

連続合成桁中間支点部における合成床版の動的載荷試験

Dynamic Loading Test of Composite Slab on Intermediate Support of Continuous Composite Girder

櫻井信彰*¹, 中山逸人*¹, 松井繁之*²

Nobuaki Sakurai, Hayato Nakayama, Shigeyuki Matsui

*¹新日鉄エンジニアリング株式会社 技術開発研究所 建設・鋼構造技術室 (〒229-1131, 相模原市西橋本 5-9-1)

*²大阪工業大学 八幡工学実験場 構造実験センター (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地)

For verification of the serviceability of steel-concrete composite slabs on intermediate supports of continuous composite girders, static loading tests are usually used. But the tests for the composite slabs using transverse rib are apt to develop larger width of concrete cracks than the allowable width, because concrete cracks concentrate at the position of ribs due to weak bond between concrete and the ribs. This report shows a verification of serviceability of this area using dynamic loading test. The dynamic loading test makes the intervals of cracks approximate to the pitch of main reinforcements. Therefore width of crack becomes smaller than the ones in the static loading test.

Key words: steel-concrete composite slab, continuous composite girders, intermediate supports, concrete cracking, dynamic loading test

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版は、道路橋示方書¹⁾に規定されている床版に関する要求性能である「活荷重に対して疲労耐久性を損なう有害な変形が生じないようにする」ことを満足できることを照査する必要がある。この要求性能の照査法の一つとして、連続桁の中間支点部において有害なひび割れが生じないことが挙げられる。

このことに関する実験的照査法として、桁と床版を一体化した実物大の負曲げ試験を行い、橋軸方向の鉄筋応力度をある制限値以内に収めると有害なひび割れが発生せず、RC床版と同程度のひび割れ幅となることを、静的漸増載荷試験にて確認するのが一般的である^{2)~4)}。

これらの既往の研究では、ひび割れ発生荷重、設計荷重(鉄筋応力が100MPa程度となる荷重)、許容荷重(鉄筋応力が140MPa程度となる荷重)の3ステップ程度の荷重を1, 2回繰り返した後に、鉄筋あるいは主桁上フランジが降伏応力度に達するまで載荷し、断面の平面保持状態、ひび割れ性状について考察している。

この方法で行った試験結果を概観すると、筆者らが対象とするような形鋼などからなるリブ付き合成床版タイプは比較的ひび割れ間隔が大きく、ひび割れ幅も大きくなっているようである。これは、リブ直上付近のコンクリートに応力が集中してそこがまずひび割れ、そのひび割れ箇所が支配的になって分散が進んでいかないことに起因すると思われる。

実橋梁においては、このような静的載荷で中間支点に集中荷重がかかるのではなく、移動する動的荷重の効果を受けるため、配力鉄筋によるひび割れ分散効果が現れて、リブ位置中間にもひび割れが発生することが予想される。

そこで、本試験検討では、まず既往の研究と同様の静的載荷試験を行った後に、若干回数の動的載荷試験を行い、ひび割れ分散性を検証することとした。

2. 試験概要

2.1 試験供試体

実験供試体および載荷状態については、中間支点部の床版ひび割れ性状に関する既往の研究成果²⁾を参考に設定し、RC床版および他の構造形式の鋼コンクリート合成床版との比較を容易にした。

(1) 実験供試体

実験供試体形状は図1に示すように、中間支点部付近のI形鋼付き合成床版(以下、I形鋼合成床版)を有する実物大部分模型を用いた。なお設計にあたっては以下の点に留意している。

- 床版支間 6.0m の I 形鋼合成床版を用いた支間長 55m の連続合成桁の中間支点前後 10m に着目
- 床版厚 260mm を有する幅 1,200mm の I 形鋼合成床版と桁高 1,000mm の主桁とを頭付きスタッドにより結合
- 床版コンクリート部は設計基準強度 30N/mm²で収縮補償の膨張コンクリート(膨張剤添加量 20kg/m³)を使用
- 床版の上側配力鉄筋の鉄筋比は、使用鉄筋径 ≤ D22, 最小鉄筋間隔 ≥ 100mm とした場合の最大鉄筋量である 1.5% (ハンチ部, 底鋼板を無視した断面: 1,200 × 260 に対する値)
- 筆者らが対象とする I 形鋼合成床版の底鋼板継手は一般部が HTB 引張接合, 中間支点部は施工誤差吸収を考え HTB 摩擦接合としているので、実構造に合わせた 2 種類の継手構造を再現

(2) 荷重状態

図2に示すように、床版部が下になるように供試体を反転し、中央部に1点荷重した。試験は、新日鉄エンジニアリング(株)相模原技術センター第3実験棟で実施した。図3に荷重状況を示す。

2. 2 荷重方法

荷重方法を、以下に記す。

Step1) 静的荷重

鉄筋ひずみが弾性範囲内において、以下の状態を想定した荷重を漸増荷重した。

- ・ 床版コンクリートひび割れ荷重 (200kN)
- ・ 設計荷重 (700kN)
- ・ 許容荷重 1 (1,000kN)
- ・ 許容荷重 2 (1,450kN)

ここで許容荷重 1 とは中間支点位置の鉄筋ひずみが許容応力度レベル (700 μ) になる荷重で、許容荷重 2 とは曲げひび割れ幅の量を調べる中間支点から 1m 離れた位置にある鉄筋ひずみが許容応力度レベルに達する荷重をいう。

Step2) 動的荷重

実橋での活荷重によるコンクリートのひび割れ性状を調べることを目的として、以下の状態を想定して変位制御荷重した。

- ・ 一般的な橋梁における活荷重による鉄筋ひずみ (320 μ) を上限荷重とする振幅で 500 回
- ・ Step1 における設計荷重による鉄筋ひずみ (480 μ) を上限荷重とする振幅で 500 回
- ・ Step1 における許容荷重 1 による鉄筋ひずみ (620 μ) を上限荷重とする振幅で 1000 回

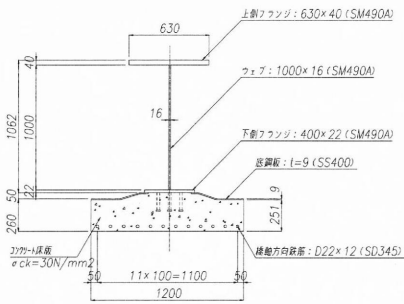
なお、各状態の荷重下限値は試験設備の制約より鉄筋ひずみが 40 μ に達する荷重とし、各状態の荷重上限値は Step1 における鉄筋の残留ひずみ約 80 μ を考慮した。

Step3) 静的荷重

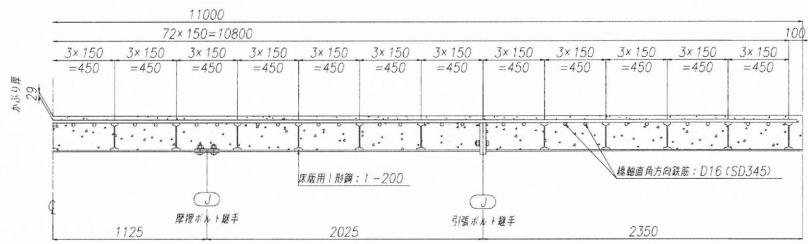
コンクリートのひび割れによる剛性低下の影響を観るため、Step1 の各状態における荷重までを荷重・除荷した。

Step4) 静的荷重

Step3 に引き続き、主桁上フランジ降伏荷重まで荷重した。



(a) 合成断面



(b) 合成床版部の詳細 (橋軸方向)

図1 実験供試体形状

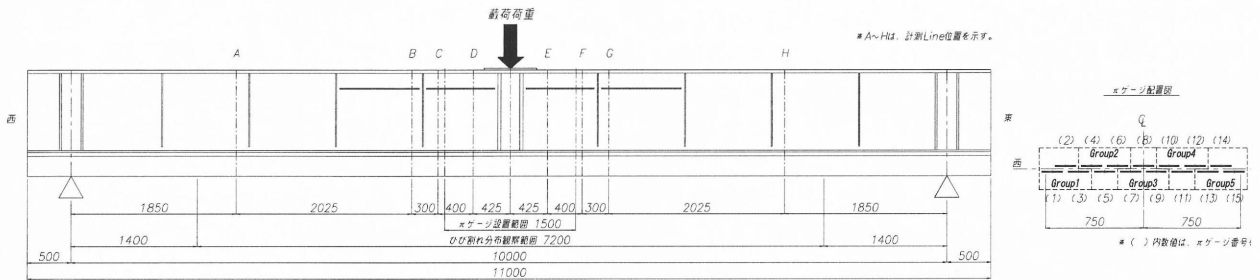
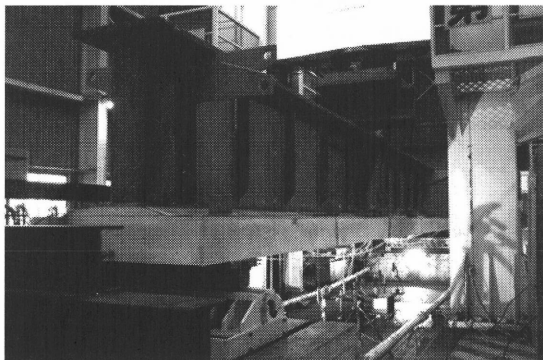


図2 荷重図およびゲージ配置図



静的荷重



動的荷重

図3 荷重状況

3. 試験結果

3. 1 静的載荷における合成断面の挙動

Step1 と Step3, 4 の実験結果から、表 1 に断面構成別の断面諸元、図 4 に荷重- 中央鉛直たわみ関係、図 5 に荷重- 中立軸関係、図 6 に断面ひずみ分布、図 7 に荷重- 添接板ずれ量関係を示す。これらの図には、表 1 に示す断面諸元の理論値を図示している。

Step1 と Step3 の許容荷重 $2 = 1, 450\text{kN}$ までの挙動は、

Step3 では低荷重域においてすぐに引張コンクリート無視の状態に移行する以外は、Step2 の動的載荷を経ても、差異は見られなかった。底鋼板の添接板がずれ始めた載荷荷重=2000kN(設計荷重の約 2.9 倍、許容荷重の約 2 倍)で剛性を若干落とし始める。

しかし、Step4 除荷時の剛性に着目すると、上フランジ降伏後の剛性は、鋼桁+鉄筋+底鋼板の剛性と鋼桁+鉄筋の剛性の間に位置しており、鋼桁+鉄筋+底鋼板

表 1 断面構成別の断面諸元

断面構成		全断面有効	鋼桁+底鋼板+鉄筋	鋼桁+鉄筋	鋼桁のみ
形状					
I (m ⁴)		0.02849	0.01583	0.01292	0.00897
y (mm)		804.4	531.7	449.8	367.9
Z (m ³)	下フランジ	0.03728	0.03219	0.03153	0.02736
	上フランジ	0.12094	0.03114	0.02189	0.01335
	底鋼板	0.09977	0.02835	0.02018	0.01242
	上側鉄筋	0.05401	0.01978	0.01465	0.00931

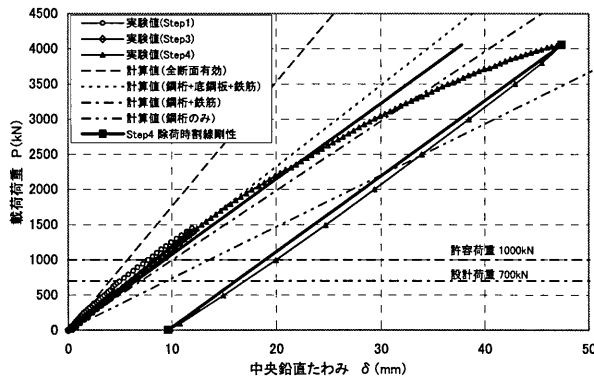


図 4 荷重- 中央鉛直たわみ関係

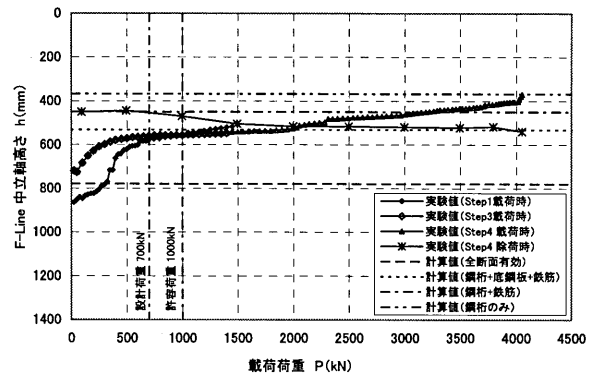


図 5 荷重- 中立軸関係

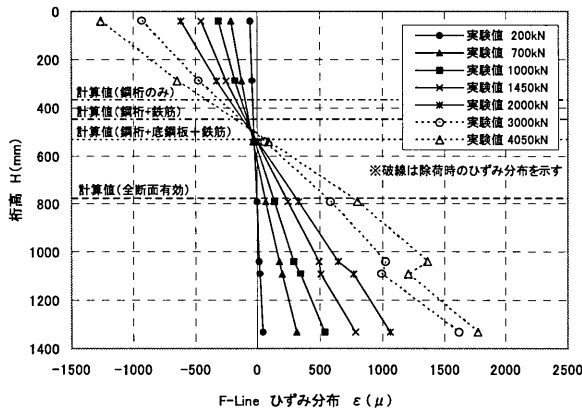


図 6 断面ひずみ分布

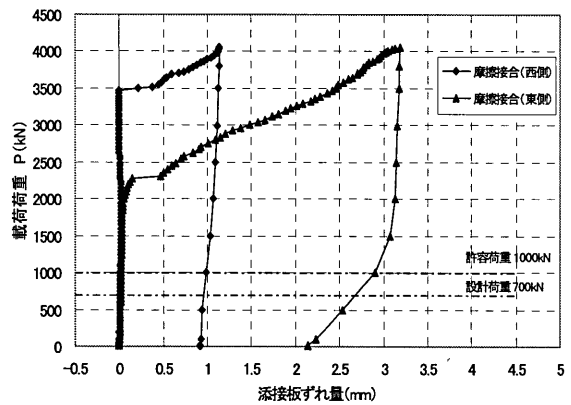


図 7 荷重- 添接板ずれ量関係

の剛性の約9割を保持している。

このことは、今回検討したI形鋼合成床版は、主部材のI形鋼を底鋼板に溶接したため、I形鋼間のコンクリートがひび割れ後も拘束され、結果としてスタッ

ド列前面あるいは後面で幅方向にひび割れが発生しにくくなり、スタッドのずれ変形が小さく保持され、底鋼板と上フランジの間で橋軸方向のずれが拘束されたためと考えられる。

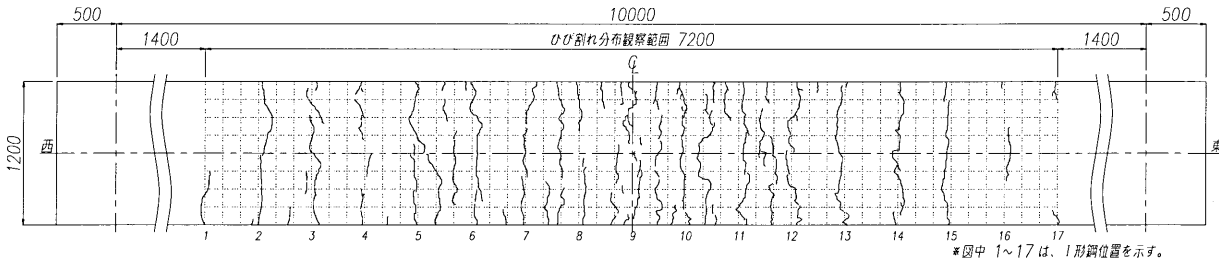


図8 ひび割れ分布図 (Step1: 静的載荷後)

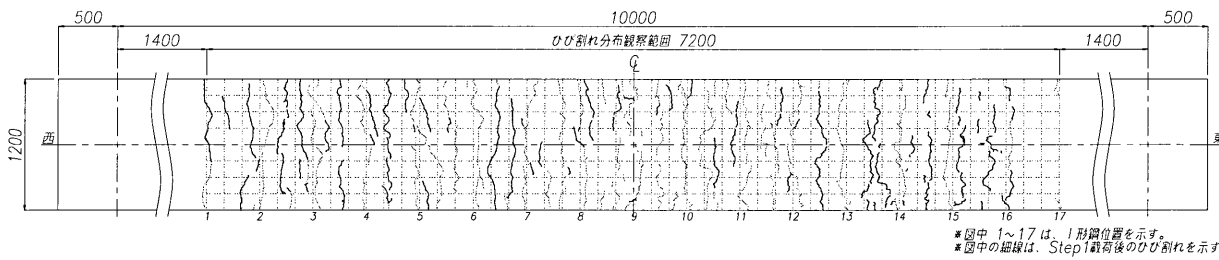


図9 ひび割れ分布図 (Step2: 動的載荷後)

表2 Step1: ひび割れ間隔 (I形鋼位置6~12領域)

本数	床版幅方向位置 (mm)					平均間隔 (mm)
	0	300	600	900	1200	
1	246	370	403	410	553	
2	146	217	294	274	168	
3	209	118	487	188	167	
4	77	187	133	370	212	
5	215	307	203	280	168	
6	239	138	206	189	69	
7	96	138	139	232	233	
8	295	247	382	175	192	
9	107	223	133	122	286	
10	143	306	62	137	104	
11	148	203		255	148	
12	85	215			208	
13	268				248	
14	222					
15	205					
16						
17						
18						
19						
20						
平均	180	222	244	239	212	220
本数	15	12	10	11	13	12

表3 Step2: ひび割れ間隔 (I形鋼位置6~12領域)

本数	床版幅方向位置 (mm)					平均間隔 (mm)
	0	300	600	900	1200	
1	346	101	150	164	346	
2	150	180	143	117	168	
3	97	108	113	129	167	
4	146	216	117	272	56	
5	209	118	179	189	155	
6	77	187	180	96	168	
7	215	307	311	173	69	
8	136	138	133	97	236	
9	102	138	205	262	192	
10	96	247	203	106	95	
11	295	219	140	130	192	
12	107	57	128	221	104	
13	143	257	135	171	148	
14	148	205	117	123	208	
15	85	146	133	137	248	
16	268	253	119	163		
17	222		112			
18	205					
19						
20						
平均	169	180	154	159	170	166
本数	18	16	17	16	15	16

表4 Step1: ひび割れ間隔 (I形鋼位置1~6, 12~17領域)

本数	床版幅方向位置 (mm)					平均間隔 (mm)
	0	300	600	900	1200	
1	391	453	421	321	456	
2	57	381	495	96	383	
3	252	67	367	348	449	
4	261	392	82	403	245	
5	366	469	247	316	177	
6	211	182				
7	250	158				
8	157					
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
1'	425	366	416	379	178	
2'	412	542	445	537	255	
3'	441	329	458	396	440	
4'	927		539		386	
5'					476	
6'					449	
7'						
8'						
9'						
10'						
11'						
12'						
13'						
14'						
15'						
平均	346	334	386	350	354	354
本数	12	10	9	8	11	10

表5 Step2: ひび割れ間隔 (I形鋼位置1~6, 12~17領域)

本数	床版幅方向位置 (mm)					平均間隔 (mm)
	0	300	600	900	1200	
1	293	320	352	124	200	
2	99	127	120	197	107	
3	57	150	107	206	149	
4	252	165	209	119	185	
5	261	65	105	120	198	
6	186	67	119	81	219	
7	180	209	123	96	132	
8	211	190	267	146	100	
9	250	218	116	191	245	
10	82	251	232	77	177	
11	77	185	82	111		
12		158	247	190		
13				39		
14				129		
15				186		
1'	210	193	258	173	178	
2'	215	180	131	165	255	
3'	157	265	215	341	263	
4'	67	54	111	187	177	
5'	188	216	119	229	225	
6'	246	172	153	167	160	
7'	194	65	161	66	476	
8'	276	95	144	322	449	
9'	223	149	132	163		
10'	425	212	222			
11'			185			
12'						
13'						
14'						
15'						
平均	198	168	170	159	216	182
本数	21	22	23	24	18	22

3. 2 静的および動的載荷でのひび割れ性状の比較

図 8, 図 9 に Step1 静的載荷時および Step2 動的載荷時のひび割れ分布図を, 表 2, 表 3 に載荷点近傍である I 形鋼位置 6~12 の領域の Step1 および Step2 のひび割れ間隔を示す. また, 表 4, 表 5 に I 形鋼位置 1~6 ならびに 12~17 の領域の Step1 静的載荷時および Step2 動的載荷時のひび割れ間隔を示す.

まず, I 形鋼位置 6~12 の領域に着目すると, Step1 の静的載荷時のコンクリートのひび割れは, 設計荷重レベル (載荷荷重: 700kN) では I 形鋼位置に発生し, 許容荷重レベル (載荷荷重: 1000kN) ではその間にも分散して発生した. その際の平均ひび割れ間隔は 220mm であった.

Step2 の動的載荷によってコンクリートのひび割れにそれほどの変化は見られなかったが, 平均ひび割れ間隔は 220mm から 166mm へと狭まり, そのひび割れ間隔は鉄筋間隔に近くなった.

次に, I 形鋼位置 1~6 ならびに 12~17 の領域に着目すると, Step1 の静的試験の際には I 形鋼直上付近以外にほとんどひび割れが発生していないが, Step2 の動的載荷の際には I 形鋼間にひび割れが分散して発生しており, 平均ひび割れ間隔は 354mm から 182mm へと変化しており, 応力レベルの高い I 形鋼位置 6~12 と同等のひび割れ間隔になっている. Step2 の動的載荷の最大荷重による I 形鋼位置 6 の鉄筋ひずみは, Step1 の静的載荷の設計荷重による載荷点直下の鉄筋ひずみと同一レベルである.

また, 図 10 に Step1 の静的載荷時の荷重-ひび割れ

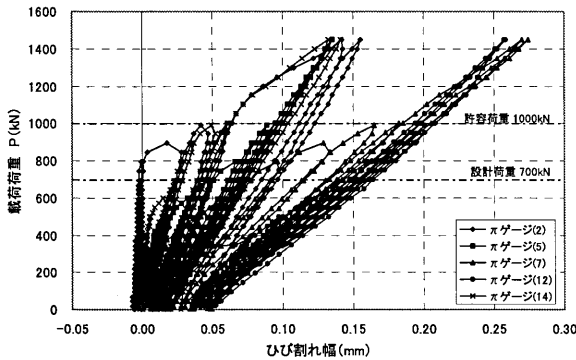


図 10 荷重-ひび割れ幅関係 (Step1: 静的載荷時)

表 4 最大ひび割れ幅 (Step1: 静的載荷後)

πゲージ番号	許容荷重時最大ひび割れ幅 (mm)
2	0.123
5	0.100
7	0.205
12	0.208
14	0.104
平均	0.148

幅関係, 表 4 に許容荷重時での最大ひび割れ幅を, 図 11 に Step3 静的載荷時の荷重-ひび割れ幅関係, 表 5 に許容荷重時での最大ひび割れ幅を示す. なお, Step3 の荷重-ひび割れ関係および最大ひび割れ幅の表において, Step1 終了後の残留ひび割れ幅を加算して評価するものとした.

ひび割れ間隔の推移からすると, 動的載荷試験によりひび割れ間隔が小さくなったことに伴い, ひび割れ幅も小さくなることが期待されたが, πゲージを設置した支点上付近は Step1 の試験の際に I 形鋼周辺およびその中間に入ったひび割れに支配されて分散が進まなかったために, 結果として, 許容荷重 2 (1,450kN) の平均ひび割れ幅は, Step1 の 0.148mm から, 0.151mm へと推移した. ただし, ここで残留ひび割れ幅として考慮しているのはπゲージの数値なので, 実際の残留ひび割れ幅はこれより小さく, 結果として平均ひび割れ幅も若干小さくなったことは推察される.

これらより, 鉄筋ひずみが同じレベルであっても静的載荷によるひび割れ分散の性状と動的載荷によるひび割れ分散の性状は異なり, 実橋梁における挙動を考慮した動的載荷によってひび割れが分散し, ひび割れ幅がより分散することが分かった. また, 動的載荷の場合は設計荷重レベルなどの低荷重で, 静的漸増載荷で高荷重まで載荷した場合と同等の間隔でひび割れが発現したことを考えると, 最初から動的載荷のみを行えばひび割れ幅も, ひび割れ間隔が小さくなるにつれて小さくなることも推測できる. したがって, 動的載荷による設計荷重レベルの繰返し載荷をある程度行え

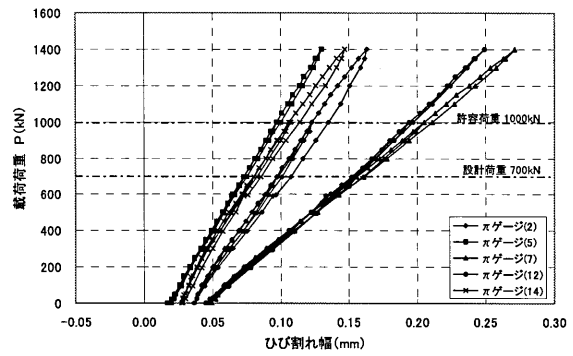


図 11 荷重-ひび割れ幅関係 (Step3: 静的載荷時)

表 5 最大ひび割れ幅 (Step3: 静的載荷後)

πゲージ番号	許容荷重時最大ひび割れ幅 (mm)
2	0.135
5	0.100
7	0.211
12	0.197
14	0.114
平均	0.151

ば、静的載荷により許容荷重レベルなどに荷重を上げて評価しなくてもひび割れ分散の性状を確認できるといえる。

なお、Step1 の静的載荷におけるひび割れ幅は、供用性能の一つの指標であるコンクリート標準示方書⁵⁾のひび割れ幅許容値=0.2mm 以下に抑えられており、I 形鋼合成床版のひび割れ制御は十分に行えると考えられる。

また、Step1 の静的載荷におけるひび割れ幅とひび割れ間隔の結果を、RC 床版および他の構造形式の鋼・コンクリート合成床版のひび割れ性状に関する既往の研究成果²⁾に照らし合わせると図 12、図 13 のようになり、概ね他の床版と同等のひび割れ性能を有していることが確認できた。

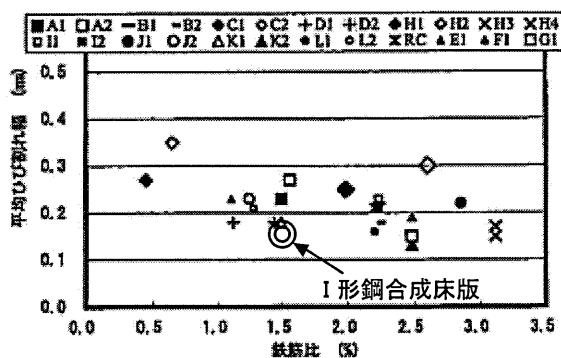


図 12 鉄筋比とひび割れ幅の関係（鉄筋応力 137MPa）

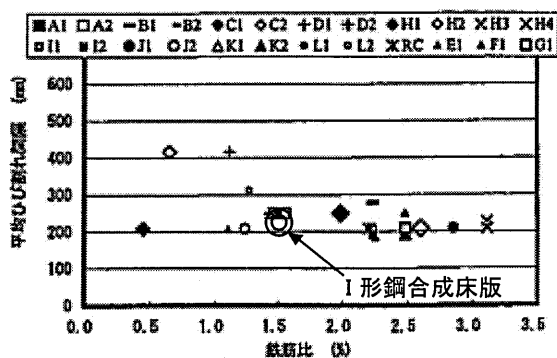


図 13 鉄筋比とひび割れ間隔の関係（鉄筋応力 137MPa）

4. まとめ

鋼・コンクリート合成床版の供用性能確認の一つとして行う連続桁中間支点部の負曲げ試験において、動的載荷を追加して検討し、得られた結論は以下の通りである。

- Step1 の静的載荷の結果としては、設計荷重レベルでは主部材である I 形鋼直上付近にひび割れが発生し、許容荷重レベル程度まで荷重を上げて行かない限り I 形鋼間に配置されている鉄筋位置に分散していかないものの、平均ひび割れ幅は許容値以内であった。
- Step2 の動的載荷を行っても、Step1 の静的試験でひび割れが発生した中間支点部付近では、ひび割れの分散はそれほど変化しなかった。
- Step2 の動的載荷では、静的載荷の際には応力レベルが低くひび割れが発生しなかった供試体支点側にひび割れが発生し、そのひび割れ間隔は鉄筋間隔に近くなる。つまり、設計荷重レベルの繰返し載荷をある程度行えば、容易にひび割れ分散が起こり、安定したひび割れ性状が確認できる。
- Step3 の静的載荷は、Step2 の動的載荷を経た後にも、Step1 の静的載荷と、荷重-変位関係、荷重-ひずみ関係に差異は見られなかった。
- 試験全工程を通じて、底鋼板、鉄筋などのひずみ分布は中立軸からの距離に比例しており、底鋼板は有効に機能していた。

以上より、合成床版の連続桁中間支点部のひび割れ性状について、既往の試験方法でも十分安全側の結果が得られるものの、I 形鋼合成床版のようなリブ付き合成床版の場合には、本試験のような動的効果を再現した試験の方が供用性能の確認としては実態を再現したものと言える。

ただし、本実験においては、設計荷重、許容荷重を上限として 1,000 回程度載荷してみただけであるので、応力振幅、くり返し数を実橋の状態に照らしてどの程度に設定するかなどが今後の検討課題となろう。

参考文献

- 1) 道路橋示方書 II 鋼橋編, (社)日本道路協会, H14.3
- 2) 村山ら: 合成床版を有する合成桁の中間支点部負曲げ実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会, H13.10
- 3) 木水ら: 連続合成桁における合成床版のひび割れ性状に関する実験, 土木学会構造工学論文集 Vol.48A, H14.3
- 4) 例えば, 鈴木ら: ADS 床版を用いた連続合成桁中間支点部静的負曲げ試験, 東骨技報 No.52, H18.
- 5) コンクリート標準示方書 [構造照査編], (社)土木学会, H14.3