

土木学会 鋼構造新技術小委員会

耐久性研究ワーキング

最終報告書

－ 概 要 版 －

平成8年5月31日

## 1. 研究目的

鋼構造物の耐久性の向上および耐久性の確保に関連した研究を実施する。鋼構造を今後さらに広げていくためには、耐久性に関し「疲労」と「腐食」の問題解決が必須と考える。本WGでは、鋼構造物として橋梁に絞り、その耐久性に関連する損傷の中で疲労と腐食を取りあげ、コンクリート構造に対し、耐久性の面での競争力の向上を目指す。

## 2. 研究内容と方法

本WGでは、疲労および腐食に関し、(1) 疲労抵抗向上の研究、(2) 腐食に強い鋼構造物の研究、(3) 損傷検出評価技術の研究の3テーマに絞り、活動を進めた。

### 2. 1 疲労抵抗向上の研究

最近の実大試験体の疲労試験結果は高強度鋼の溶接継手部の疲労強度は軟鋼の疲労強度より低い、いわゆる逆の強度依存性を示しているように見える。これは、高強度鋼を橋梁に使用する上で重大な問題である。

ここでは、高強度鋼溶接継手の疲労強度を向上させる方法として以下の方法を取り上げ、それらの効果について実験的に検討した。

- ① 溶接材料の軟質化、② 溶接止端のグラインダー仕上げ、③ T I G 処理、④ 止端改良棒、⑤ 化粧溶接。

①～③の効果を検討するために、首溶接部、垂直ステイフナー溶接部、ウェブガセット溶接部とフランジガセット溶接部を含む大型の桁試験体の疲労試験を行った。用いた試験体は7体である。

①および③～⑤については、ウェブガセット溶接部を模擬した小型の面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験を行うことにより検討した。

さらに、①の効果を考える上で鍵になると考えられる溶接止端形状および載荷によるその変化を詳細に調べる目的で、垂直ステイフナー溶接部を模擬した小型の荷重非伝達型十字すみ肉溶接継手も作成し、疲労試験を行った。また、①の効果を高めるために従来の軟鋼用の溶接材料よりもさらに降伏点の低い溶接材料を開発した。

上記検討にて得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 首溶接部のブローホールから疲労き裂が発生する場合、溶接部を軟質化することにより、ブローホールからの疲労き裂発生率は改善され、疲労強度も向上する。
- 2) 溶接止端が疲労破壊の起点となる垂直ステイフナー溶接部とウェブガセット溶接部においては、溶接部を軟質化することにより溶接止端の曲率半径が改善され、疲労強度も向上した。しかし、フランジガセット溶接部では溶接材料の軟質化の効果は認められなかった。止端半径の改善に対しては溶接材料だけではなく、溶接姿勢などの溶接条件も影響するため、この効果についてはさらに検討が必要である。
- 3) ガセット端にフィレットを付して溶接部をグラインダー仕上げする方法と溶接止端の T I G 処理の効果を大型試験体において確認した。しかし、これらの効

果を十分に発揮させるためには、ガセット側の溶接止端形状も改善することやグラインダー仕上げは傷が残らないように行うことも必要である。

- 4) 溶接後に化粧溶接を行うことにより疲労強度は向上し、その程度はTIG処理と同等である。これは、化粧溶接により止端形状が滑らかとなることによって応力集中が小さくなること、また残留応力が小さくなることによるものと考えられる。
- 5) 止端改良棒による溶接では、微視的な溶接止端形状の改善効果は認められず、そのため疲労強度改善効果も低い。
- 6) 溶接形状が同じとなるように製作した高強度鋼溶接継手と軟鋼溶接継手の疲労強度は同程度であり、溶接部を軟質化した高強度鋼溶接継手の疲労強度もこれらと同程度であった。
- 7) 溶接部を軟質化しても塑性変形による溶接止端部の形状改善効果は期待できない。

## 2. 2 腐食に強い鋼構造物の研究

メンテナンスフリーの追及は将来の社会情勢から最重要課題の一つと言える。本研究では、腐食に強く、かつ強度面で鋼と遜色のないステンレスクラッド鋼に注目し、この鋼材の橋梁への適用性について検討した。

防食性に富むステンレスで橋梁表面を覆うことにより、塗装を省くことが主目的であるが、ステンレス表面の仕上げ方法によって、金属的色彩からの制限はあるものの、種々の肌合いを醸し出すことができるので、塗装にはできない景観を造り出すことも可能である。

従来、ステンレスクラッド鋼は圧力容器やケミカルタンカー、水門などに使用され、高防食性の特徴が活かされてきた。しかし、これらの設計においては、ステンレスを腐食性保証材としかみなさず、強度材には含めない場合がほとんどである。ステンレスクラッド鋼を橋梁に適用する場合には、上記構造物に比べて腐食環境は穏やかであることから、ステンレスも強度材として考慮するのが合理的である。

このような観点から、合わせ材：SUS316L、母材：SS400の熱間圧延ステンレスクラッド鋼を用いて、①適する断面・構造詳細、②製作・施工性、③表面仕上げと色調、④腐食、⑤強度、⑥疲労、について検討した。

①～③については、ほぼ断面寸法が実物大のパイロットメンバーを試作して、加工性、溶接性などについて検討するとともに、ステンレス表面の仕上げと色調について検討した。

④では、暴露試験と腐食促進試験を実施し、クラッド鋼の腐食速度を調べた。

⑤では、クラッド鋼から合わせ材あるいは母材をそれぞれ削り取った試験片とクラッド鋼試験片の材料特性試験を行い、クラッド鋼としての材料特性を評価した。また、製作過程で発生する板厚方向の残留応力を逐次除去法により調べるとともに、これが座屈強度に及ぼす影響について実験的・解析的に検討した。

⑥については、クラッド鋼クーボン試験と約1/4スケール（補剛材などは実物大）の2体の箱桁模型を用いて、疲労強度およびき裂進展速度を調べた。

上記検討にて得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 角溶接のような鋼が暴露されるディテールは好ましくなく、外表面をステンレスで覆うような構造断面が要求される。このため箱形桁で、フランジウェブ接合部をラウンドコーナーとし、フランジとウェブを突き合わせ溶接する断面が適する。
- 2) 箱桁内部のダイアフラム、リブ等の溶接は、通常の炭素鋼の溶接となるので溶接性の問題はない。また、クラッド鋼の溶接に関しても大きな問題はないが、曲率を有する角部の加工、現場溶接における目違い量の管理、溶接時のひずみ防止等には留意する必要がある。
- 3) 溶接時のステンレス表面の焼け等に関しては、電解洗浄処理、研磨処理、ブラスト処理等の表面仕上げで対応が可能である。また、これらの表面仕上げにより、種々の肌合いを醸し出すことが可能である。
- 4) ステンレスクラッド鋼の合わせ材の鋼種は、使用される大気環境に適合したものを選ぶ必要があるが、基本的には、腐食速度は小さく、無塗装橋梁としてステンレスクラッド鋼が適用できる。
- 5) ステンレスクラッド鋼としての弾性係数、降伏強度、引張強度は、ともに混合則（板厚による加重平均）を適用して評価できる。ただし、ステンレスの板厚が薄いことから、 $\sigma_y$ が規格値より相当大きくなるため、クラッド鋼を使用した場合の強度は鋼単体の場合よりも大きくなる。
- 6) 弾塑性域におけるステンレスクラッド鋼板の中立面（板理論における曲げひずみが0となる面）は、ステンレスと鋼の弾性係数の差が僅少であることより、板の中央面とほとんど変わらない。
- 7) 板厚方向の残留応力は、ステンレス側では、表面で $\sigma_y^{s's}/2 \sim \sigma_y^{s's}$ （ $\sigma_y^{s's}$ ：ステンレス降伏応力）の圧縮応力から、普通鋼との境界面付近で引張応力に転じる。鋼側では、ステンレス・鋼境界面で圧縮応力となり、鋼中央で引張あるいは0に近い分布に移行して、鋼表面では再び $\sigma_y^{s'}/2 \sim \sigma_y^{s'}$ （ $\sigma_y^{s'}$ ：鋼降伏応力）の圧縮となる。また、圧延方向と圧延直角方向では残留応力の差はほとんどない。
- 8) 板厚方向の残留応力は板の圧縮強度に大きく影響し、解析結果からは、残留応力がある場合には、ない場合よりも10～15%圧縮強度が低下する。したがって、クラッドとしての弾性座屈強度は、鋼板のそれよりも若干低めとなる。
- 9) 疲労実験結果からは、疲労強度は鋼構造の疲労強度と大差はなく、鋼構造における疲労強度が適用できる。ただし、1)で述べたクラッド鋼を用いるために工夫したフランジの突合せ溶接ディテールにおいて、フランジの板厚変化部と目違いにより生じる局所的な形状変化部の応力集中に注意する必要がある。

以上、クラッド鋼の橋梁への適用性について検討した結果、その可能性は十分にあり、無塗装橋梁として適用できると考えられる。

## 2. 3 損傷検出評価の研究

破壊力学の分野で得られた成果を鋼構造物の疲労寿命予測や性能評価に有効活用するために、溶接欠陥と疲労に起因する損傷の検出・評価手法をより定量化す

ることを検討した。この定量化が進めば、非破壊検査的な立場から鋼構造物の長寿命化への貢献が期待できる。

溶接欠陥と疲労に起因する損傷の定量化を具体的に進める上で、先端の鋭いき裂状の欠陥か、あるいは先端が丸みを帯びた欠陥かという2つの問題に絞り検討した。ここでは、

- ① 溶接部から発生した疲労き裂の識別を意図した欠陥先端形状の識別法
- ② クラッド鋼等の耐食性鋼板の界面に起因して生じた欠陥の評価法
- ③ 鋼材の強度変動の推定法の定量化

に関する研究を行った。

①に関しては、超音波回折トモグラフィー、開口合成による欠陥の画像化と欠陥識別性能の向上ならびに端部エコーの発生挙動の解明、ディコンボリューションによる端部エコー法の時間分解能向上による端部エコー法の高精度化を検討した。

②については、クラッド鋼界面に存在するき裂長の推定法の構築、板波を利用した界面損傷の推定法の構築による異種材料界面の損傷評価技術の開発を行った。

③鋼材の強度変動を引き起こす要因として初期不整を取り上げ、鋼材の引張強度の確率変動を分岐理論により解明することを試みた。

上記検討にて得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 超音波回折トモグラフィーについては、先端半径の異なる人工欠陥に回折トモグラフィーを適用し、その先端形状を概略ではあるが再現することができた。
- 2) 数値実験によりスキニングピッチ、開口幅、使用する波の数が開口合成の精度にどの程度影響するかを調べ、ピッチを小さくすること、もしくは開口幅を広げることが開口合成の分解能を向上させることがわかった。また、鋼材表面に対して超音波の入射角度を変化させることのできる実験システムを開発し開口実験を行った結果、他手法に比べ横方向の分解能を改善することができ、各角度における最大値だけを用いることによりさらに正確な再構成結果を得ることができた。
- 3) 端部エコーの発生メカニズムおよび端部エコーの特性と欠陥形状、寸法との関係を明らかにするために、有限要素法動弾性解析による数値シミュレーションおよび実験を行った。その結果、端部エコーは欠陥の先端近傍がせん断変形することにより生じる散乱波であり、端部エコーの強さは欠陥先端の寸法に依存すること、端部エコーの位相は欠陥の先端から $1/4$ 周期遅れること、欠陥の上下端の端部エコーの波形が逆転することなどの諸特性が明らかとなった。
- 4) クラッド鋼界面に存在するき裂長の推定法としては、散乱振幅変動周期とき裂長との関係式を固体内に存在するき裂について波動論的に導き出した。さらに、この関係式をき裂長、き裂の傾き、散乱振幅変動周期の関係に拡張し、散乱振幅変動を計測することによりき裂と傾きを推定する関係式を導き出した。この関係式は、実験によりその有効性を確認している。
- 5) 板波を利用した界面損傷の推定では、欠陥近傍の近距離波動場の計算と遠方の散乱波の計算を分離して行った。近距離波動場の計算では、無限弾性体における動弾性基本解を用いて境界積分方程式を構築した。一方、遠方場の計算で

は、板のグリーン関数を用いて、遠方散乱波の積分表現を導いた。これらを取り入れた数値シミュレーション結果では、き裂の深さを変化させて散乱振幅を計算した場合、定性的に実験結果と符号する結果が得られることなどが明らかとなった。

6)分岐理論による鋼材の強度変動の推定については、鋼材の引張試験より得られた応力-ひずみ曲線上において分岐理論を適用し、ひずみ差の2乗と荷重差との間に良好な相関関係がみられ、ここで提案した分岐理論の妥当性が示唆された。

### 3. まとめ

本WGでは、耐久性に関し「疲労」と「腐食」の問題を取り上げ、具体的には、疲労抵抗向上の研究、腐食に強い鋼構造物の研究、損傷検出評価技術の3テーマに関し検討した。

これらの研究テーマ遂行に当たっては、新しい分野に取り組み、数多くの新しい知見を得ることができた。今後は、実構造物の設計、製作およびメンテナンス分野への適用を目指して、さらに、データに蓄積を図るとともに、基準化等についても検討を進めていく必要がある。