

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 9 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760343

研究課題名（和文） 高強度鋼の軟質溶接継手による疲労強度の向上とそのメカニズムの解明
 研究課題名（英文） Improvement of fatigue strength of under-matched welded joints applied to high strength steel and clarify its mechanism

研究代表者

木下 幸治 (KOJI KINOSHITA)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：90452169

研究成果の概要（和文）：

高強度鋼の“軟質溶接継手”による疲労強度向上法の提示を目的とし、切欠き感度、軟質化の程度がその継手部の疲労強度に及ぼす影響について疲労実験、溶接部の応力集中を評価可能な有限要素法による応力解析、並びに他の溶接継手部を対象とした既往の疲労試験結果との比較を通じて、500MPa 級の高強度鋼材を用いた軟質溶接継手部の疲労強度は等質継手と同程度以上として扱える可能性があるが、800MPa 級の高強度鋼を用いた軟質溶接継手では軟質化を行う上での条件を設定する必要があることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Aiming to propose fatigue improvement method by using under-matched welded joints applied to high strength steel, influences of notch effects and under-match level for fatigue strength were studied using fatigue. Moreover, finite elements analysis focused on estimating stress concentration was conducted and fatigue test data obtained this research were compared with results reported in previous research. As a result, fatigue strength of under-matched welded joints using 500MPa steel is similar to that of over-matched welded joints not depending on the magnitude of stress concentration. However, under-matched welded joints should be carefully used for 800MPa steel.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|----------|-----------|---------|-----------|
| 平成 22 年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 平成 23 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・（構造工学・地震工学・維持管理工学）

キーワード：軟質溶接継手、高強度鋼、疲労、切欠き感度、溶接割れ

1. 研究開始当初の背景

鋼橋への高強度鋼の適用は、軽量化や製作コスト低減など、極めて大きな効果が期待できるため、世界的に増加している。しかし、

高強度鋼は切欠き感度が高いために、応力集中が起こる溶接部の疲労強度の確保が重要な課題である。

現在までの軟質溶接継手の疲労強度に関

する報告は 500MPa 級の高強度鋼までであるので、今後、省資源、省エネルギーの面から、より大きな効果が期待できる 800MPa 級の高強度鋼に関する研究の進展が望まれる。軟質溶接継手による疲労強度向上のメカニズムが解明できれば、最適な溶接材の選択や溶接条件の決定が理論的に行えるようになり、高強度鋼の適用が大きく広がると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、上記課題の達成を目的とするもので、高強度鋼の“軟質溶接継手”による疲労強度向上法の提示を目的とする。

具体的には、軟質溶接材で溶接した軟質溶接継手について、疲労強度評価、溶接部の金属組織の解析、破断部の切欠き感度の推定、溶接残留応力の評価を総合して、軟質溶接継手の疲労強度向上メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

800MPa 級高強度鋼の疲労強度を最大にする、軟質溶接継手の溶接条件の解明と、その疲労強度向上のメカニズムの解明を目標として、次の3つの項目を実施する。

- (1) 高強度鋼の軟質溶接継手の切欠き感度、溶接残留応力と疲労強度との関係に関する検討
- (2) 800MPa 級高強度鋼材を用いた軟質溶接部の疲労強度評価、並びに軟質溶接部の組織とその変化に関する検討
- (3) 橋梁用降伏点鋼材 SBHS700 の軟質溶接継手による溶接割れ防止効果に関する検討

4. 研究成果

(1) 切欠き感度と疲労強度との関係に関する検討

高強度鋼を用いた十字すみ肉溶接継手を対象に軟質化の程度を変えた試験体を用いて、疲労き裂発生位置の応力集中を変えた一軸片振り引張疲労試験並びに4点曲げ疲労試験を実施した(図-1 参照)。その上で、軟質溶接継手の疲労強度について、本試験結果と既往の試験結果を整理することにより検討した。

一方、軟質継手とすることにより、き裂発生位置の切欠き感度の低下並びに残留応力の低下が期待できると言われている。切欠き感度 η は式 (1) により求められる。

$$\eta = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\sigma_f}{\sigma_m} \quad (2)$$

並びここで、 β は式 (2) で求められる切欠き係数、 α は応力集中、 σ_f は平滑材の疲労限、

σ_m は切欠き材の疲労限である。切欠き感度は式 (1) に示すように切欠きの鋭さ、すなわち、応力集中 α に依存することが知られている。これより、軟質継手によるき裂発生位置の切欠き感度の低下を検討する上で応力

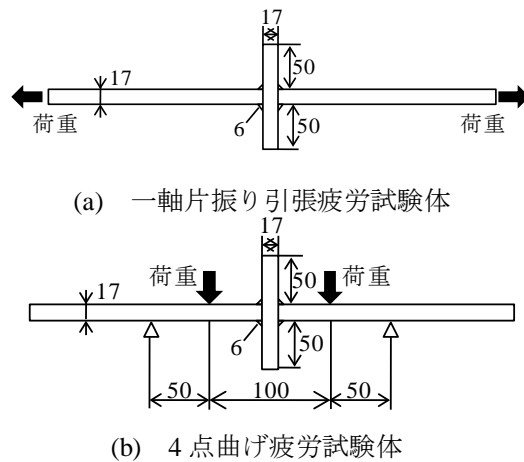


図-1 試験体と疲労試験方法

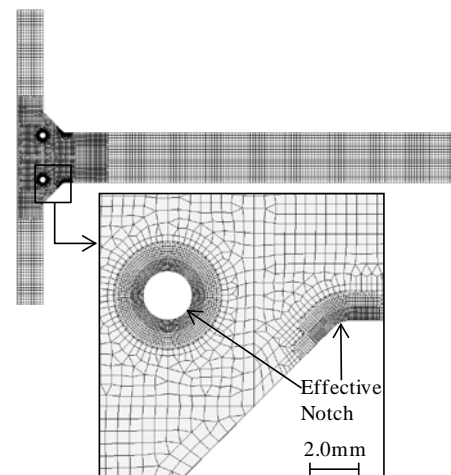


図-2 解析モデル

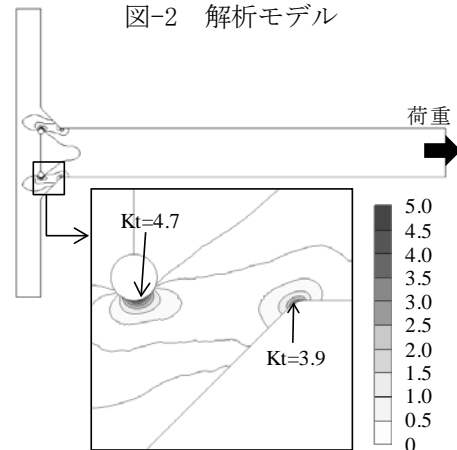


図-3 一軸片振り引張疲労試験体モデル

集中 α の大小に着目した検討が必要となる。そこで、ここでは、き裂発生位置の局部応力評価法である Effective Notch Stress (以後、

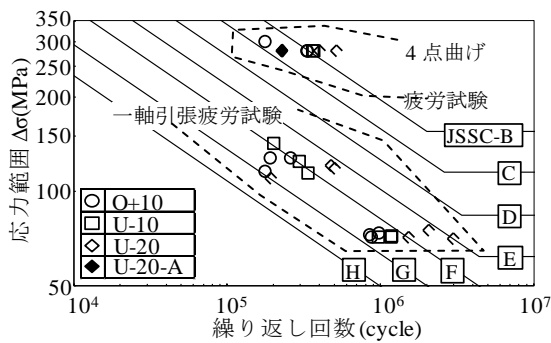
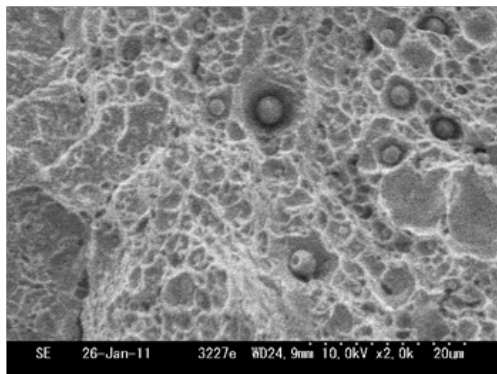


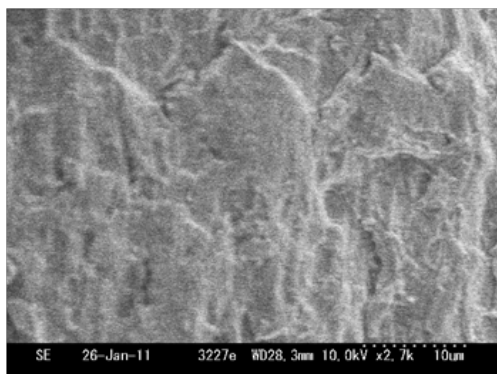
図-4 疲労試験結果 (試験体破断時)

表-3 母材, 溶接材料の降伏強度
と引張強度

| | | 降伏強度(Mpa) | 引張強度(Mpa) |
|------|-------------|-----------|-----------|
| 母材 | WEL-TEN780E | 814 | 895 |
| | G-200 | 390 | 450 |
| 溶接材料 | L-55 | 480 | 550 |
| | L-80 | 740 | 830 |



(a) U-50



(b) U-10

図-5 SEMによるルートき裂起点
付近の観察写真

ENS) 法を用いた FEM 解析により, 一軸片振り引張疲労試験並びに 4 点曲げ疲労試験におけるき裂発生位置の応力集中の差異について検討した (図-2, 図-3 参照).

以上の検討より, 軟質継手の疲労強度は軟質化の程度並びに疲労き裂発生位置の応力集中の大きさの違いによらず, 従来継手の疲労強度と同程度以上であることを明らかにした (図-4 参照). 軟質継手に見られた疲労

特性の改善は溶接線に沿った止端半径の急変の改善並びに, 切断法により溶接部近傍の残留応力を計測した結果より溶接残留応力の低減によるものと推察される. ただし, 試験体の溶接部近傍の残留応力を計測し, 必ずしも軟質継手とすることにより溶接残留応力が低減するとは限らないことを示した.

その上で, 本研究結果と既往の研究結果を合わせて整理した結果, 軟質継手の疲労強度は軟質化の程度並びに継手種類によらず従来継手の疲労強度と同程度として設定するのがよいことを示し, 今後利用する上での設計に用いられることが予想される重要なデータを提示した.

(2) 800MPa 級高強度鋼材を用いた軟質溶接部の疲労強度評価, 並びに軟質溶接部の組織とその変化に関する検討

800MPa 級高強度鋼材を用いた試験体の溶接継手は, 上記 500MPa 級高強度鋼材を用いた試験体と合わせ, 荷重伝達型の十字すみ肉溶接継手とした. 母材には板厚 22mm の WEL-TEN780E (JIS G 3128 SHY685) を用いた. 試験体を使用した溶接材料には母材の降伏強度に対して 50%程度降伏強度の低い G-200 (JIS Z3211 D4301), 40%程度降伏強度の低い L-55 (JIS Z3212 D5016), および軟質化による効果の検証を目的として WEL-TEN780E 鋼材用の溶接材料 L-80 (JIS Z3212 D8016) とした (表-1 参照). 疲労試験の結果, 軟質化の程度が大きくなるに従い, 徐々に疲労強度が低下する傾向が見られた. この疲労強度の低下の原因について明らかにするために, 破断面のき裂起点付近を SEM により観察した. SEM による観察の結果, 軟質化の程度が大きい U-50 ではき裂起点付近にディンプルが確認でき, U-10 では明確なディンプルは観察できなかった (図-5 参照). これより, 軟質化の程度を大きくすることにより, 軟質化した一層目での局部的なひずみ集中の影響により疲労強度が低下したものと推察される. 以上より, 軟質溶接部が局部的に降伏する高応力範囲では, 疲労強度が低下する可能性が示された. 本研究では 800MPa 級高強度鋼材を用いる上で最適な溶接材を選択するには至らなかったが, 本成果は今後最適な溶接材を選定する上で, 非常に重要な知見になったと考えている.

なお, 研究機関中には予算的に軟質継手の大型桁試験の疲労試験には至らなかったが, 大型桁試験システムを構築し, 今後の大型桁疲労試験を実施可能とした (図-6 参照).

(3) 橋梁用降伏点鋼材 SBHS700 の軟質溶接継手による溶接割れ防止効果に関する検討

今後 800MPa 級の高強度鋼材として利用が期待されている橋梁用降伏点鋼材 SBHS の

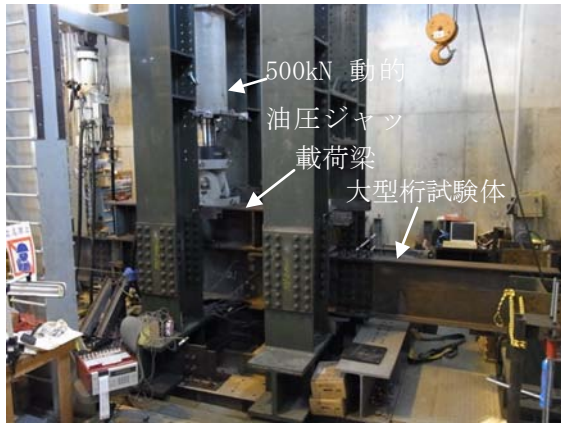


図-6 構築した大型桁疲労試験システム
(桁高 600mm, 桁長 6400mm)

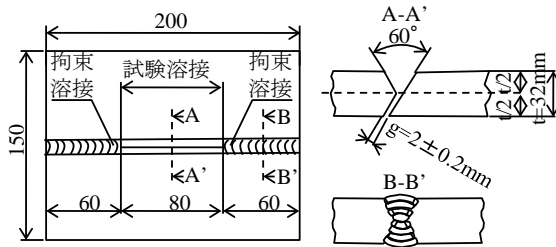


図-7 y形溶接割れ試験体



(a) 780MPa 級高強度鋼用溶接材



(b) 550~610MPa 級高張力鋼用溶接材



(c) 490MPa 級高張力鋼用溶接材

図-8 溶接部横断面のマクロ試験結果

800MPa 級鋼材に相当する SBHS700 鋼材を入手し、新たな鋼材に対する軟質継手とすることで期待できる溶接時の溶接割れ防止効果による、予熱無による制作コスト低減について、y 形溶接割れ試験、溶接部の硬さ試験により検証した。

y 形溶接割れ試験体の形状を図-7 に示す。

試験体は JIS の y 形溶接割れ試験方法 (JIS Z 3158-1993) に準じている。図-7 中のルート間隔 g は 2mm とした。板厚 32mm の SBHS700 を用いた。溶接方法は低水素系の溶接棒による被覆アーク溶接 (SMAW) とし、SBHS700 鋼材用の溶接材料、すなわち、780MPa 級高強度鋼用の溶接材料として、LB-80UL (JIS Z3211E7816-N4CM2) を用いた。さらに、軟質継手の適用性を検討するために、550~610MPa 級高強度鋼用の溶接材料 LB-62UL (JIS Z3211 E6216-N1M1)、490MPa 級高強度鋼用の溶接材料 LB-52UL (JIS Z3211 E4916) も用いた。なお、いずれも市販の超低水素系溶接棒であり、 $\phi 4.0$ mm 径である。

図-8 に各試験体の試験ビードスタート側の横断面のマクロ試験結果例を示す。全ての試験体の横断面について観察した結果、割れは確認されなかった。以上のように、今回の試験条件では何れの溶接材料を用いた場合であっても溶接割れは確認されなかった。次に、y 形溶接割れ試験体の溶接部の硬さ試験を実施した。従来、溶接部の硬さは溶接割れの発生を目安となっており、通常、溶接部の低温割れは JIS の最高硬さ試験における硬さ $H_v \leq 350$ で防止でき、 $H_v \geq 400$ になると割れやすくなるとされている。これより、硬さに着目することにより軟質溶接継手を採用したことによる差異が確認できると考えられる。硬さ試験はマイクロビッカース試験機を用いてビッカース硬さ試験 (JIS Z 2244) に則り実施した。測定箇所は試験ビードスタート側の横断面とした。硬さ試験の結果より、軟質継手を採用することにより硬さを低くできることがわかった。ただし、軟質化の程度を大きくすることにより硬さが低くなるといった傾向は見られなかった。以上より、本試験結果より、軟質溶接継手の採用による溶接割れ防止効果が期待できることを明らかとし、実構造における溶接時の予熱無による制作コスト低減に大きく貢献できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① 木下幸治, 荒川慎平, 盛高志, 軟質溶接継手を適用した荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労強度, 鋼構造論文集, 第 69 号, pp.33-40, 2011, 査読有

〔学会発表〕 (計 3 件)

- ① 木下幸治, 超低水素系溶接材料を用いた橋梁用高性能鋼材 SBHS700 溶接継手部の溶接性, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会, 2012 年 3 月, 信州大学
- ② 水江大地, 木下幸治, 800MPa 級高強度鋼を用いた荷重伝達型十字すみ肉軟質溶接継手の高応力範囲下の疲労強度, 土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会,

2011年9月，愛媛大学

- ③ 水江大地，木下幸治，800MPa 級高強度鋼を用いた軟質溶質継手の疲労強度に関する研究，平成 22 年度土木学会中部支部研究発表会，2011 年 3 月，中部大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下幸治 (KOJI KINOSHITA)

岐阜大学・工学部・社会基盤工学科・助教
研究者番号：90452160

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

無