(4) 樹脂ブロック補強による 隅肉溶接継手の疲労強度向上

杉浦 江1・小出 宜央2・安森 浩3・加藤 健3

¹正会員 川崎重工業株式会社 技術研究所 強度研究部 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1-1) E-mail:sugiura hiro@khi.co.jp

²正会員 川崎重工業株式会社 営業推進本部 市場開発部 (〒105-6116 東京都港区浜松町2-4-1) E-mail:koide n@khi.co.jp

³正会員 KDDI株式会社 au建設本部 設備建設部 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋3-11-11) E-mail:hi-yasumori@kddi.com E-mail:ae-katou@kddi.com

近年,鋼構造物の老朽化や使用環境の過酷化に伴い,主に溶接継手部における疲労損傷問題が顕在化している.適切な予防保全による延命化対策が重要な課題となっており,供用中でも施工可能な現場作業性に優れる疲労強度向上法の開発が望まれている.

筆者らは,溶接止端部の応力集中を緩和し,疲労強度を改善する方法として,剛性の高い樹脂をブロック状に成型し,溶接止端部に接着する補強工法を開発した.本稿では,鋼床版実物大モデルおよび既設鋼 管柱を対象とした施工事例,補強効果の検証試験結果を報告する.

Key Words : steel deck, steel tower, weld toe, fatigue, reinforcement, adhesive

1. はじめに

近年、鋼構造物の老朽化や使用環境の過酷化に伴い、 疲労損傷の発生が問題となっている。 例えば、道路橋鋼 床版では,交通の増大,交通車両の大型化により,溶接 継手部において疲労損傷が発生していることが報告され ている ¹⁾⁻⁴⁾. また,標識柱や照明柱など,鋼管柱の基部 やフランジ継手における三角リブ溶接部で疲労き裂が発 生した事例も報告されている^{5,6},これら溶接継手部の 疲労強度を向上させるためには、溶接止端部における応 力集中の低減,引張残留応力の低減が効果的である.こ れらの効果を目的とした溶接後処理による疲労強度向上 法としては、グラインダー処理、TIG 処理、ピーニング 処理などの手法がある ^{7,8}. しかしながら, これらの手 法は、現場作業性の困難さや、処理作業者の技能に起因 した効果のバラツキなどが問題となる. そこで, 筆者ら は、溶接止端部の応力集中を緩和し、疲労強度を改善す る方法として、樹脂ブロックによる補強工法を開発した.

樹脂ブロック補強工法は、図-1 に示すような剛性の 高い樹脂をブロック状に成型し、溶接止端部に接着する. 適用対象としては、鋼床版デッキプレートと垂直補剛材 の隅肉溶接部や、鋼管柱の三角リブ溶接部といった回し 溶接止端部への施工を想定している.本工法は、現場で の施工が容易なため、作業者の技量によらず安定した補 強効果を得ることができる.また、剛性を急変させない ため、補強後に新たな応力集中箇所などの弱点が生じる こともない.

本稿では、鋼床版実物大モデルおよび既設鋼管柱を対 象とした樹脂ブロック補強の施工事例、補強効果の検証 試験結果を報告する.



図-1 樹脂ブロック

2. 樹脂ブロックの設計・施工法

(1) 使用材料

樹脂ブロック材料の特性値を表-1 に示す. 2 液硬化型 エポキシ樹脂は、主剤と硬化剤を混合するまで硬化反応 が進行せず、常温で保存可能で保存安定性に優れている. さらに、常温硬化型なので、施工現場での加熱処理が不 要な点で優れている.また、補強効果の向上を図るため に、通常のエポキシ樹脂に比べて弾性率が 2~3 倍高い 鉄粉含有タイプのエポキシ樹脂を用いている.

(2) 形状・寸法

図-2に示すように、溶接部の全面を被覆するように樹 脂ブロックを施工する.樹脂ブロックの形状・寸法は、 補強効果ならびに、施工対象部位との取り合いや、ブロ ックの成型性を加味して決定する.ここで、樹脂ブロッ クの曲率半径を決定するに当たって、補強効果の目安を 得るための基礎実験を実施した.実験は、図-3に示すよ うな荷重非伝達型十字隅肉継手試験片に、4点曲げ負荷 を与えて、補強前後のひずみ変化を計測した.ひずみゲ ージは、溶接止端より2mm位置に12枚貼付した.荷重は、 補強前の試験体で、溶接止端近傍の発生ひずみが1000µ 程度になるように負荷し、補強後も同荷重を負荷した.

試験結果を図4に示す.図は、補強樹脂の曲率半径と、 補強後のひずみ変化率の関係を示している.この結果に よれば、樹脂ブロックの曲率半径とひずみ低減効果には 相関があり、曲率半径が大きいほど高い補強効果が得ら れることがわかる.これは、曲率半径を大きくとれば、 結果的に溶接部を覆う樹脂が厚くなることで、樹脂ブロ ックの剛性が上がるためである.

(3) 施工方法

樹脂ブロックの施工は、以下の手順で行う.

a)下地処理

接着接合を行う際には、被着材表面を素地調整した上 で、鋼材素地に直接接着するのが一般的な方法である. 本工法においても、樹脂ブロックの補強効果を得るため には、母材との接着性が十分に確保されている必要があ るため、表面の塗料や錆をディスクサンダーなどにより 除去する.

表-1 樹脂ブロック材料の特性値

タイプ	2液性接着樹脂 (エポキシ・鉄粉含有)
比重	2.3
圧縮強さ (MPa)	45~75
引張強さ (MPa)	20~35
弾性係数(MPa)	5000~6000

b)樹脂ブロックの接着

施工面と樹脂ブロックに接着剤を塗布し、施工対象部 位にブロックを押し付けて接着する.接着剤は、表-1 に示した樹脂ブロック成型材と同等の特性値を有するエ ポキシ樹脂であるが、ここでは速乾タイプを使用する. 速乾タイプの樹脂は、初期硬化時間が5分(25℃)~10 分(16℃)程度であるため、押し付け状態を維持して養 生するための特殊な治具などは必要ない. c)仕上げ塗装

直射日光に曝される部位では、樹脂ブロックの経年劣 化を防止するため、耐候性塗料を塗布する.基本的には、 鋼部材に適用している塗装系と同一とする.



図-2 樹脂ブロックによる補強構造







図4 樹脂の曲率半径とひずみ低減効果の関係

3. 鋼床版垂直補剛材溶接部への適用

鋼床版では、デッキプレートと垂直補剛材の溶接部近 傍に疲労き裂が発生する場合があり、重大な損傷に至る 可能性がある.このような部位の応力を応急的に適切に 緩和するため、樹脂ブロック補強の適用を検討した.こ こでは、実物大鋼床版試験体に樹脂ブロックを施工し、 静的載荷試験により発生応力を計測した.また、この計 測結果と FEM 解析結果より、ホットスポット応力を推 定し、補強効果を明らかにする.

(1) 試験体

図-5 に示す鋼床版試験体の垂直補剛材とデッキプレートの溶接部近傍に樹脂ブロックを施工した.鋼床版試験体の垂直補剛材は板厚 10mm×幅 150mm, デッキプレ

ートの板厚は 12mm, 隅肉溶接脚長は 6mm である.ひ ずみゲージは,溶接止端から 17mm 位置のデッキプレ ートおよび垂直補剛材に貼付した.樹脂ブロックの施工 状況を図-6に示す.樹脂ブロックの形状は,曲率半径 *R*=50mm(デッキプレート板厚の約4倍)とした.あら かじめ3分割にして成型しておき,試験体に接着して一 体化した.

(2) 載荷試験

当該溶接部には、車両の通行により複雑な応力が作用 する.そこで、図-7 に示すように、実タイヤを用いた トラック載荷(輪荷重5tf)を行った.載荷位置は、図-8 に示すような6ラインとし.溶接部からの距離が同じ載 荷ラインでの計測結果(L1とL7,L2とL6,L3とL5) を比較して、補強効果を求めた.



図-5 鋼床版試験体



図-6 樹脂ブロックの施工状況



図-7 載荷状況

図-8 載荷ライン

(3) FEM解析

FEM 解析により、外力に対する溶接止端近傍での発 生応力分布を求め、ひずみゲージ貼付位置での計測結果 より、ホットスポット応力を推定する.解析モデルを 図-9 に示す.デッキプレート、垂直補剛材、樹脂ブロ ックを3次元弾性体でモデル化し、主桁との接合部は完 全拘束とし、反対側のデッキプレートの端部に垂直せん 断力、モーメントを負荷して、発生応力を求めた.各負 荷に対するデッキプレート側の発生応力を図-10 に示す.

(4) 補強効果の評価

計測値(デッキプレート側 σ_D , 垂直補剛材側 σ_R)か ら,ホットスポット応力を推定する.まず,計測位置 (溶接止端より 17mm) での実測値 σ_D , σ_R と FEM 解析 結果の関係より,倍率 A, B を求める.ひずみゲージ貼 付位置に対応する垂直せん断力負荷時の FEM 応力値 σ_{DF} , σ_{RF} ,モーメント負荷時の FEM 応力値 σ_{DM} , σ_{RM} との関係 は以下のような式となる.

$$\sigma_D = A \cdot \sigma_{DF} + B \cdot \sigma_{DM} \tag{1a}$$

$$\sigma_{R} = A \cdot \sigma_{RF} + B \cdot \sigma_{RM} \tag{1b}$$

式(la), (lb)より求めた*A*, *B*を用いて, デッキプレート のホットスポット応力*o*_{DHSS}を推定する. ホットスポット 応力は, 0.3t法⁹に従い, 溶接止端より3.6mm位置での FEM応力値*o*_{DFHSS}, *o*_{DMHSS}を参照し, 以下の式より求めた.

$$\sigma_{D,HSS} = A \cdot \sigma_{DF,HSS} + B \cdot \sigma_{DM,HSS} \tag{2}$$



図-9 解析モデル

式(2)より求めた,各載荷ラインでのホットスポット 応力を図-11に示す.ここでは,各載荷ラインでの最大 応力と,補強の有無による変化率を示している.この結 果によれば,樹脂ブロック施工による応力低減は29%~ 49%であった.これは,JSSCのE等級¹⁰に相当するとみ なせば,約3~7倍の疲労寿命延長の効果が期待できる.



図-11 各載荷ラインでのホットスポット応力

4. 鋼管柱三角リブ溶接部への適用

鋼管柱のボルト継手構造では、鋼管とフランジを三角 リブで溶接した構造が一般的である.このような構造で は、三角リブ先端に高い応力集中が生じ、風荷重等で発 生する応力とその頻度によっては、回し溶接止端部に疲 労き裂の発生が懸念される.ここでは、当該部位に樹脂 ブロック補強を適用し、既設鋼管柱を対象にした施工事 例および応力頻度計測による補強効果の検証結果を報告 する.

(1) 計測対象および計測条件

図-12 に示す無線鉄塔のフランジ接合部を計測対象として、自然風により生じる応力頻度計測を実施した.補 強対象となる部位は、φ900×t16.0 (SM490A 材)の鋼管に、 板厚 ⊨16mm の三角リブが溶接されている.この三角リ ブの回し溶接部近傍にひずみゲージを貼付した.図-12 に示すように、ひずみゲージは4箇所の三角リブを対象 に、溶接止端より 5mm および 100mm の位置に貼付した. なお、鋼管の板厚が ⊨16mm であるため、5mm (0.3t) 位置の計測値はホットスポット応力に相当する.なお、 樹脂ブロック施工後は、5mm 位置のひずみゲージは、 樹脂内に埋め込んだ状態とした.

応力頻度分布は、補強前および補強後に、それぞれ 5 日間連続計測でひずみ計測を実施し、計測した時系列ひ ずみデータをレインフロー解析することで求めた.また、 計測期間中の風況データを取得するために、鉄塔頂上付 近に風向・風速計を設置した.計測条件を表-2 に示す.

(2) 樹脂ブロックの施工

樹脂ブロックの形状・寸法を図-13に示す.鋼床版への適用事例ではブロックを3分割し,現場施工時に一体化していたが,ここでは,現場施工性の向上を図るために,ブロックを一体成形し,鋼管補強リブとの取合いを考慮して外形寸法を決定した.樹脂ブロックの曲率半径は,*R*=50mm(鋼管板厚の約3倍)とした.



図-13 樹脂ブロックの形状・寸法



図-12 計測対象の無線鉄塔

表-2	計測条件
-----	------

	補強前	補強後	
時期	2010年11月25日 ~11月30日	2010年12月7日 ~12月12日	
応力頻度	5日間 (サンプリングレート100Hz)		
風向・風速	5日間 (10分インターバル計測)		

樹脂ブロックの施工は、三角リブ先端に32箇所施工した.施工状況を図-14に示す.本鉄塔は、溶融亜鉛メッキ処理がなされており、溶融亜鉛メッキ面との接着では、 十分な接着強度を確保できない.そのため、ベルトサン ダーにて下地処理を行い、鋼材素地を露出した上で接着 作業を実施した.樹脂ブロックの接着時には、接着剤の 初期硬化が始まるまでブロックを押え付けておく必要が ある.今回の施工では、速乾タイプの樹脂を使用してお り、初期硬化に要する時間は5分~10分程度であるため、 手で保持しておくだけで十分であった.なお、32箇所の 施工に要した時間は、作業員2名で概算2.5日間であった.

(3) 風向・風速の計測結果

平均風速および瞬間最大風速の発生頻度を図-15に示 す.計測期間中は、北北西の風が卓越しており、平均風 速は概ね2~6m/sであった.この計測データの中より、 樹脂ブロックの補強効果を検証するために、補強前・補 強後の風速・風向条件が近いデータをそれぞれ12時間ず つ抽出した.抽出したデータの風向・風速の概況を表-3 に示す.



(a) ブロック接着



(b) 施工後の仕上がり状態

図-14 樹脂ブロックの施工状況





図-15 風向・風速の計測結果

表-3 検証用データ計測時の風向・風速の概況

	補強前	補強後
計測日時	2010年11月28日 0:00~12:00	2010年12月11日 12:00~24:00
10分間平均風速 の平均値	3.9m/s	3.8m/s
瞬間最大風速 の平均値	9.8m/s	9.8m/s
瞬間最大風速 の最大値	17.1m/s	16.2m/s
風向概況	南西~南南西	南西~南南西

(4) 応力頻度の計測結果

応力頻度分布は、計測した時系列ひずみデータをレイ ンフロー解析により求めた.また、計測ひずみから応力 への変換は、鋼のヤング率206GPaとした.表-3に示した 期間内における応力頻度分布を図-16に示す.ここでは、 北東位置のリブ(No.14)と南西位置のリブ(No.30)で の計測結果を示している.なお、計測対象とした無線鉄 柱の竣工が2000年であったため、これまでの供用期間を 考慮して、12時間の計測データを10年相当に発生頻度を 換算して表示した.一般部(溶接止端から100mm位置) の応力頻度分布に着目すると、発生頻度は僅かに差異が あるものの、応力レベルは補強前と補強後で同等である. よって、補強効果を検証する上で、外力条件としては、 ほぼ同等と見なすことができる.この結果によれば、溶 接止端近傍の応力頻度分布は、補強により、発生応力レベルが下がる傾向にあり、樹脂ブロックによる補強効果が確認できる.

また、補強効果を検証するための指標として、等価応 力範囲の算出結果を図-17 に示す.等価応力範囲 $\Delta \sigma_{req}$ は、 JSSC の疲労設計指針¹⁰に基づいて、SN 線図の傾き m=3 として算出した.この結果によれば、樹脂ブロック補強 により、溶接止端近傍の等価応力範囲は 70%程度に低減 される.これは、当該継手構造が JSSC の G 等級に相当 ⁶すると考えれば、樹脂ブロック補強により約 2 ランク (E 等級)の疲労強度向上(疲労寿命 3 倍)となり、溶 接止端にグラインダ仕上げを行った以上の効果が期待で きる.





5. まとめ

溶接止端部の応力集中を緩和し、疲労強度を改善する 方法として、剛性の高い樹脂をブロック状に成型し、溶 接止端部に接着する補強工法を提案した.鋼床版実物大 モデルおよび既設鋼管柱を対象として、本工法の補強効 果を検証した.これら検証の範囲内で得られた結果から、 樹脂ブロックの曲率半径を *R*=3t~4t(t:補強対象の板 厚)とすることで、ホットスポット応力を約 50~70%に 低減でき、隅肉溶接止端部の疲労強度向上に有効な方法 であることが確認できた.

謝辞:実物大鋼床版モデルによる検証試験については, 供試体の提供および,一連の実験計測を首都高速道路 (株),(社)施工技術総合研究所にご協力いただいた.こ こに記して,謝辞といたします.

参考文献

- 1)高田佳彦,平野敏彦,坂野昌弘,松井繁之:阪神高速道路に おける鋼床版の疲労損傷と要因分析の検討,土木学会,第 五回道路橋床版シンポジウム講演論文集,pp.253-258,2006.7
- 2)村越潤,有馬敬育:鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討ーデッキプレート内進展き裂を対象として ー,土木学会,第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.13-24,2006.7
- 3) 牛越裕幸,下里哲弘,木下琢雄,弓削太郎:鋼床版デッキプ レートとトラフリブ溶接部に発生した亀裂の進展性状と応 急対策状況,第 61 回年次学術講演会講演概要集,CD-ROM, I-544,2006.9
- 4) 三木千尋, 菅沼久忠, 冨澤雅幸, 町田文孝: 鋼床版箱桁橋の デッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因, 土木学会 論文集 No.780/I-73, pp.57-69, 2005.1
- 5) 片桐秀喜,前野裕文,山田健太郎,小塩達也,山田聡:門型 標識柱基部に発生した疲労き裂の調査・検討および補修工 事について,第 60回年次学術講演会講演概要集,CD-ROM, I-402, 2005.9
- 6) 日本鋼構造協会:鋼橋付属物の疲労, JSSC テクニカルレポ ート No.81, 2008.7
- 7) 三木千尋, 穴見健吾, 谷英樹, 杉本一郎:溶接止端部改良に よる疲労強度向上法, 溶接学会論文集, 第 17 巻, 第 1 号, pp.111-119, 1999.
- 8) 冨永知徳,高田佳彦,中島隆,松岡知巳:超音波衝撃処理された鋼床版鉛直スティフナーに関する局部応力を考慮した 疲労性能評価,土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.273-285, 2010.6
- 9) 仁瓶寛太:ホットスポット応力算出法の問題点と改善策,溶 接学会全国大会講演概要,第63集,F-44-F-50,1998.10
- 10) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説,技報 堂,1993.

FATIGUE STRENGTH IMPROVEMENT OF FILLET WELDED JOINTS BY RESIN ADHESION

Hiroshi SUGIURA, Norio KOIDE, Hiroshi YASUMORI and Takeshi KATOU

The deterioration of performance of steel structures comes from various reasons. One of main reasons of such deterioration is the fatigue crack of welded joints, and the development of a reasonable repair and reinforcement method are demanded. We propose the new fatigue strength improvement method. This method reduce stress concentration at fillet weld toe by bonding resin-block to welded joints. This paper reports the results of the confirmation test of the reinforcement effect at the steel deck and the existing steel tower.