

論文 乾燥収縮拘束応力下での多数回繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート造スラブの特性

山本 俊彦*1

要旨: 倉庫, 運輸, 商業施設などにおいて繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート造スラブでは, ひび割れの進展や動的・静的剛性の低下により機能不全に陥る場合がある。本論では, 乾燥収縮拘束応力を受ける 3 体の試験体を用いた多点繰返し載荷実験結果を述べるものである。実験では, 床版剛性は徐々に低下し, 2 万回繰返し後には初期剛性に比べて 0.5 となり, 25 万回繰返し以降は急激にひび割れが増加し, 最終の 82 万回繰返しでは剛性比 0.3 と著しく低下した。また, 床版の固有振動数も大幅に低下した。乾燥収縮を更に拘束した他の 2 体では, より大きな性能低下が見られた。

キーワード: 多数回繰返し荷重, 鉄筋コンクリート造, スラブ, 疲労特性, 乾燥収縮, 振動性状

1. はじめに

多数回の繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート造スラブは, 1 万回を超えるような場合, その疲労特性を考慮する必要がある。このため, 考慮すべき設計での安全および使用性能の限界状態を表-1 に示す。安全の限界状態は, スラブの疲労破壊で, 検証の指標は応力および荷重である。使用性の限界状態は, 部分的な構造損傷, 許容できない変形, 不快な振動性状であり, 検証の指標は, それぞれひび割れ幅・応力, 変形・剛性, 固有振動数・応答である。また, 鉄筋コンクリート構造物では, コンクリートの乾燥収縮の影響は避けられないため, 実験では収縮拘束応力の影響も検討した。

建物内ではスラブは通常乾燥状態であるが, 屋外の道路橋スラブ等では, ひび割れからの雨水の浸透により部分的な疲労破壊が生じることが近年報告されている^{1), 2)}。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体を表-2 および図-1, 図-2 に示す。試験体は A, B, C の 3 体で, 周辺を幅 300mm×成 680mm の梁に囲まれたスパン 2000mm, 厚さ 80mm の 4 辺固定の正方形スラブである。積載荷重 20kN/m² 程度を想定したスラブの縮尺率 1/2~1/3 の模型で, スラブの曲げ主筋は D6@100 で $p_t=0.5\%$, 鉄筋のかぶり厚は 10mm である。梁主筋は 4-D16 である。スラブ A, B は鉄筋コンクリート造, スラブ C はプレストレスト鉄筋コンクリート造である。スラブ C の緊張材は, 各方向 6 本ずつの PC 鋼線 3-φ2.9 によりスラブ厚中央に直線配置した。スラブの平均軸方向圧縮力は 0.49MPa である。なお, 梁にもスラブと同じ平均軸方向圧縮力 0.49MPa を導入した。

鉄筋コンクリート造梁とスラブの乾燥収縮進行速度の違いにより, 乾燥収縮ひずみ差による拘束応力が試験

表-1 安全および使用限界状態

要求性能	限界状態	検証指標
安全性	疲労破壊	応力, 力
使用性	限定局部構造破壊	ひび割れ幅, 応力
	過大変形	変形, 剛性
	不快な振動性状	固有振動数, 応答

表-2 試験体

名称	$L_x \times L_y \times t$ (mm)	補強筋	拘束	プレストレス
A	2000×2000×80	D6@100	-	-
B	2000×2000×80	D6@100	○	-
C	2000×2000×80	D6@100	○	○

拘束鋼材: 4-H125, 緊張材: 3-φ2.9@300

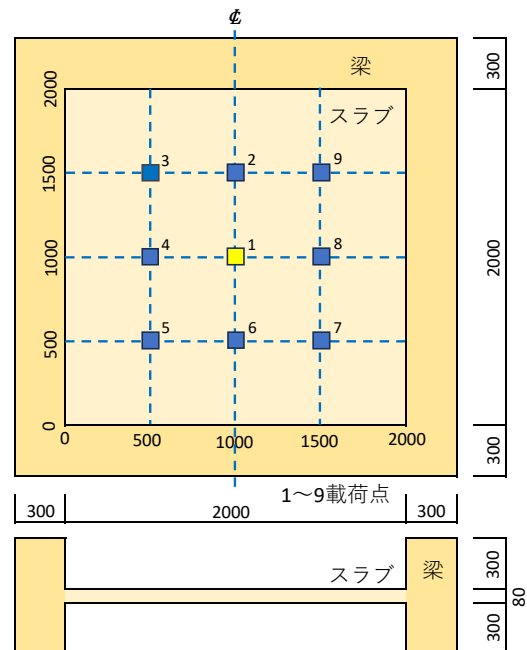


図-1 試験体 A および載荷点

*1 大同大学 名誉教授 工博 (正会員)

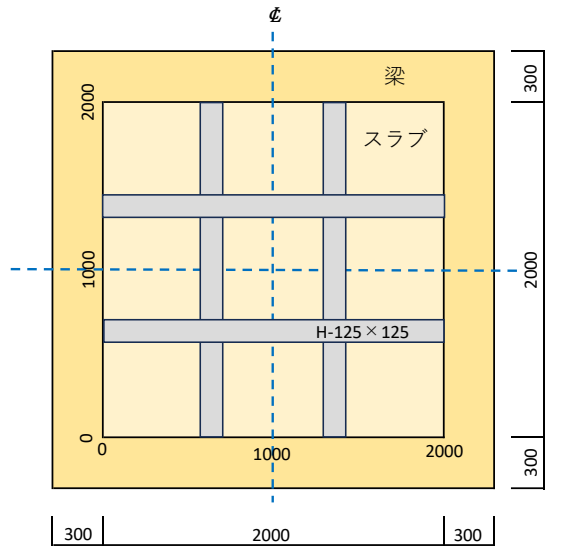


図-2 試験体 B, C

体スラブで生じることとなる³⁾。スラブ B, C には、更に鋼材 4-H125×125 で乾燥収縮を拘束している。鋼材の乾燥収縮拘束率 μ は、鋼とコンクリートのヤング係数比を 10 とし、クリープ係数 3.0 とした場合 0.75 となる。

2.2 使用材料

表-3 にコンクリートの性質を、表-4 鋼材の性質を示す。コンクリートの実験時の圧縮強度は、23.2MPa であった。また、コンクリートの弾性係数 E_c は 22.4GPa とした。

2.3 繰返し荷重

荷重は、スラブ上を重量物積載したフォークリフト等が日々繰返し移動し、衝撃荷重も加わることを考慮した。実験では、試験体の縮尺率およびスラブに生じる曲げ応力を考慮して、最大値を 24.5kN とした。スラブ主筋に生じる引張応力は降伏強度の 0.7 以下、コンクリートの曲げ応力は引張強度以上曲げ強度以下とした。

2.4 荷重方法

繰返し荷重は、動的アクチュエーター (491kN:400mm/s) により下限値を最大値の 0.2 として、24.5kN(14.7 ± 9.81kN)で sin 波 5Hz³⁾ を原則とした。荷重方法を図-3 に、また、荷重手順を表-5 に示す。荷重はスラブ上面に 100mm 角版を置き、荷重は下面に 45 度方向に拡散すると想定した。荷重は、第 1 セットではスラブ全 9 点で万遍なく行い、第 2 セットでは、スラブ中央 1 点と中央を挟んだ 2 点同時荷重を行い、スラブ全体への繰返し荷重の影響を調べた。繰返し回数は、使用 30 年で 50 ~ 100 万回程度を想定した。実験での繰返し回数は、表-1

表-3 コンクリートの強度特性

養生条件	材齢 (days)	圧縮 (MPa)	引張 (MPa)	曲げ (MPa)	弾性係数* (GPa)
気中	176	23.2	2.17	5.03	22.4

*圧縮強度から換算

表-4 補強鋼材の機械的性質

種別	断面積 (mm ²)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数* (GPa)	伸び (%)
D6	32	423	539	182	15.0
3-φ2.9	19.8	1880	2010	201	9.00

*表面添付ゲージ(4-Gauge)による

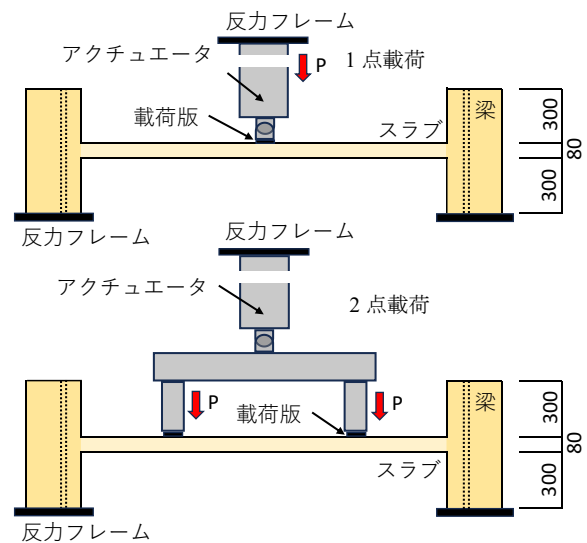


図-3 荷重方法

表-5 繰返し荷重手順

セット	試験体	荷重 (kN)	荷重位置	繰返し回数
1-1	A	9.81	1	1~10,000
1-2	"	13.7	1	10,001~20,000
1-3	"	24.5	1, 2~9	20,001~260,000
1-4	"	"	1	260,001~270,000
2-1	A, B, C	24.5	1, 2点*	1~250,000
2-2	"	"	1, 2点*	250,001~500,000
2-3	"	"	1	500,001~550,000

*同時 2 点荷重位置 2+6, 3+7, 4+8, 5+9

の安全限界に達するか、50 万回を超え安定状態になるまで継続することとした。

2.5 スラブの弾性的性質

スラブの弾性的な性質を表-6 に示す。計算は、汎用コード LISA による FEM 解析によった。シェル要素を用い、100mm メッシュに分割し、コンクリートのポアソン比を 0.2 とした。表中の応力値は応力集中を考慮して、

要素の平均値で示した。曲げ応力は、荷重 24.5kN では 2.39MPa~4.83MPa となり、コンクリートの引張強度以上曲げ強度以下である。また、鉄筋引張応力は、141MPa~287MPa となり、鉄筋引張降伏強度の 0.7 以下である。スラブのたわみは、中央載荷点 1 での値が一番大きく 0.545mm である。スラブ自重での固有振動数(NVF)計算値は 102Hz となった。

2.6 乾燥収縮

表-7 に各試験体の乾燥収縮拘束応力推定値を示す。スラブ A は、部材厚の違いによる周辺梁による拘束を受けるため、梁とスラブの乾燥収縮ひずみの違いによる既往の研究⁴⁾から両者の断面積比から推定拘束応力を求めた。一方、スラブ B, C は、実験開始前の材齢 80 日での乾燥収縮拘束鋼材 4-H125 のひずみから、スラブに生じる引張応力を直接計算した。スラブに負担される引張応力は、図-2 をモデル化した FEM 弾性解析により求めた。実験材齢とは異なるが、この値が維持されると想定した。その結果、乾燥収縮拘束応力推定値は、スラブ A で 0.80MPa, B, C はそれぞれ 1.60MPa, 1.45MPa となった。

2.7 本実験の疲労特性

繰返し回数が 1 万回を超えるような場合、疲労特性の検討対象となる。このため、実験条件とは必ずしも一致しない部分もあるが、本実験での位置付けを CEB-FIP90⁵⁾により検討する。表-8 にコンクリートに埋め込まれた鋼材の疲労限界、表-9 にコンクリートの疲労限界の算定を示す。いずれもひび割れ断面を対象とし、コンクリートは圧縮縁応力である。鋼材では、載荷位置によっては応力レンジが繰返し回数 $N=10^6$ での対応値をやや上回る値となっている。一方、コンクリートでは、圧縮に対しては大幅な余裕がある。また、パンチングに対しても $N=10^6$ 以上の疲労強度となっている。コンクリートの引張強度に対しては、荷重が 24.5kN の場合、いずれもコンクリートの引張強度を上回り、繰返し荷重によるひび割れの発生・進展は避けられないと考えられる。

一方、繰返し荷重によるたわみの増大も生じる。CEB-FIP90 では、繰返し荷重の上限と下限の平均値に対して、疲労載荷期間のクリープひずみの増大を算定し、弾性たわみに加算している。式 (1) によりクリープによるたわみの増大を算定する。

$$a_n = a_1 [1.5 - 0.5 \exp(-0.03n^{0.25})] \quad (1)$$

ただし、

a_1 : 第 1 サイクルでの全荷重によるたわみ

n : 繰返しサイクル数

これによれば、載荷位置 1 で 24.5kN 繰返し載荷した

表-6 スラブの弾性的性質

載荷位置	荷重(kN)	固定端(MPa)		中央部(MPa)		たわみ δ_c (mm)
		σ_{ct}	σ_{ft}	σ_{ct}	σ_{ft}	
1	9.81	0.956	56.8	1.62	96.4	0.218
1	13.7	1.34	79.4	2.27	135	0.305
1	24.5	2.39	142	4.06	241	0.545
2, 4, 6, 8	24.5	4.12	245	3.22	191	0.342
3, 5, 7, 9	24.5	3.01	179	2.75	164	0.231
2+6, 4+8	24.5×2	4.83	287	3.16	188	0.498
3+7, 5+9	24.5×2	3.28	195	2.89	172	0.272

表-7 スラブに生じる乾燥収縮拘束応力

スラブ	材齢 (日)	4-H125 による		プレストレス 拘束応力 (MPa)	拘束応力 (MPa)
		ひずみ(μ)	スラブ応 力 (MPa)		
A	176	-	-	-	0.80 ⁴⁾
B	80	-153	1.60	-	1.60
C	"	-186	1.94	-0.49	1.45

表-8 鋼材疲労特性

材料	載荷位置	繰返し応力(MPa)			CEB-FIP90 (MPa)	
		σ_{max}	σ_{min}	$\Delta\sigma^*$	$\Delta\sigma_{Rsk}^{**}$ $N=10^6$	$\Delta\sigma_{Rsk}^{**}$ $N=10^8$
鉄筋	1	241	48.2	193	210	125
	2+6, 4+8	287	57.4	230		

*応力レンジ, **繰返し回数 N に対応する応力レンジ

表-9 コンクリート疲労特性

対象	載荷位置	繰返し荷重特性値(24.5kN)			CEB-FIP90 Log N
		$S_{cd,max}^*$	$S_{cd,min}^*$	ΔS_{cd}^{**}	
圧縮	1	0.379	0.0758	0.303	13.0
	2+6, 4+8	0.447	0.0894	0.358	
パンチング	1~9				6.92

*繰返し応力の対圧縮強度の比, **強度比のレンジ

場合、 $n=25$ 万回および 50 万回でのたわみ増大率は、それぞれ 1.24 倍、1.28 倍となる。これは、クリープの影響のみで、ひび割れの発生などによる剛性低下は対象外である。実験では、繰返し荷重による残留たわみの増大に影響を及ぼすこととなる。

3. 第 1 セット実験結果

3.1 第 1 セット概要

第 1 セットでは、荷重を三段階で増加させ、繰返し回数 8 万回までは中央 1 点での載荷とした。以降 26 万回まで各載荷点を順次移動した。続いて最後に、載荷点 1

表-10 第1セット実験結果

繰返回数	荷重セット	荷重 (kN)	δ_s^{*1} (mm)	δ_r^{*2} (mm)	δ_e/δ_o^{*3}	ε_s^{*4} (μ)	NVF (Hz)
1			0.16	0.00	1.36	31	101
10			0.25	0.01	0.91	86	
100	1-1	9.81	0.25	0.01	0.91	86	
1000			0.31	0.04	0.81	181	
10000			0.32	0.04	0.78	185	
10001			0.43	0.06	0.82	242	94.6
10100	1-2	13.7	0.43	0.05	0.80	249	93.9
20000			0.46	0.06	0.76	284	93.7
20001			0.91	0.16	0.73	440	92.9
20100	1-3	24.5	0.94	0.19	0.73	447	
21000			1.18	0.36	0.66	532	
80000			1.49	0.62	0.63	644	
260001	1-4	24.5	2.23	1.12	0.49	727	72.5
270000			2.36	1.20	0.47	707	

*1 荷重位置 1 でのスラブ全たわみ, *2 残留たわみ

*3 $\delta_e = \delta_s - \delta_r$, δ_o : たわみ計算値, *4 鉄筋ひずみ

で 27 万回まで繰返し荷重した。表-10 に第 1 セットの結果を示す。第 1 セットでは、疲労破壊はスラブの局部、全体ともいづれも見られなかった。

3.2 スラブたわみ

スラブのたわみは、荷重位置 1 の場合が最大となることから、たわみの値はすべて荷重位置 1 での荷重による値を示した。以降これにより、スラブ剛性等の性能評価を行うこととした。図-4 に荷重セットに伴うスラブたわみの変化を示す。各荷重段階の最初を 1 回として重ねて示した。荷重 9.81kN の 1-1 セットでは、スラブの全たわみ δ_s は増加を続けたが、残留たわみはわずかであった。荷重 13.7kN の 1-2 セットではたわみはほとんど増大しなかった。荷重 24.5kN の 1-3 セットでは、繰返し回数が増すに従いたわみは増大した。図-5 に通算繰返し回数に対するスラブの全たわみ δ_s と残留たわみ δ_r を示す。全たわみは、最終 2.36mm となり弾性たわみ計算値 δ_o の 4.33 倍となった。荷重除荷時のスラブ残留たわみ δ_r は当初 0 であったが、繰返し荷重により徐々に増加を続け、クリープによる影響もあり最終的には全たわみの 50% を超えるまでになった。

3.3 剛性変化

図-6 にスラブの静的剛性 D_s 、動的剛性 D_d の変化を示す。スラブの固有振動数は、砂袋の落下による自由振動を計測した。静的剛性は、初期は計算値を上回ったが、動的剛性、静的剛性ともに早期に低下した。全 9 点繰り返し荷重によりスラブ全体にひび割れが発生したため、1-

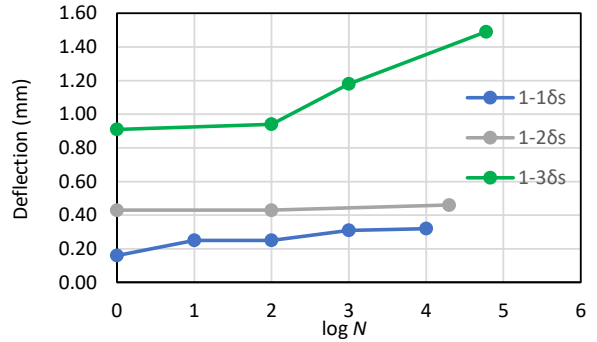


図-4 荷重セットに伴うスラブたわみの変化

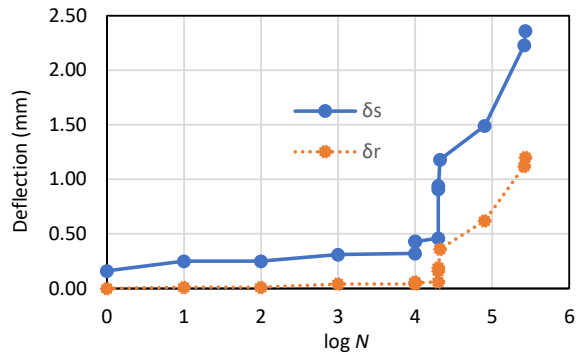


図-5 通算繰返し回数に伴うスラブたわみの変化

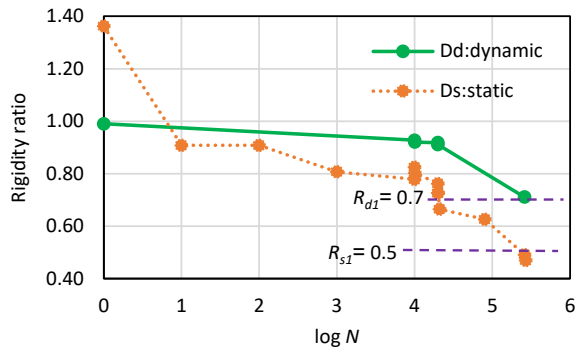


図-6 通算繰返し回数に伴うスラブ剛性の変化

4 セットでは剛性は大きく低下した。剛性の低下は、静的剛性で計算値に対して 0.47、動的剛性は同 0.71 となった。剛性低下を静的剛性で 0.5、動的剛性で 0.7 を許容しうる使用性能の限界レベル 1 と仮定し、 R_{s1} および R_{d1} として図中に示した。

3.4 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみは、4 辺の中央での固定端上端筋を対象として測定した。荷重初期では、ひび割れの発生が少ないため鉄筋ひずみの値は小さかったが、1-3 セットでは増大し、最終的にひび割れ断面計算値の 9 割程度となった。

4. 第 2 セット実験結果

4.1 第 2 セット概要

第 2 セットの結果を表-11 に示す。試験体スラブ A に

表-11 第2セット実験結果

試験体 繰返回数 載荷荷重 セット (kN)	A					B					C				
	δ_s^{*1} (mm)	δ_r^{*2} (mm)	δ_e/δ_o^{*3} (mm)	ε_s^{*4} (μ)	NVF (Hz)	δ_s^{*1} (mm)	δ_r^{*2} (mm)	δ_e/δ_o^{*3} (mm)	ε_s^{*4} (μ)	NVF (Hz)	δ_s^{*1} (mm)	δ_r^{*2} (mm)	δ_e/δ_o^{*3} (mm)	ε_s^{*4} (μ)	NVF (Hz)
1	1.37	0.36	0.54	583	68	2.28	0.93	0.40	999	62.3	1.6	0.45	0.47	541	74.8
100	2-1 24.5					2.76	1.11	0.33	1118		2.34	0.68	0.33	816	
10000						3.73	1.42	0.24	1331		2.44	0.78	0.33	834	
50000						1.7	0.31	0.39	552	68.4	4.25	1.71	0.21	1397	60.8
250001	2-2 24.5					2.61	0.81	0.30	1616	68.4	5.71	2.67	0.18	1512	44.8
300000						2.7	1.09	0.34	1035	63.3	6.28	3.01	0.17	1483	45.3
500001	2-3 24.5					2.77	1.07	0.32	2897	63.3	6.54	3.09	0.16	1452	41.5
550000						2.81	1.13	0.32	2475	62.8	6.71	3.29	0.16	1305	41.2

*1 載荷位置 1 でのスラブ全たわみ, *2 残留たわみ *3 $\delta_e = \delta_s - \delta_r$, δ_o : たわみ計算値, *4 鉄筋ひずみ

加え、B、C の3体で繰返し載荷を行った。載荷は中央1点 (24.5kN) と、中央を挟む2点同時 (24.5kN×2) での繰返し載荷を行った。繰返し回数 25 万回までで一巡し、さらに 50 万回までで二巡した。最後に中央1点で 55 万回まで載荷した。スラブ A は、通算 82 万回となる。いずれの試験体も局部、全体とも疲労破壊は見られなかった。

4.2 スラブたわみ

図-7 に繰返し回数に伴うスラブたわみの変化を示す。スラブ B および C のたわみは、乾燥収縮拘束応力の影響により、初載荷からひび割れが発生し、大きなたわみを生じた。同時に残留たわみも大きな値を示した。第1セットの残留たわみを加算したスラブ A の全たわみ $A\delta_s$ は、ひび割れの増加に伴い 2-2 セット終了(通算 57 万回)まで増加を続けたが、その後安定状態となった。最終たわみは 4.01mm で、弾性計算値 δ_o の 7.35 倍となった。プレストレスを導入したスラブ C は、スラブ B に比しやや性能の改善がみられたが、全たわみは、最終で $B\delta_s$ で 6.71mm、 $C\delta_s$ 5.26mm となり、それぞれ弾性計算値の 12.3 倍、9.65 倍と極めて大きくなった。また、荷重除荷時の残留たわみ δ_r も、2.00mm~3.00mm と大きくなった。

4.3 剛性変化

図-8 に、各スラブの静的剛性 D_s と動的剛性 D_d の変化を示す。スラブ B および C の初期剛性は、いずれも初期から計算値比 0.5 以下と大きく下回る値となった。スラブ A も静的剛性が引き続き低下した。プレストレスが導入されたスラブ C は、動的剛性の低下が比較的小さかった。使用上問題となる剛性低下の第2限界レベルを、計算値比静的剛性で 0.25、動的剛性で 0.5 と仮定して図中に示した。スラブ B、C は、スラブ C の動的剛性を除き、実験値は早期にこの値以下となった。

4.4 鉄筋ひずみ

図-9 に鉄筋ひずみの変化を示す。スラブ B では、早

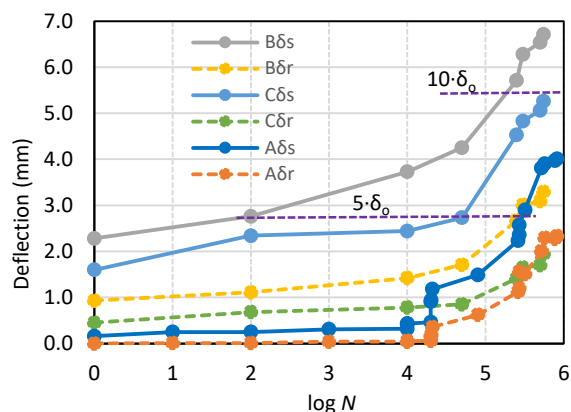


図-7 第1・2セット通算スラブたわみの変化

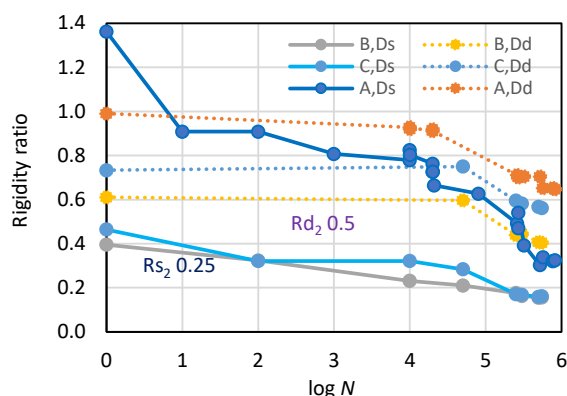


図-8 第1・2セット通算スラブ剛性の変化

期に計算ひずみ ε_e を超え、その後 1500 μ 程度で推移した。スラブ C は、プレストレスの効果により、計算ひずみ程度で推移した。一方、スラブ A は、第2セットでひずみが増大し、最終的に降伏相当ひずみを大きく超えた。

4.5 スラブのひび割れ状況

図-10 にスラブ A の最終ひび割れ状況を示す。ひび割れは全9点の載荷終了時の繰返し回数 25 万回以降急増し、スラブ上面では梁に沿って内接円状に、下面では

スラブ中央から放射状にひび割れが発生した。スラブに生じる曲げ応力に対応しているが、通常の荷重に比べ低い荷重で、かなり多数のひび割れが生じており、繰返し荷重の影響が顕著に表れている。スラブ B, C も同様であったが、乾燥収縮拘束応力によるひび割れも見られ、ひび割れ幅もやや大きかった。

5. まとめ

実験は、鉄筋に生じる引張応力は降伏応力の0.7以下、コンクリートの曲げ引張応力は引張強度以上曲げ強度以下の条件で、スラブ各点を万遍なく繰返し荷重し、鉄筋コンクリート造スラブの特性を調べた。

- 1) 繰返し荷重により、スラブの使用性に対する性能は著しく低下した。一方、荷重伝達ができなくなるまでの損傷には至らなかった。
- 2) 繰返し荷重により、スラブ使用上に大きな問題となる著しい剛性低下が生じた。更に、大きな収縮拘束応力が生じる場合、より大きく剛性低下した。
- 3) 鉄筋応力は、繰返し荷重荷重により増大し、スラブ A では降伏相当ひずみに達した。スラブでは、ひび割れの進展により荷重の伝達経路が均一でなくなることが考えられる。
- 4) 固有振動数は、静的剛性と相関して大きく低下した。プレストレスを導入したスラブ C は、やや改善効果がみられた。
- 5) スラブの使用性能確保の観点から、繰返し荷重による応力が長期設計応力に相当する場合では性能低下が著しく、また、乾燥収縮拘束応力の影響も極めて大きいことから、これらの検討・低減が必要と考えられる。

謝辞：本論文に関し東急建設技術研究所に謝意を表します。

参考文献

- 1) 浦島康希, 千々和伸浩, 田中大介, 上條崇：低弾性材料で上面増厚補強を施した RC 床版の疲労寿命への水の影響に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.1057-1062, 2024
- 2) 喜多雄士, 山下恭敬, 渡邊晋也, 菊地新平：上床版厚が不足した RC 中空床版橋の疲労破壊に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp. 829-834, 2024
- 3) Shi, X. P., Fwa, T. F., Tan, S. A., : Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete, ACI Material Journal, Title no.,

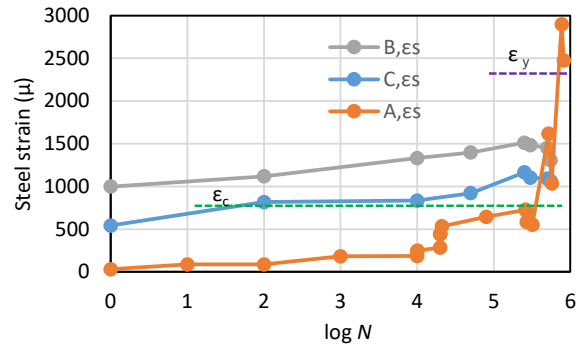


図-9 第1・2セット通算鉄筋ひずみの変化

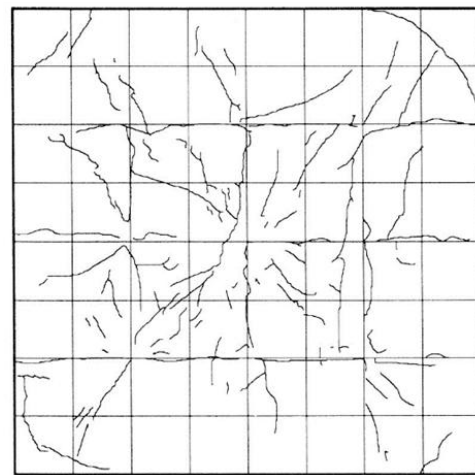
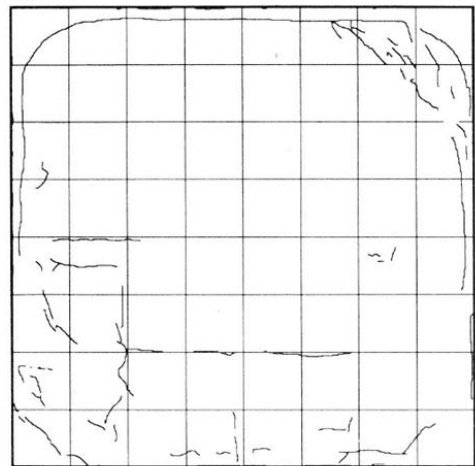


図-10 スラブ上下面ひび割れ状況

- 90-M46, pp.435-440, Sept.-Oct.,1993
- 4) 山本俊彦：鉄筋コンクリート造スラブに生じる乾燥収縮拘束応力とその影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp. 1063-1068, 2024
- 5) CEB-FIP: Model Code 1990, London, Thomas Telford, 1990