

合成床版に用いられる鋼板—鉄筋溶接継手部の疲労強度

Fatigue strength of the welded joint between steel plate and steel reinforcement in steel-concrete composite decks

館石和雄*, 大田孝二**, 鈴木清***

Kazuo TATEISHI, Koji OHTA and Kiyoshi SUZUKI

*工博, 東京大学助教授, 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

** 工博, 大和設計 (株) (〒135 東京都江東区佐賀 1-1-3)

***工修, (株) ダイクレ技術本部 (広島県呉市築地町 1-24)

In steel-concrete composite bridge decks, steel beams and steel reinforcements are placed longitudinally or transversally. At the intersection between steel beam and steel reinforcement, welding is sometimes provided in order to fix the position of reinforcement during construction period. In this study, fatigue strength of the welded joint between steel plate and steel reinforcement was investigated experimentally. The test results showed that this type of welded joint had relatively high fatigue strength and could be categorized into D class in JSSC codes, because welding residual stress around the welded part and geometrical stress concentration was small.

Key Words: steel-concrete composite slab, welded joint, fatigue

キーワード: 鋼・コンクリート合成床版, 溶接継手, 疲労

1. はじめに

近年の鋼橋の合理化, 省力化の要請にもなっており, 従来よりも長支間の床版や架設の容易な床版などが求められるようになっており, 鋼・コンクリート合成床版はそれを満たす構造形式の一つとして数多く施工されるようになってきた。しかし床版は活荷重の影響を直接受ける部材であることから, その疲労特性については十分に注意を払う必要がある。そのため道路橋示方書²⁾においても, 鋼床版についてのみは, 早くから疲労を考慮した設計を行うことを規定してきた。鋼・コンクリート床版に関しても疲労による損傷の発生は十分に予想されるため, 比較的大型の試験体により疲労特性が検討されており, 特に最近の移動式輪荷重載荷装置などによる検討などで床版の疲労耐力には問題がないことを確認した上で実用に供されている³⁾。これらの実物モデルによる疲労試験では, その部材の疲労抵抗性能がある要求レベルを上回るか否かの検討は可能である。しかし近年, 様々なタイプの鋼・コンクリート合成床版の形式が提案されているが, それら一つ一つについてこのような検討を行うのは非効率である。また, これらの検討結果からは, 試験体を製作したときと異なる施工品質のものが部材に存在した場合の性能を予測することが難しい。これを可能にするためには疲労強度上弱点となり

得る箇所に着目し, その構造ディテールの応力性状, 疲労強度を詳細に把握しておくことが必要である。

鋼・コンクリート合成床版の中で疲労上弱点となり得るディテールの一つとして, 鋼板と鉄筋との間に施される溶接継手を挙げるることができる。この溶接は製作時から施工時にかけて鉄筋の位置を固定することを目的としたものであり, コンクリート打設後には不要となる溶接である。しかしこのような荷重伝達を期待しない溶接でも, 供用開始後にそれが疲労強度上の弱点となることは十分に考えられる。

鋼構造物の設計, 施工に関する指針類では, この種の溶接に関する記述はみられない。仮付け溶接長に関する規定はあるが, これは板どうしの溶接を想定したものであり, ここで着目するような点溶接は含まれていない。鋼構造分野でこの溶接に関する記述がないのは, そもそも鉄筋を扱う機会が少ないこと, 溶接性が保証されていない鉄筋に対する溶接施工を当初から想定していないことなどによるものと思われる。一方, コンクリート構造物の設計, 施工指針類では, 点溶接は原則として避けることされており, やむを得ない場合に行う場合の注意点などが記述されている。このように, いずれの分野においても鉄筋などに対する点溶接は想定していない, あるいは望ましくないものとされているが, 実際にはその需要は多く, 合成床版などの

表1 供試鋼材の機械的性質・化学成分

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000
鋼板	350	480	32	13	13	58	31	31
鉄筋	363	536	25	24	16	57	37	33

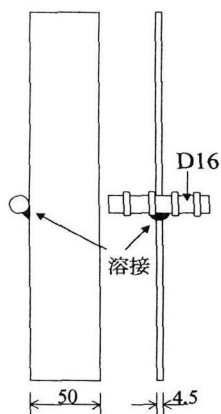


図1. 試験体の形状・寸法

合成構造物では特に使われる機会が多い。しかしその疲労強度に関しては検討が行われていないのが現状である。

そこで本研究では、鋼板と鉄筋の溶接継手に着目し、その疲労強度について実験的に検討することを目的としている。そのために鋼板—鉄筋の溶接継手試験体を作成し、疲労試験を行う。鋼板と鉄筋の溶接継手がいわゆる鋼部材の溶接継手部（各種疲労設計指針類に示されている継手等級分類に含まれている継手）と異なる点は、1）溶接時間が短く、また溶接サイズが小さいこと、2）溶接形状のばらつきが大きいと予測されること、3）溶接残留応力分布が通常の溶接継手と異なるとが予想されること、4）板と鉄筋の向きの組み合わせによって、溶接が3次元的形状となること、などがあげられる。これらの影響が疲労強度に与える影響を解明することを目的として、疲労試験および有限要素法による応力解析を行った。

2. 試験体および疲労試験方法

試験体の形状寸法を図1に示す。鉄筋が鋼板の側面に垂直に交差しており、その交差部に溶接を施している。これは例えばI型鋼格子床版などにみられる溶接継手を想定し、それを単純化したものである。使用した鋼材の機械的性質・化学成分を表1に、溶接条件を表2に示す。溶接は実際のI型鋼格子床版における溶接にできるだけ近い条件で行った。

疲労試験には動的最大能力±100kNの油圧サーボ式疲労試験機を用い、鋼板の端部を油圧チャックで固定して繰返し荷重を载荷した。载荷条件を表3に示す。応力比は0および0.5の2通りについて実施した。鉄筋の端部には拘束を与えておらず、自由な状態である。

本試験体では鉄筋が片側についているため、面内曲げに

表3. 载荷応力と疲労試験結果

No.	応力振幅 (MPa)	応力比 (R)	破断回数 Nf	備考
1	261.3	0.0	459,700	
2	261.3	0.0	341,300	
3	217.8	0.0	376,829	
4	217.8	0.0	411,619	
5	174.2	0.0	1,330,500	
6	174.2	0.0	3,554,100	
7	169.9	0.0	10,000,000	未破断
8	152.4	0.0	10,000,000	未破断
9	130.7	0.0	11,975,700	未破断
10	174.2	0.5	383,126	
11	130.7	0.5	1,572,607	
12	108.9	0.5	10,000,000	未破断

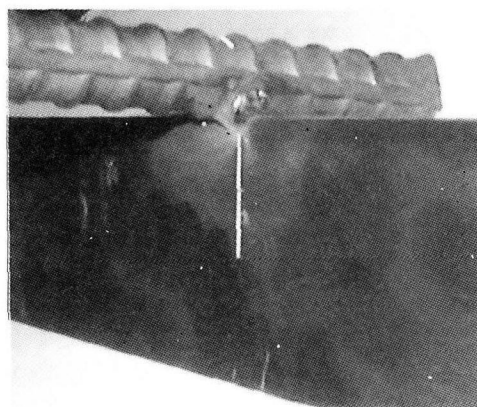


図2. 溶接形状

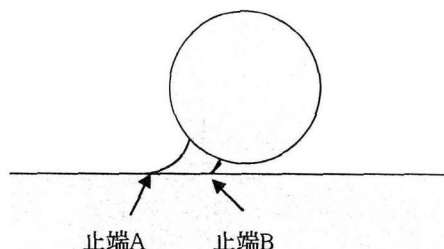
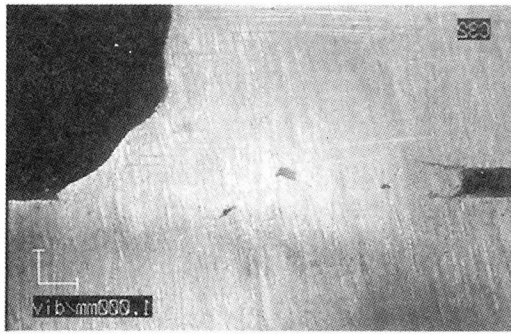


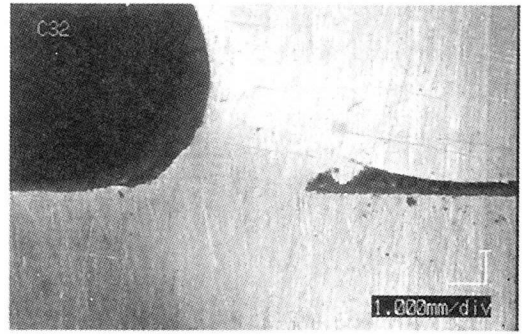
図3. 止端の記号

よって板の左右の縁で応力が異なることも考えられるので、両縁のコバ面にひずみゲージを貼り付け、応力測定を行った結果、左右の応力差は1%程度と小さかった。

3. 溶接形状

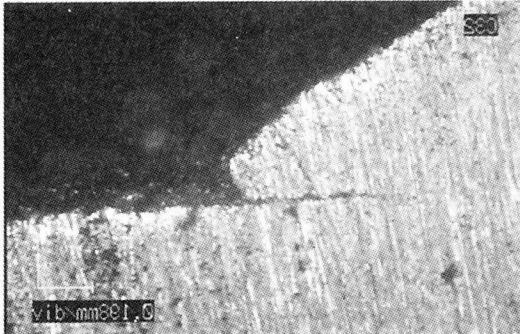


(a) 溶込みが深い例

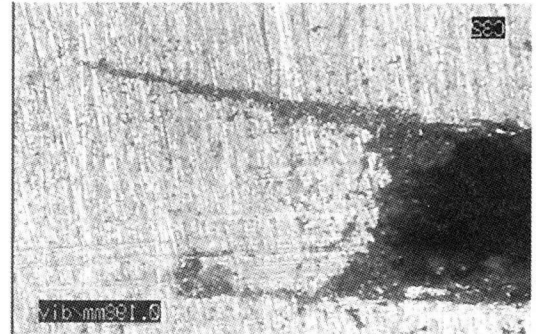


(b) 溶込みが浅い例

図4. 溶接部の形状



(a) 止端A



(b) 止端B

図5. 溶接止端部の詳細形状

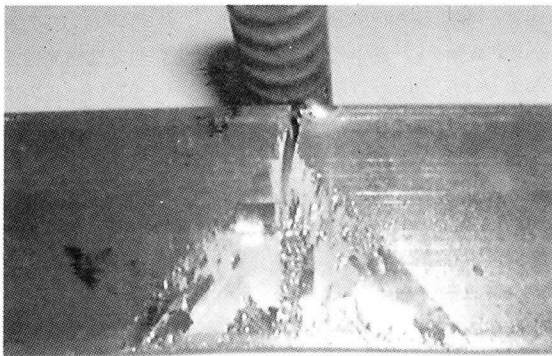


図6. 破壊状況

図2に溶接部の全体形状を示す。ここで対象とした鋼板—鉄筋の交点溶接部には鉄筋中心軸から遠い側の溶接止端と鉄筋中心軸に近い側の溶接止端部の2つがある。ここでは図3に示すように、便宜上、前者を止端A、後者を止端Bと呼ぶこととする。止端Aの溶接止端部については目視によってもその形状を観察することができるが、止端Bについては溶接が鉄筋と鋼板の交差部を中心にして鋼板を取り囲むように施されていることから外見から観察することは困難である。そこで一部の試験体について、カッターによって鉄筋を板厚程度まで短く切断し、さらにグラインダーで溶接部近傍を磨き出すことによって溶接部を露呈させた。図4に研磨によって露呈させた溶接部形状の例を示す。図に例示するように、試験体によって溶接部の

サイズは大きく異なっており、(a)では鉄筋の下側に十分に溶接金属が充填されているのに対し、(b)では溶接部が小さく、鉄筋の下側に比較的大きな空間が空いている。このように溶接部の形状は試験体ごとにばらつきが大きい。また、止端Aと止端Bを比較すると、止端Aでは鋼板と溶接部が比較的滑らかにつながっているのに対し、止端Bでは溶接金属と鋼板とが鋭角を構成しており、止端Aと比較して鋭い形状となっている。なお、図4(b)に示した溶接部の止端Bの曲率半径は0.12mmであった。

図4(a)に示した溶接部の止端A、B近傍の拡大写真をそれぞれ図5(a)、(b)に示す。止端Aでは溶接金属と鋼板との間に未溶着部と考えられるき裂状の欠陥が認められる。また、止端Bでは溶接金属と鋼板の間および溶接金属と鉄筋の境界部に同じく未溶着部と見られる欠陥が認められる。ただし欠陥の向きはいずれも荷重方向にほぼ平行であることから、鉄筋と鋼板の間に荷重伝達が生じない限りはこの欠陥の存在が疲労強度に与える影響はあまり大きくないものと考えられる。図4(b)に示した溶接部についてはこのような未溶着部は認められない。

4. 疲労試験結果

破断状況を図6に示す。一体を除くすべての試験体において、疲労き裂は止端Bから発生し、鋼板内に進展して最終的な破壊に至った。

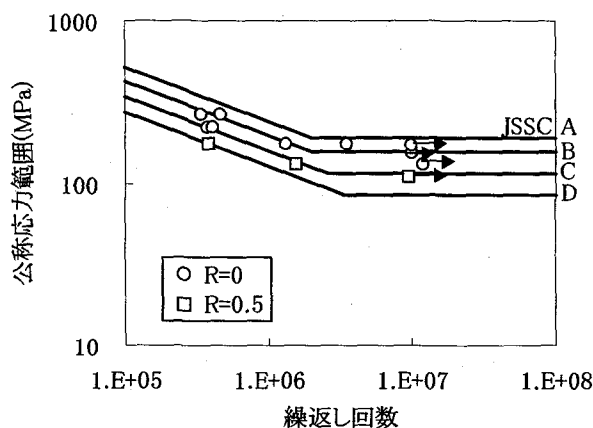


図7. 疲労試験結果

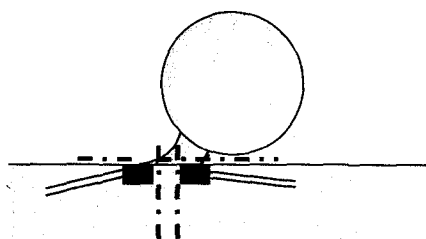


図8. 残留応力測定位置

疲労試験によって得られた試験体の破断寿命の一覧を表3に示す。1千万回を載荷しても破断しなかった試験体はその時点で試験を終了した。破断寿命を鋼板の公称応力範囲で整理した結果を図7に示す。応力比が0の場合、本試験データはほぼJSSC継手等級⁴⁾のC等級の強度曲線上にあり、D等級を満足していることがわかる。JSSCの継手等級分類でいえば、例えば止端仕上げなどの処理をしない突き合わせ溶接継手がD等級であり、ここでの継手はそれと同等の比較的高い疲労強度を有する結果となった。

応力比が0.5のシリーズでは、応力比が0のものと比較してJSSCの継手等級で一等級ほど疲労強度が低下している。一般に溶接部近傍には降伏応力と同等の高い溶接残留応力が生じるため、溶接継手の疲労強度に与える応力比の影響は非常に小さいとされているが、ここで対象とした継手では応力比によって疲労強度に差が認められた。よってこの点について詳細に検討するため、溶接部近傍の残留応力測定を行った。

5. 溶接残留応力の測定

図4にその溶接形状を示した試験体に対して、図8に示すように両止端近傍のできるだけ板縁に近い位置にひずみゲージ（ゲージ長1mm）を貼り付け、切断法によって残留応力の測定を行った。図の一点鎖線が切断線を示しており、ゲージを設置後、鉄筋を切断して除去し、さらにゲ

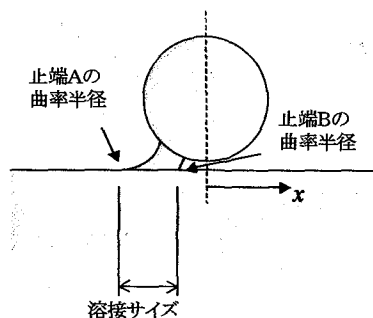


図9. 解析におけるパラメータ

表4 残留応力測定結果

溶接サイズが大きいもの		溶接サイズが小さいもの	
止端A	止端B	止端A	止端B
82 MPa	127 MPa	149 MPa	157 MPa

ージ近傍に切り込みを入れた。なお、ひずみゲージを設置したのは図4に示した状態、すなわち鉄筋を板厚程度まで切断した後であり、それによる残留応力の解放は考慮していないが、しかしその影響は小さいものと考えられる。

表4に残留応力の測定結果を示す。溶接サイズの大きい試験体（図4（a））の残留応力は溶接サイズの小さい試験体（図4（b））の残留応力と比較して小さめである。また、いずれの試験体でも止端Aの残留応力は止端Bのそれと比較して小さい。全体的に残留応力の値そのものは小さく、降伏応力の半分程度である。これは溶接時の入熱量が比較的小さいことによるものと考えられる。前節に示したように応力比が0.5の場合の疲労強度は応力比0の場合と比較して低下したが、これは溶接残留応力が降伏応力と比較して小さいことによるものと考えられる。また、この継手の疲労強度が比較的高かったことについても、残留応力が小さいことが原因の一つとして考えられる。

6. 有限要素解析

6-1. 解析条件

溶接部近傍の応力状態を詳細に解明することを目的として、有限要素解析を行った。解析には汎用有限要素解析プログラムCOSMOS/Mを使用した。鋼板-鉄筋溶接部は非常に小さい溶接であり、実際の施工条件を一定に保つのは困難である。そのため前に示したように、完成した溶接部の形状も様々である。しかしここでは、溶接部近傍の応力状態に与える溶接形状の影響の概略を把握するために、溶接部の形状を単純にモデル化して解析を行った。図9に解析におけるパラメータを示す。モデル化にあたって変化させたパラメータは、溶接サイズ、止端Aの止端半径、止端Bの止端半径であり、それぞれの値を表5に示す範囲で変化させた。これらの値は図4に示した溶接形状を参考にして決定したものである。なお、ここでのモデルは図4に示したような未溶着部が存在する

表5 解析に用いた値

溶接サイズ	2, 4, 6 mm
止端A半径	0.5 mm
止端B半径	0.1, 0.3, 0.5 mm

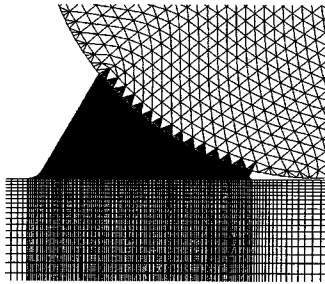


図10.要素分割図

場合は想定していない。

使用した要素は平板要素であり、ヤング率を 2.0×10^5 (MPa)、ポアソン比を 0.3 とし、平面ひずみを仮定して解析を行った。図 10 に解析モデルの一例を示す。止端形状を十分に再現できるように、最小要素寸法は 0.02mm とした。

6-2. 溶接サイズの影響

図 11 に解析により得られた応力分布を示す。図に示した応力は板の縁上における部材軸方向の応力であり、原点は図 9 に示すように鉄筋中心を通る位置としている。また縦軸は応力を公称応力で除した値、いわゆる応力集中係数で示している。3本の線は、止端A、Bの曲率半径をそれぞれ 0.5mm、0.1mm と固定し、溶接サイズを変化させたときの結果を示している。

いずれの溶接サイズの場合にも、止端A、Bの近傍では鋭い応力の増加が認められる。その極大値についてみると、溶接長が短くなるほど止端A、Bとも応力集中の程度は小さくなっている。よってこの結果からは、施工上必要な強度を確保でき、かつ溶接止端の曲率半径が著しく小さくならない程度で溶接の溶け込みはできるだけ小さい方が局部的な応力集中が小さく、疲労に対して有利であるといえることができる。

6-3 溶接止端形状の影響

疲労き裂は1体を除いたすべての試験体において止端Bから発生したことから、ここでは止端Bの応力に着目する。図 12 は止端Bの曲率半径を変化させた場合の応力集中係数の値である。当然のことながら曲率半径が大きくなると応力集中係数は低下している。曲率半径を 0.1mm と小さく見積もった場合においても応力集中係数は 3 に達していない。これはリブ十字継手⁹⁾や縦リブ継手¹⁰⁾について得られた値と比較すると小さい値となっている。このことより、この継手においては継手の全体形状によって決まる構

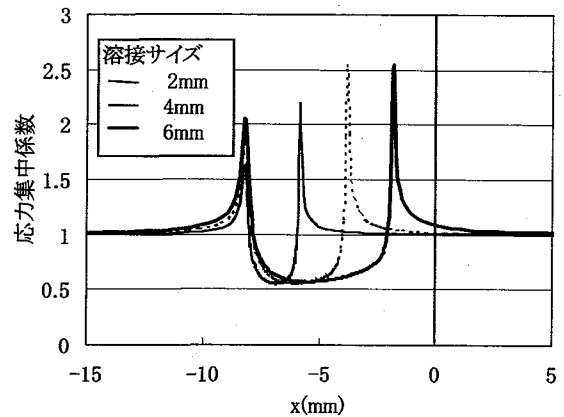


図11 応力分布(溶接サイズの影響)

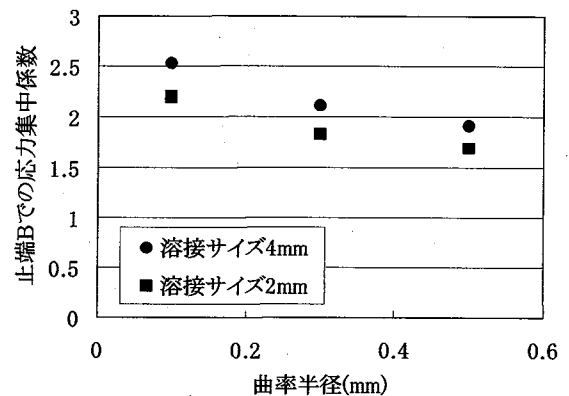


図12.止端Bの曲率半径の影響

造的な応力集中は比較的小さく、応力集中は溶接止端の微視的な形状に特に強く依存すること、溶接サイズが小さい方が応力集中が小さくなることが明らかとなった。

6. 結 論

合成床版に用いられる鋼板—鉄筋溶接継手部の疲労特性について、実験、解析により検討した。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 鋼板—鉄筋溶接継手部の疲労強度は、応力比が0の場合、JSSC設計指針のD等級を満足した。
- 2) 鋼板—鉄筋溶接継手部の疲労強度は、応力比が高くなると低下する傾向を示した。
- 3) 鋼板—鉄筋溶接継手部の残留応力は降伏応力と比較して半分程度であり、通常の鋼部材で用いられる溶接継手のそれと比較して小さい。
- 4) 鋼板—鉄筋溶接継手部の止端部近傍の局部応力は、溶接サイズが小さいほど小さくなる。よって、必要な強度を確保できる範囲で、できるだけ小さな溶接を施すことが望ましい。
- 5) 鋼板—鉄筋溶接継手部に生じる応力集中は、十字継手、縦リブ継手で生じる値と比較して小さい。ここで検討した範囲では、最大でも3を上回ることはなかった。

謝 辞

本研究の実施に当たり(社)鋼材倶楽部より助成金をいただきました。ここに記して深謝いたします。また、査読者の方からいただきました有用なご助言に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば園田恵一郎：土木分野における複合構造の最近の動向と研究状況，土木学会論文集，No. 556/I-38，1997.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994
- 3) 大田孝二，高木優任，鈴木清，松井繁之：I型格子床版の耐久性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.44A，1998.
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993
- 5) 後川理，中山英治：溶接継手部の応力集中係数：石川島播磨技，Vol.23，No.4，1983
- 6) 館石和雄，慶甲秀，町田文孝，三木千寿：高張力鋼すみ肉溶接継手部の疲労強度の溶接材料依存性，土木学会論文集，No. 543/I-36，1996.

(1999年9月17日受付)