

## 第2章 コンクリート系床版の疲労耐久性評価手法の検証

### 2.1 解析手法の妥当性及び適用範囲の確認

1.2～1.4に記述したコンクリート系床版の疲労耐久性評価手法（すべての方向について同様の破壊則に基づいて剛性を低下させる破壊方法の考え方）の妥当性及び適用範囲について確認するため、上記手法を用いた解析結果と、旧土木研究所及び国立大学法人大阪大学で行われたRC床版供試体における輪荷重走行試験結果を比較する。

#### (1) 検討ケース

対象とする床版は、表-2.1.1に示す輪荷重走行試験を実施した床版供試体 No.1 から No.7 とする。供試体 No.1～6 は、輪荷重を一定とした載荷（以下「一定荷重走行」という。）試験、供試体 No.7 は同試験機により走行回数が多くなるに従い段階的に載荷荷重を大きくすることにより劣化を促進させる階段状荷重漸増載荷（以下「階段載荷」という。）試験が行われたものである。荷重載荷方法を図-2.1.1に示す。

供試体 No.1～4 及び 7 は、（独）土木研究所の輪荷重走行試験機（当時建設省土木研究所）を用い、供試体 No.5,6 は大阪大学の輪荷重走行試験機を用いてそれぞれ試験を行った。

供試体 No.1～3 は、1964(昭和 39)年改定の道路橋示方書に準じて製作した供試体を対象として、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異なることを確認する。

供試体 No.4 は、1973(昭和 48)年に改定された道路橋床版に準じて製作した供試体であり、供試体 No.1～3 とは適用示方書が異なるため、版厚、配筋量及びコンクリート圧縮強度が異なる。従来示方書で行われてきた配筋量の増加措置による疲労耐久性の違いについて検討する。

供試体 No.5,6 は供試体 No.1～3 と床版支間が異なる供試体である。このため、供試体 No.4,5 を対象とした解析では、試験と同じ荷重を載荷させ、床版支間の相違が解析結果から推定される結果の違いを検討する。なお、供試体 No.5,6 の実験では、輪荷重走行試験機が異なっており、諸元に示した平面寸法以外にも、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る。このため、繰返回数や載荷荷重による単純な比較はできない面がある。ここでは、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、詳細を厳密には反映していない。

供試体 No.7 は、1996(平成 8)年（現行設計規準と同じ）改定の道路橋示方書に準じた設計により製作された床版供試体である。本研究では、RC8n1 を検討対象とした。

表-2.1.1 対象とする床版

供試体		適用示方書	載荷荷重 (kN)	寸法(mm) (厚さ*幅*長さ)	支間長 (mm)	備考
1	S39-3	1964(昭和39)年	105	190*2800*4500	2500	基本のケース a)荷重の違い
2	S39-4		196			
3	S39-5		167			
4	S47	1973(昭和48)年	210	200*2800*4500	2500	b)基準の違い
5	N1(S47)*1		210	180*2000*3000	1800	c)供試体寸法の違い
6	DR1(S39)*2	1964(昭和39)年	142	190*2000*3000		い
7	RC8n1	1998(平成8)年	階段載荷	250*2800*4500	2500	b)基準の違い

\*1 参考文献2.3)

\*2 参考文献2.4)

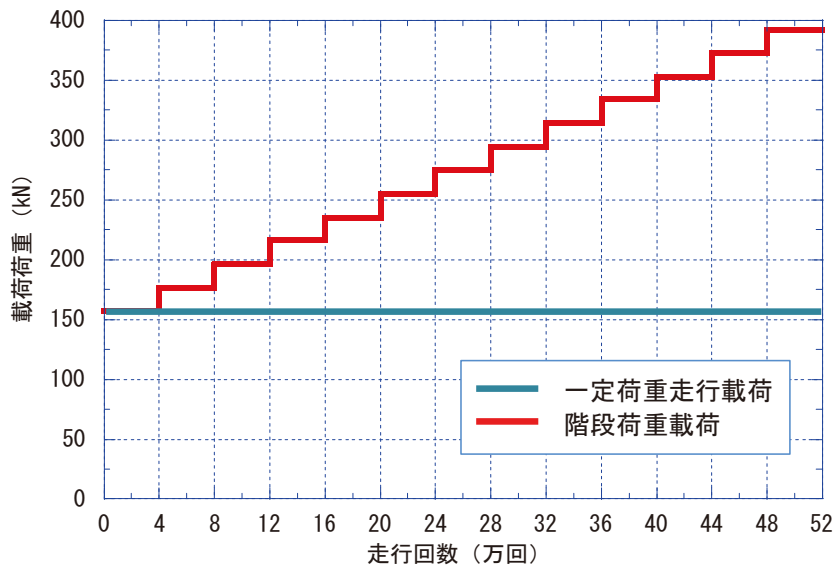
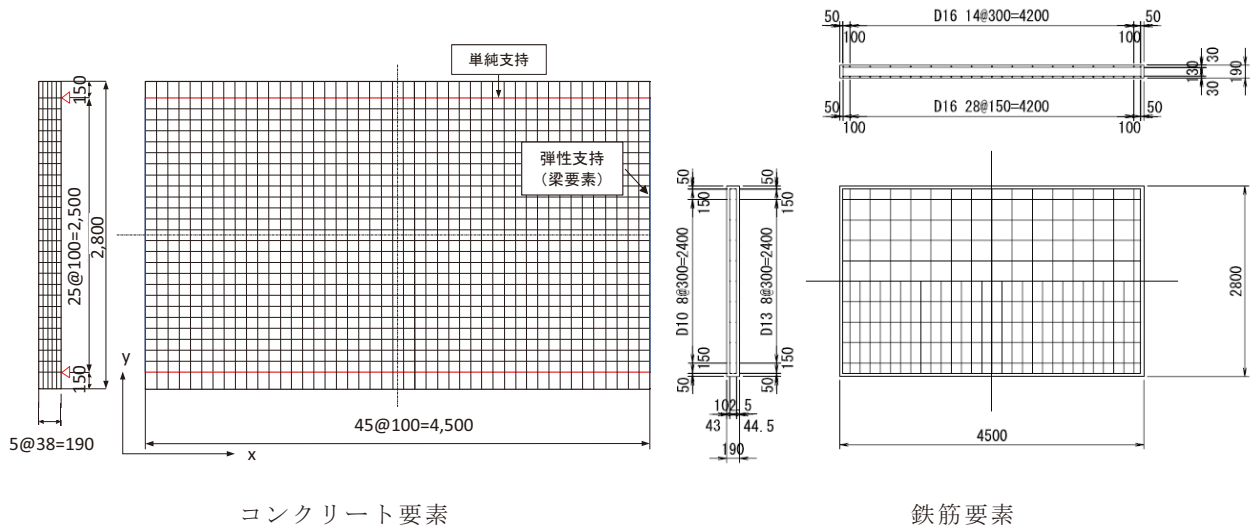


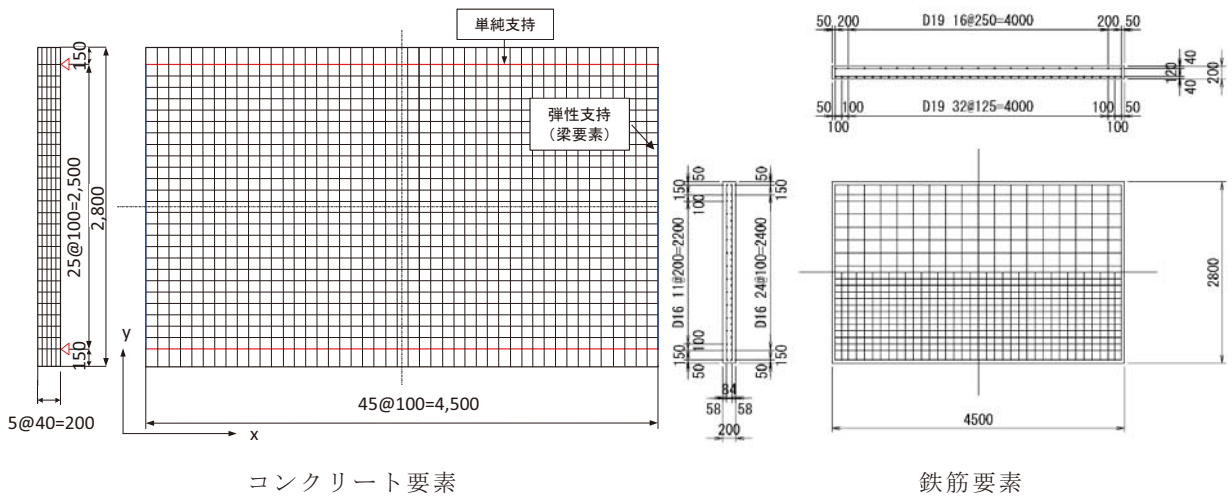
図-2.1.1 荷重載荷方法

(2) 解析モデル

解析モデルは、床版をソリッドモデルとし、100mm×100mm程度の大きさの要素に分割する。鉄筋は埋め込み要素とする。コンクリート要素の解析モデル図を図-2.1.2に、要素分割の断面を図-2.1.3に、材料の物理定数と諸元を表-2.1.2に示す。荷重と支持条件は実験と同じであり、長辺は単純支持、短辺は弾性支持とした。荷重載荷位置は図-2.1.4及び表-2.1.3に示す。



(a) 供試体 No. 1～3



(b) 供試体 No. 4

図-2.1.2(1) 要素分割



要素分割の部分を図-2.1.3 に示す。床版の版厚はそれぞれのケースで異なるが、いずれも版厚を 5 層に等分し、上面から 2 層目及び 4 層目に主鉄筋及び配力筋をそれぞれ配置している。

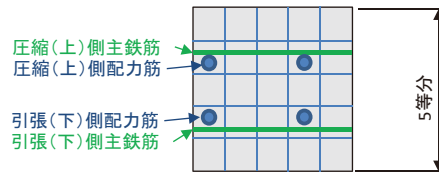
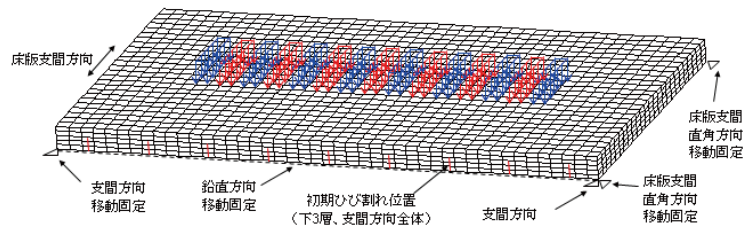
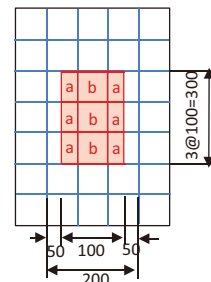
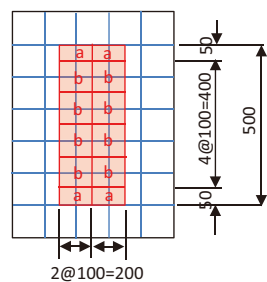


図-2.1.3 要素分割の部分

荷重の載荷位置を図-2.1.4 に示す。荷重は幅 500mm 又は 300mm、長さ 200mm の着色部分に載荷した。橋軸方向に 15 箇所の移動載荷とした。破壊基準、疲労被害則の考え方は 1.4 で記述したとおりである。



(a) 荷重載荷位置



(b) 供試体 No. 1~4, 7 の荷重分布 (c) 供試体 No. 5, 6 の荷重分布

図-2.1.4 移動荷重載荷方法

表-2.1.2 材料の物理定数と諸元

供試体		コンクリート					鉄筋（下側）		鉄筋（上側）	
		圧縮 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング 係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	せん断 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
1	S39-3	13.6	1.44	16.2	7.04	0.191	D16@150	D13@300	D16@300	D10@300
2	S39-4	29.7	2.69	23.9	10.40	0.172	D16@150	D13@300	D16@300	D10@300
3	S39-5	31.1	2.49	23.4	10.20	0.170	D16@150	D13@300	D16@300	D10@300
4	S47	29.9	2.92	23.1	10.00	0.184	D19@125	D16@100	D19@250	D16@200
5	N1(S47)	54.2	3.29	27.9	12.10	0.200	D16@100	D16@125	D16@200	D16@250
6	DR1(S39)	28.8	2.17	20.0	8.70	0.200	D16@90	D13@250	D16@180	D13@400
7	RC8n1	33.1	2.64	27.9	12.10	0.150	D19@150	D16@125	D19@300	D16@250

表-2.1.3 各要素に載荷する荷重

供試体		載荷荷重 (kN)	荷重要素 図-2.1.4 参照	X (mm)	Y (mm)	面積 (mm <sup>2</sup> )	荷重強度 (N/mm <sup>2</sup> )	荷重 (kN)
1	S39-3	105	a	100	50	5,000	1.050	5.250
			b	100	100	10,000	1.050	10.500
2	S39-4	167	a	100	50	5,000	1.670	8.350
			b	100	100	10,000	1.670	16.700
3	S39-5	196	a	100	50	5,000	1.960	9.800
			b	100	100	10,000	1.960	19.600
4	S47	210	a	100	50	5,000	2.100	10.500
			b	100	100	10,000	2.100	21.000
5	N1(S47)	210	a	50	100	5,000	3.500	17.500
			b	100	100	10,000	3.500	35.000
6	DR1(S39)	142	a	50	100	5,000	2.367	11.833
			b	100	100	10,000	2.367	23.667
7	RC8n1	階段載荷	a	100	50	5,000	1.570*	7.850*
			b	100	100	10,000	1.570*	15.700*

\* : 初期荷重

(3) 解析結果

供試体 No.1~7 を解析し、床版たわみ、鉄筋ひずみの推移及び剛性低下要素の推移を示す。

なお、剛性低下した要素内に縦線「|」または横線「-」がある要素ではそれと直行する方向に要素が破壊したことを示す。また、「×」は水平方向の破壊を示している。

① 供試体 No. 1 (S39-3)

床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.5~図-2.1.7 に示す。図-2.1.5(b)の横軸は走行回数を輪荷重走行試験で破壊した走行回数で除した比を、図-2.1.6の横軸は1.2節(3)4)③で定義した「走行回数 N」を換算回数としてそれぞれ表している。

解析の結果、床版たわみ及び鉄筋ひずみは、走行回数の増加とともに徐々に増加しており、実験における傾向と概ね一致しているといえる。また、剛性低下範囲についても、走行回数が増えるごとに徐々に剛性低下範囲が増加し、かつその密度が増加しながら床版上面に広がっていく傾向が得られた。これは、実際の道路橋床版や輪荷重走行試験の結果でみられるひび割れの進行傾向とも概ね一致する。たわみの絶対値は初期においては一致しているものの、2500回を超えると実験値の増加程度と比較して解析値の増加程度の方が小さい。

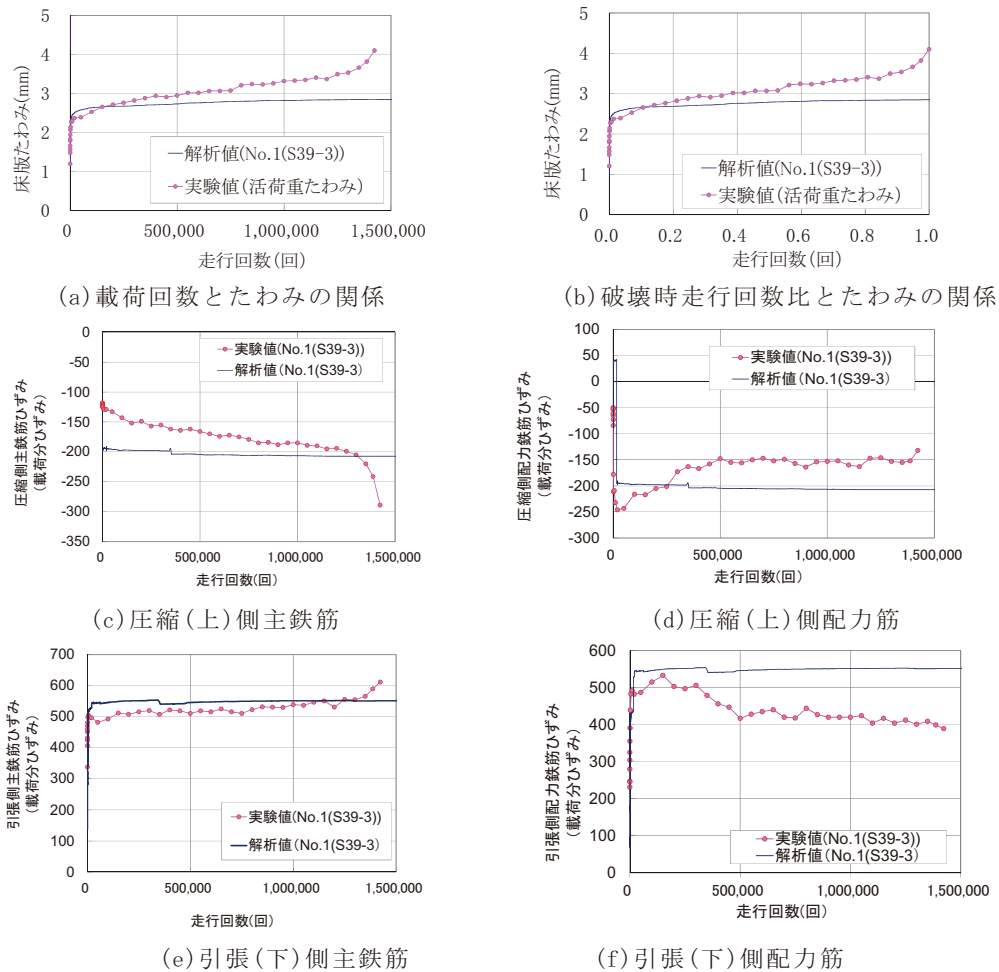
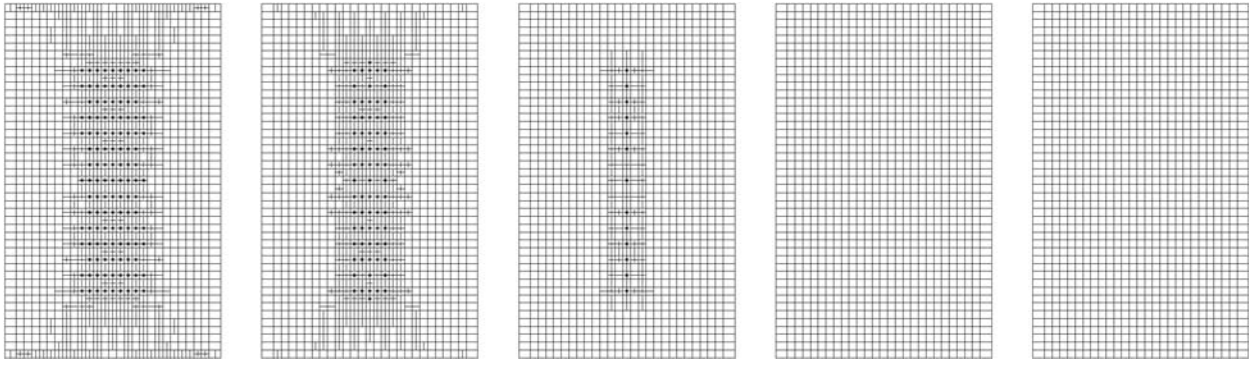
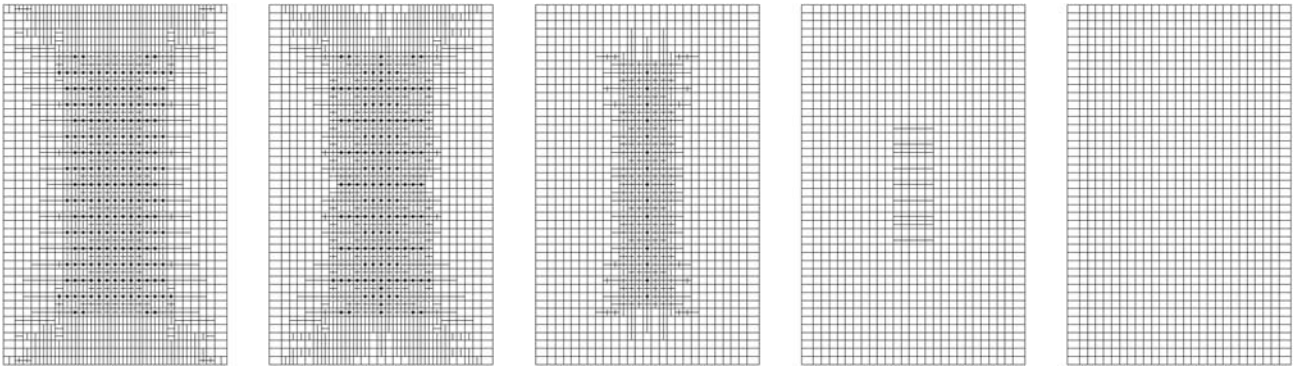


図-2.1.5 供試体 No. 1 (S39-4) の応答の推移 (支間中央)

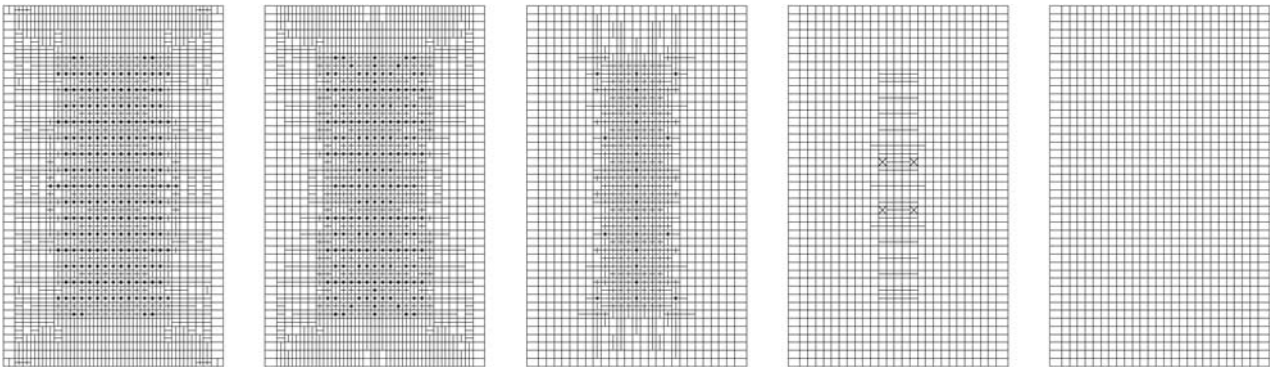




(a) Step500 換算回数 0.078 回



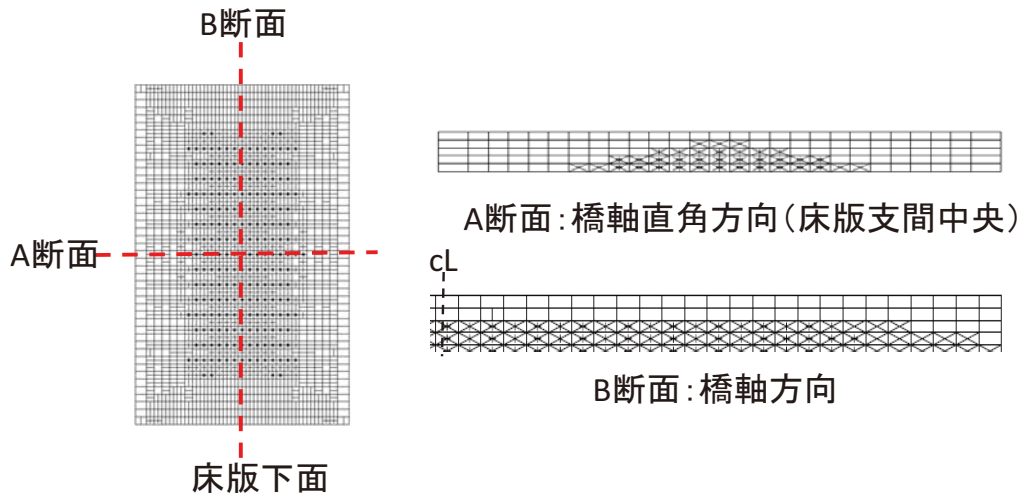
(b) Step900 換算回数 397 回



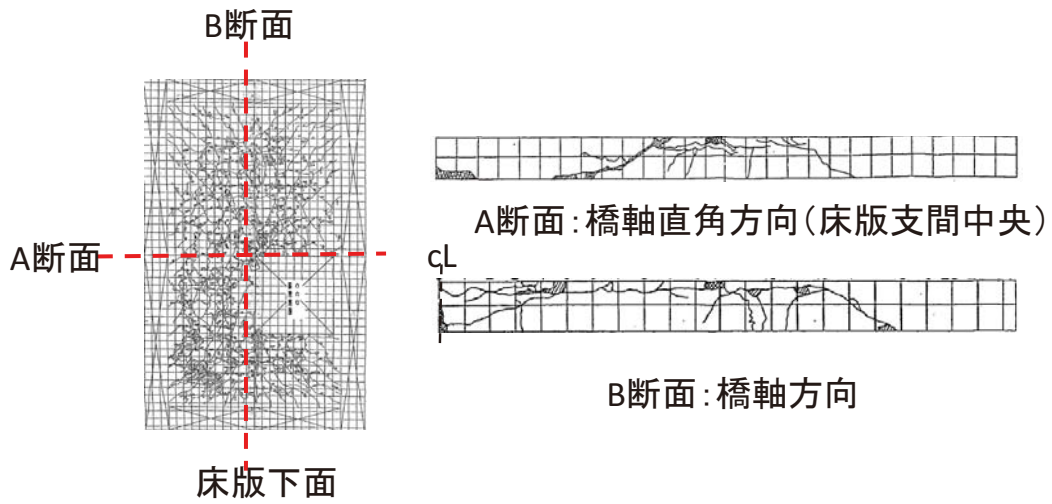
(c) Step1100 換算回数 2,422 回

図-2.1.6 供試体 No.1(S39-3)剛性低下要素の増加傾向





(a) 解析結果 (Step1,000 換算回数 2,422 回)



(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

図-2.1.7 供試体 No. 1 (S39-3) 剛性低下要素とひび割れ性状との関係

②供試体 No. 2 (S39-4)

床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.8 から図-2.1.10 に示す。図-2.1.8 (b) の横軸は、走行回数を輪荷重走行試験で破壊した走行回数で除した比で表している。これらの結果から、実験と解析の床版たわみ、鉄筋ひずみの増加傾向、ひび割れ性状と剛性低下範囲の関係は概ね一致しており、床版たわみの絶対値は初期値から合わないものの、損傷の進展に伴う耐荷力機構の変化はある程度再現できている可能性がある。

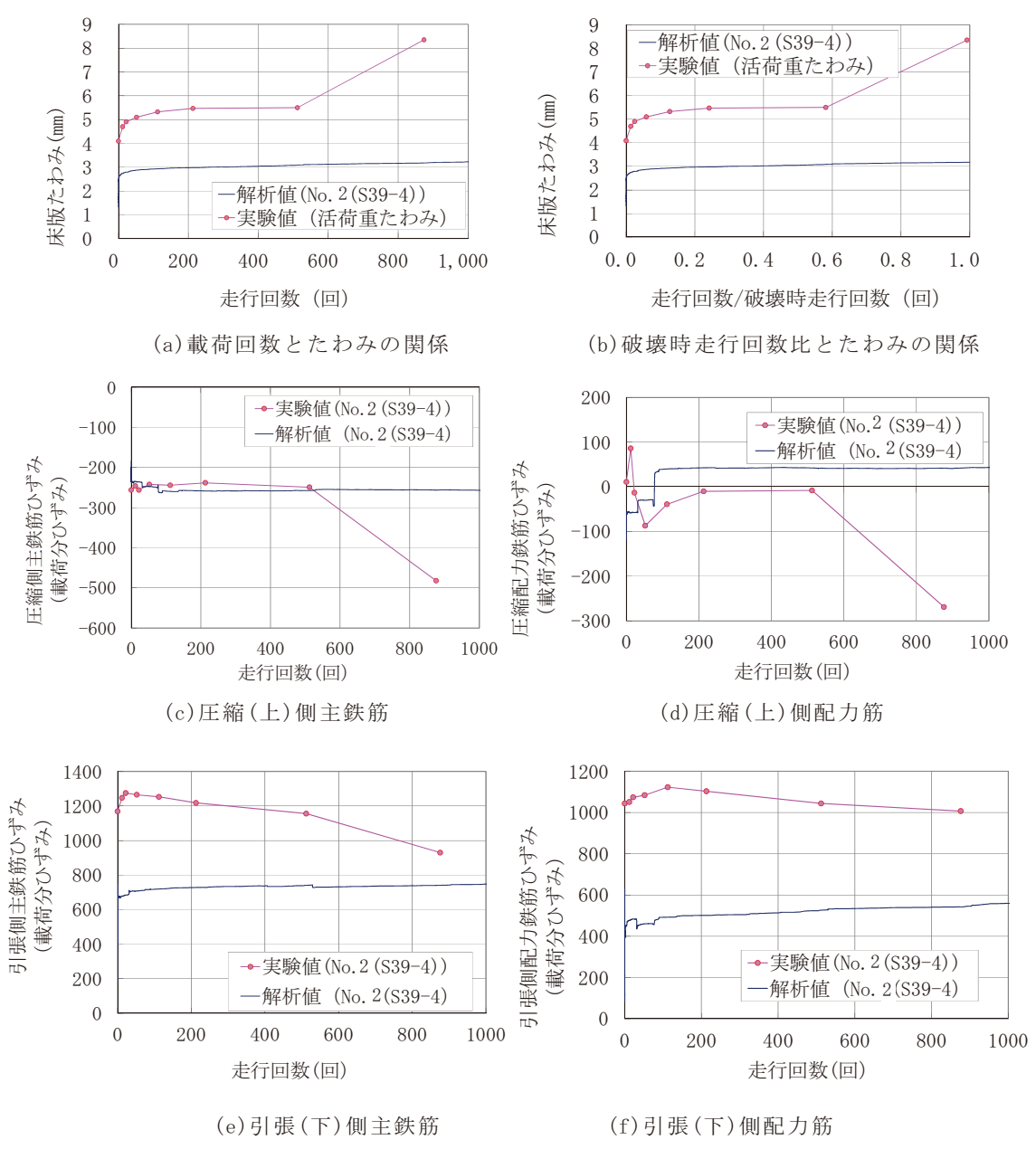
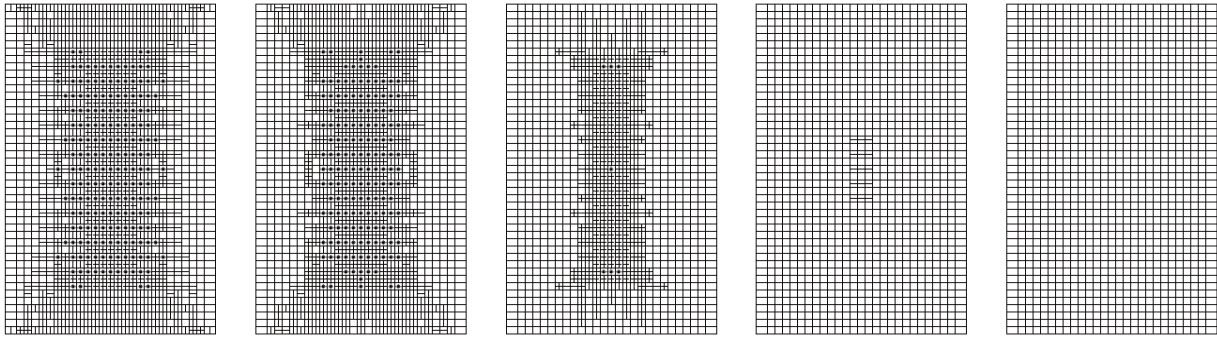
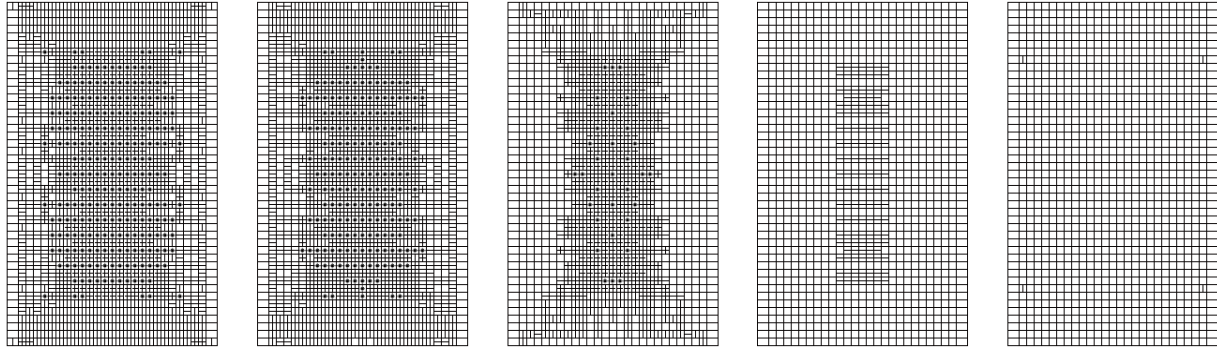


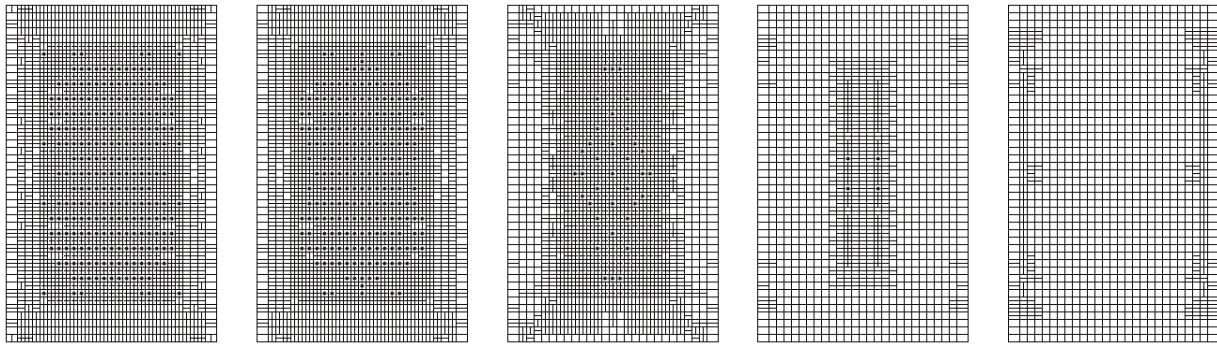
図-2.1.8 供試体 No. 2 (S39-4) の応答の推移 (支間中央)



(a) Step906 換算回数 109 回

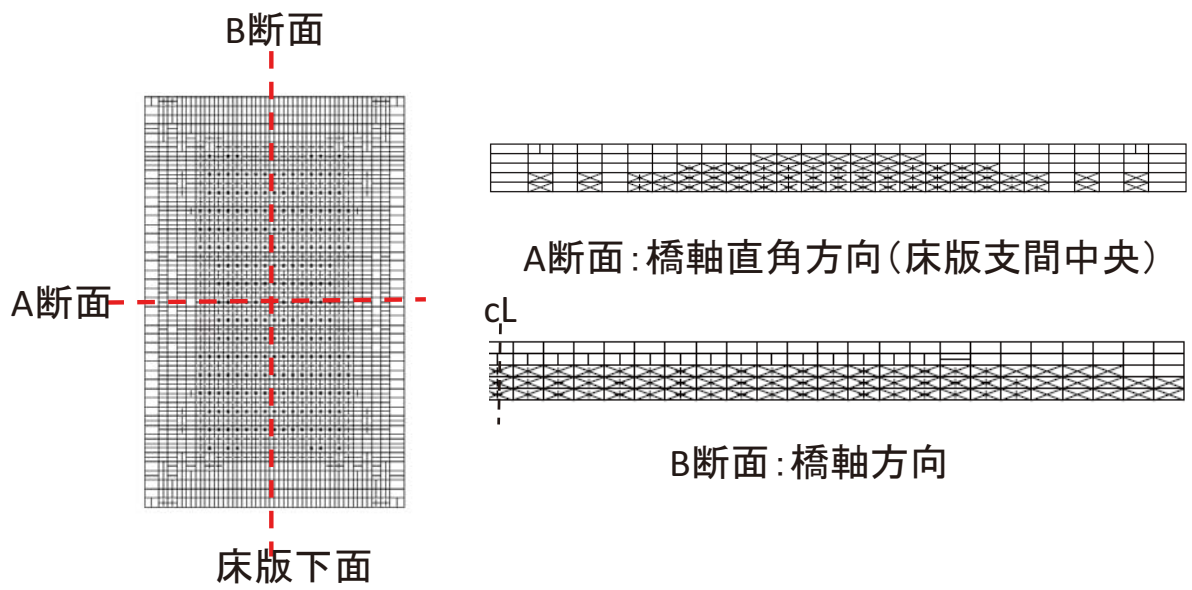


(b) Step1256 換算回数 4,882 回

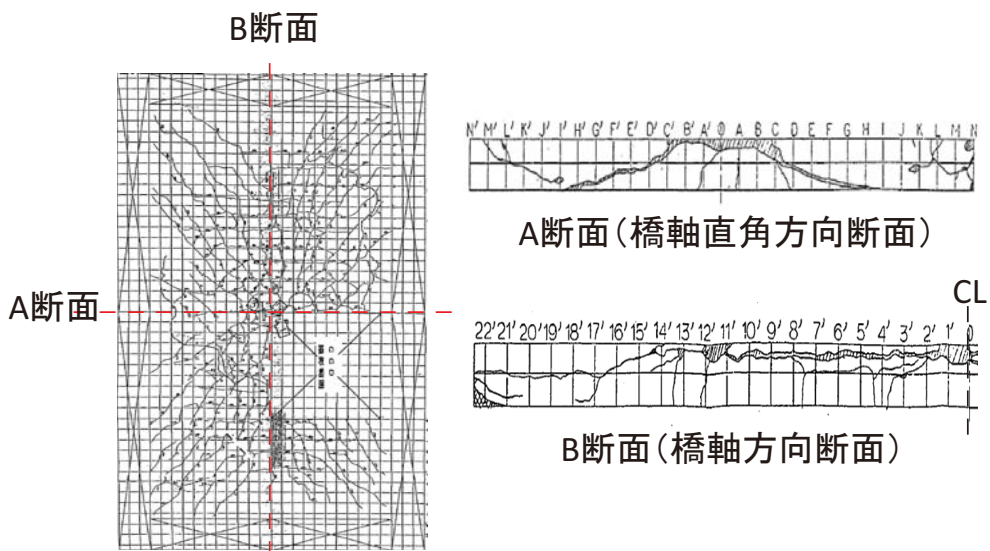


(c) Step1592 換算回数 256,244 回

図-2.1.9 供試体 No.2(S39-4)剛性低下要素の増加傾向



(a) 解析結果 (Step1592 換算回数 109 回)

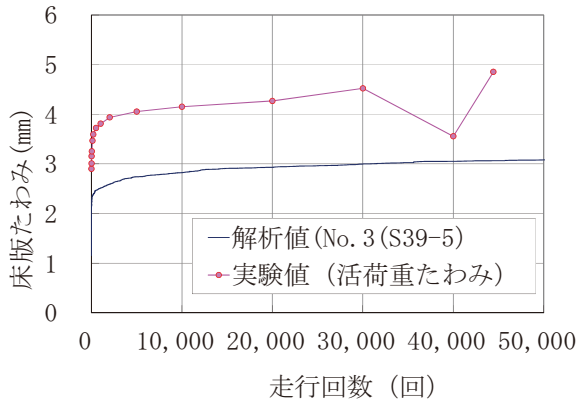


(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

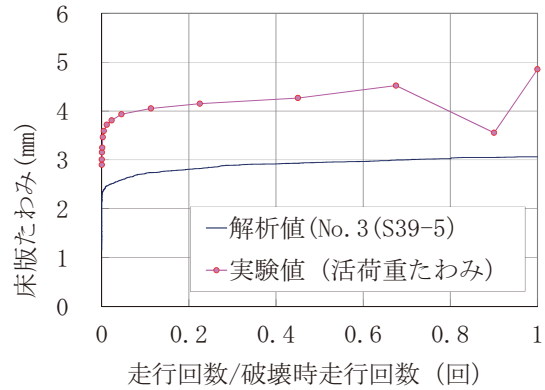
図-2. 1. 10 供試体 No. 2 (S39-4) 剛性低下要素とひび割れ性状との関係

③供試体 No. 3 (S39-5)

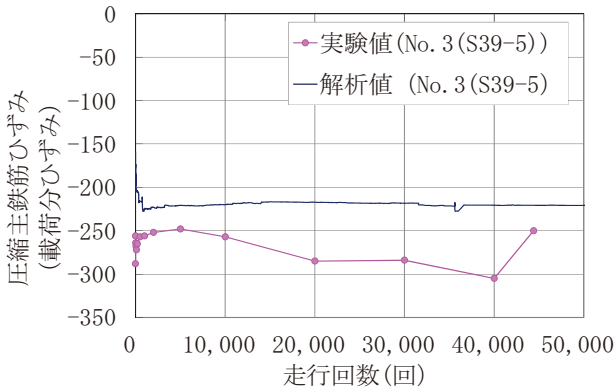
床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.11 及び図-2.1.12 に示す。図-2.1.11 (b) の横軸は、走行回数を輪荷重走行試験で破壊した走行回数で除した比で表している。これらの結果から、実験と解析の床版たわみ、鉄筋ひずみの増加傾向、ひび割れ性状と剛性低下範囲の関係は概ね一致しており、床版たわみの絶対値は初期値から合わないものの、損傷の進展に伴う耐荷力機構の変化はある程度再現できている可能性がある。



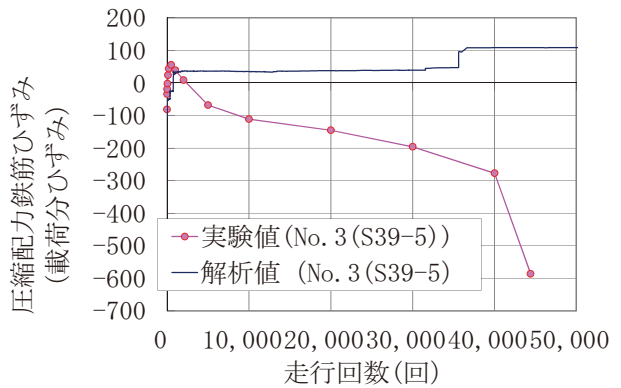
(a) 荷重回数とたわみの関係



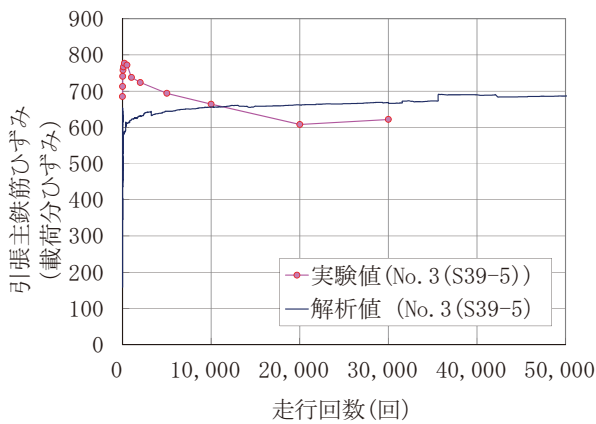
(b) 破壊時走行回数比とたわみの関係



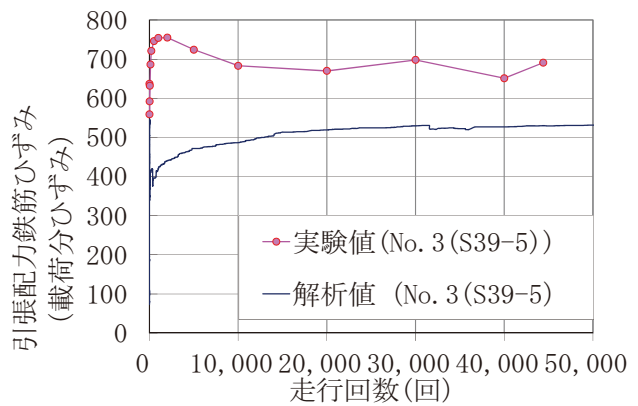
(c) 圧縮(上)側主鉄筋



(d) 圧縮(上)側配力筋



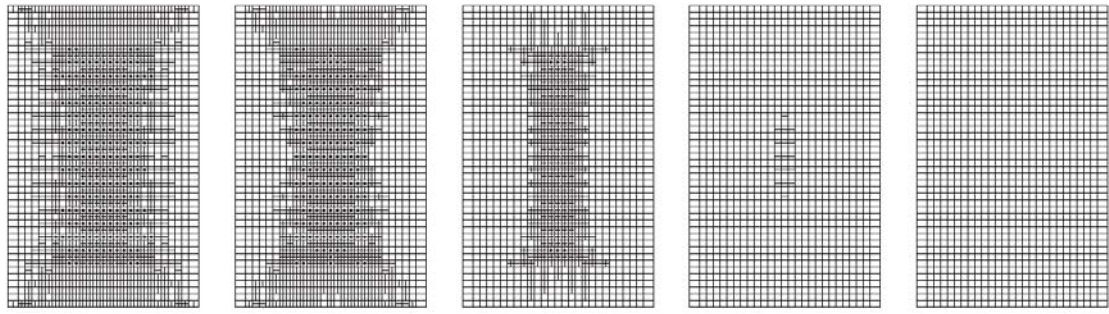
(e) 引張(下)側主鉄筋



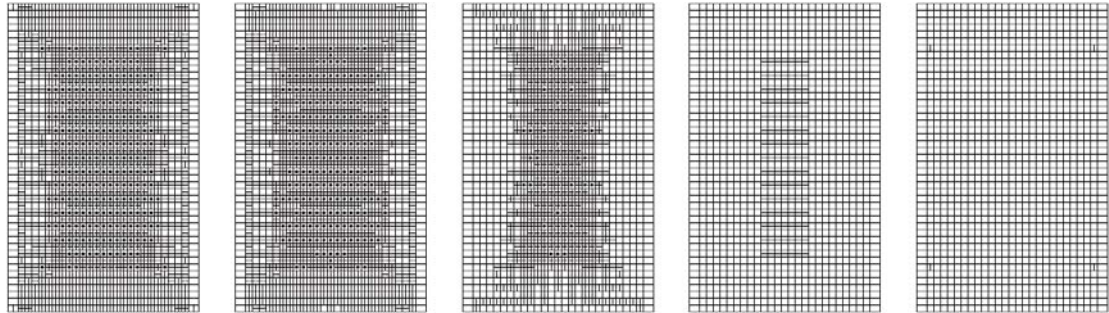
(f) 引張(下)側配力筋

図-2.1.11 供試体 No. 3 (S39-5) 応答の推移 (支間中央)

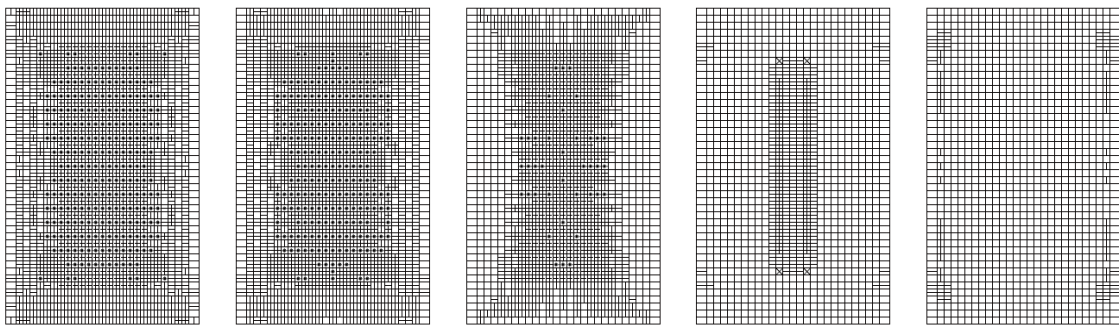




(a) Step898 換算回数 1,191 回



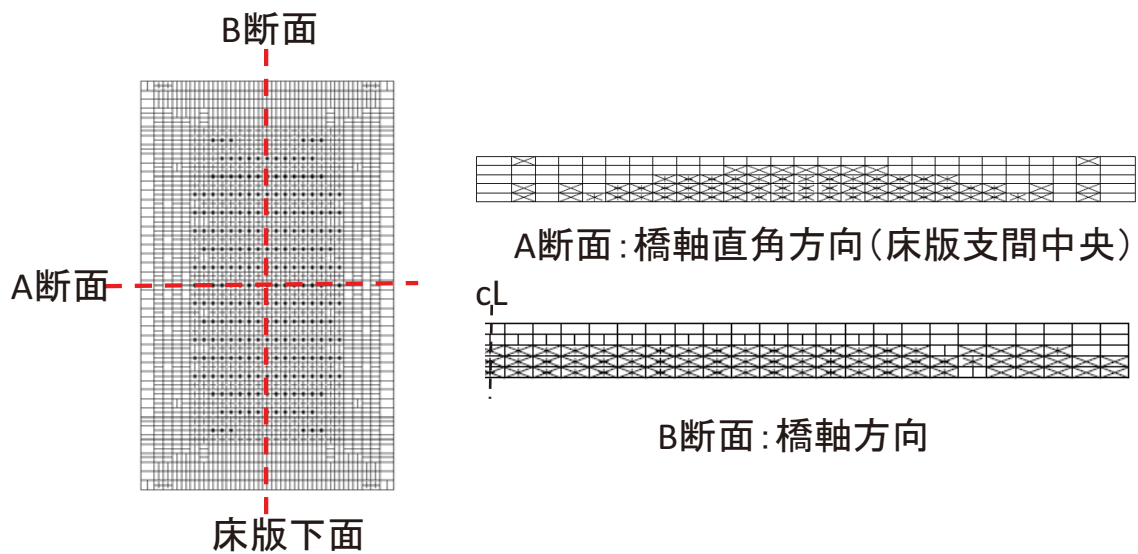
(b) Step1251 換算回数 27,148 回



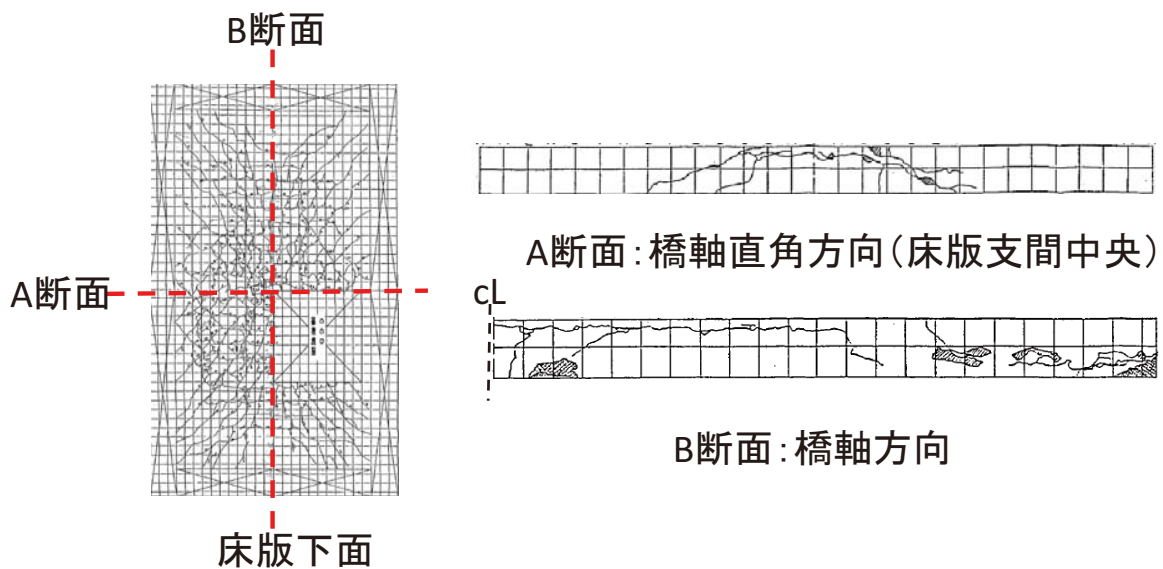
(c) Step1447 換算回数 134,467 回

図-2.1.12 供試体 No. 3(S39-5)剛性低下要素の増加傾向





(a) 解析結果 (換算回数 482 回)



(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

図-2.1.13 供試体 No. 3(S39-5)剛性低下要素とひび割れ性状との関係

④供試体 No. 4 (S47)

床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.14 から図-2.1.16 に示す。図-2.1.14 (b) の横軸は、走行回数を輪荷重走行試験で破壊した走行回数で除した比で表している。これらの結果から、実験と解析の床版たわみ、鉄筋ひずみの増加傾向、ひび割れ性状と剛性低下範囲の関係は概ね一致しており、床版たわみの絶対値は初期値から合わないものの、損傷の進展に伴う耐荷力機構の変化はある程度再現できている可能性がある。

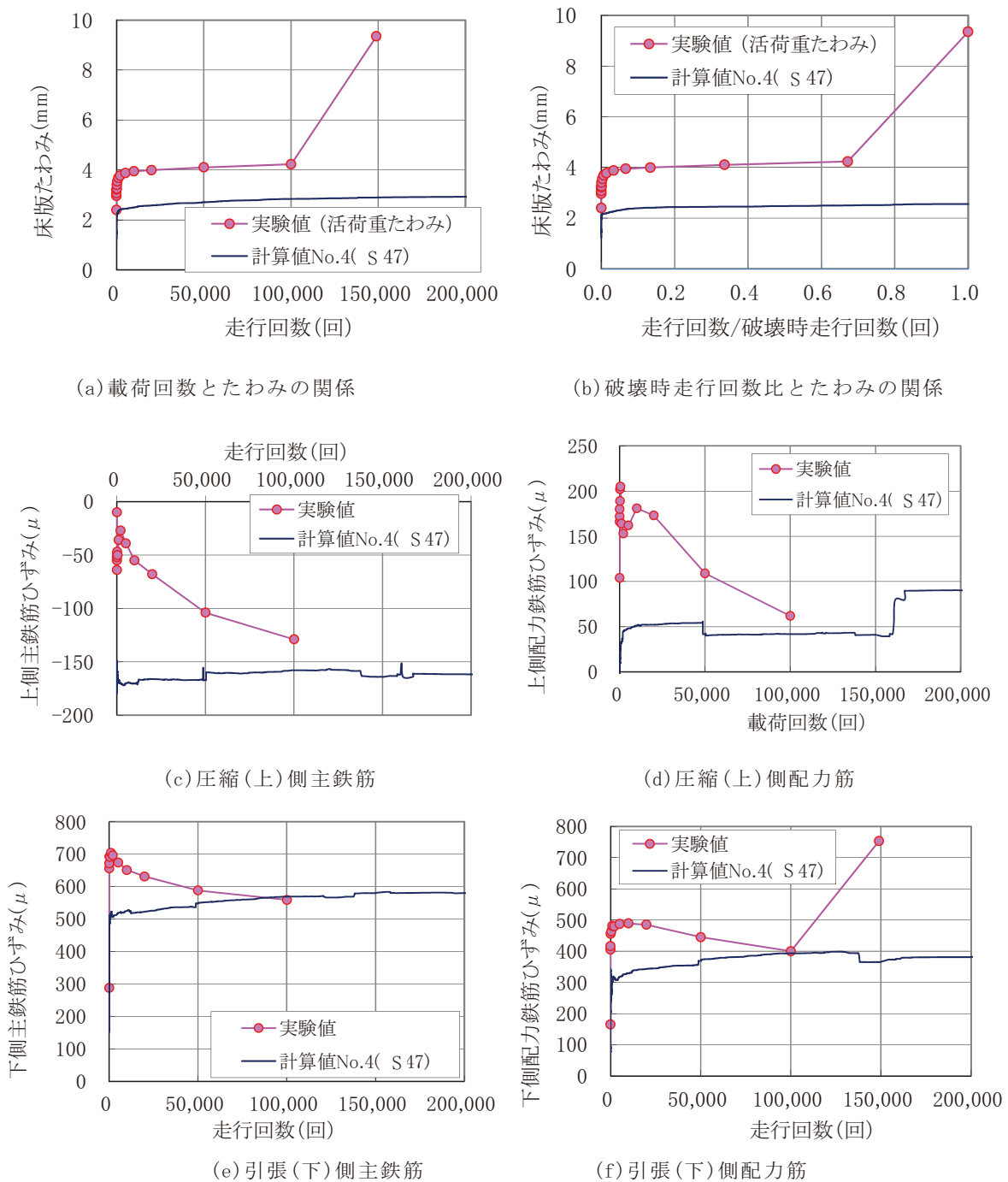
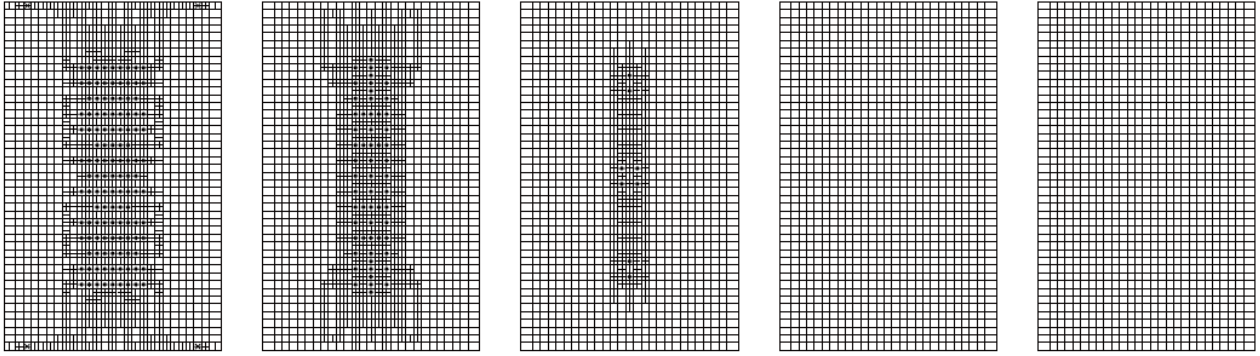
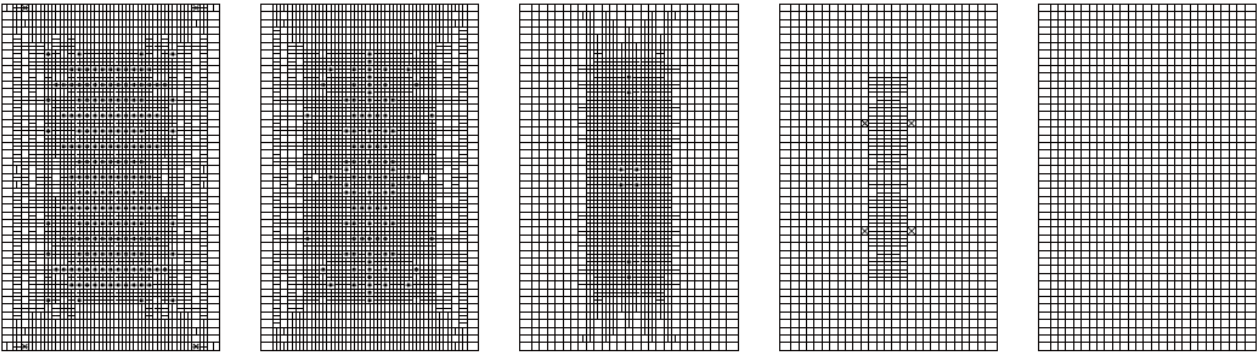


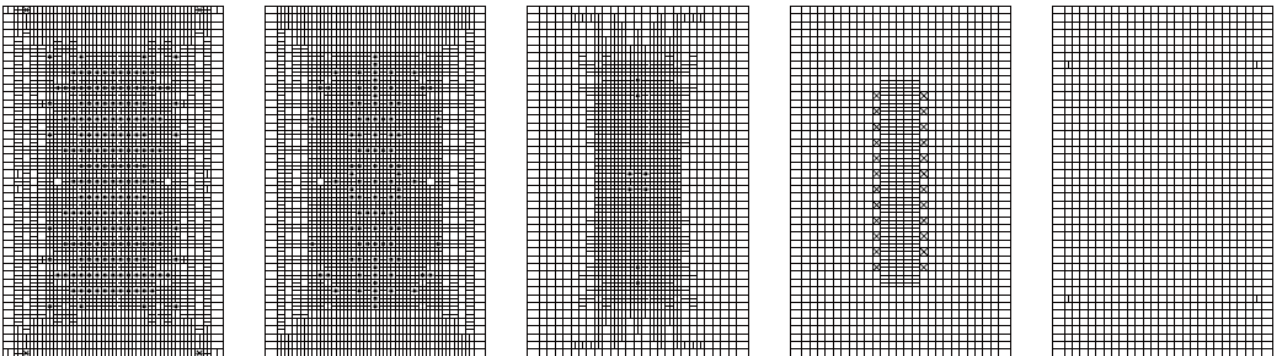
図-2.1.14 供試体 No. 4 (S47 (P=210kN)) 応答の推移 (支間中央)



(a) Step522 換算回数 28回

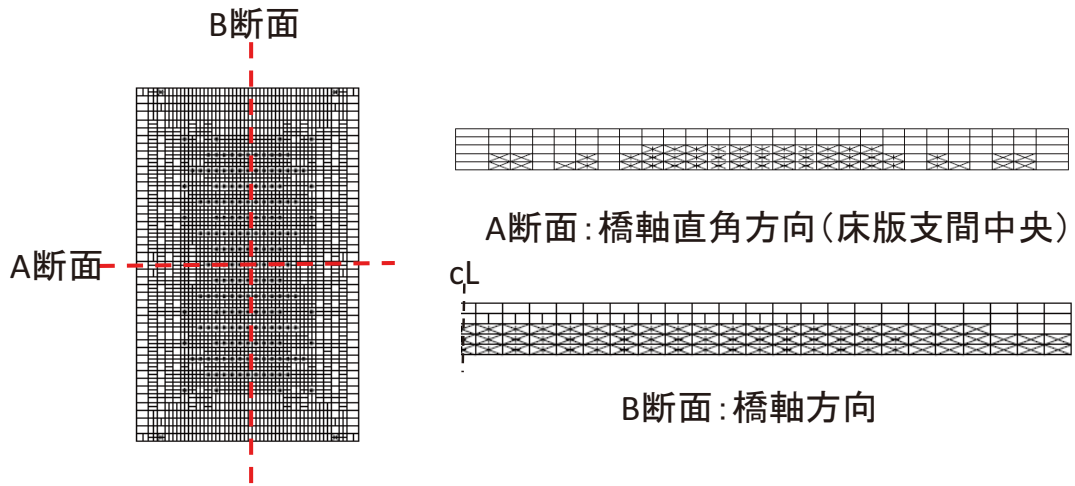


(b) Step1,224 換算回数 196,475回

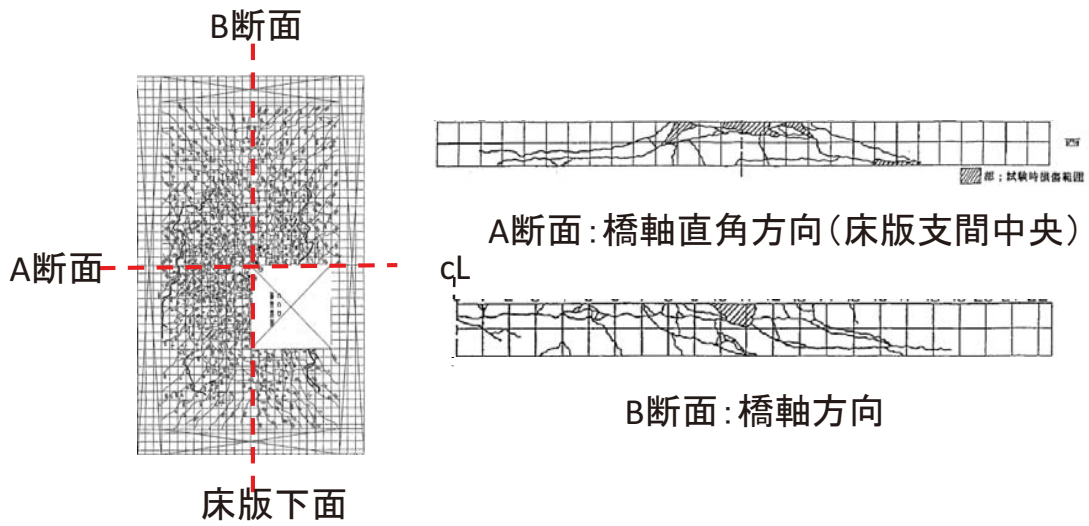


(c) Step1,189 換算回数 148,000回

図-2.1.15 供試体 No. 4(S47(P=210kN))剛性低下要素の増加傾向



(a) 解析結果 (換算回数 482 回)

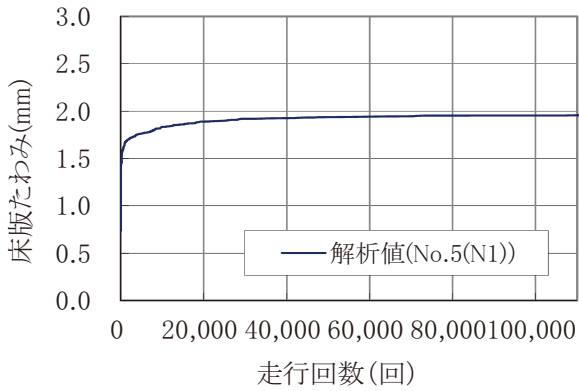


(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

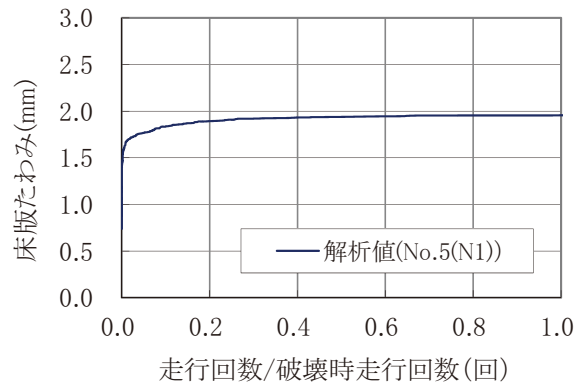
図-2.1.16 供試体 No. 4 (S47 (P=210kN)) 剛性低下要素とひび割れ性状との関係

⑤ 供試体 No. 5 (N1(S47))

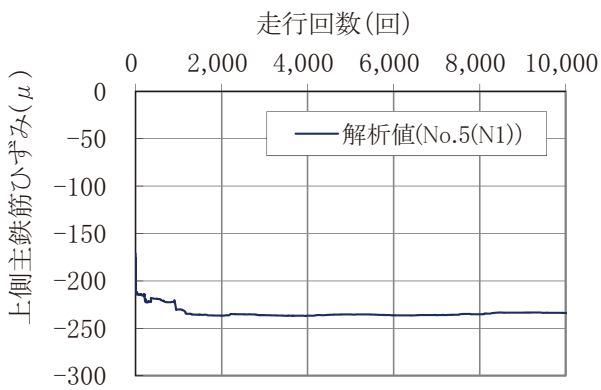
供試体 No.5 の床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.17 及び図-2.1.18 に示す。実験における床版たわみ及び鉄筋ひずみとの比較はしていないが、床版たわみ及び鉄筋ひずみの増加及び剛性低下範囲が少しずつ増加していく傾向は再現できているといえる。



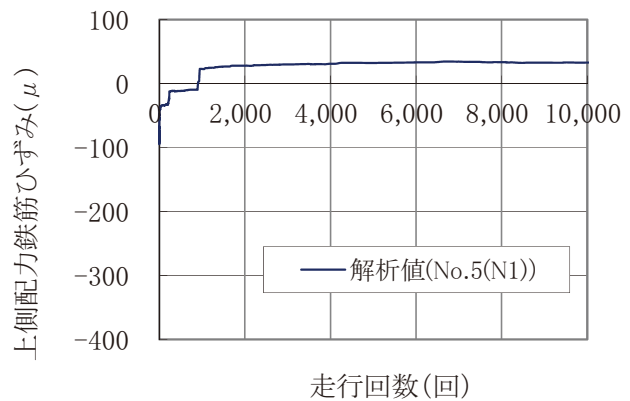
(a) 荷重回数とたわみの関係



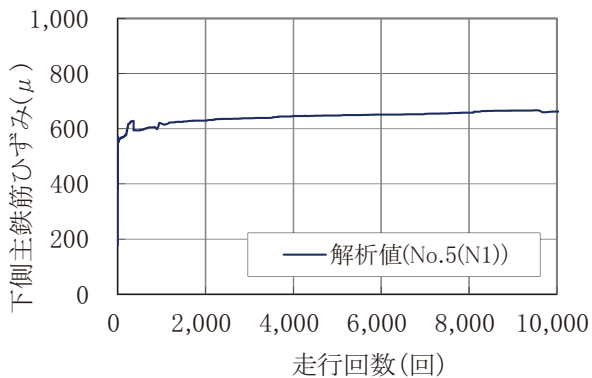
(b) 破壊時走行回数比とたわみの関係



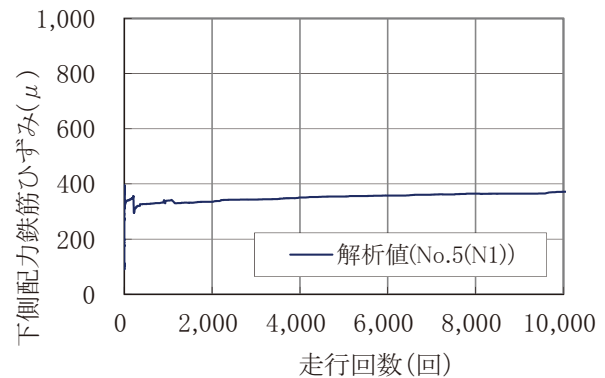
(b) 圧縮(上)側主鉄筋



(c) 圧縮(上)側配力筋

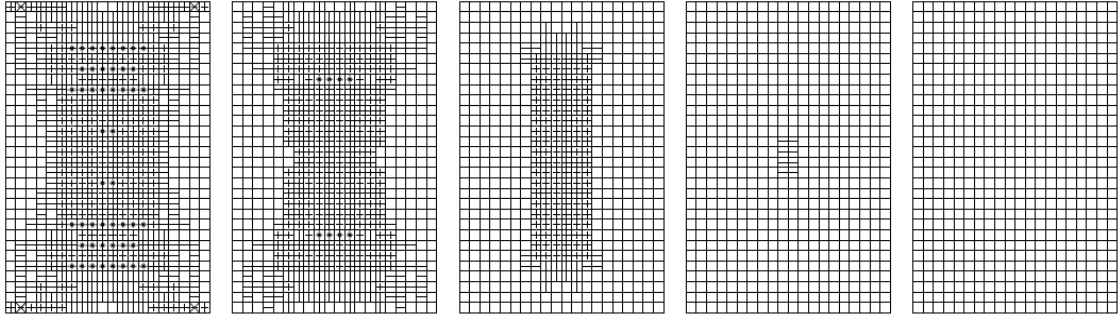


(d) 引張(下)側主鉄筋

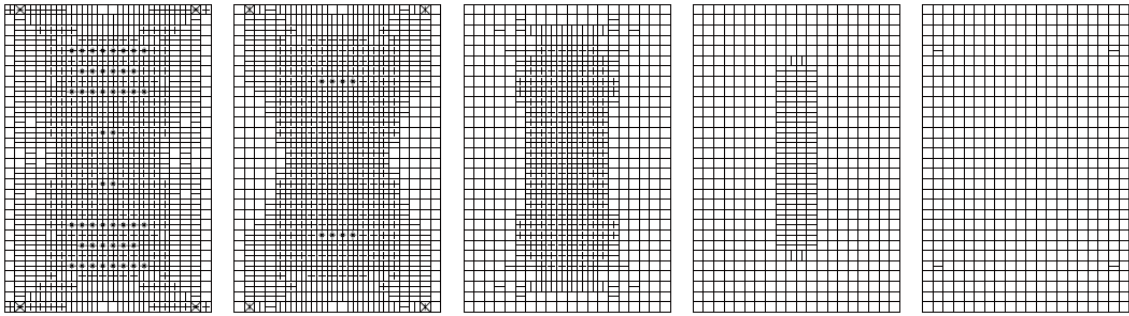


(e) 引張(下)側配力筋

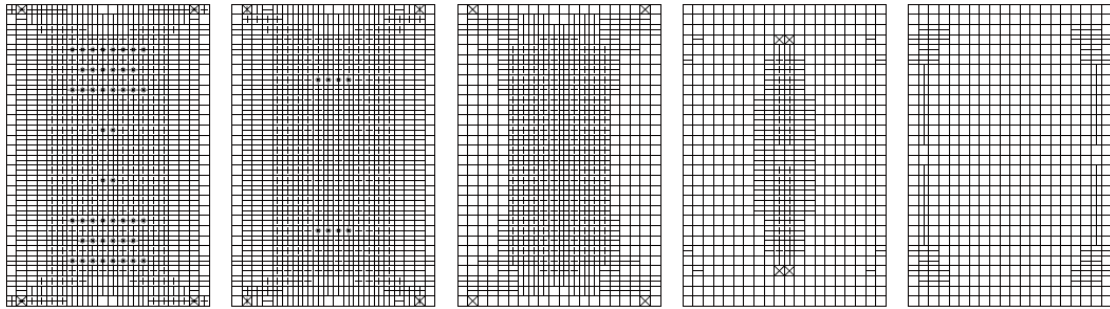
図-2.1.17 供試体 No. 5 (N1(S47)) (P=210kN) 応答の推移 (支間中央)



(a) Step411 換算回数 907 回



(b) Step536 換算回数 12,360 回



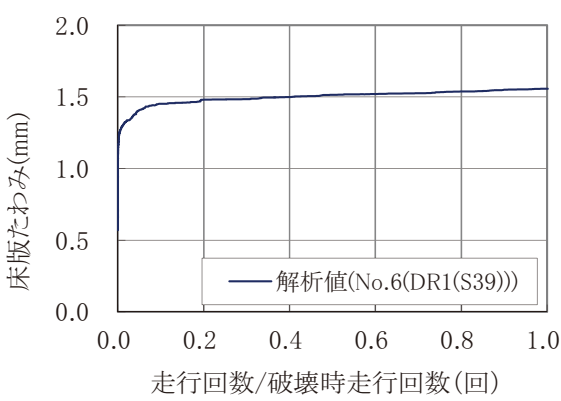
(c) Step656 換算回数 246,806 回

図-2.1.18 供試体 No. 5 (N1 (S47)) (P=210kN) 剛性低下要素の増加傾向

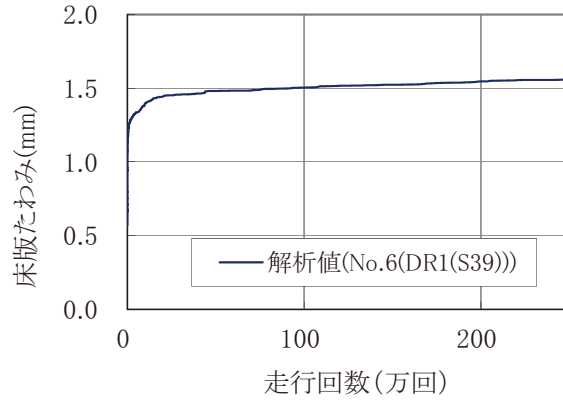


⑥ 供試体 No. 6 (DR1 (S39)) (P=142kN)

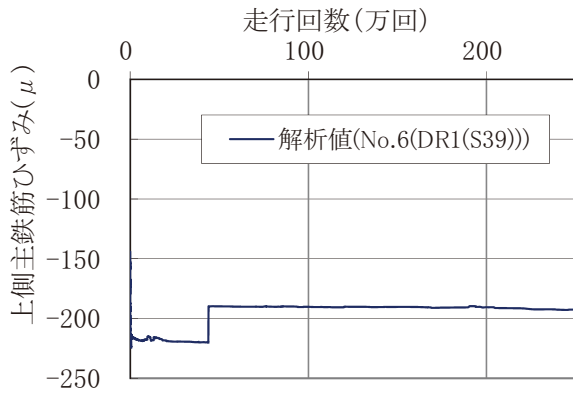
供試体 No.6 の床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.19 及び図-2.1.20 に示す。実験における床版たわみ及び鉄筋ひずみとの比較はしていないが、床版たわみ及び鉄筋ひずみの増加及び剛性低下範囲が少しずつ増加していく傾向が表現されている。



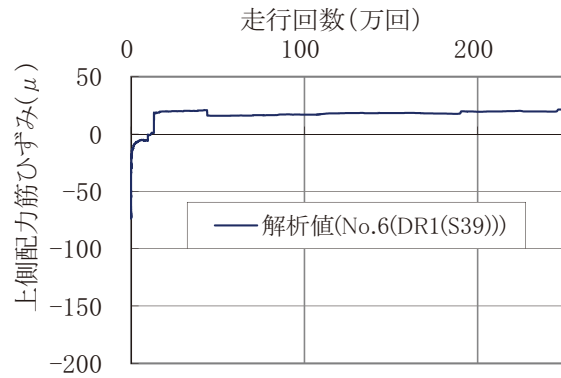
(a) 荷重回数とたわみの関係



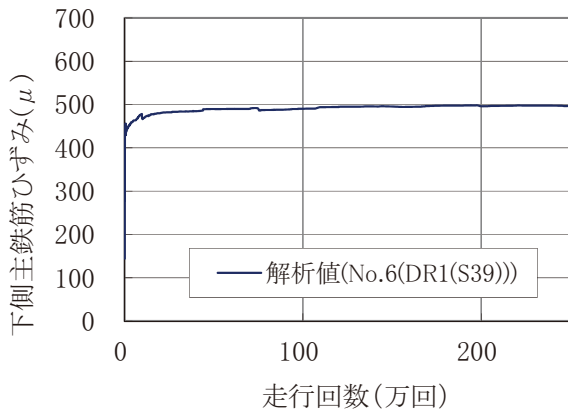
(b) 破壊時走行回数比とたわみの関係



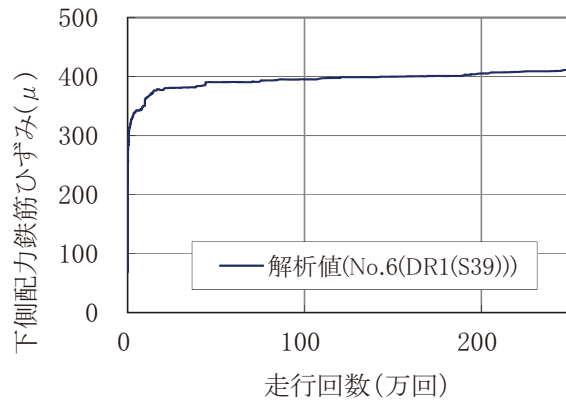
(b) 圧縮(上)側主鉄筋



(c) 圧縮(上)側配力筋

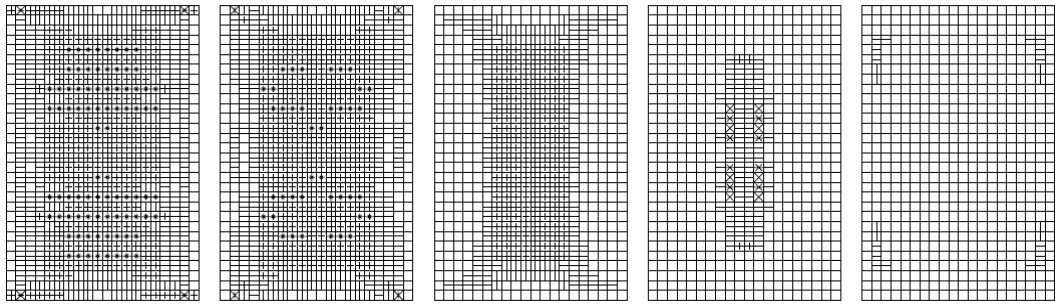


(d) 引張(下)側主鉄筋

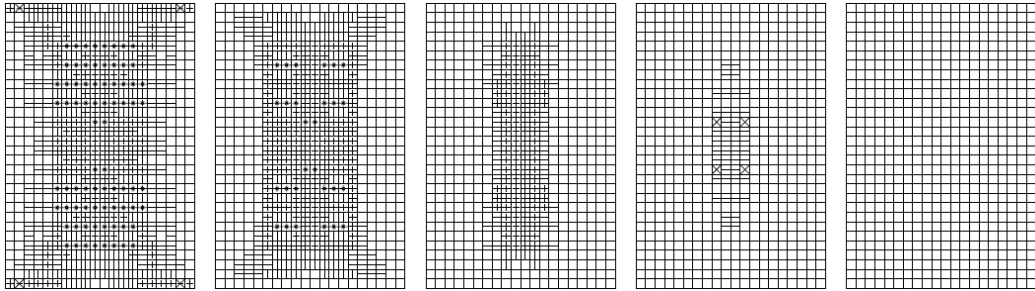


(e) 引張(下)側配力筋

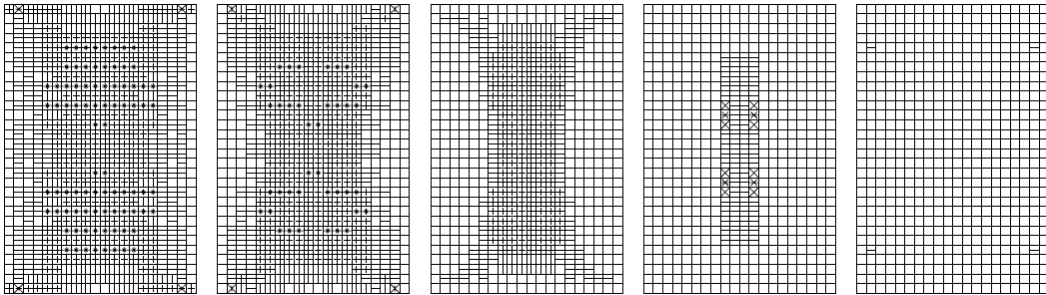
図-2.1.19 供試体 No. 6 (DR1 (S39)) (P=142kN) 応答の推移 (支間中央)



(a) Step593 換算回数  $1.17 \times 10^5$  回



(b) Step548 換算回数 63,527 回

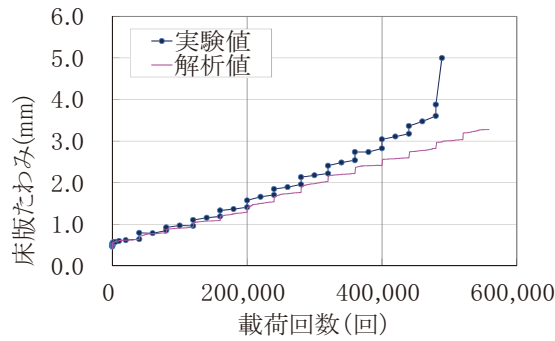


(c) Step389 換算回数 4,112 回

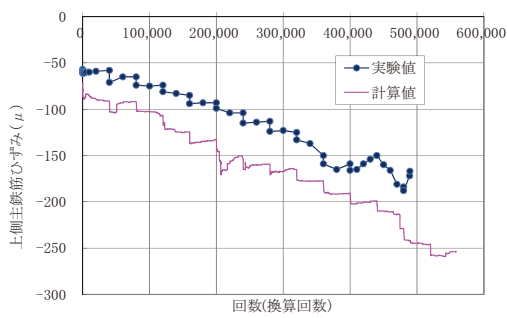
図-2.1.20 供試体 No. 6 (DR1 (S39)) (P=142kN) 剛性低下要素の増加傾向

⑦供試体 No. 7(RC8n1) (階段载荷)

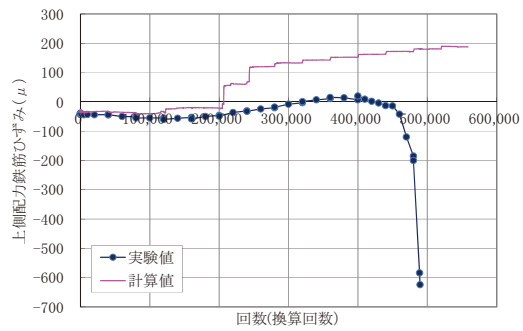
床版たわみ、鉄筋ひずみ、剛性低下範囲を図-2.1.21~図-2.1.23に示す。床版たわみ、鉄筋ひずみの増加、剛性低下範囲の増加傾向について概ね一致している。また、図-2.1.28 及び図-2.1.29 に示すたわみの初期値についてもほぼ一致している。しかしながら 20,000 回を超えた辺りから少しずつ床版たわみが実験結果と解析結果が乖離していく傾向が見られた。



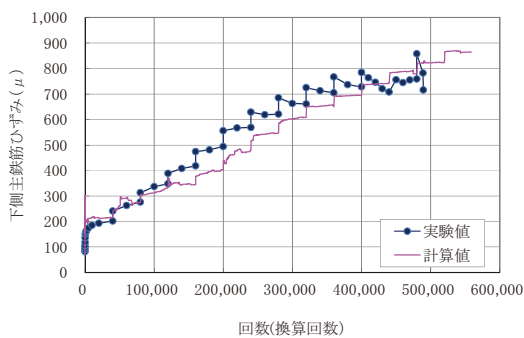
(a) 载荷回数とたわみの関係



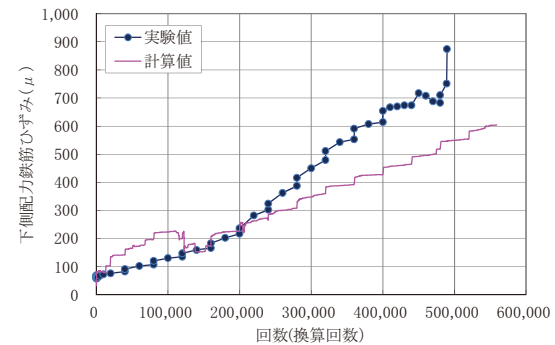
(b) 圧縮(上)側主鉄筋



(c) 圧縮(上)側配力筋

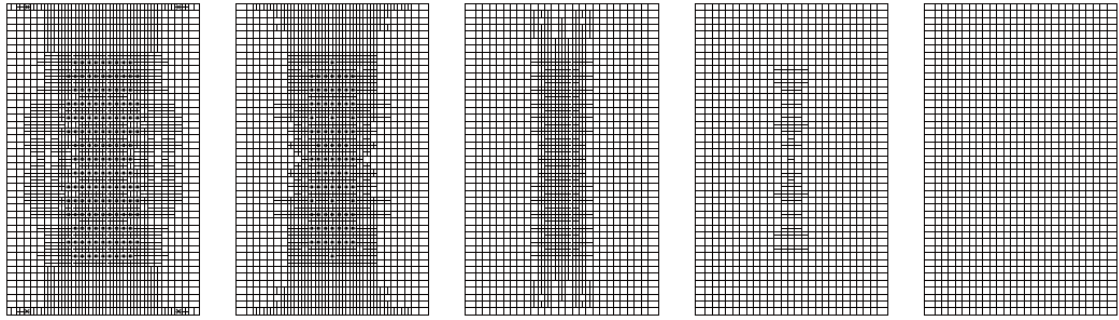


(d) 引張(下)側主鉄筋

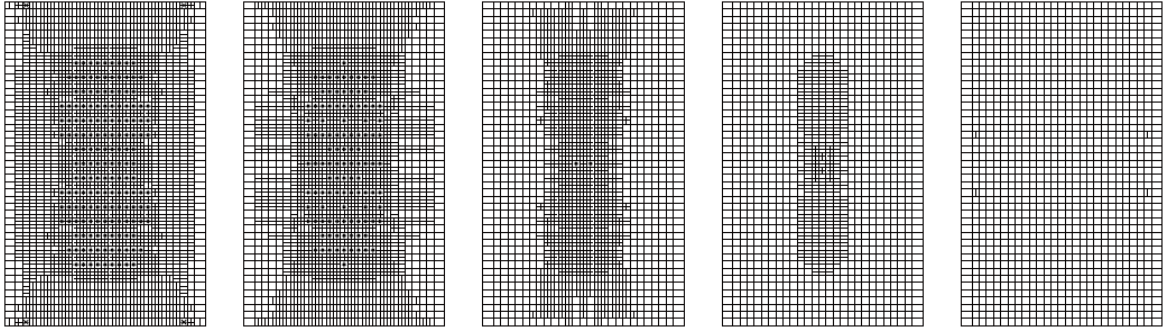


(e) 引張(下)側配力筋

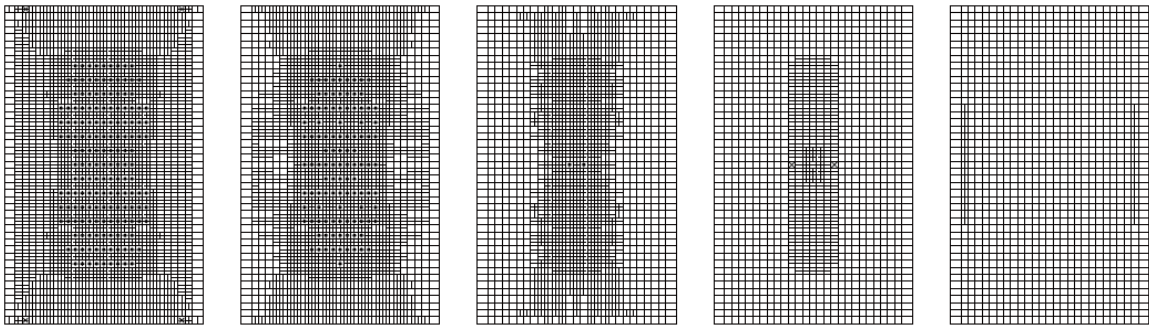
図-2.1.21 供試体 No. 7(RC8n1) (階段载荷) 応答の推移 (支間中央)



(a) Step837 換算回数  $7.04 \times 10^6$  回

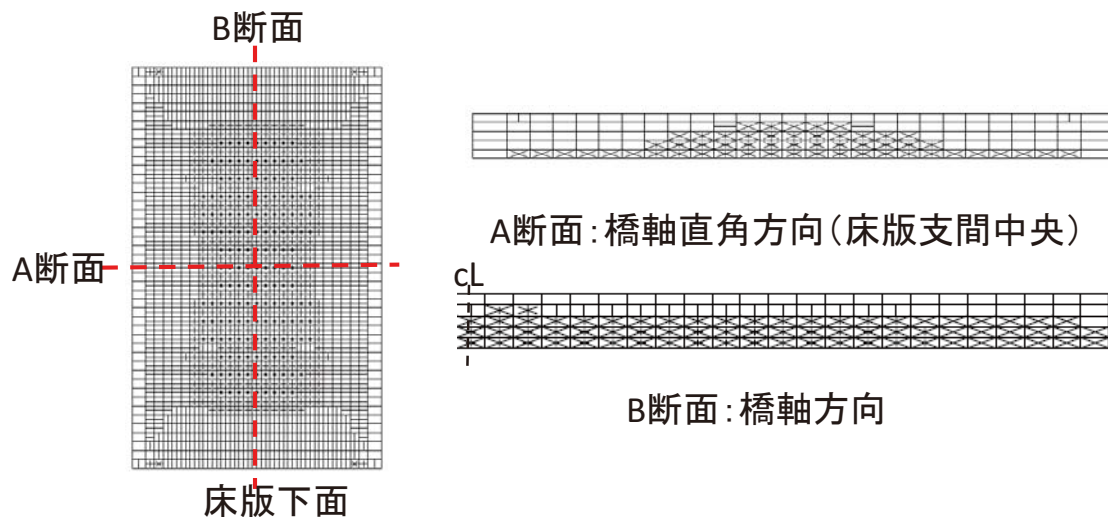


(b) Step1,140 換算回数  $1.67 \times 10^7$  回

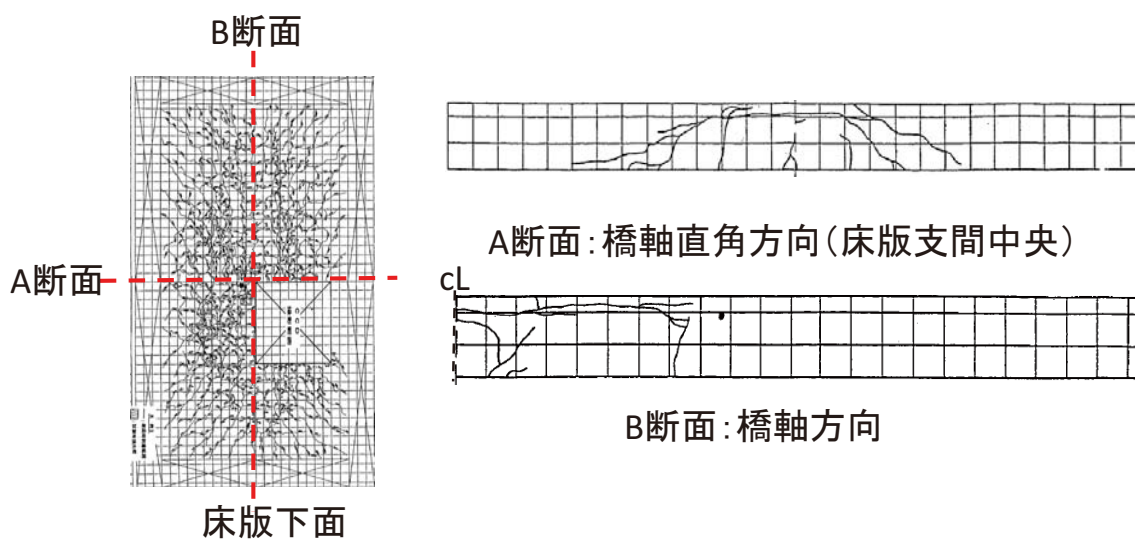


(c) Step1,193 換算回数  $1.87 \times 10^7$  回

図-2.1.22 供試体 No. 7 (RC8n1) (階段載荷)剛性低下要素の増加傾向



(a) 解析結果 (換算回数  $1.87 \times 10^7$  回)



(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

図-2.1.23 供試体 No. 7 (RC8n1) 剛性低下要素とひび割れ性状との関係

(4) まとめ

- ・ 輪荷重走行試験で生じる床版たわみの増加傾向は、提案する解析手法によってもある程度類似して表現されることがわかった。

一定荷重で輪荷重走行試験を実施した供試体 No.1~No.6 について解析したたわみの推移を図-2.1.24 に、階段荷重を実施した供試体 No.7 について解析したたわみの推移を図-2.1.25 に示す。横軸は、走行回数を輪荷重走行試験で破壊した走行回数で除した比で表している。床版中央における鉛直たわみの推移は、輪荷重走行試験の結果と同様に、荷重直後に床版たわみが急激に増加し、その後緩やかな増加傾向を続け傾向を示した。実験と解析の供試体ごとの床版たわみの大小関係も同じであることから、解析結果が概ね妥当な評価を行っているものと考えられる。また、図-2.1.26 及び図-2.1.27 に供試体 No.2(S39-4)を例に床版のたわみ分布を、図-2.1.28 及び図-2.1.29 に供試体 No.7 の床版のたわみ分布を示す。解析値は実験値と同様にすべての供試体において橋軸直角方向分布、橋軸方向分布とも曲線の形状を保ちながら増加していく傾向となった。

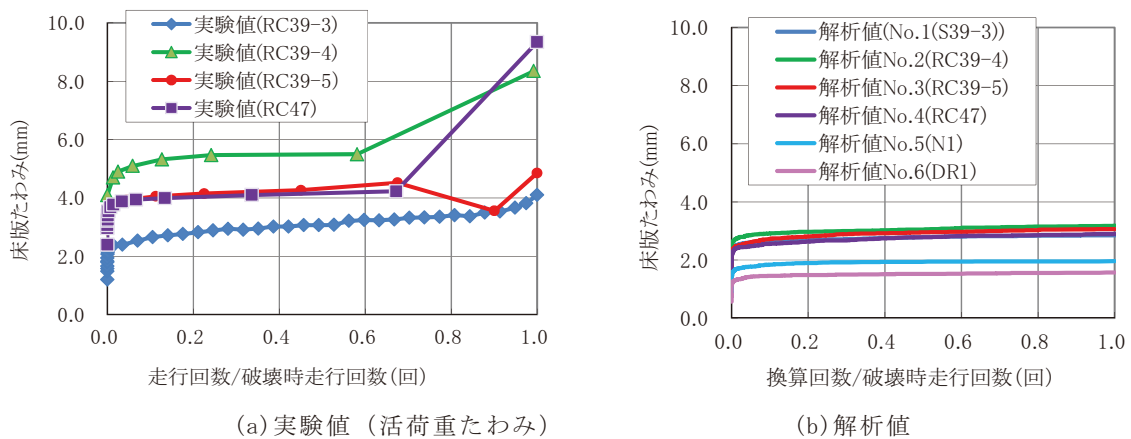


図-2.1.24 破壊時走行回数比と床版中央橋軸直角方向のたわみの関係 (一定荷重)

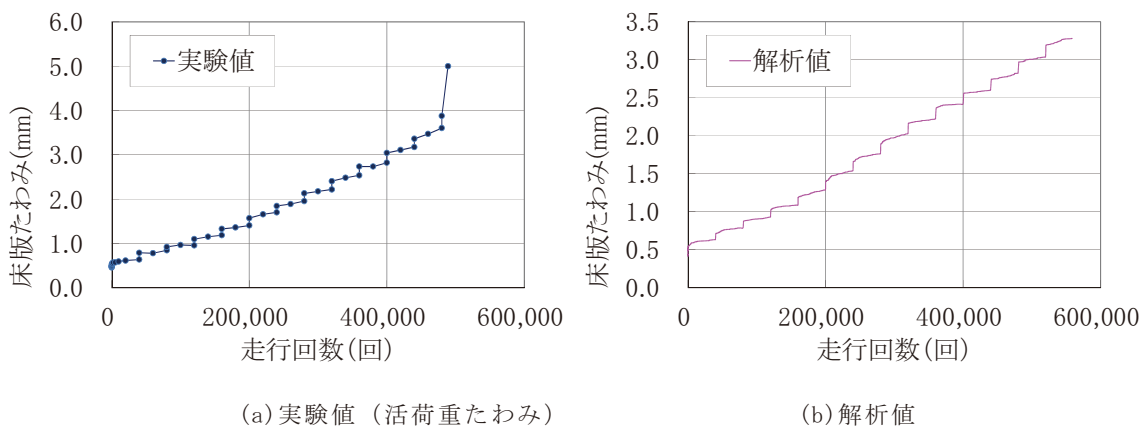
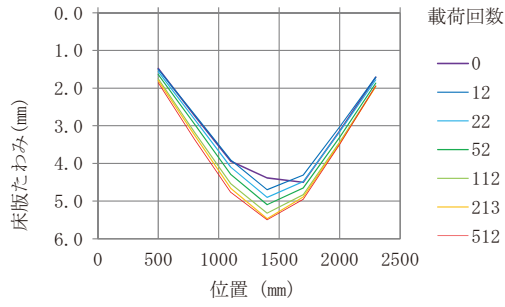
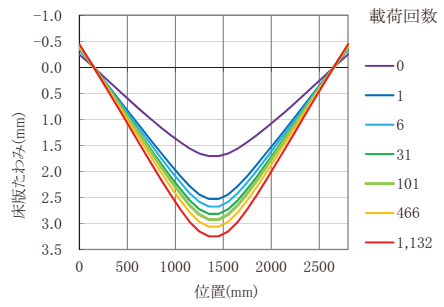


図-2.1.25 荷重回数と床版中央たわみの関係 (供試体 No.7 (RC8n1)) (階段荷重)



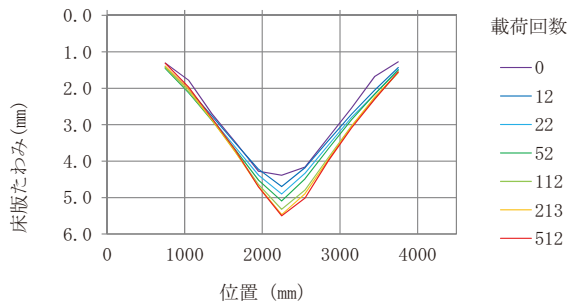


(a) 実験値 (活荷重たわみ)

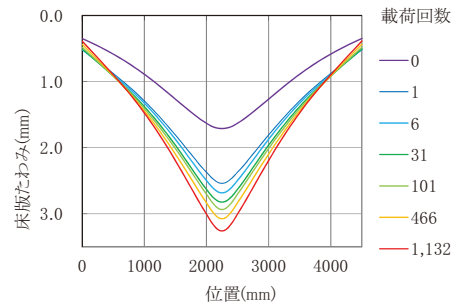


(b) 解析値

図-2.1.26 床版橋軸直角方向のたわみ分布 (供試体 No. 2 (S39-4))

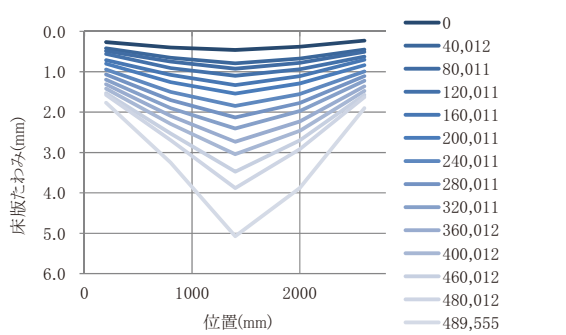


(a) 実験値 (活荷重たわみ)

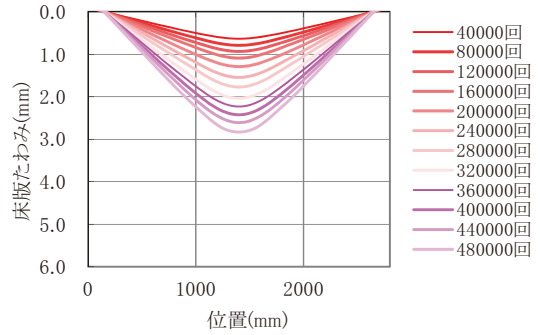


(b) 解析値

図-2.1.27 床版橋軸方向のたわみ分布 (供試体 No. 2 (S39-4))

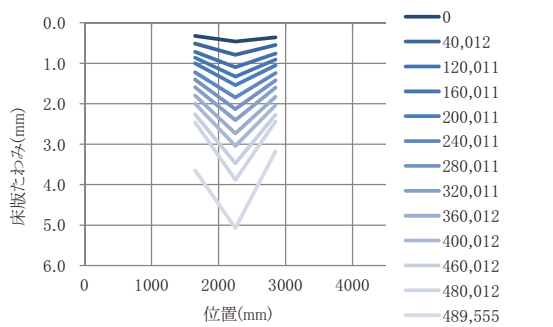


(a) 実験値 (活荷重たわみ)

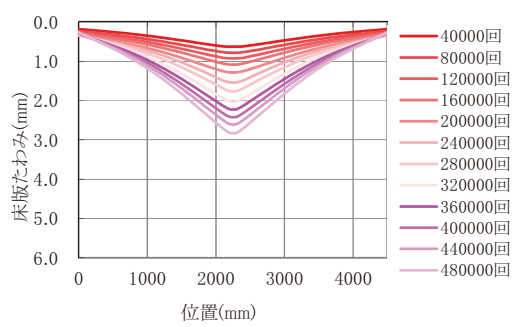


(b) 解析値

図-2.1.28 床版橋軸直角方向のたわみ分布 (供試体 No. 7 (RC8n-1))



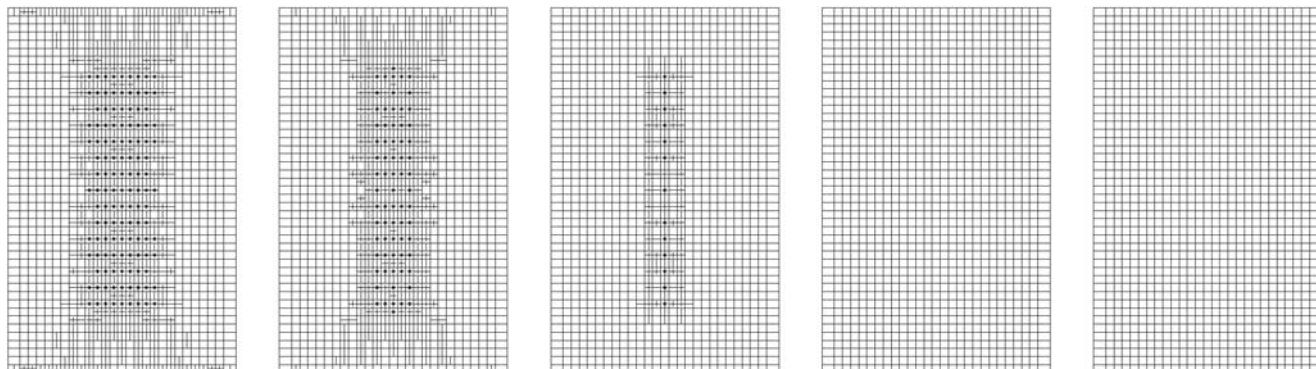
(a) 実験値 (活荷重たわみ)



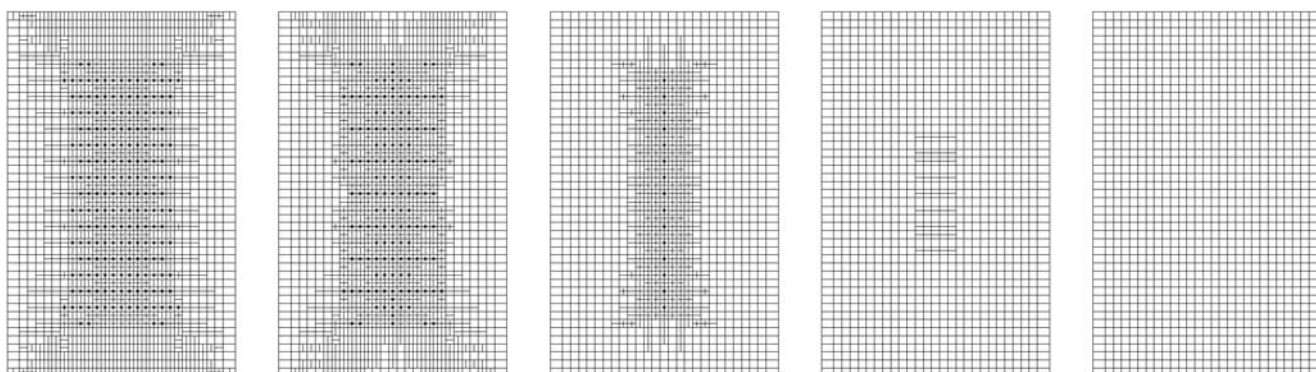
(b) 解析値

図-2.1.29 床版橋軸方向のたわみ分布 (供試体 No. 7 (RC8n-1))

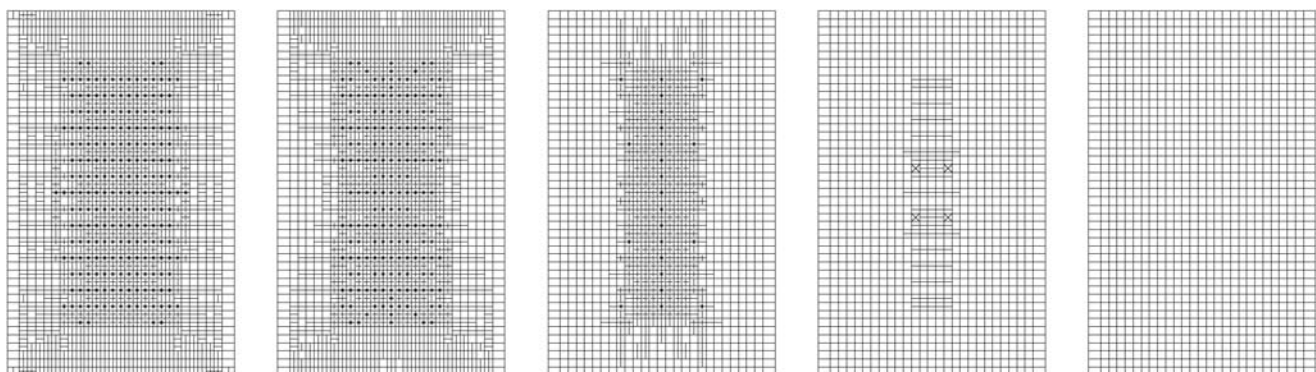
- 剛性低下要素の範囲は、走行回数が増えると徐々に広がる傾向が表されている。また、輪荷重走行試験におけるひび割れ性状との関係も概ね一致していることから、本解析によって実験結果を擬似的に表現できていると考えられる。



(a) Step500 換算回数 0.078 回

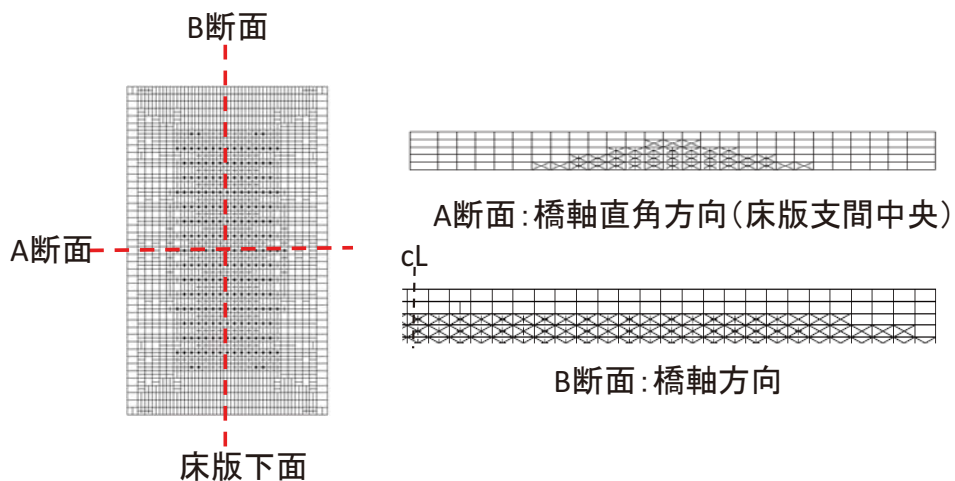


(b) Step900 換算回数 397 回

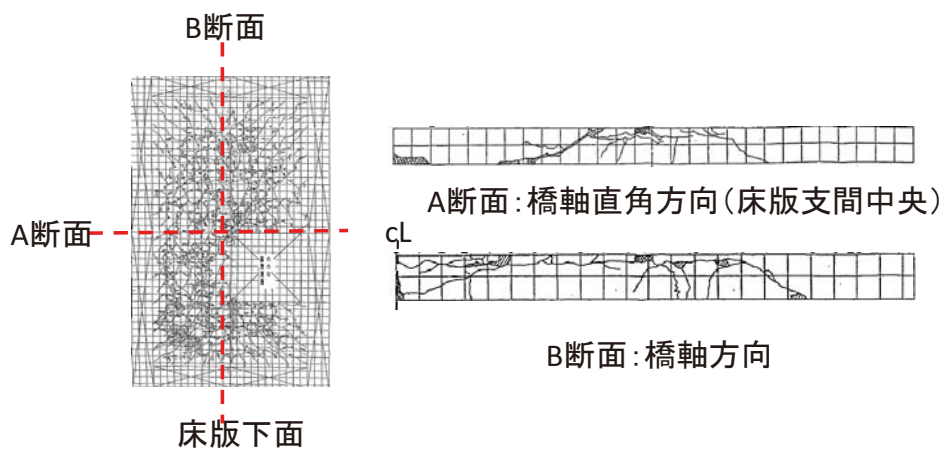


(c) Step1,100 換算回数 2,422 回

図-2.1.30 供試体 No.1(S39-3)剛性低下要素の増加傾向



(a) 解析結果 (換算回数 2,420 回 Step1,000)



(b) 輪荷重走行試験破壊時のひび割れ性状

図-2.1.31 剛性低下要素とひび割れ性状との関係 (供試体 No. 1(S39-3)の例)

・床版たわみ及び鉄筋ひずみの絶対値の違いについて

本解析手法を用いることで、RC床版の輪荷重走行試験の結果について、たわみの増加、ひび割れの発生・進展による床版剛性の低下範囲の拡大、鉄筋応力の変化といった損傷過程における床版の特性の変化を模擬的に再現できる可能性が示された。しかしながら、図-2.1.32に示すように、供試体 No.1,7 においては繰返载荷途中から、供試体 No.2~4 については初期の段階から、床版たわみ及び鉄筋ひずみの絶対値が乖離していく傾向であった。

これは、寸法形状が同じで荷重が異なる供試体 No.1~3 を比較しても荷重が大きい順 (No.2,3 の順) に乖離が大きいことから、本解析において非線形状態を考慮していないこと、コンクリートと鉄筋の付着切れ等による鉄筋の抜け出し等は考慮できていないことが理由として考えられる。これにより、床版が持つ耐荷力に対して大きな荷重を载荷される場合による乖離が大きくなってしまうと考えられる。

例えば、ある範囲の床版に载荷される荷重と変位の関係を図-2.1.33 に示す。本解析においてはヤング係数及びせん断弾性係数を変化させることで損傷を模擬している。しかしながら実験床版においては、図-2.1.33 に示すような本モデルでは再現が困難な非線形性の強い挙動が生じている可能性がある。

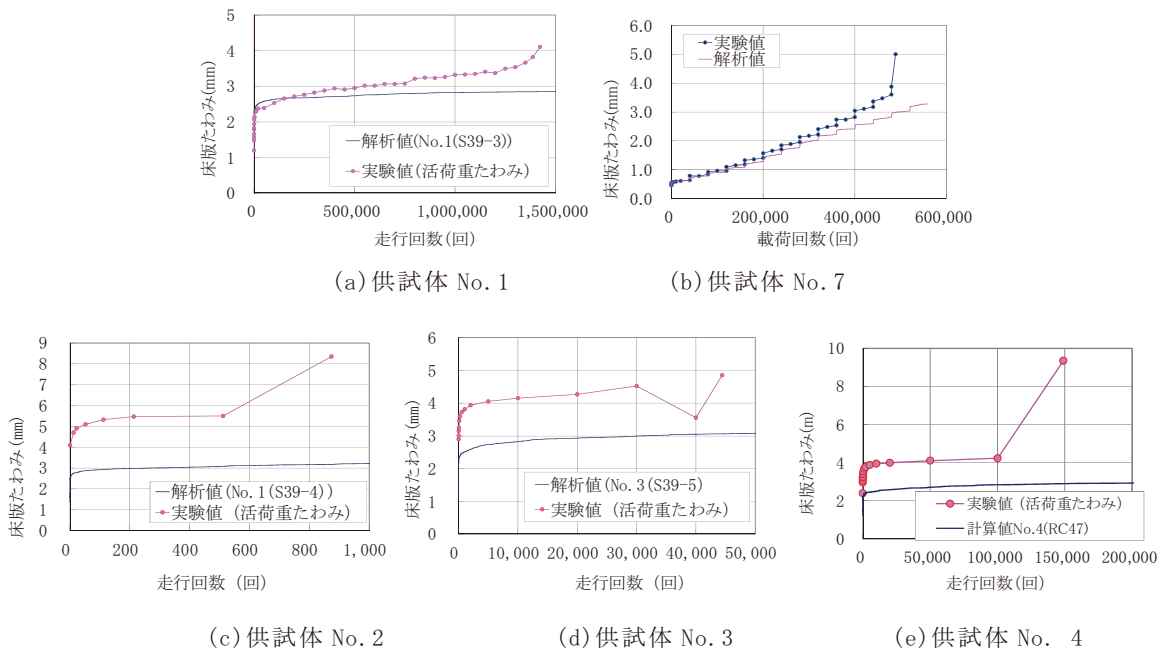


図-2.1.32 実験結果と解析結果の差 (床版たわみ)

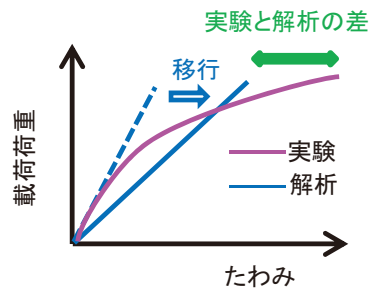


図-2.1.33 床版全体の剛性イメージ (実験と解析の比較)

## 2.2 疲労耐久性評価手法による解析結果の評価方法

### (1) 耐久性評価のための限界点の設定

本解析手法を用いることで、床版たわみや鉄筋ひずみの増加、剛性低下領域の拡大といった各種応答が得られる。しかし、解析により得られた損傷の段階と、実際の橋梁の劣化状態との関係から、合成床版の開発・採用において耐久性を評価するための解析指標を設定するには、床版に要求される性能を考慮して適切に対応させる必要がある。

損傷事例や多くの研究結果<sup>例えば 2.6)</sup>による損傷過程等を参考に、道路橋床版の限界状態についてまとめると、表-2.2.1のように整理できる。

道路橋の設計においては、設計供用期間中に橋の機能上考えられる限界の状態に対して、構造毎に適切な工学的指標に置き換え、着目した橋の機能を決定付ける部材や部位の状態として評価することとなる。

道路橋鉄筋コンクリート床版において構造上の使用限界状態は、床版のひび割れが貫通しておらず版としての連続性を喪失していないとみなせる限界の状態と考えられる。そして通常的设计においては、それを活荷重による押抜きせん断耐力及び曲げ耐力算定式による指標により確認することになる。一方、所要の耐力性能が経年的な作用の影響によって損なわれていないとみなせる限界の状態を疲労限界状態とした場合、押抜きせん断破壊、曲げ破壊が生じていない状態と考えられることから、道路橋鉄筋コンクリート床版の活荷重による影響が支配的であるため、その使用限界と、疲労限界は結果的に近い状態であるともいえる。

表-2.2.1 道路橋鉄筋コンクリート床版の活荷重の疲労に対する限界状態の整理

	使用限界状態	疲労限界状態
機能上	想定する荷重に対して所要の耐力余裕を有しており、安全な通行機能が確保されているとみなせる限界の状態。	経時的な作用（ここでは、想定する自動車荷重）の影響に対して所要の耐力があることとみなせる限界の状態。
構造上	・床版が版としての連続性を喪失していない状態。 ( <span style="color: blue;">≡</span> ひび割れが貫通していない状態)	・押抜きせん断破壊、曲げ破壊が生じていない状態。
工学的指標	・活荷重たわみが引張側コンクリートを無視したときの理論たわみに達していないこと。 ・活荷重による押抜きせん断耐力、曲げ（引張鉄筋）耐力算定式。	・活荷重による押抜きせん断耐力、曲げ（引張鉄筋）耐力算定式。



図-2.2.1に本研究における疲労限界状態の考え方を示す。本研究では、活荷重の繰返載荷により損傷が徐々に拡大することにより耐荷力が低下する床版において、所要の耐荷力があるとみなせる限界の状態を疲労限界状態と呼ぶ。このとき、所要の耐荷力があるとみなす判断基準としては、時間的に適当な確からしさで（ある程度の余裕をもって）これが満足されることとなるため、結果的に床版として必要な耐荷力の最低限までは至らない状態がほぼ担保されることを想定している。

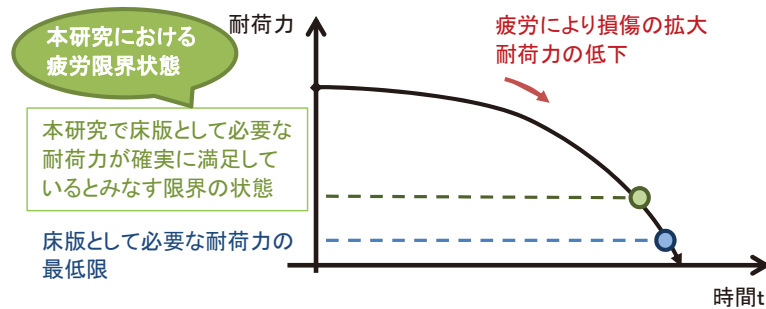


図-2.2.1 疲労限界状態の考え方

一方、床版の耐荷力性能の限界状態は、床版のタイプごとに異なると考えられる。鉄筋コンクリート床版においては、床版下面の橋軸直角方向、橋軸方向のひび割れが徐々に進行し、貫通ひび割れが形成され、陥没に至ると考えられている。しかしながら、底鋼板が設けられており内部にはコンクリートと一体で挙動する種々の鋼部材が設けられている合成床版においては、例えば、内部鋼材が設けられていることで床版コンクリートに生じる局部応力からひび割れが進行していくことも考えられる。

したがって、疲労耐久性を評価するためには、上記の疲労限界状態に対して共通の定義に基づき、種々の床版タイプに応じた耐荷力の低下程度を工学的指標にて判定する必要がある。

鉄筋コンクリート床版においては、図-2.2.1における必要な耐荷力が確実に満足しているとみなす限界の状態として、次の定義1から6に示すような工学的指標を定義した。これらは、本解析で得られる状態のうち、設計時に想定した破壊と同等と考えられる状態を想定している。

定義1：疲労解析の限界値は、①～④の条件を2つ以上の条件を満たしたものとする。

- ①厚さ方向に5層に分割した床版要素の上から3層(中間層)のY方向(橋軸方向面)剛性低下領域個数が層の要素数50%以上に達する。
- ②厚さ方向に5層に分割した床版要素の上から2層目のX方向(橋軸直角方向面)剛性低下領域個数が層の要素数20%以上に達する。
- ③厚さ方向に5層に分割した床版要素の上から2層目のZ方向(水平方向面)剛性低下領域個数が層の要素数2.5%以上に達する。
- ④厚さ方向に5層に分割した床版要素の最上層のX方向(橋軸直角方向面)剛性低下



領域個数が層の要素数 10%以上に達する。

定義 2：上側配力鉄筋が引張側に応力が転換(図-2.2.2(c) 矢印)した回数を疲労破壊の限界値とする。

定義 3：上側配力鉄筋のひずみに変状が生じた時(図-2.2.2(d) 丸印)の回数を疲労破壊の限界値とする。

定義 4：上側配力鉄筋の引張ひずみが、鉄筋長さに対してある範囲に達した点を限界値とする。

定義 5：最上層に剛性低下要素が生じた(図-2.2.2(f) 丸印)回数を限界値とする。

定義 6：厚さ方向に 5 層に分割した床版要素の上から 2 層目に Z 方向の剛性低下(水平方向にひび割れが発生)(図-2.2.2(g) 丸印)が生じた回数を限界値とする。

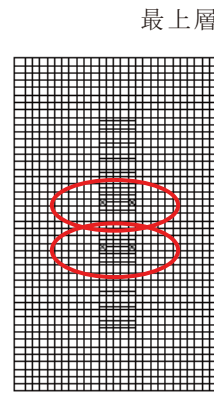
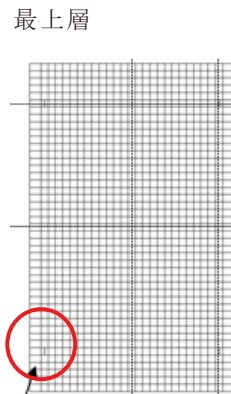
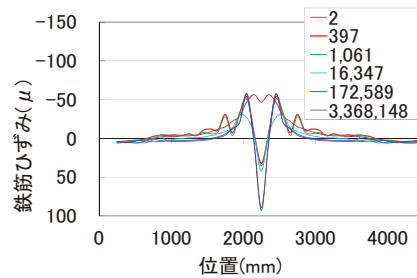
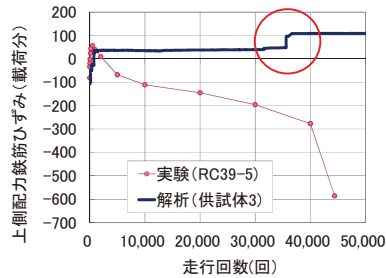
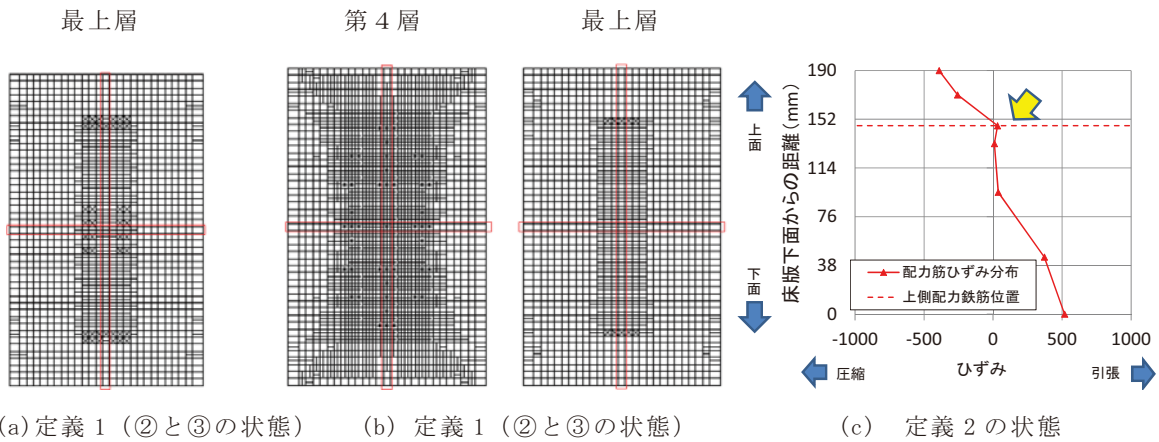


図-2.2.2 破壊の定義 1~6 の例

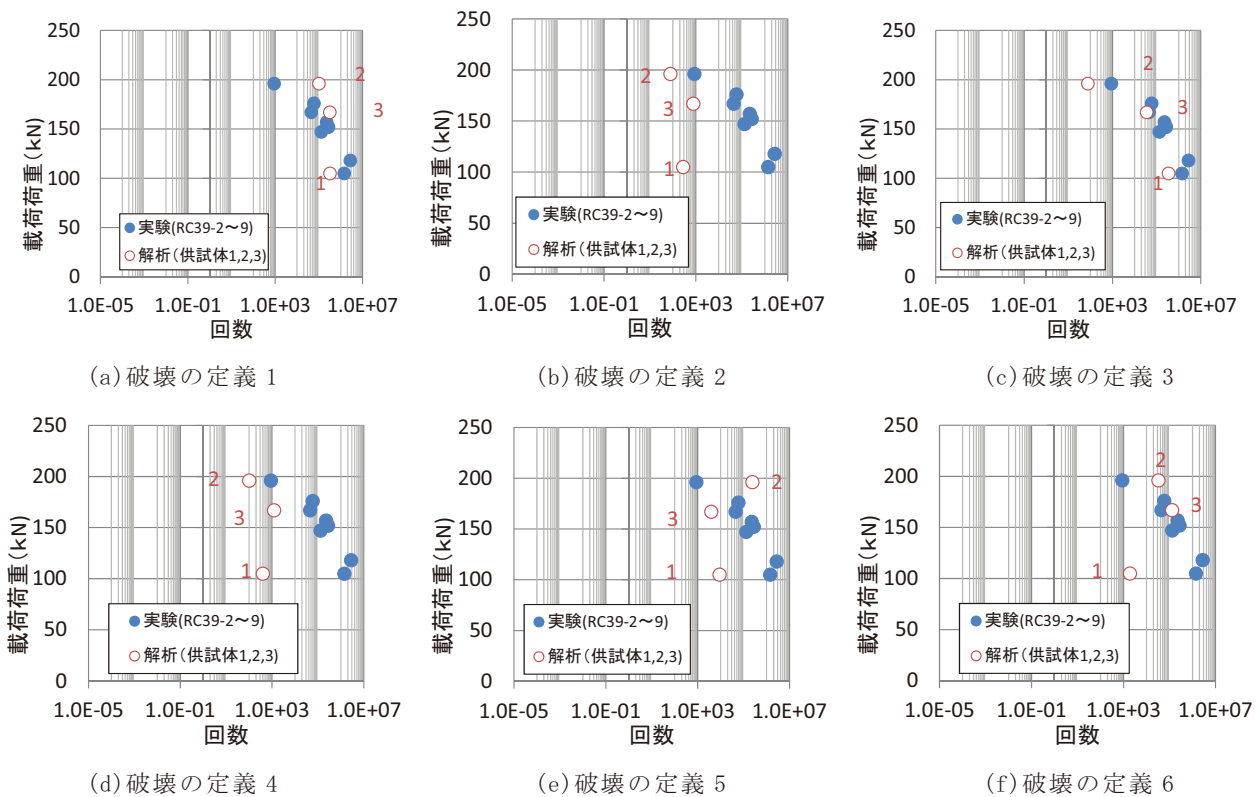
供試体 No.1~3 の解析結果を定義 1~6 で整理すると、表-2.2.2 のように整理することができる。これらの定義で整理した破壊とみなす走行回数と表-2.2.3 に示す輪荷重走行試験における破壊の回数を比較すると、破壊（とみなす）回数と載荷荷重との関係から、図-2.2.3 のように整理することができる。

表-2.2.2 解析において破壊とみなす走行回数

供試体名	破壊時荷重 (kN)	走行回数						
		定義1	定義2	定義3	定義4	定義5	定義6	
1	RC39-3	105	323,000	278	342,044	397	8,881	1,900
2	RC39-4	196	101,000	78	77	101	238,775	32,724
3	RC39-5	167	318,000	771	35,621	1,220	3,912	130,336

表-2.2.3 実験における破壊回数（一定載荷）

供試体名	荷重 (kN)	破壊回数
RC39-2	176	59,078
RC39-3	105	1,423,112
RC39-4	196	881
RC39-5	167	45,034
RC39-6	147	130,828
RC39-7	152	272,329
RC39-8	118	2,750,073
RC39-9	157	224,764



※図中に示す赤字の数字は供試体名

図-2.2.3 解析において破壊とみなす回数と輪荷重走行試験における破壊回数

解析結果を定義1～6で整理した破壊とみなす走行回数と輪荷重走行試験における破壊の回数について図-2.2.3のように整理した結果、それぞれの定義について次のような課題が浮かび上がった。

定義1は、①から④の条件を組み合わせることで、載荷荷重に対する破壊回数の関係を実験結果と同様の順序で表すことができるものの、それぞれの条件の工学的な意味や相互の関係性は明確でなく、指標として曖昧である。

定義3は、実験結果の傾向をよく表すことができている、かつ安全側の評価ができると考えられるものの、図-2.2.4に示すようにひずみに変状が生じた回数の判断が曖昧となる場合がある。これは、本解析において鉄筋は棒要素で埋め込まれているもの実際には梁のような変形をすること、また、上側鉄筋では計測位置が載荷荷重の影響を直接受けていることなどが原因と考えられる。

定義4は、図-2.2.5に示すように床版下面に発生したひび割れが徐々に増加していくとともに、鉄筋がコンクリート分のひずみも負担し、その範囲が増加していく状況をとらえようとしたものであり、鉄筋長さ当たりのひずみの大きさの範囲によって整理ができると考えたものである。しかしながら、図-2.2.6に示す輪荷重走行試験結果とは分布形状が全くことなることから、指標として普遍性に問題がある。なお、解析と輪荷重走行試験の分布形状が異なる理由としては、実際にはより多方面にひび割れが複雑に発生していることが挙げられる。

定義5は、輪荷重走行試験結果との関係が明らかに異なる上、支持辺近傍の床版上面に発生する剛性低下要素を対象に含めるかどうかなどの条件設定によっても結果が異なり、普遍性の点で問題がある。

以上を踏まえてここでは、定義2及び6（以下「定義A」、「定義C」という。）を解析結果の評価指標として採用する。なお、各社合成床版の定義については4章にて後述する。

**定義A**：上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

**定義C**：厚さ方向に5層に分割した床版要素の上から2層目にZ方向の剛性低下（水平方向にひび割れが発生）が生じた回数を限界値とする。

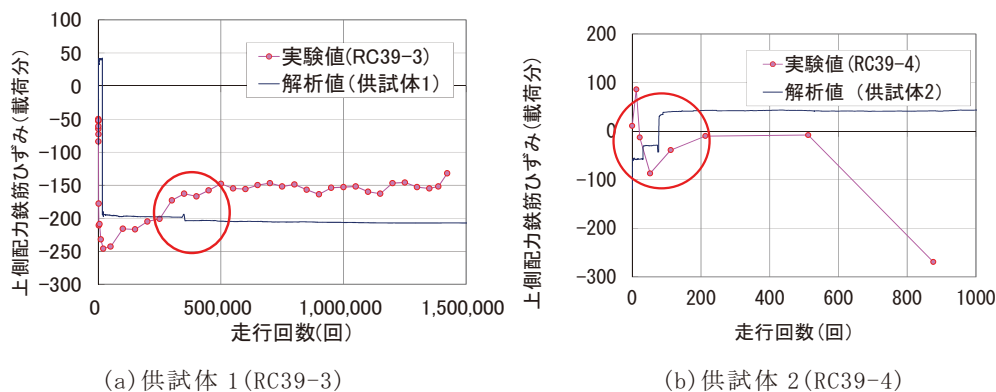
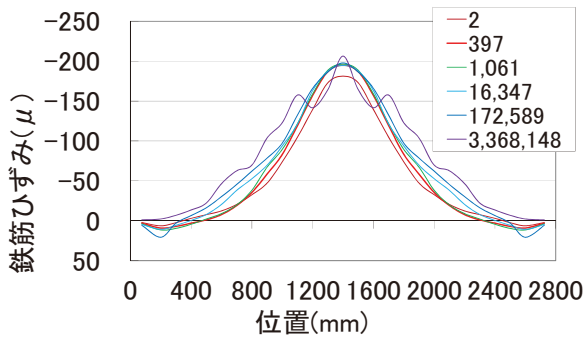
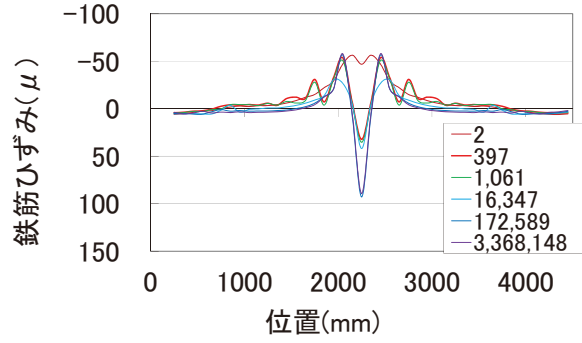


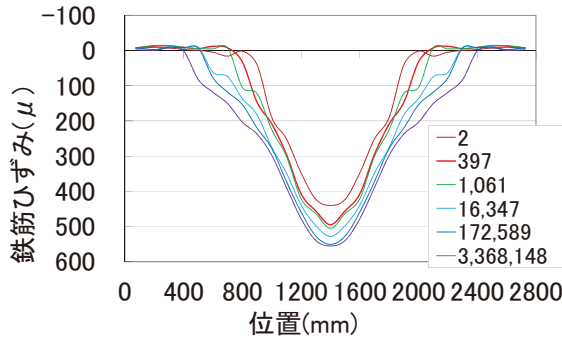
図-2.2.4 輪荷重走行試験結果と解析の比較（鉄筋ひずみの推移(圧縮(上)側配力筋)）



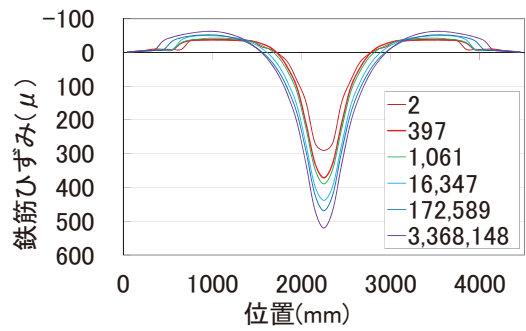
(a) 圧縮(上)側主鉄筋



(b) 圧縮(上)側配力筋

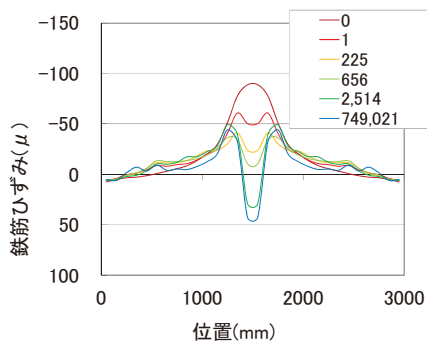


(c) 引張(下)側主鉄筋

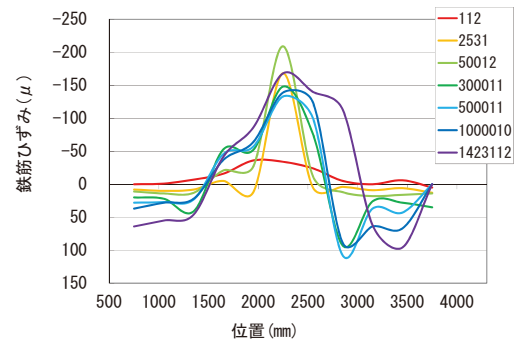


(d) 引張(下)側配力筋

図-2.2.5 解析結果 (鉄筋ひずみ分布(供試体 1 (RC39-3) の例))



(a) 解析結果 (N1)



(c) 輪荷重走行試験結果

(供試体 1 (RC39-3))

図-2.2.6 鉄筋ひずみ分布(圧縮(上)側配力筋)

供試体 No.1～7 の解析結果から、定義 A 及び C で整理した結果を表-2.2.4(a)に、実験における破壊の回数を表-2.2.4(b), (c)に示す。

表-2.2.4

(a) 解析における破壊とみなす回数

供試体名	破壊時 荷重 (kN)	走行回数		
		定義A	定義C	
1	RC39-3	105	278	1,900
2	RC39-4	196	78	32,724
3	RC39-5	167	771	130,336
4	RC47-1	210	29	148,315
5	N1 (S47)*	210	907	109,800
6	DR1 (S39)	142	117,000	2,280,000
7	RC8n1	階段載荷	206,000	480,000
7'	RC8n1	157	7,040,000	18,700,000

(b) 輪荷重走行試験における破壊回数 (一定載荷)

供試体名	荷重 (kN)	破壊回数
RC39-2	176	59,078
RC39-3	105	1,423,112
RC39-4	196	881
RC39-5	167	45,034
RC39-6	147	130,828
RC39-7	152	272,329
RC39-8	118	2,750,073
RC39-9	157	224,764
RC47-1	210	148,927
RC8n1	階段載荷	489,555
RC8n1	157	実験なし
N1 (S47)* <sup>1</sup>	210	109,800
DR1 (S39)* <sup>2</sup>	142	2,280,000

(c) 輪荷重走行試験における破壊回数 (階段載荷)

供試体名	荷重 (kN)	破壊回数
RC39-1	157	27392
RC47-2	314	327725
RC47-3	314	352667
RC47-4	314	321127
RC8n1	392	489555
RC8n2	334	394122
RC8n3	392	520000

表-2.2.4のうち載荷荷重の違いに着目し、破壊の回数と載荷荷重との関係を図-2.2.7に整理する。実験では、供試体 No.1 よりも No.2,3 の方が早く破壊に至っているのに対し、定義 A では供試体 No.2 が No.1 よりも早く破壊し、定義 C では供試体 No.2,3 とともに No.1 よりも破壊回数が大きい結果となった。これは、2.2.1で記述したとおり、個々の床版に対して大きい荷重を載荷する場合にたわみの絶対値が合わないと仮定すると、供試体 No.2,3 については供試体 No.1 よりも破壊の判定が実験よりも遅くなってしまう可能性がある。

供試体 No.1 と No.4 の比較結果を図-2.2.8に示す。実験結果では供試体 No.4 の方が早く破壊に至るのに対して、定義 C で整理した結果によると供試体 No.1 の方が早く破壊に至る。供試体 No.4 も No.2,3 と同様に初期のたわみの絶対値が合わないことから、破壊の判定が遅くなってしまう可能性がある。

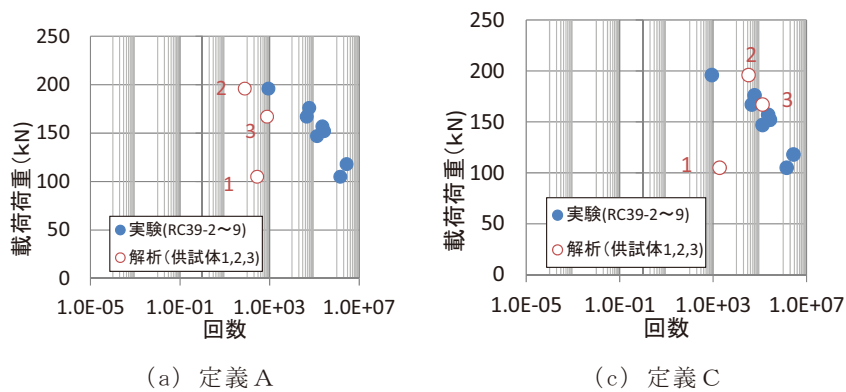


図-2.2.7 供試体 No. 1～3 の解析結果と実験結果との比較（載荷荷重の違い）

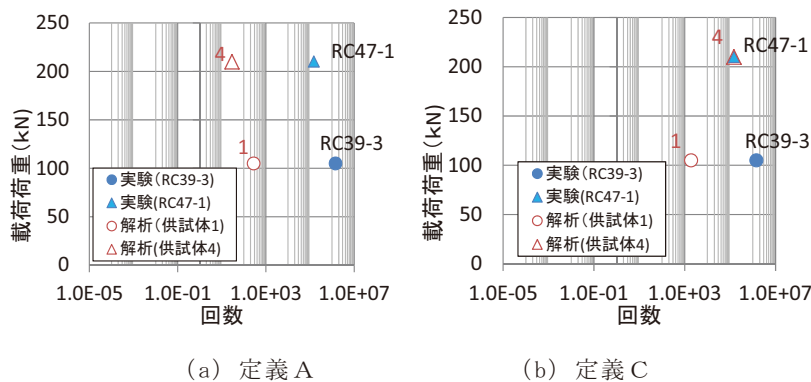


図-2.2.8 供試体 No. 1, 4 の解析結果と実験結果の比較（諸元の違い）



供試体寸法の異なる供試体 No.5,6 について、それぞれ同基準で設計した床版との比較を図-2.2.9 及び図-2.2.10 に示す。また、供試体 No.7 について解析した結果と、階段载荷による輪荷重走行試験結果との比較を図-2.2.11 に示す。図-2.2.7 及び図-2.2.8 の結果も含めて、いずれのケースにおいても「定義 A」の整理をすることで、安全側に評価可能であるといえる。

以上のことから、床版本来の耐荷力又は耐久性に対して過大な荷重により疲労試験を実施した場合を除き、設定した限界点の定義で耐久性を相対比較できる可能性が示された。また、鉄筋コンクリート床版ではいずれのケースにおいても実験結果に対して安全側に評価できる「定義 A」を限界点の基本とするのがよいと考えた。

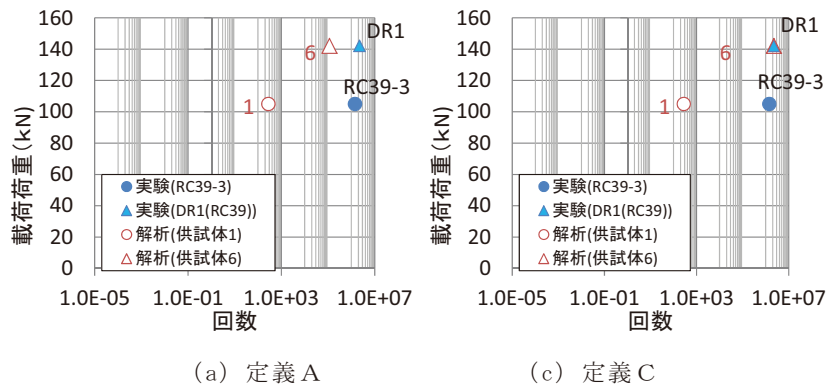


図-2.2.9 供試体 No. 1, 6 の解析結果と実験結果の比較 (供試体寸法の違い)

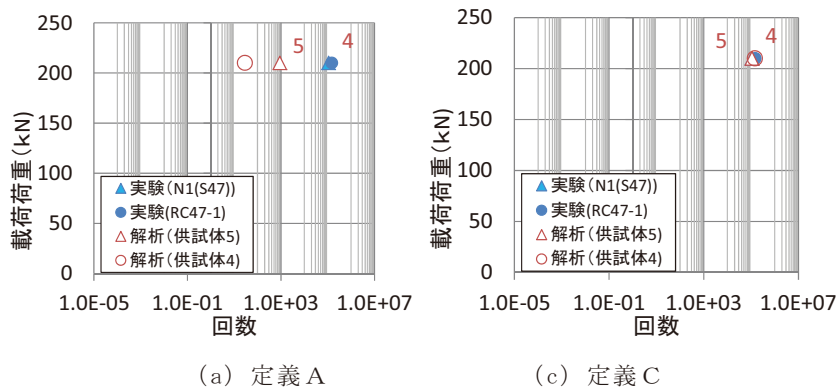


図-2.2.10 供試体 No. 4, 5 の解析結果と実験結果の比較 (供試体寸法の違い)

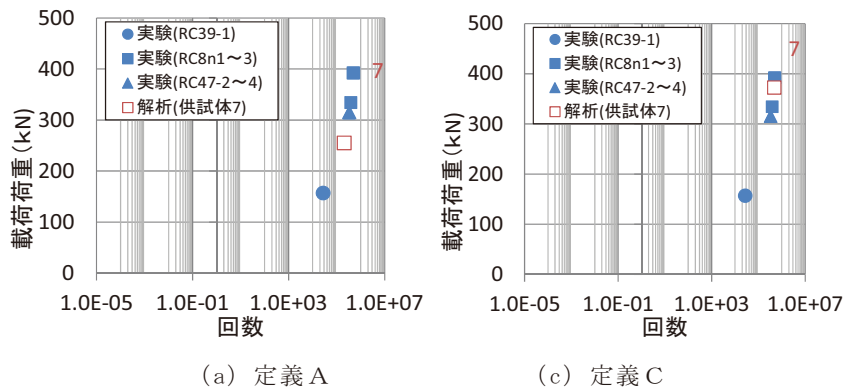


図-2.2.11 供試体 No. 7 の解析結果と実験結果 (階段载荷) の比較 (諸元の違い)

(2) 各供試体における破壊の状態

各供試体の損傷過程において定義した、A, Cそれぞれの状態における剛性低下要素の状況、ひずみ分布、上側配力鉄筋のひずみの推移について整理した結果を次に示す。

表-2.2.5(a) 供試体 No.1 (RC39-3) 破壊の定義Aの状態

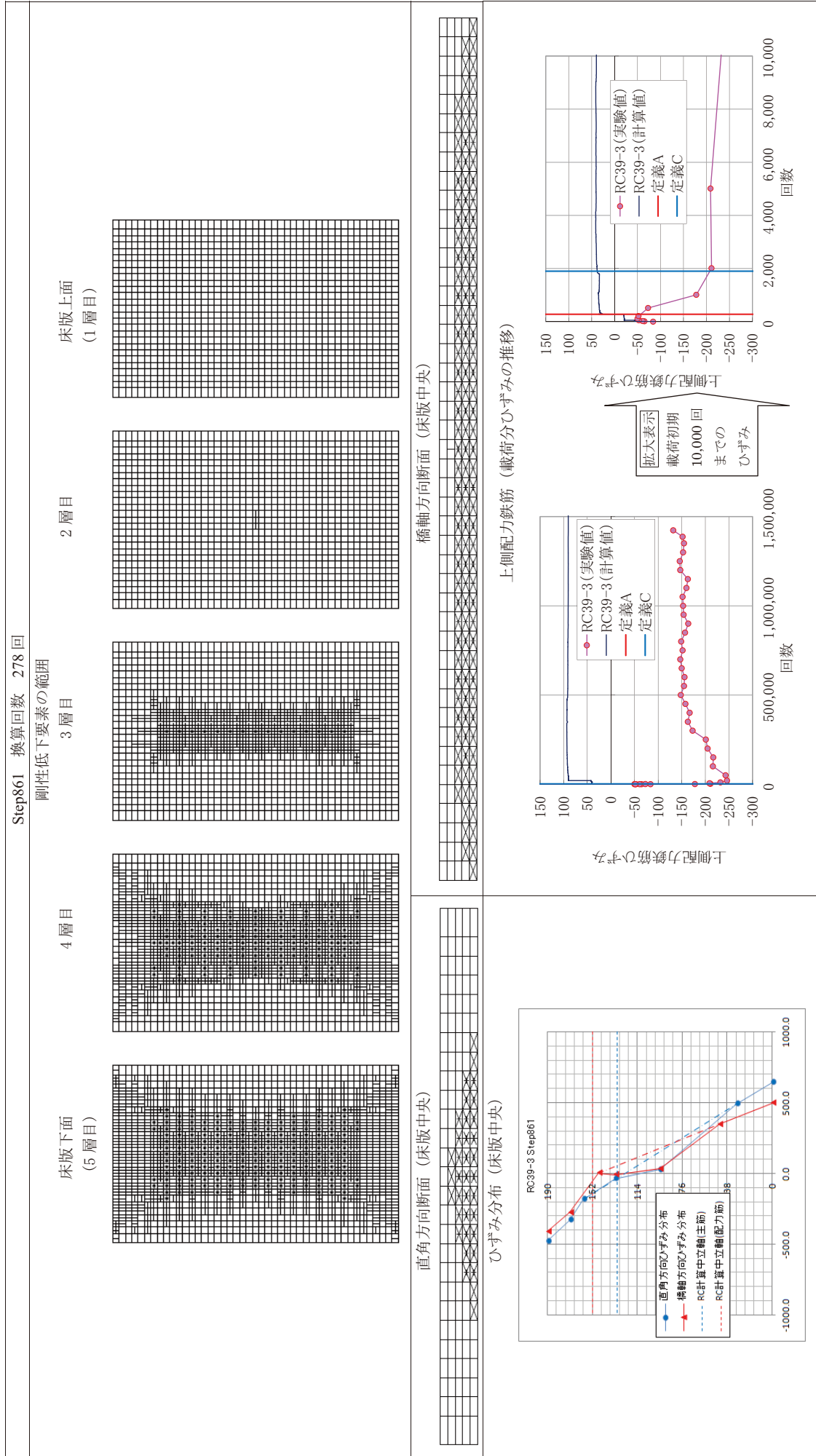
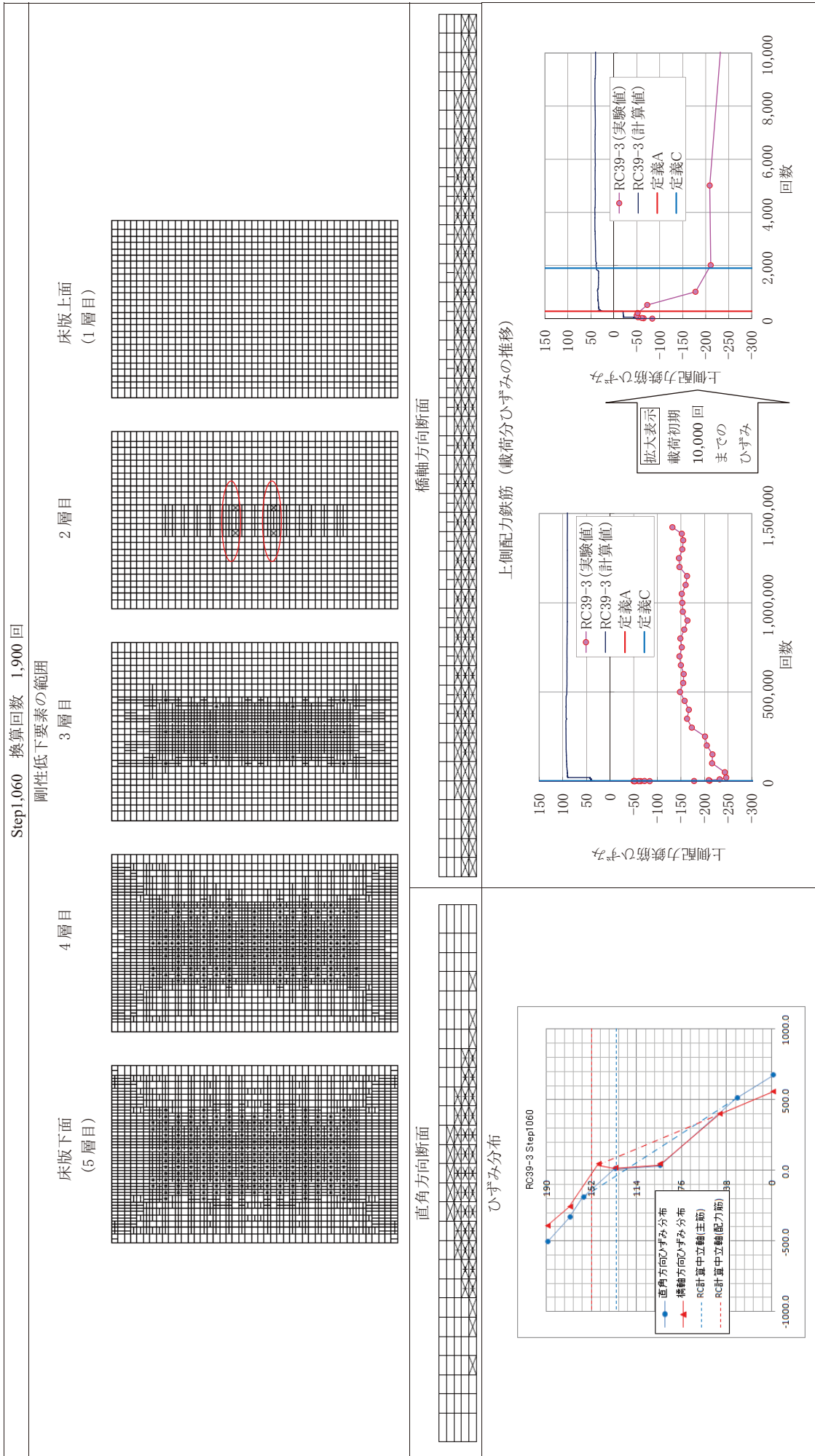
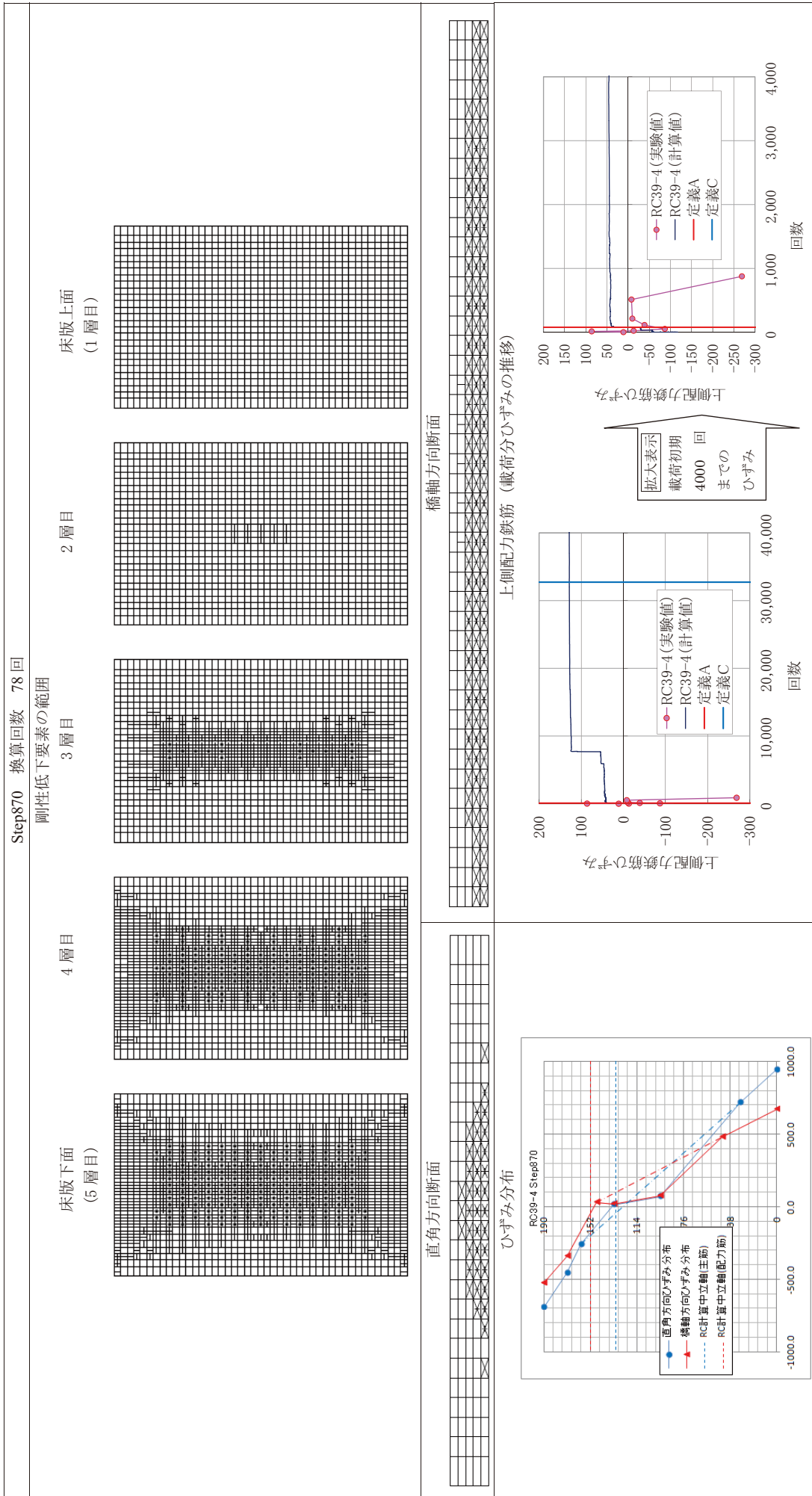


表-2.2.5(b) 供試体 No.1 (RC39-3) 破壊の定義 C の状態



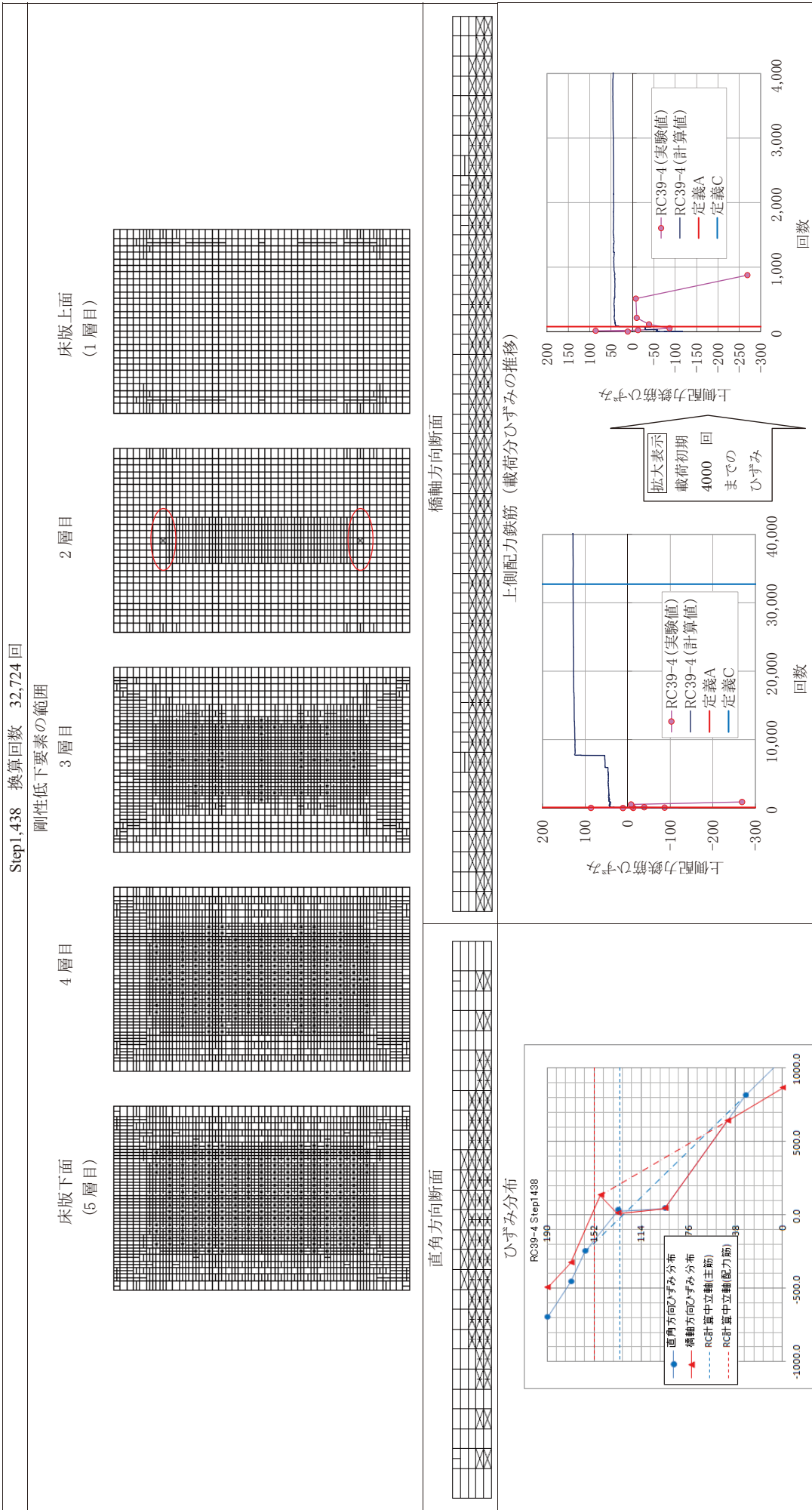
定義 C : 第 4 層 z 方向の合成低下要素が生じた回数。

表-2.2.6(a) 供試体 No. 2 (RC39-4) 破壊の定義 A の状態



定義 A : 上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

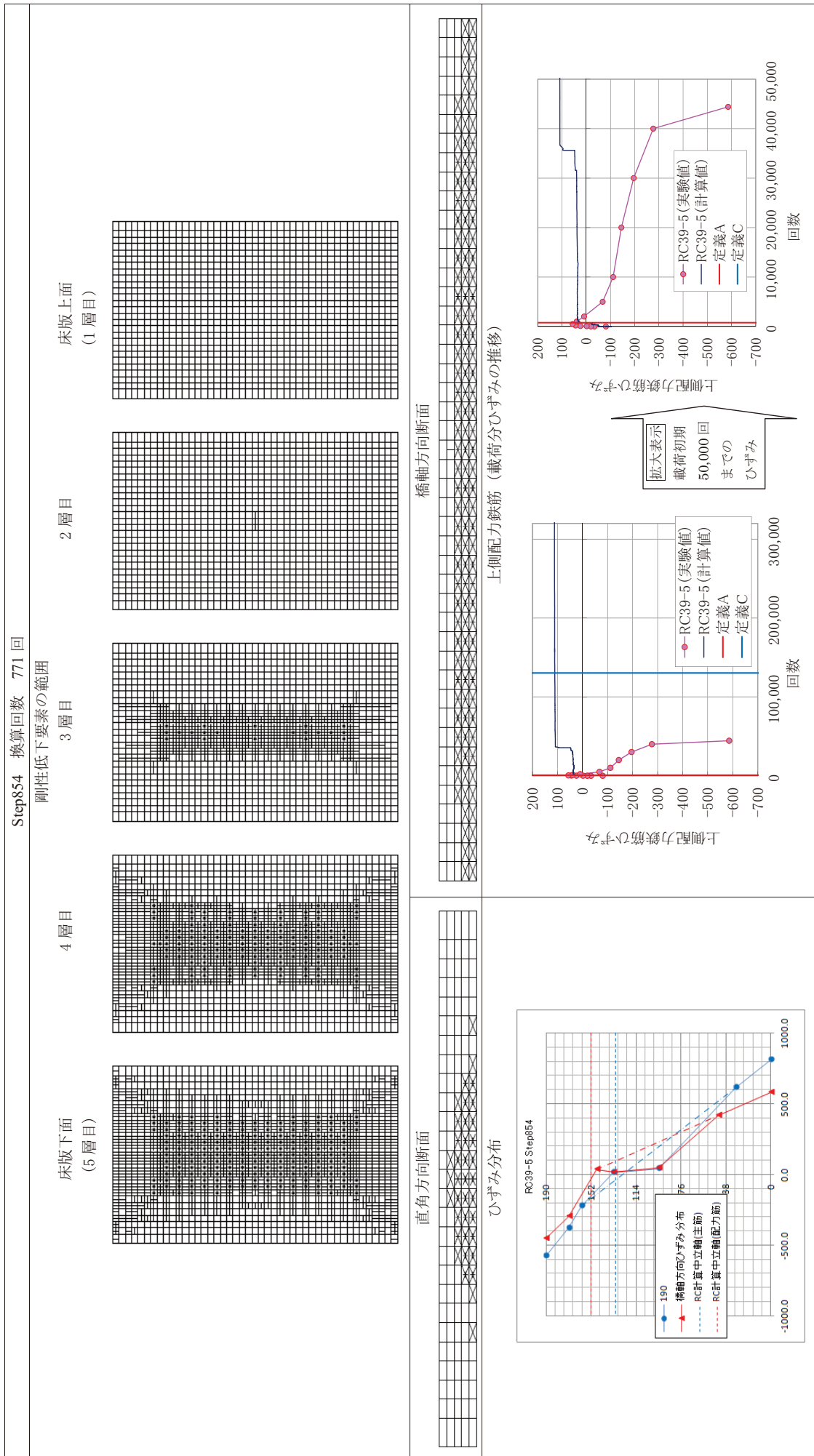
表-2.2.2.6(b) 供試体 No. 2 (RC39-4) 破壊の定義Cの状態



定義C: 第4層z方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。

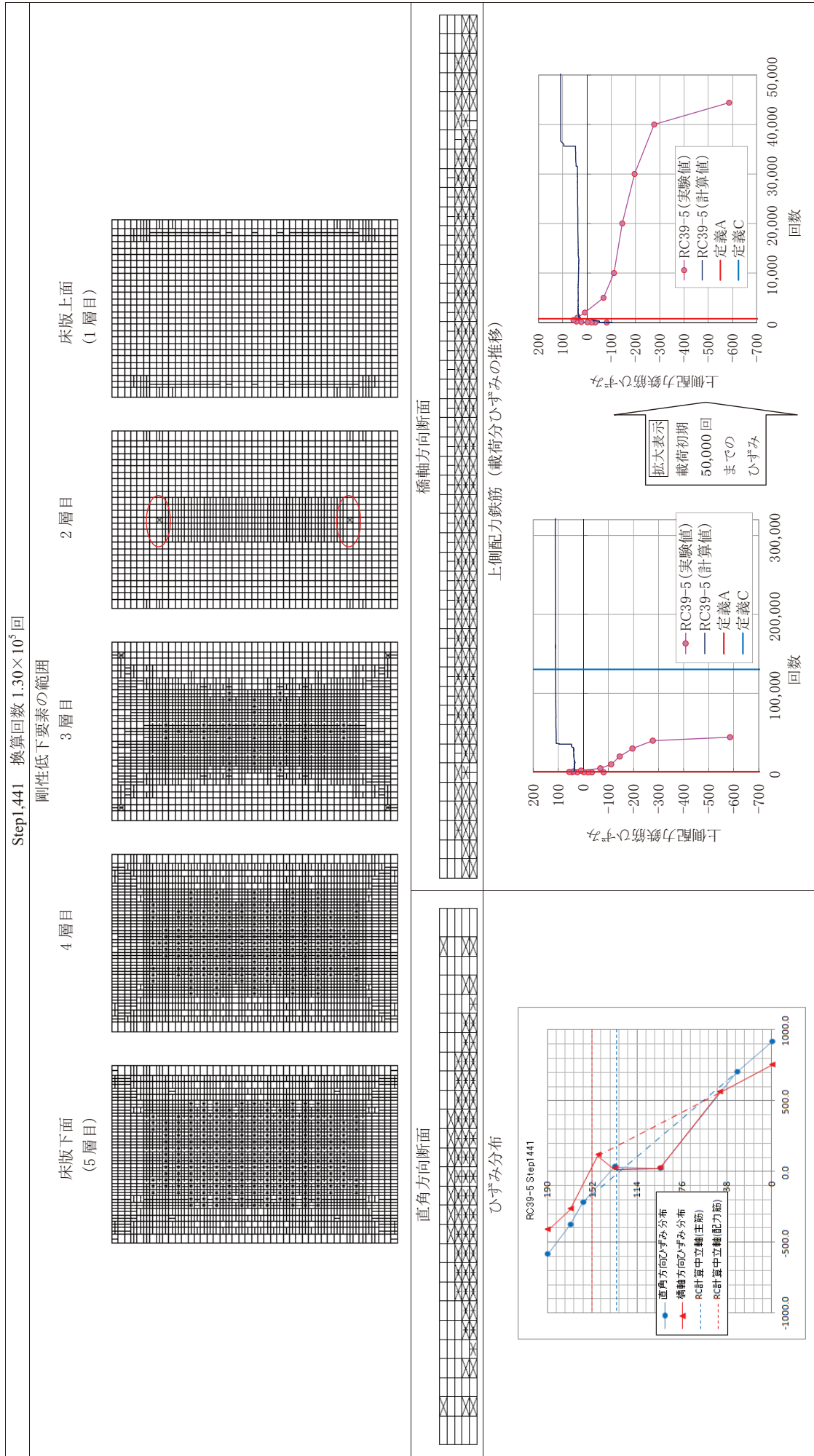


表-2.2.7(a) 供試体 No.3 (RC39-5) 破壊の定義Aの状態



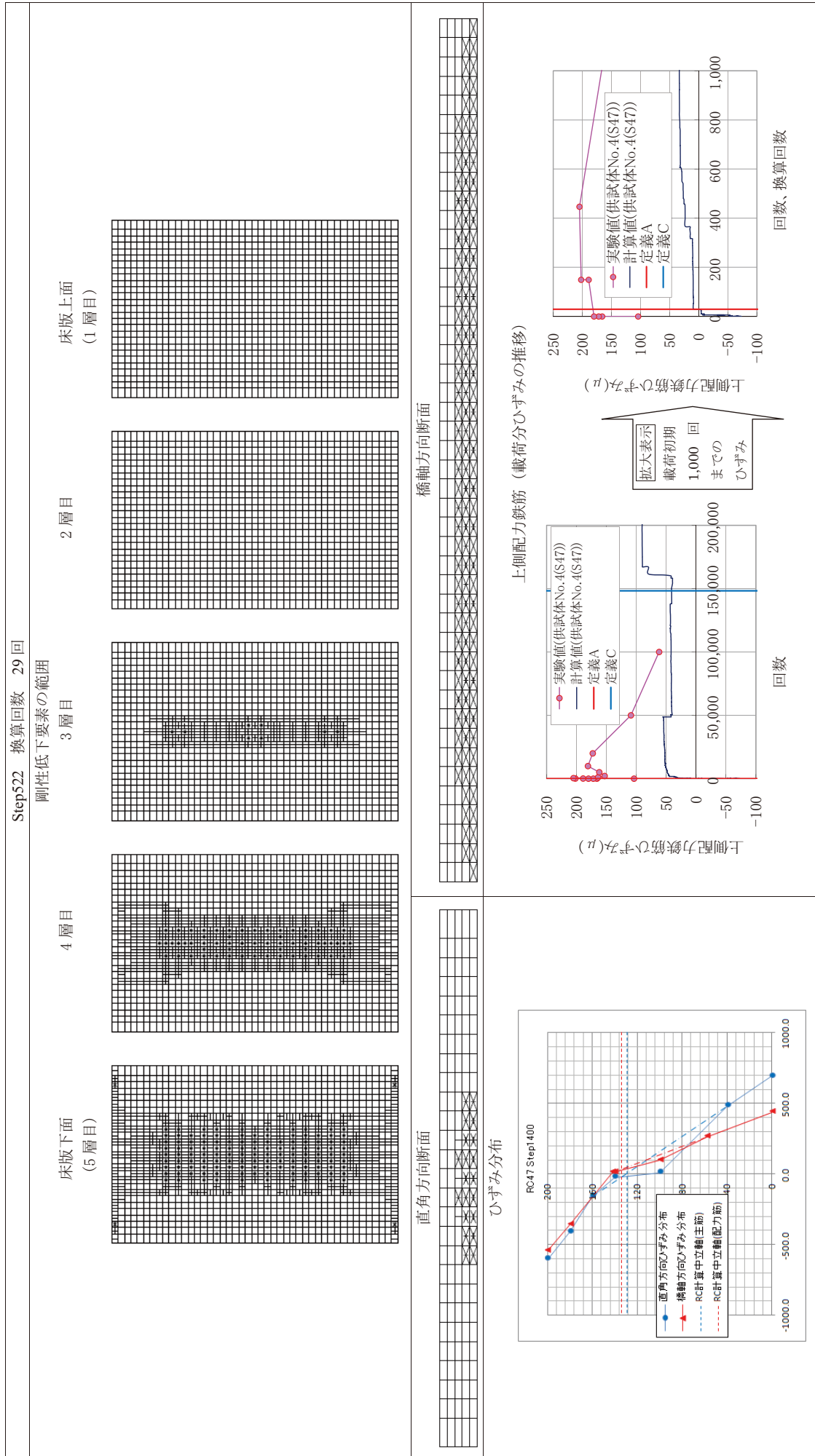
定義A：上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

表-2.2.7 (b) 供試体 No. 3 (RC39-5) 破壊の定義Cの状態



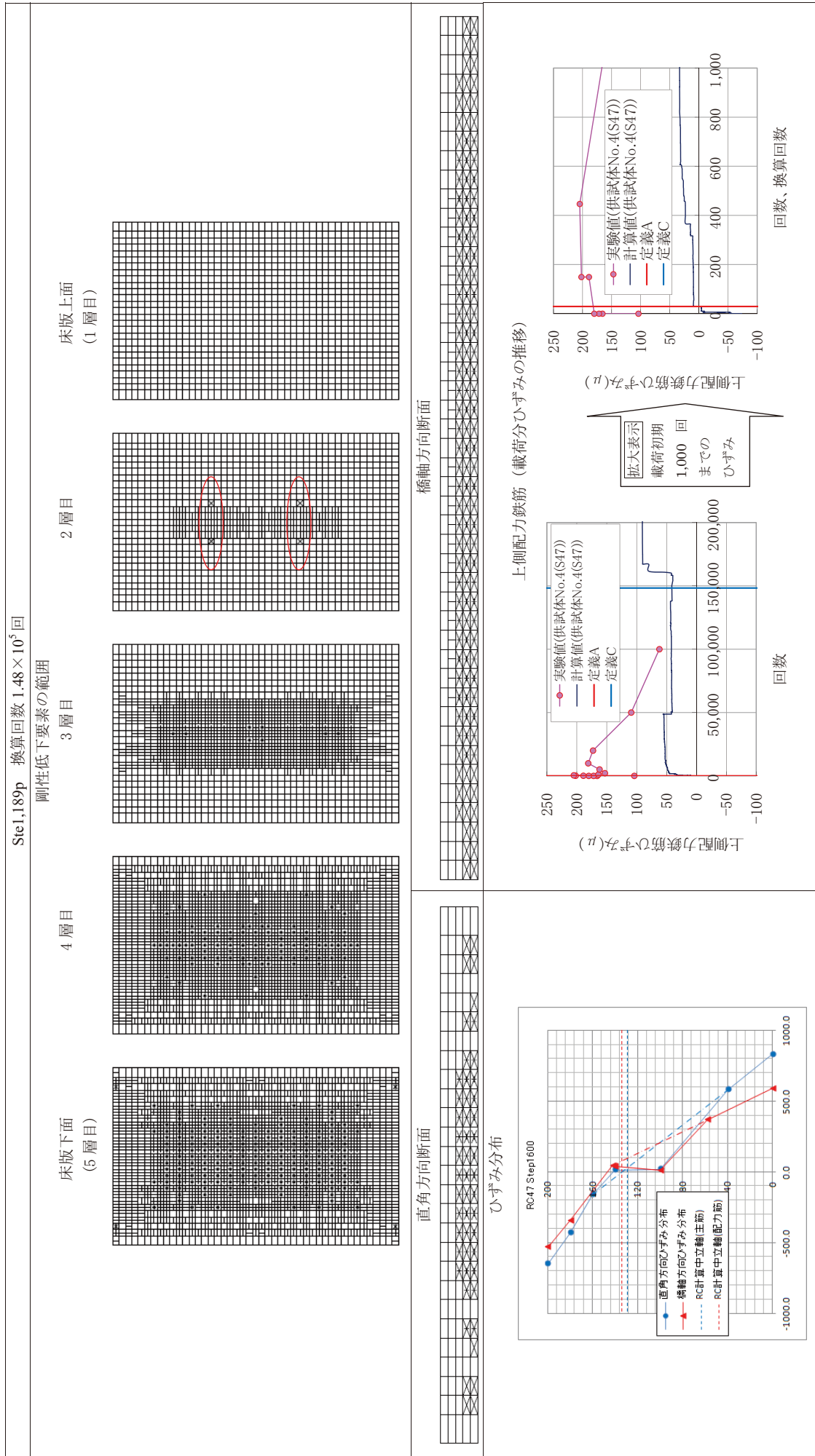
定義C：第4層 z 方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。

表-2.2.8(a) 供試体 No. 4 (S47) 破壊の定義 A の状態



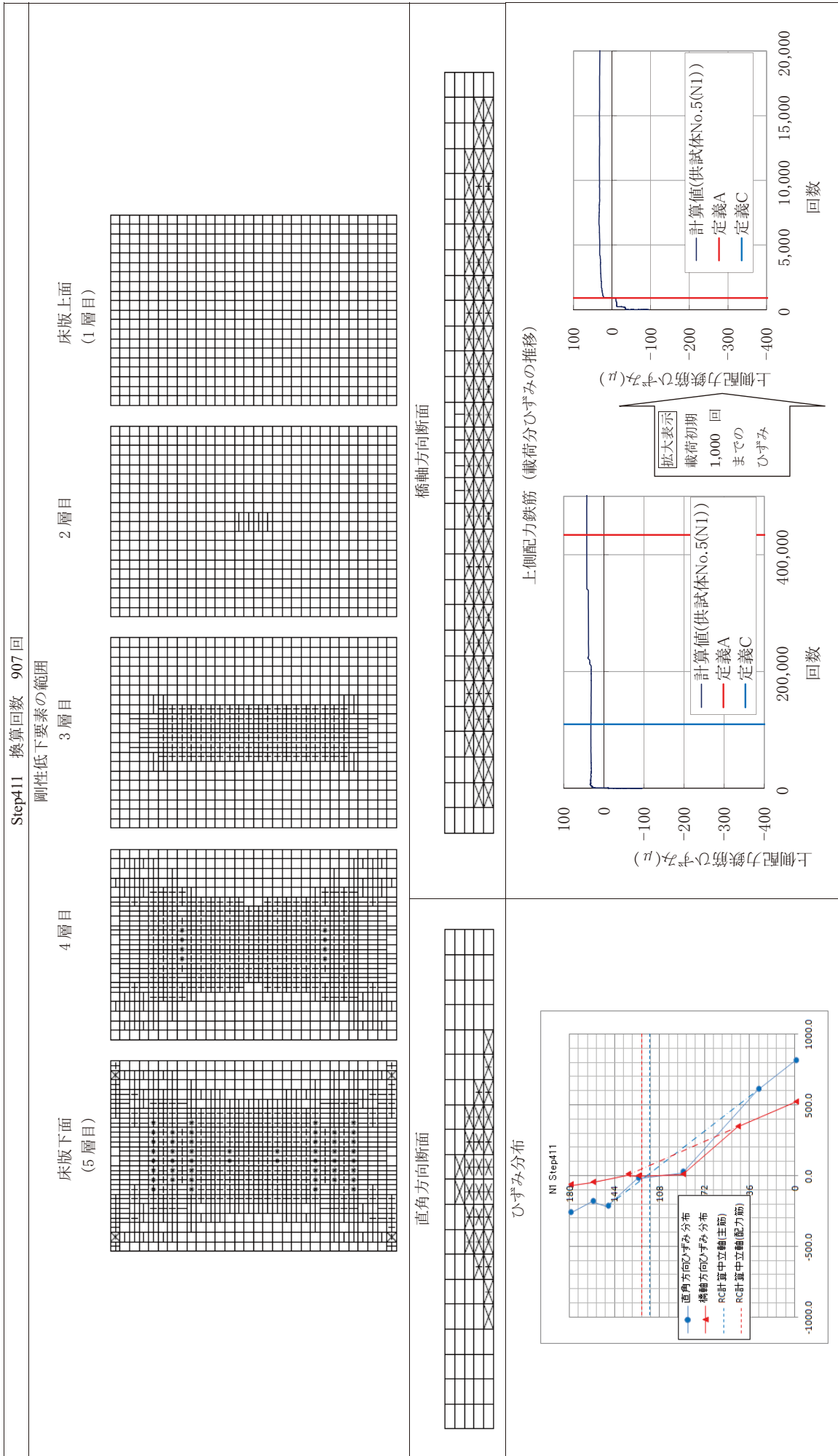
定義 A : 上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

表-2.2.8(b) 供試体 No. 4 (S47) 破壊の定義 C の状態



定義 C：第 4 層 z 方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。

表-2.2.9(a) 供試体 No. 5 (NI (S47)) 破壊の定義 A の状態



定義 A : 上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

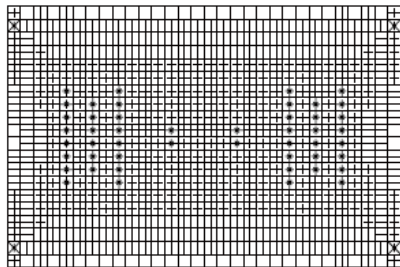


表-2.2.9(b) 供試体 No.5 (N1 (S47)) 破壊の定義 C の状態

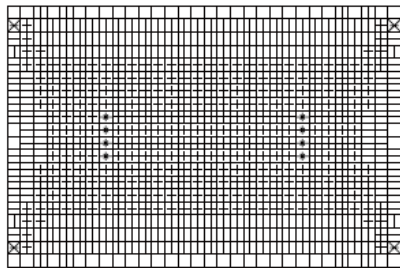
Step656 換算回数 246,806 回

剛性低下要素の範囲

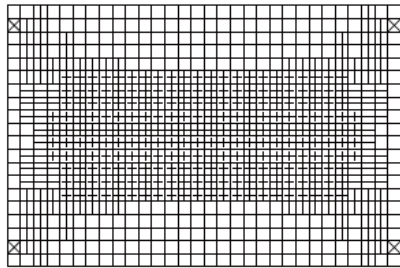
床版下面  
(5 層目)



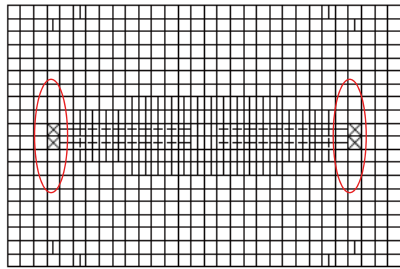
4 層目



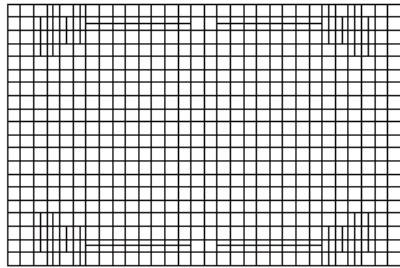
3 層目



2 層目



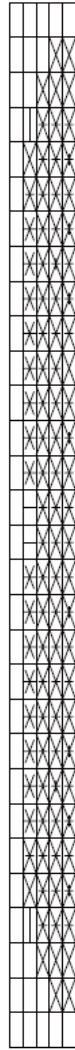
床版上面  
(1 層目)



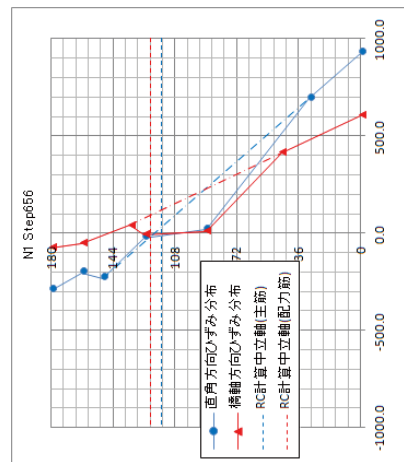
直角方向断面



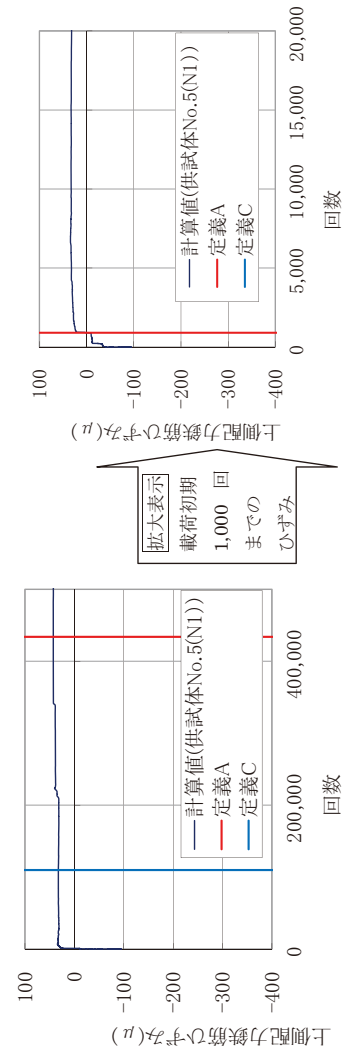
橋軸方向断面



ひずみ分布



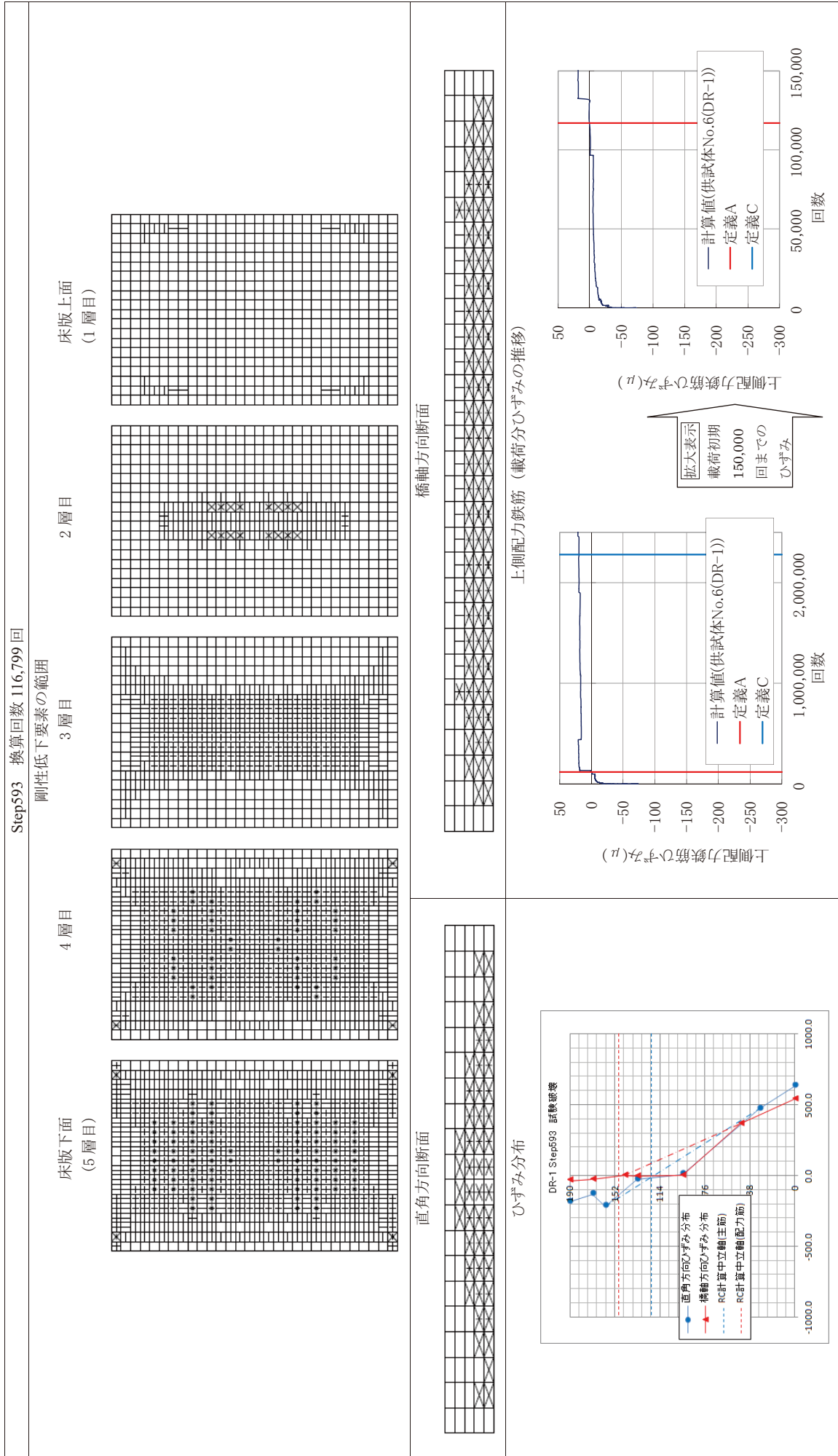
上側配力鉄筋 (載荷分ひずみの推移)



定義 C : 第 4 層 z 方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。



表-2.2.10(a) 供試体 No. 6 (DR1 (S39)) 破壊の定義 A の状態



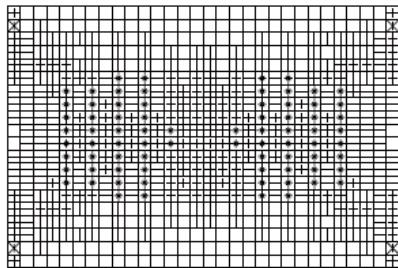
定義 A : 上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

表-2.2.10(b) 供試体 No. 6 (DR1 (S39)) 破壊の定義 C の状態

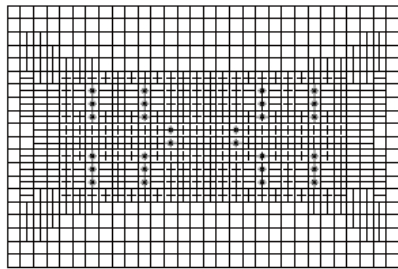
Step389 換算回数 4,112 回

剛性低下要素の範囲

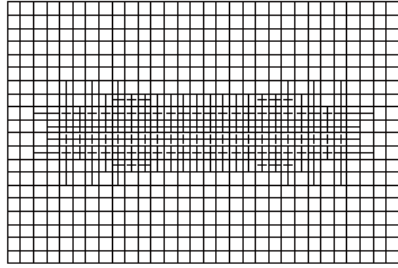
床版下面  
(5 層目)



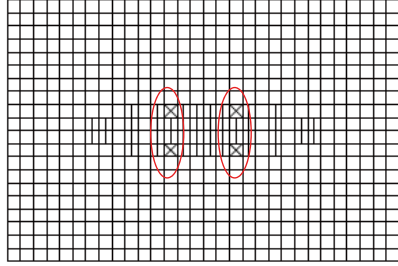
4 層目



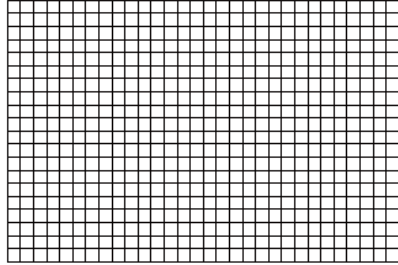
3 層目



2 層目



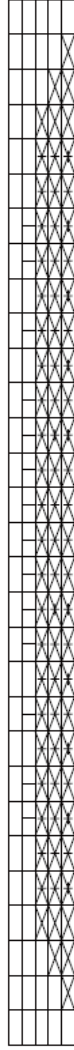
床版上面  
(1 層目)



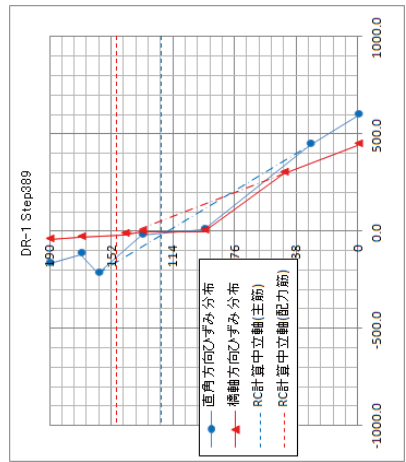
直角方向断面



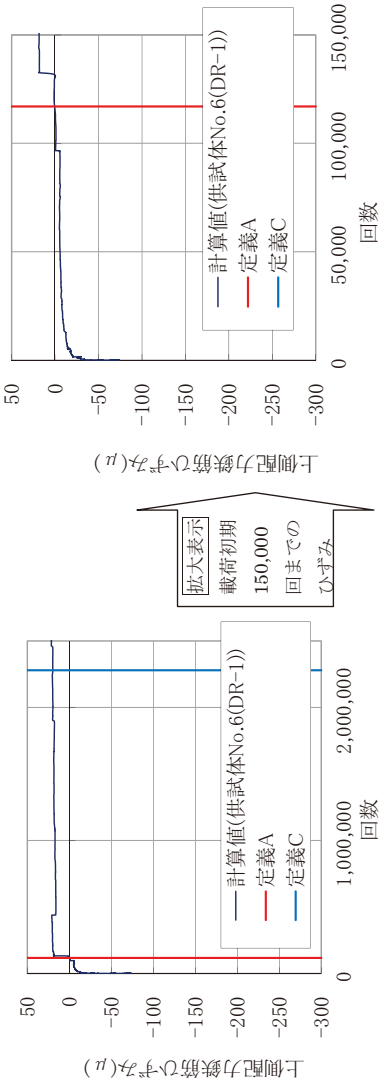
橋軸方向断面



ひずみ分布

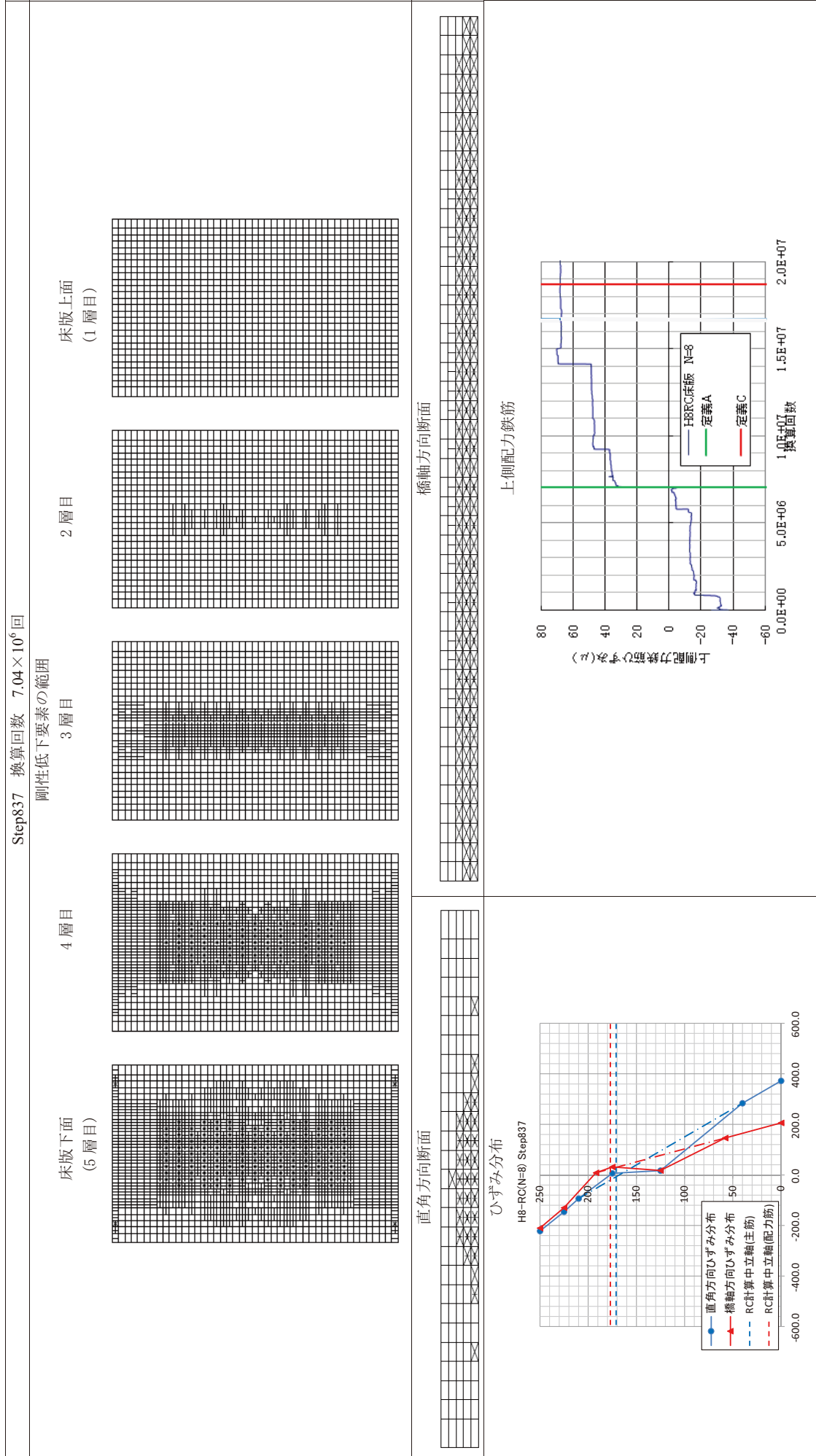


上側配力鉄筋 (載荷分ひずみの推移)



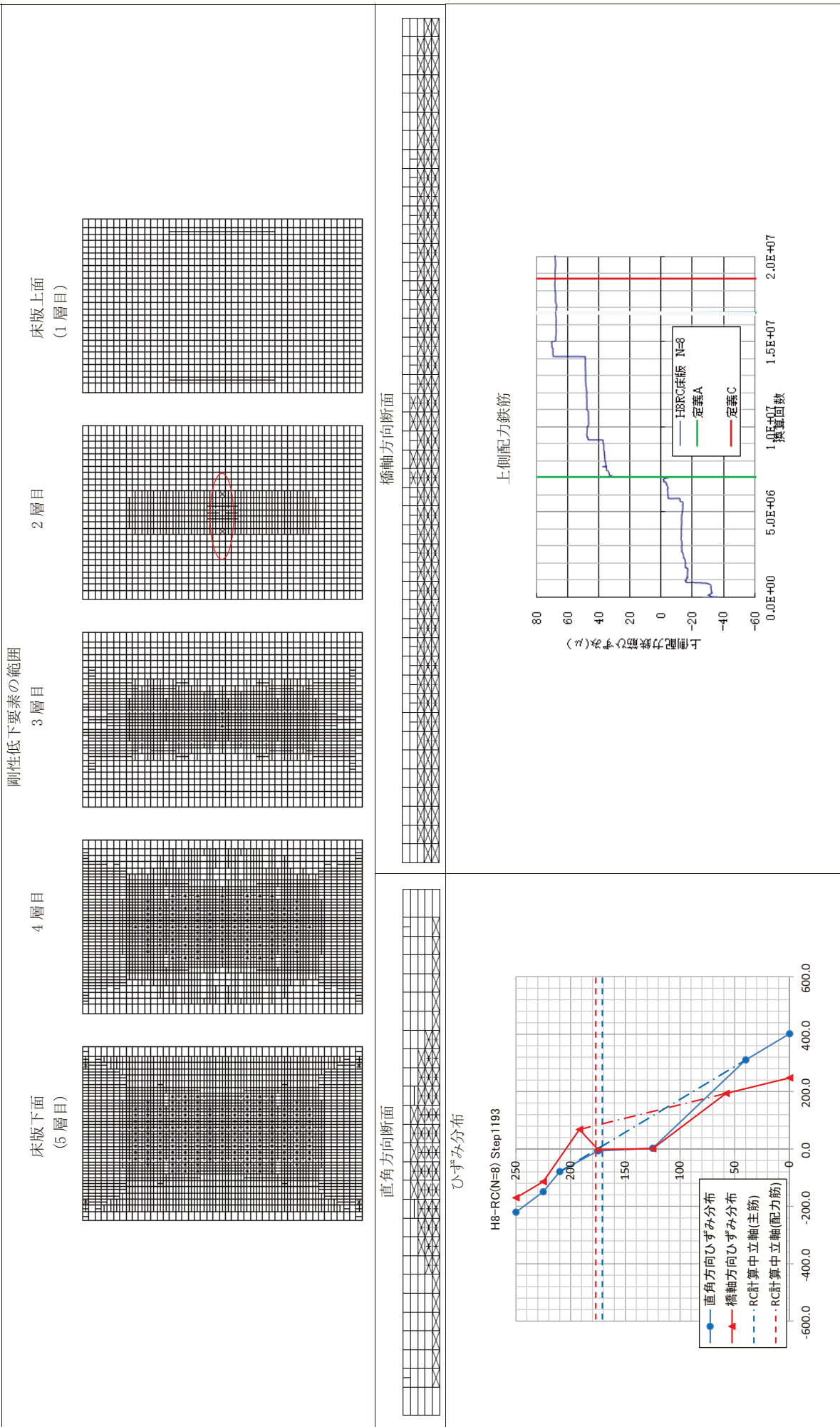
定義 C : 第 4 層 z 方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。

表-2.2.11 (a) 供試体 No. 7 (RC8n1) 破壊の定義 A の状態



定義 A : 上側配力鉄筋が引張側に応力が転換した回数が転換した回数を疲労破壊の限界値とする。

表-2.2.11(b) 供試体 No. 7 (RC8m1) 破壊の定義 C の状態  
Step1,193 換算回数  $1.87 \times 10^7$  回



定義 C : 第 4 層 z 方向の合成低下要素が生じた回数を限界値とする。

## 2 章 参考文献

- 2.1) 国総研資料第 28 号道路橋床版の疲労耐久性に関する試験,2002.3
- 2.2) 国総研資料共同研究報告書第 472 号道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究,2008.8
- 2.3) 道路橋 R C 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
- 2.4) 松井繁之,道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究,大阪大学大学院博士論文,昭和 59 年 11 月
- 2.5) 道路橋床版の要求性能と維持管理技術,(社)土木学会鋼構造委員会,2008.6
- 2.6) 松井繁之, 前田幸雄 : 道路橋 R C 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第 374 号/ I -6, pp.419-426.1986.