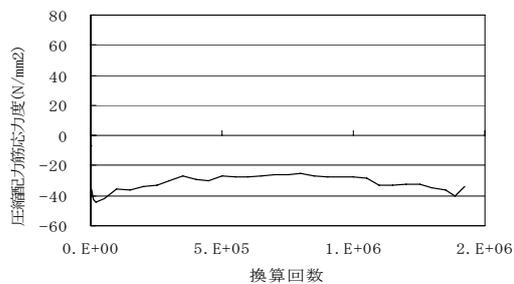


a)実験結果

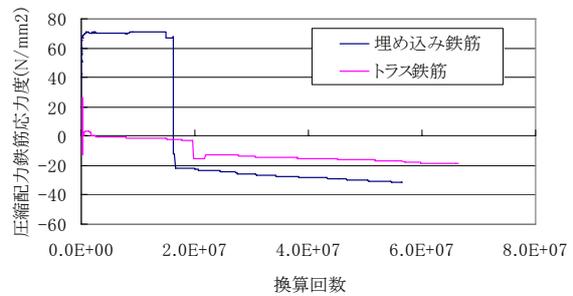


b)解析結果

図 3.5-15 圧縮主鉄筋応力度の変化

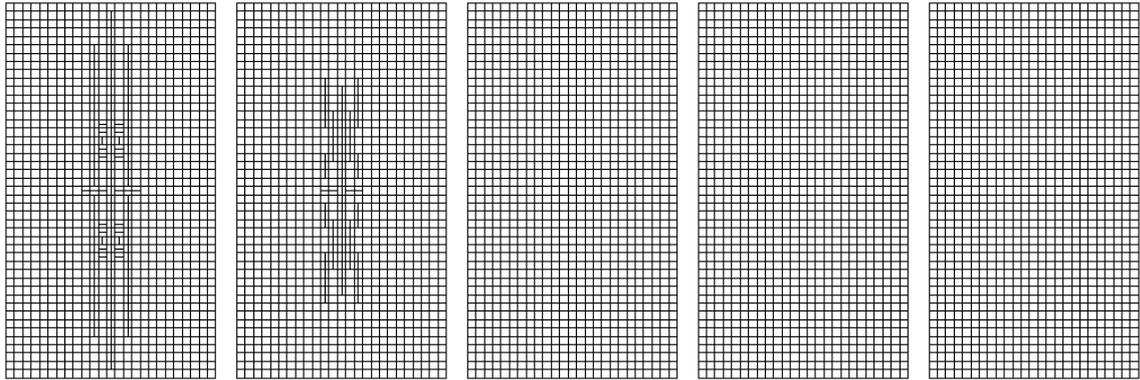


a)実験結果

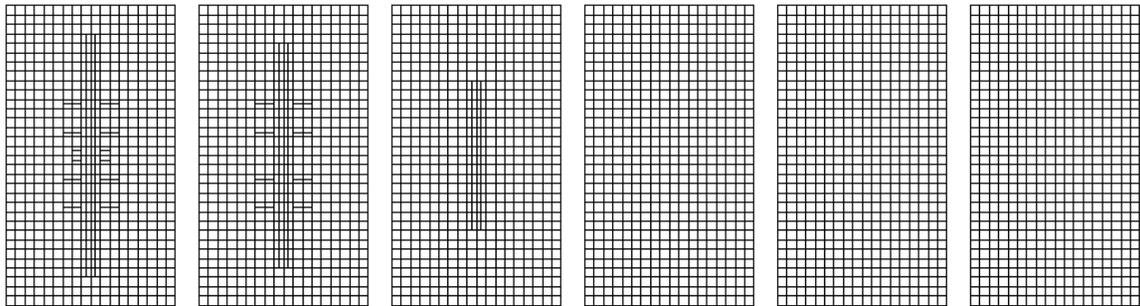


b)解析結果

図 3.5-16 圧縮配力鉄筋応力度の変化

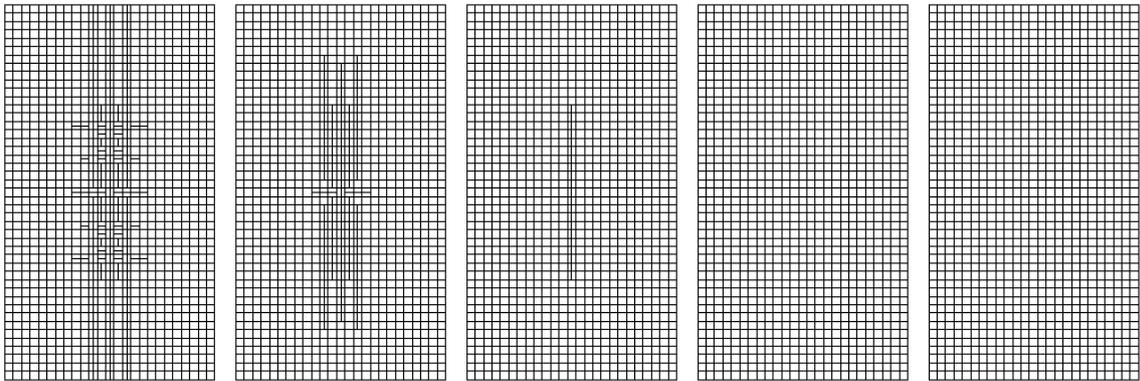


a)埋め込み鉄筋モデル (77 ステップ)

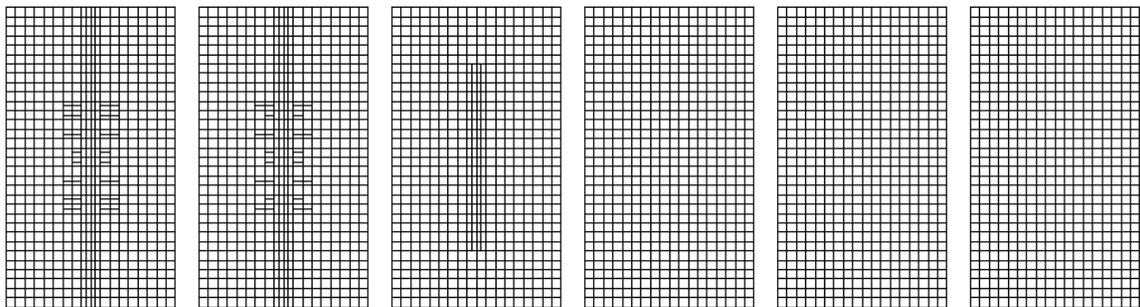


b)トラスモデル (42 ステップ)

図 3.5-17(1) 換算回数 1 回

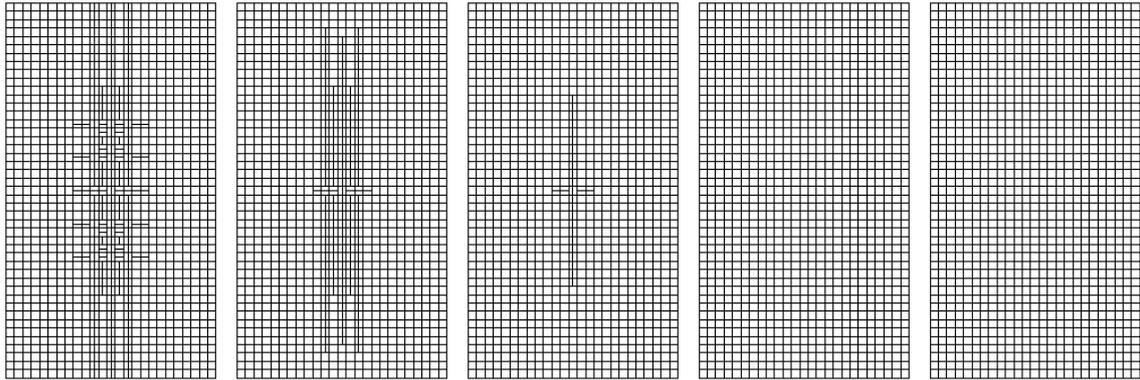


a)埋め込み鉄筋モデル (117 ステップ)

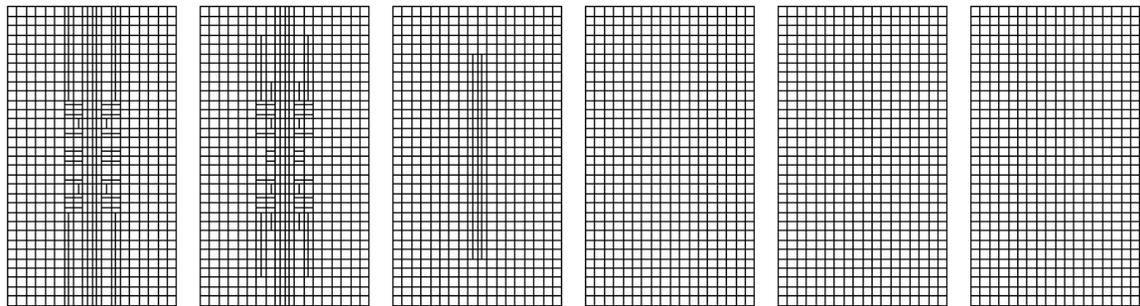


b)トラスモデル (55 ステップ)

図 3.5-17(2) 換算回数 10 回

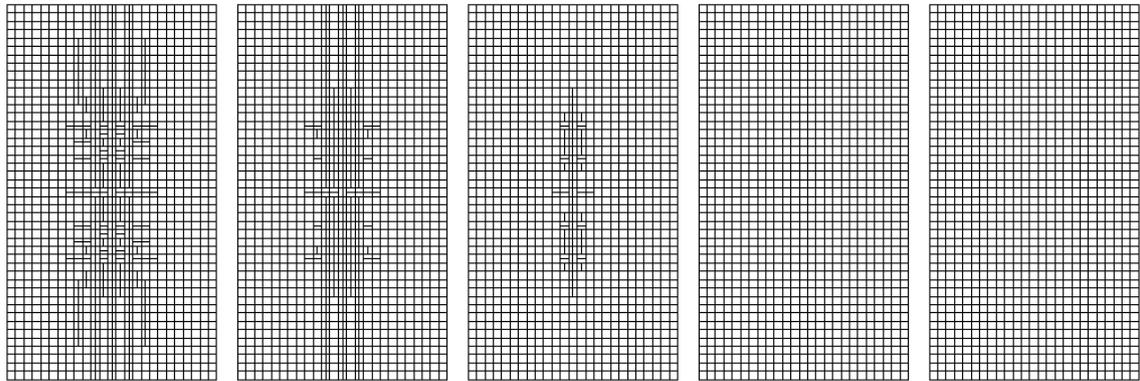


a)埋め込み鉄筋モデル (132 ステップ)

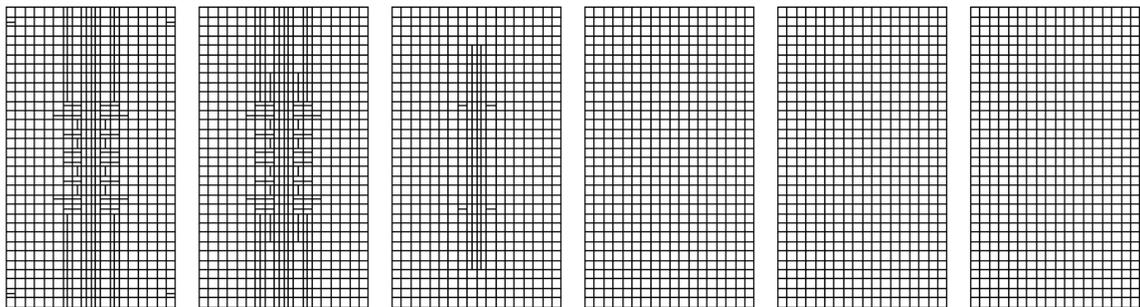


b)トラスモデル (79 ステップ)

図 3.5-17(3) 換算回数 100 回

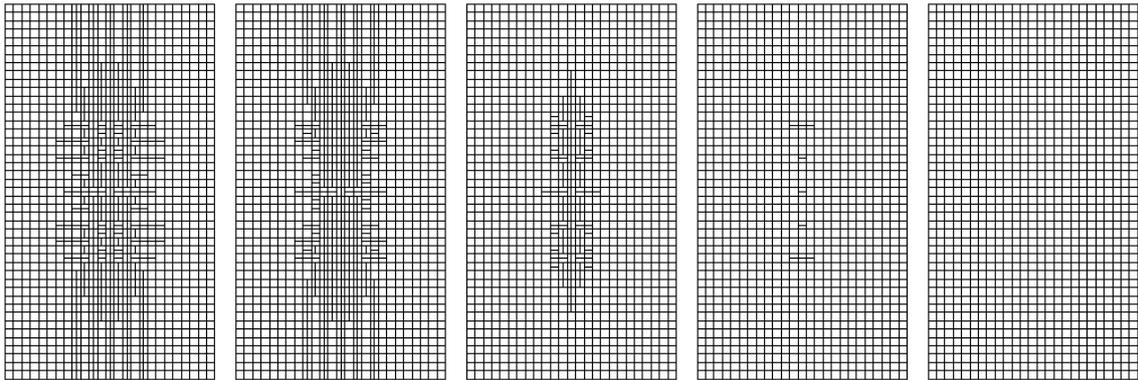


a)埋め込み鉄筋モデル (167 ステップ)

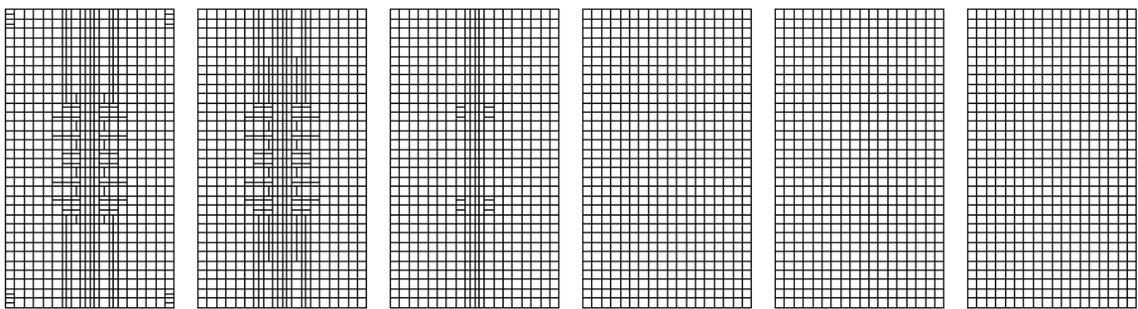


b)トラスモデル (91 ステップ)

図 3.5-17(4) 換算回数 1000 回

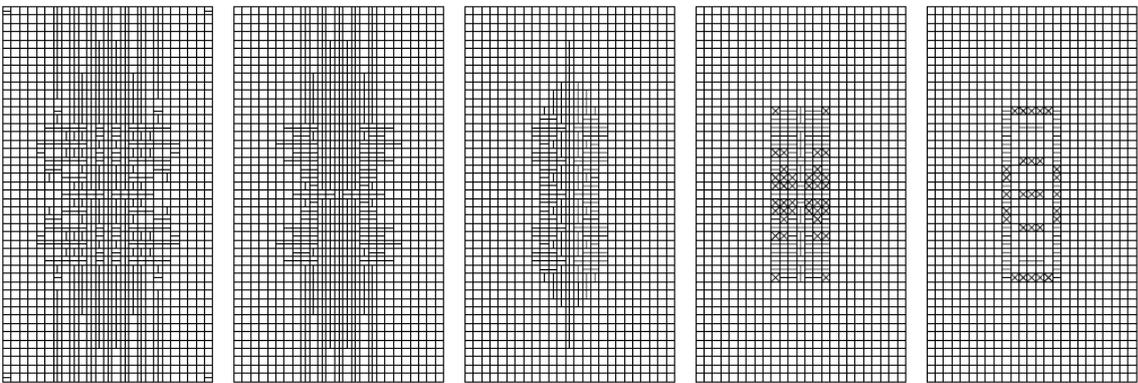


a)埋め込み鉄筋モデル (230 ステップ)

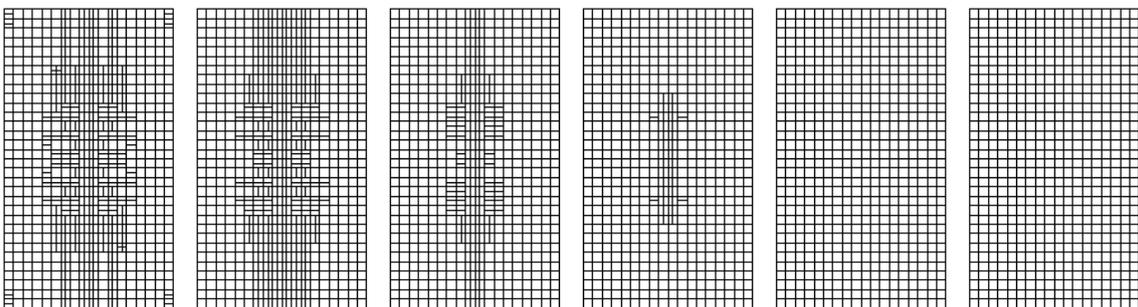


b)トラスモデル (102 ステップ)

図 3.5-17(5) 換算回数 10,000 回

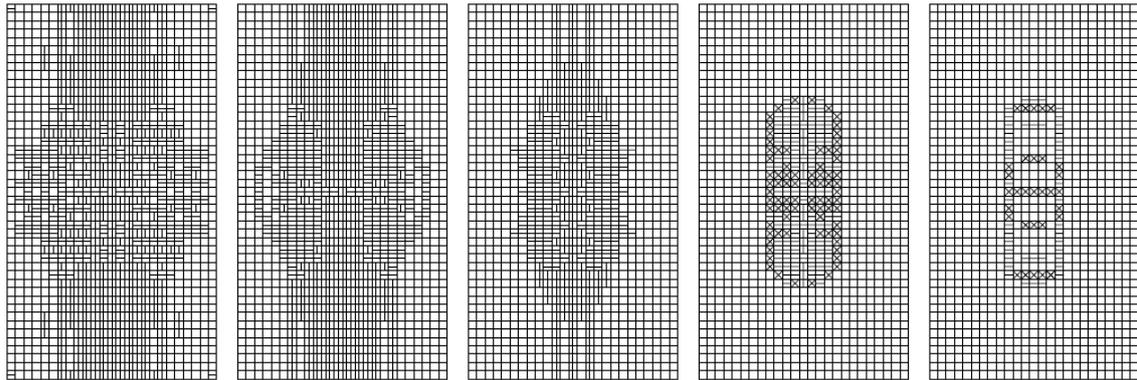


a)埋め込み鉄筋モデル(372 ステップ)

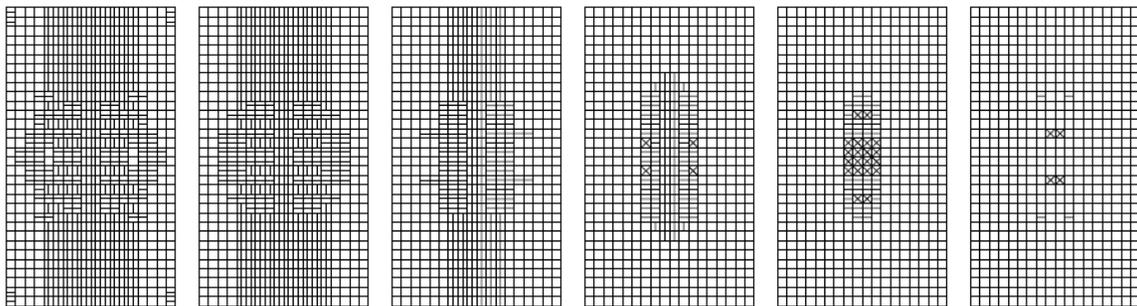


b)トラスモデル(146 ステップ)

図 3.5-17(6) 換算回数 100,000 回

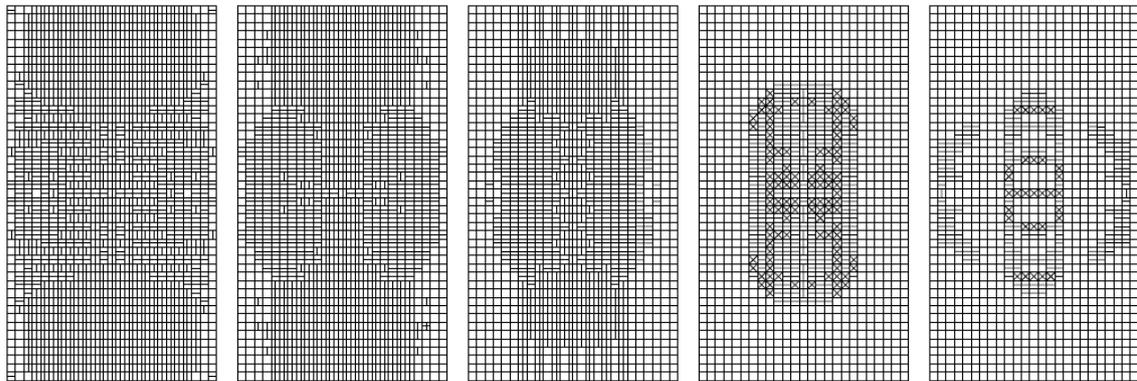


a)埋め込み鉄筋モデル (545 ステップ)

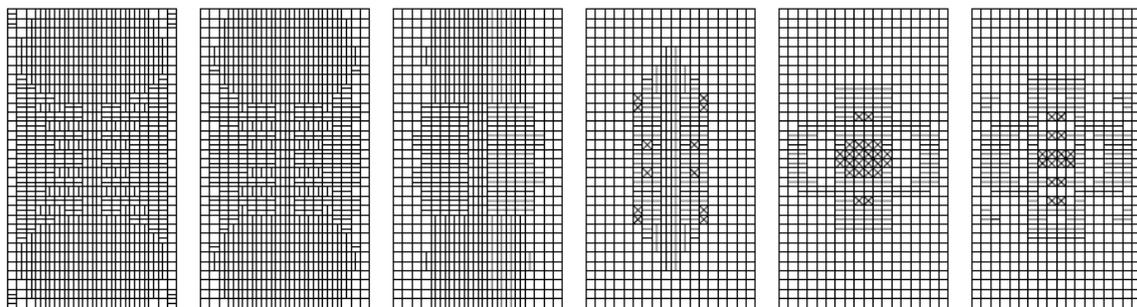


b)トラスモデル (273 ステップ)

図 3.5-17(7) 換算回数 1,000,000 回

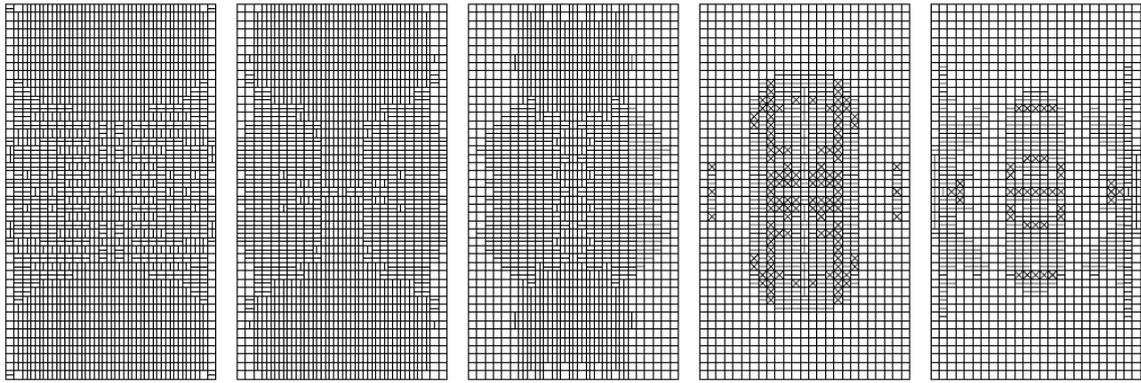


a)埋め込み鉄筋モデル (823 ステップ)

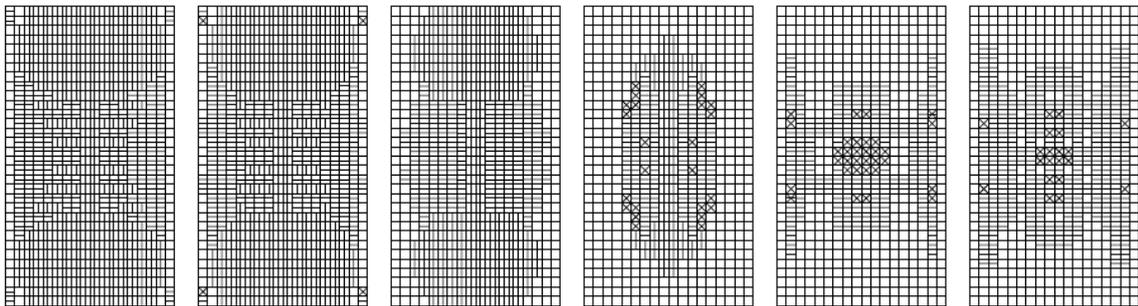


b)トラスモデル (446 ステップ)

図 3.5-17(8) 換算回数 10,000,000 回

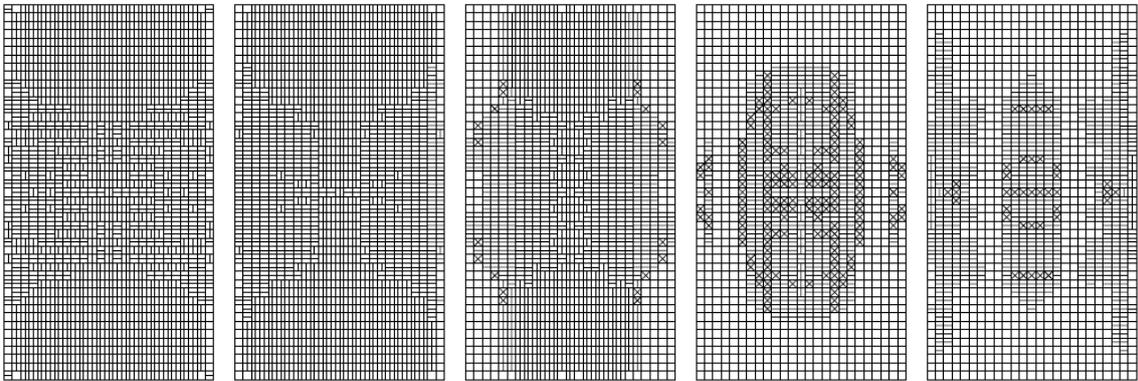


a)埋め込み鉄筋モデル (946 ステップ)

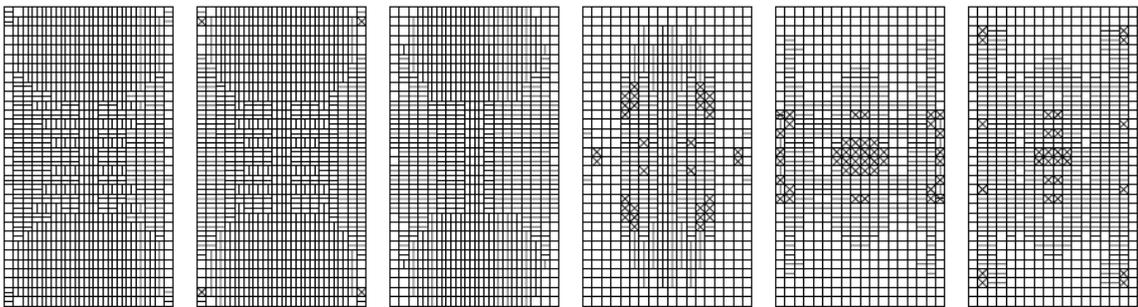


b)トラスモデル (535 ステップ)

図 3.5-17(9) 換算回数 20,000,000 回



a)埋め込み鉄筋モデル (1064 ステップ)



b)トラスモデル (608 ステップ)

図 3.5-17(10) 換算回数 10,000,000 回

c) まとめ

埋め込み鉄筋を用いたモデルでは 1300 ステップまで、トラス鉄筋要素を用いたモデルでは 800 ステップまでの計算を行った。トラス鉄筋要素を使用したモデルの方が、同じ換算回数での床版たわみがやや大きくなってはいるものの差は小さい。

トラス鉄筋要素を用いた計算は、埋め込み鉄筋要素を使用した場合と比較して要素数が少なくなっているが、本計算で行った程度の要素分割の差異であれば鉄筋のモデル化方法の違いに関わらず同程度の水準の解析が行えるものと考えられる。

3.5.4 疲労被害則の検討

解析において疲労耐久性の絶対値に支配的な影響を及ぼす被害則のべき乗則の相違が解析結果に及ぼす影響について検討する。

解析との比較対象には、平成 17 年度に国土技術政策総合研究所道路構造物管理研究室にて実施した輪荷重走行試験結果を用いる。実験結果の詳細は 3.5.2（要素の大きさが解析結果に及ぼす影響）に示すとおりである。

被害則は、3.3.2 で検討したケース⑦である。

べき乗を $\log 8$ として計算した結果を以下に示す。解析対象は床版厚 170mm の供試体 A のケースである。

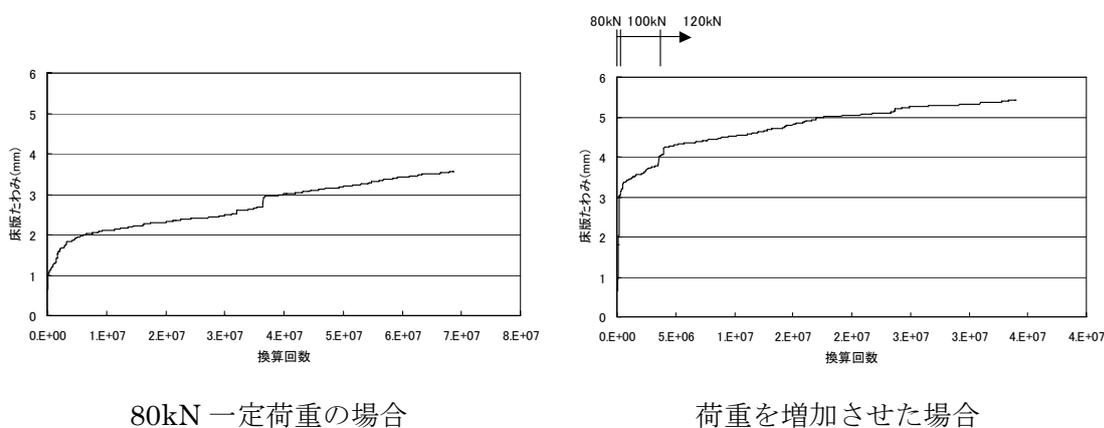


図 3.5-18 床版たわみ

荷重を増加させた場合とは、換算回数（解析により逆算した換算回数）から、実験による荷重を増加させた回数（45000 回、175000 回）の解析ステップ数を算出し、解析にて、その段階で荷重を上げ、階段载荷（実験の荷重増加と同様の载荷）をした結果である。

上記の結果および 1200 ステップでの損傷状況から、べき乗として $\log 8$ では損傷が早くなることが判明した。

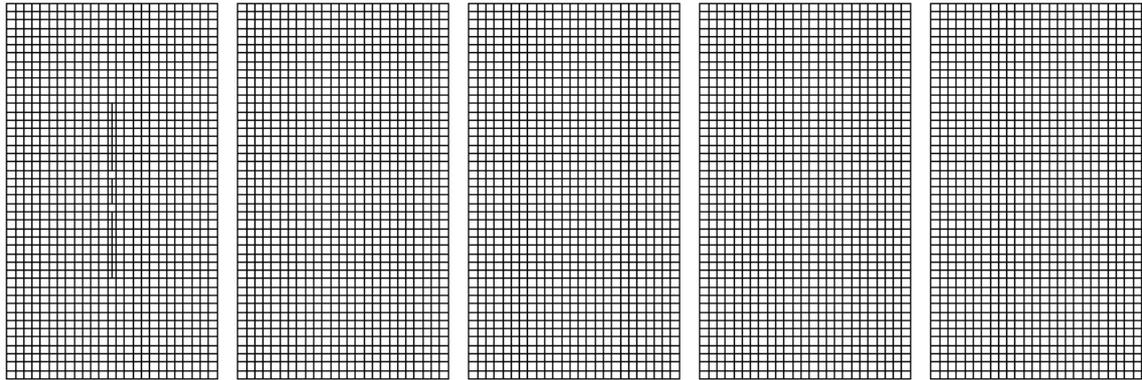


図 3.5-19(1) 10 ステップ (換算回数 6.3×10^{-6})

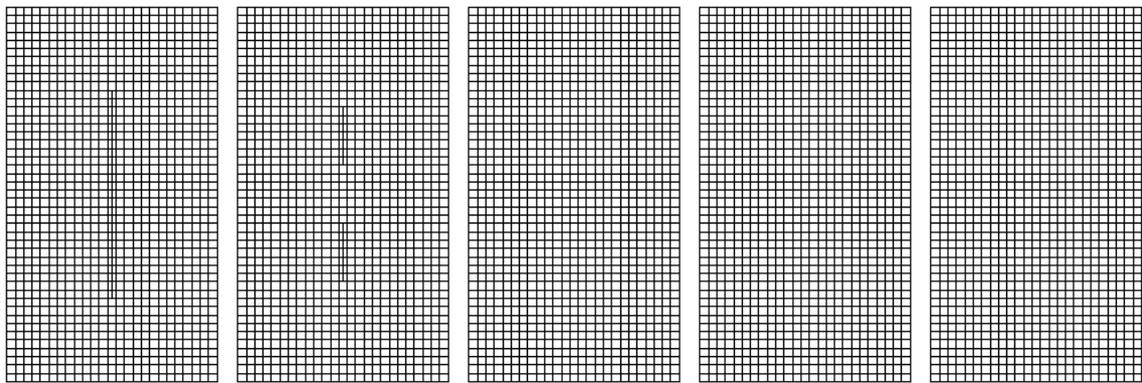


図 3.5-19(2) 20 ステップ (換算回数 2.2×10^{-3})

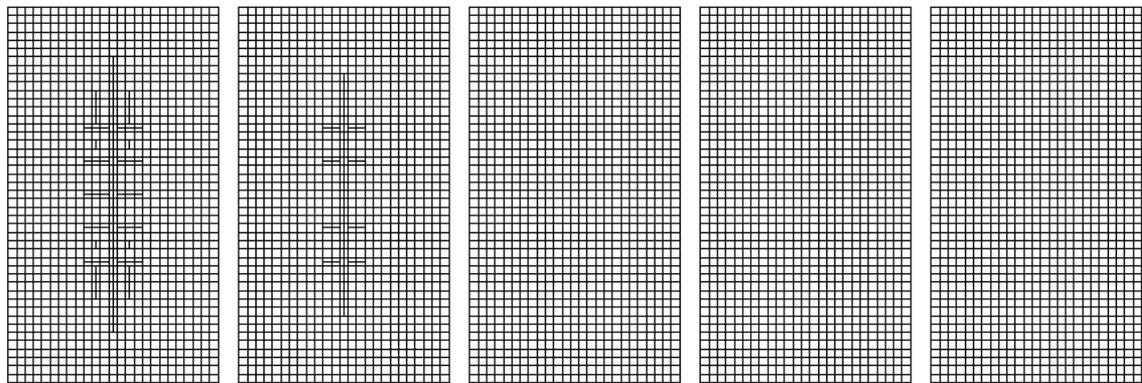


図 3.5-19(3) 50 ステップ (換算回数 14)

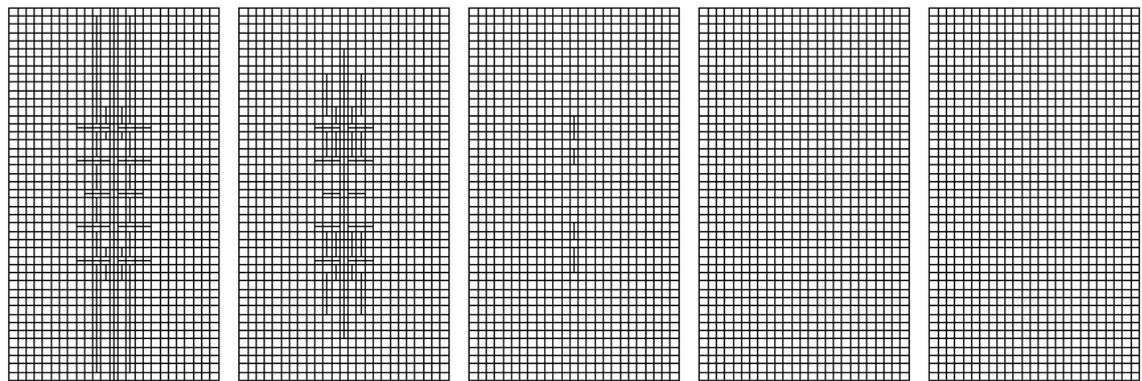


図 3.5-19(4) 100 ステップ (換算回数 1060)

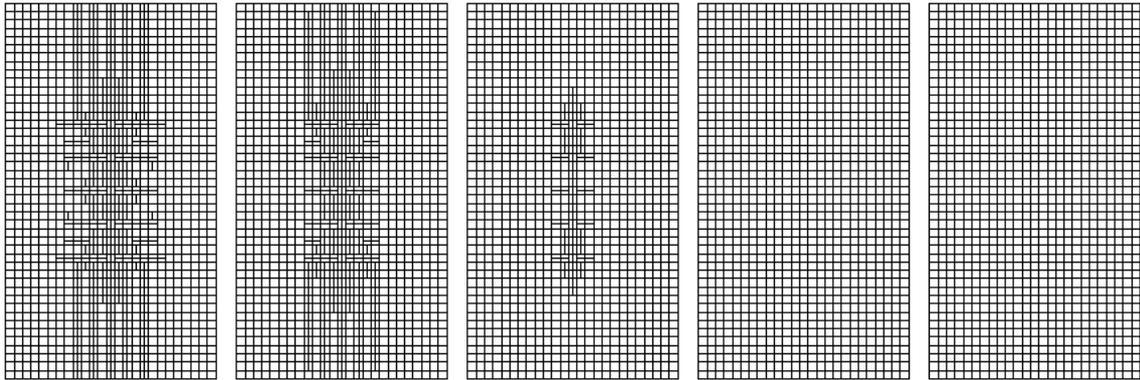


図 3.5-19(5) 200 ステップ (一定载荷 : 換算回数 1.3×10^5)

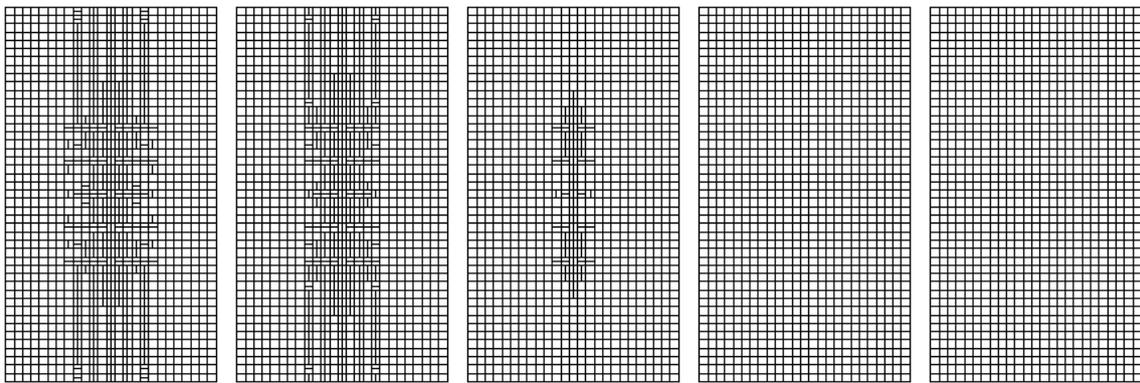


図 3.5-19(6) 200 ステップ (荷重増加 : 換算回数 5.6×10^4)

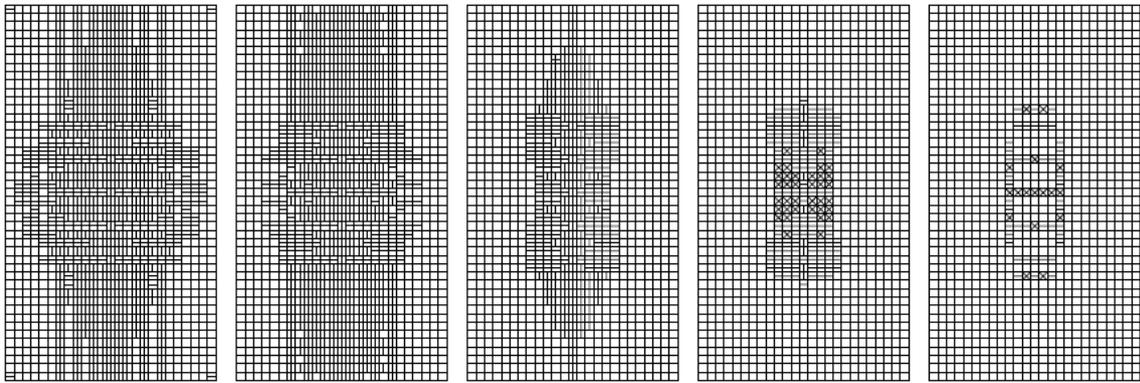


図 3.5-19(7) 500 ステップ (一定载荷 : 換算回数 4.1×10^6)

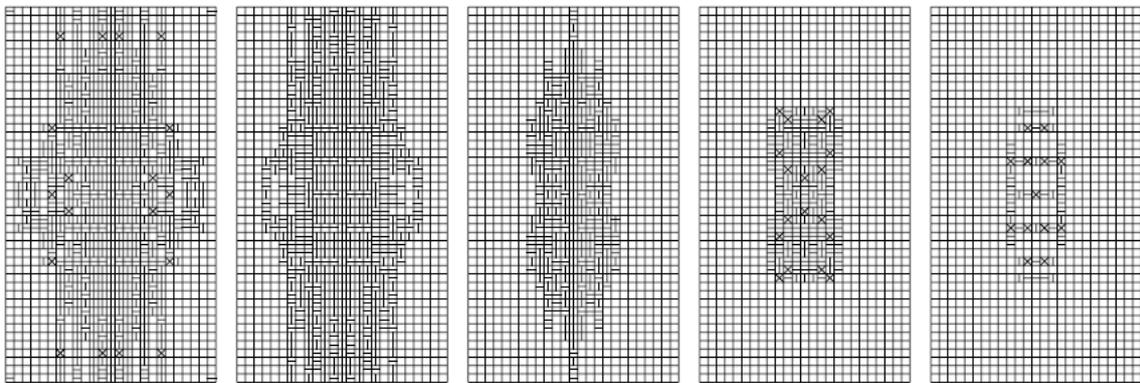


図 3.5-19(8) 500 ステップ (荷重増加 : 換算回数 1.9×10^5)

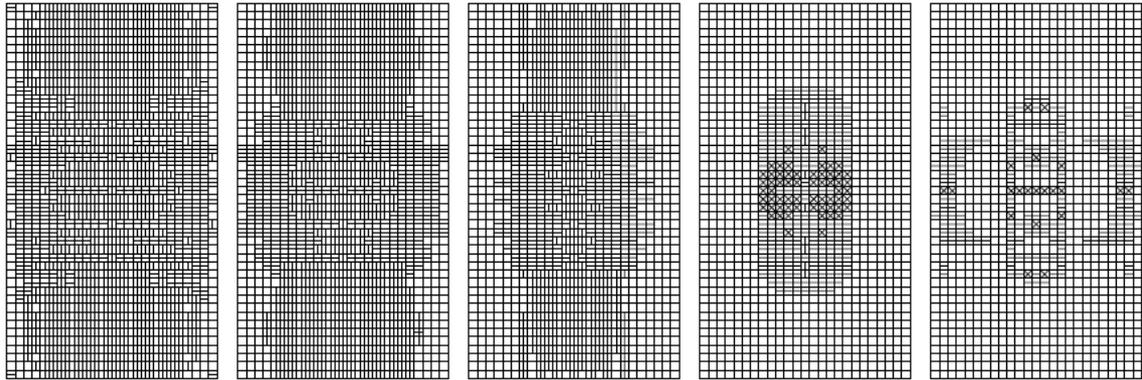


図 3.5-19(9) 800 ステップ (一定载荷 : 換算回数 2.2×10^7)

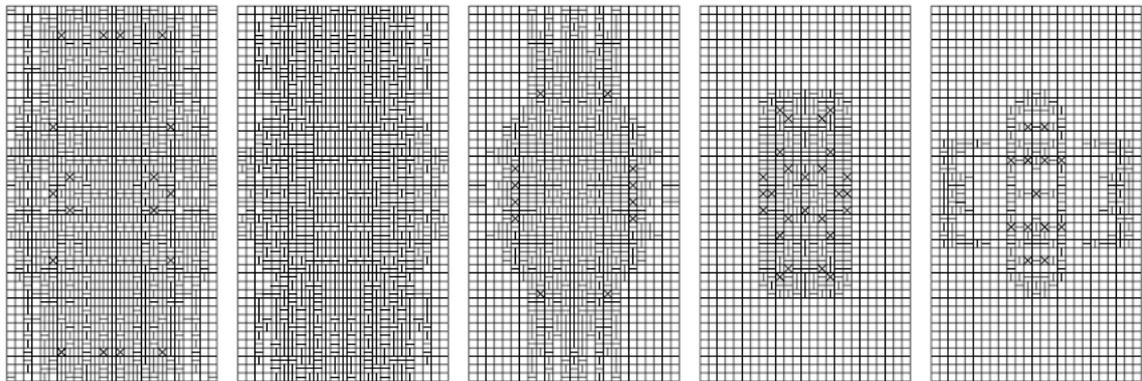


図 3.5-19(10) 800 ステップ (荷重増加 : 換算回数 2.2×10^6)

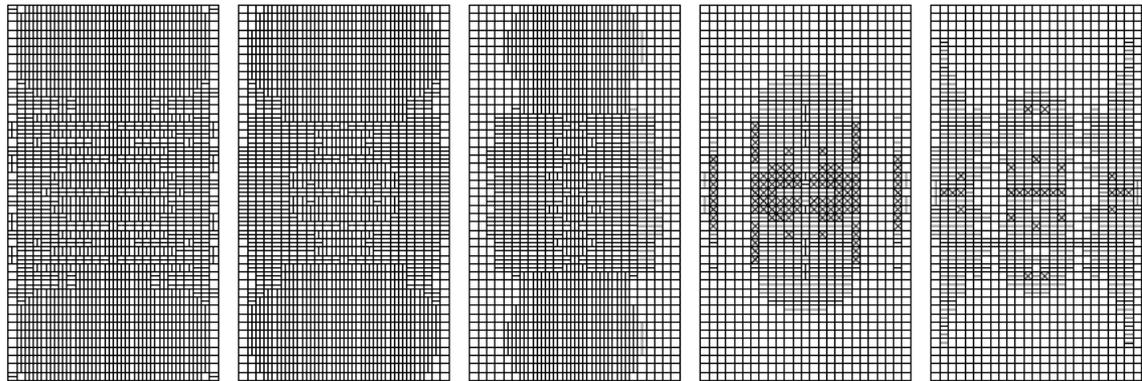


図 3.5-19(11) 1000 ステップ (一定载荷 : 換算回数 4.0×10^7)

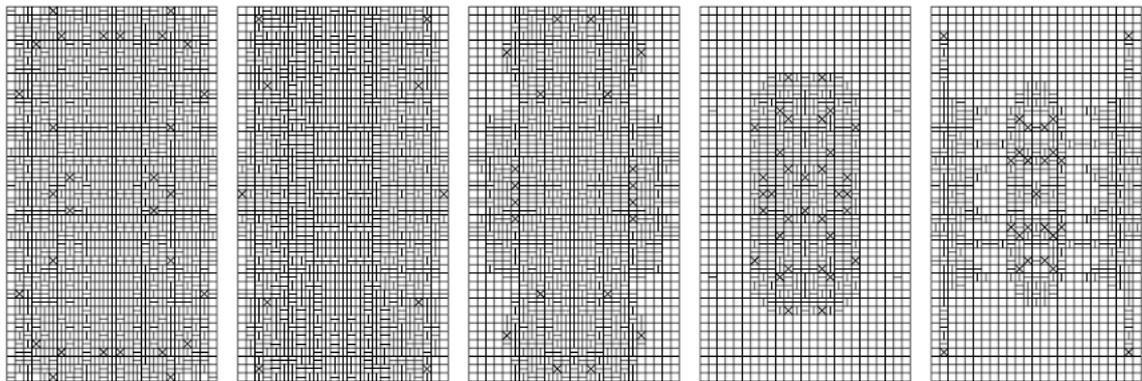


図 3.5-19(12) 1000 ステップ (荷重増加 : 換算回数 9.7×10^6)

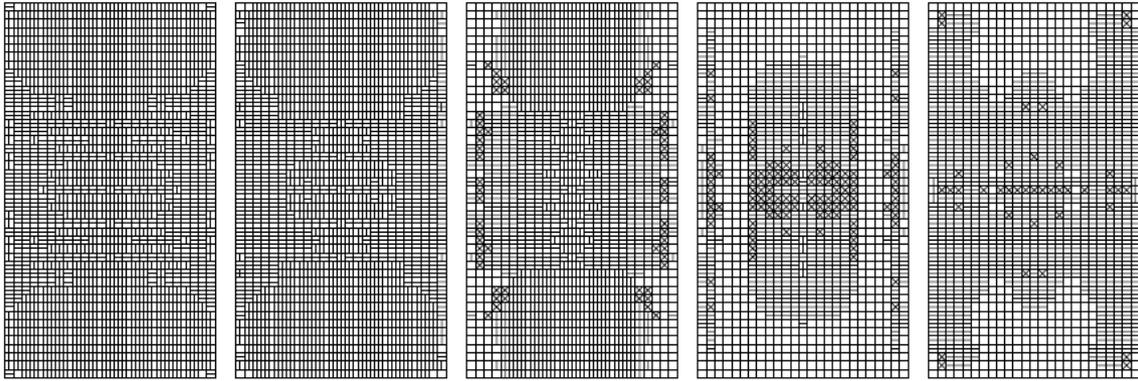


図 3.5-19(13) 1200 ステップ (一定载荷 : 換算回数 5.8×10^7)

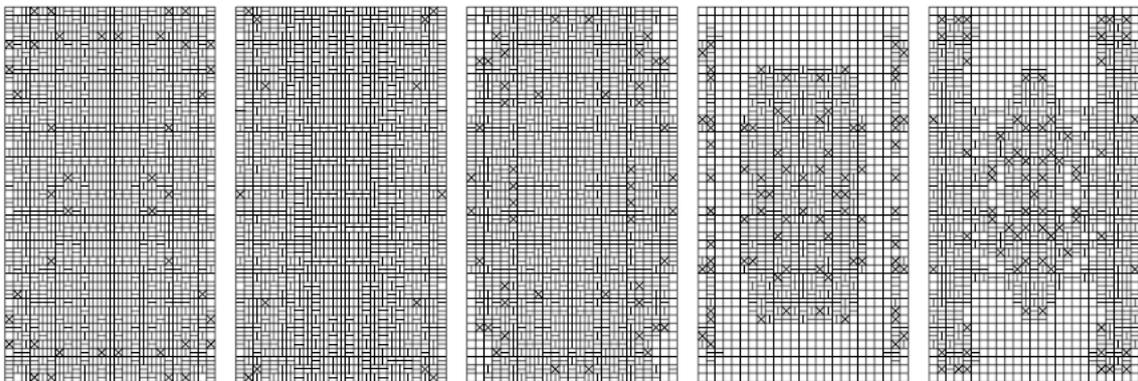


図 3.5-19(14) 1200 ステップ (荷重増加 : 換算回数 2.27×10^7)

同様の方法でべき乗数を $\log 8$ から $\log 12$ に変更して計算を行った結果を以下に示す。解析対象は床版厚 170mm の供試体 A のケースである。

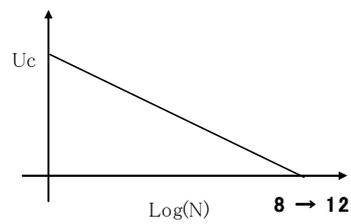
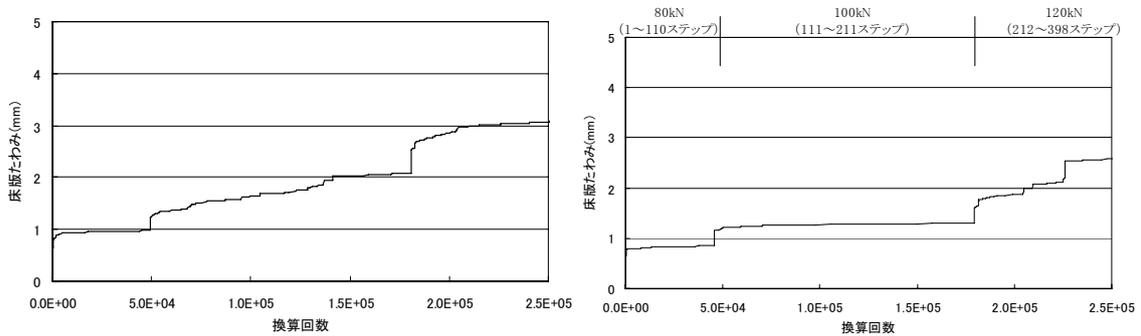
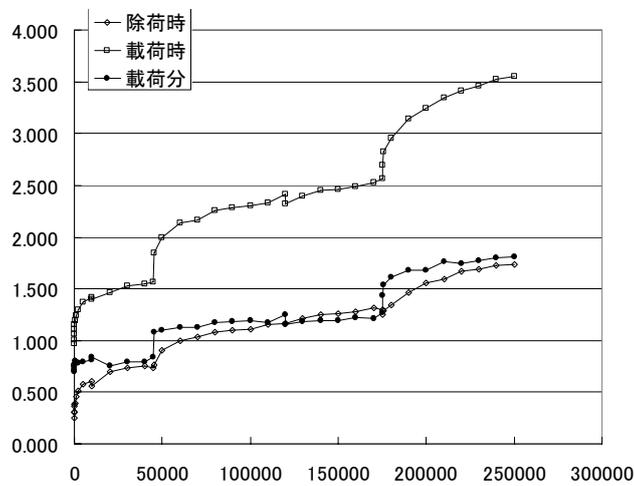


図 3.5-20 コンクリートの S-N 線図



a) N=8 とした場合

b) N=12 とした場合



c) 実験結果

図 3.5-21 べき乗の検討 (床版たわみ)

以上より、本ケースでは、疲労被害則のべき乗則は $\log 8$ より $\log 12$ とした方が実験結果と解析の適合性はよい結果となっている。荷重を 80kN から 120kN と 1.5 倍に変化させた実際の輪荷重試験では、床版たわみは約 0.8~2.0mm 以内と 2 倍以上の変化を生じたが、解析によっても概ね試験結果と類似した結果となっている。

解析と実験で床版たわみの増加傾向は概ね同様の傾向を示しており、べき乗を変えても破壊過程が大きく異なることはない。換算回数とその段階で生じる床版たわみの関係を実験や実験の現象とべき乗則の値を変化させてキャリブレーションすることで、解析的に実際の疲労損傷過程を定量的に評価できる可能性が高いものと考えられる。