

二段多重変動振幅荷重下のスポット溶接継手の疲労寿命特性
 Fatigue Life of Spot-Welded Joint under Two Steps Variable Amplitude Load

○榛澤駿¹, 根本大生¹, 石岡佑介², 田代世傑², 富岡昇³, 岡部顕史³
 Shun Hanzawa¹, Daiki Nemoto¹, Yusuke Ishioka², Seketsu Tashiro², Noboru Tomioka³, Akifumi Okabe³

In this study, a two steps variable amplitude load fatigue test was carried out on peeling test specimens using a mild steel sheet (SPCE) with a thickness $t = 1.6$ [mm]. In the fatigue testing, the amplitude number of the higher load was fixed at 100 [cycle], and that of the lower load was changed. As a result, it was found that the fatigue life increased as the amplitude number of lower load increased. It was presumed that this is caused by generating the large plastic zone due to peak load. The plastic zone was verified by the hardness testing and the size was theoretically calculated based on linear fracture mechanics. The specimen loaded with a peak load had the higher values of hardness in the vicinity of the crack compared with the unloaded specimen. Moreover, theoretically calculated size of the plastic zone is large enough to exceed the sheet thickness.

1. 緒言

自動車車体の耐久性の評価にはスポット溶接継手の疲労強度の的確な評価が必要である。従来の研究において、高張力鋼板 SPFC590 と軟鋼板 SPCE を母材としたスポット溶接引張せん断継手に定振幅荷重を負荷した場合、両母材の疲労寿命は変わらないことが知られている。しかし、二段多重変動振幅荷重を負荷した場合は、1 シークス内の高荷重に対する低荷重の繰り返し数が大きくなると、SPCE と SPFC590 では疲労寿命に異なる傾向を示した⁽¹⁾。これは高荷重負荷により生成された塑性域によってき裂の進展に遅延が生じたためである。

本研究では、単点スポット溶接をしたはく離継手について二段多重変動振幅荷重疲労試験を行い、SPCE と SPFC590 の疲労特性を調査し、その特性要因について検討した。

2. 二段多重変動振幅疲労試験

図 1 に使用したはく離試験片を示す。供試材料は板厚 $t=1.6$ mm の冷間圧延鋼材 SPCE である。溶接条件は軟鋼板の標準条件に準じた。高荷重は $\Delta L_1=1.40$ kN, 低荷重は $\Delta L_2=0.82$ kN とし、疲労限度 0.42kN 以上とした。疲労試験は、荷重制御、荷重比 $R=0.02$ で行い、下限荷重は高荷重、低荷重ともに同じ値とした。また、高荷重の振幅数 n_1 は 10^2 cycles と一定とし、低荷重の振幅数 n_2 は 10^2 から 10^6 cycles と変えた。疲労寿命は疲労き裂がナゲット径程度に成長したときとした。

図 2 に SPCE の疲労試験結果を示す。マイナー則による推定値は振幅数 n_2 に伴い増加しその後一定値に漸近したが、実験値は単調に増加し推定値と異なる性質を示した。これは引張りせん断継手に見られた特性と同様であり、過大荷重によるき裂進展遅延によるものと推察される。

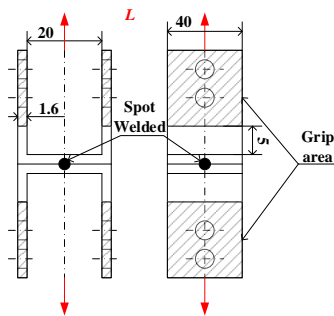


Fig.1 Fatigue test specimen

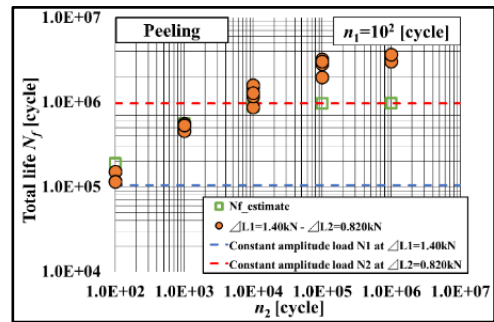


Fig.2 Variable amplitude load fatigue test results (SPCE)

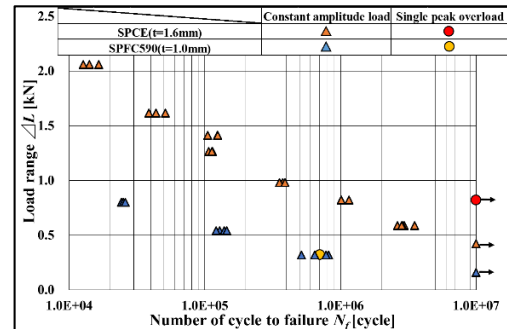


Fig.3 Single peak over load fatigue test results

3. 単一過大荷重疲労試験

前節の推論を確認するために、単一過大荷重疲労試験を実施した。初めに単一過大荷重として $\Delta L_1=1.40$ kN を 1cycle 負荷し、続いて $\Delta L_2=0.82$ kN を負荷し定振幅疲労試験を行った。母材の影響を調べるため、板厚 1mm の SPFC590 で図 1 の試験片を作成し、単一過大荷重疲労試験を行った。荷重条件は過大荷重 $\Delta L_1=0.54$ kN、定振幅荷重 $\Delta L_2=0.32$ kN とした。

図 3 に単一過大荷重疲労試験の結果を定振幅荷重疲労試験の結果とともに示す。SPCE では、荷重 0.82kN の定振幅疲労寿命は約 10^6 cycles, それに対して単一過大荷重の疲労寿命は 10^7 cycles に達しても未破断であった。SPFC590 では荷重 0.32kN の疲労寿命は定振幅疲労試験、単一過大荷重疲労試験ともに $700,000$ cycles 程度となった。この結果から、引張せん断継手と同様に SPFC590 は過大荷重の影響を受けないが、SPCE は過大荷重の影響を受けることが分かる。また単一過大荷重疲労試験と定振幅荷重疲労試験の疲労寿命の比から引張せん断継手とはく離継手を比較すると、SPCE の場合、はく離継手では 14.3 倍、引張せん断継手では 1.42 倍となる。一方 SPFC590 の場合、はく離継手では 1.00

倍, 引張せん断継手では 1.03 倍となった. このことから SPCE を母材とする, はく離継手は引張せん断継手と比べ, 過大荷重の影響を大きく受けることが分かった.

4. 塑性域生成の確認

4.1 硬さ試験結果

SPCE を母材とするはく離継手の疲労寿命が増加した要因として, 引張せん断継手同様, ナゲット端近傍に過大荷重により塑性域が生じ, き裂の進展に遅延が生じたためと推察し, その生成を実験的および理論的に確認した. 硬さの値は降伏点が高くなると大きくなるので, ここでは硬さ測定をして塑性域の生成を定性的に確認することにした.

定振幅荷重疲労試験および単一過大荷重疲労試験の両試験において, SPCE の振幅数 500,000[cycle]と SPFC590 の振幅数 300,000[cycle] (それぞれ定振幅荷重疲労試験での疲労寿命の約 50%)を荷重し, ナゲット中心で切断し, 溶接部断面の接合面端から 0.1[mm]の位置を厚さ方向に硬さを測定した. 結果を図 4 に示す.

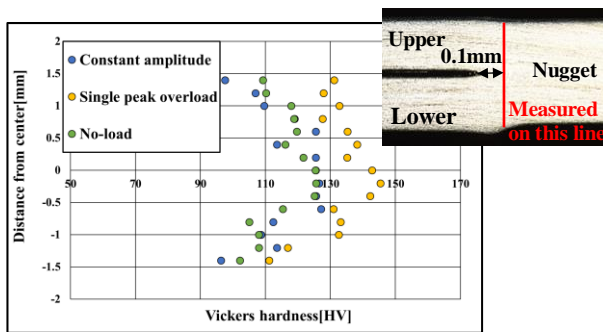
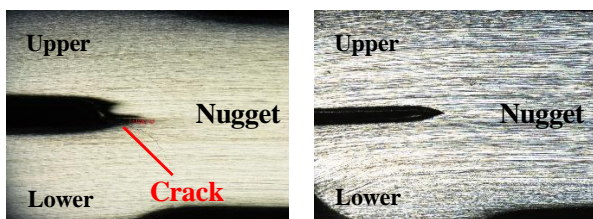


Fig.4 Distributions of Vickers hardness (SPCE)

SPCE では, 過大荷重を荷重した試験片の硬さは無負荷の試験片の硬さに比べ大きな値となっており, 過大荷重によって塑性域が生成されていることが確認できる. 一方で SPFC590 では, 過大荷重の有無による有意差は見られなかった.

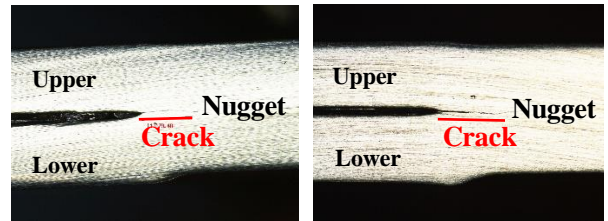
4.2 き裂観察結果

定振幅荷重疲労試験および単一過大荷重疲労試験において, SPCE の振幅数 500,000[cycle]と SPFC590 の振幅数 300,000[cycle]のき裂観察結果を図 5, 図 6 に示す. SPFC590 は定振幅荷重疲労試験及び単一過大荷重疲労試験においてもナゲット中心に向かって同程度のき裂が確認できるのに対し, SPCE では定振幅荷重疲労試験ではみられたき裂が単一過大荷重疲労試験では確認できなかった. この観察結果から SPCE の場合は単一過大荷重による影響を受けてき裂の発生・進展の遅延が生じていると言える.



(a) Constant amplitude load (b) Single peak overload

Fig.5 Fatigue crack appeared after $N=500,000$ [cycle] (SPCE)



(a) Constant amplitude load (b) Single peak overload

Fig.6 Fatigue crack appeared after $N=300,000$ [cycle] (SPFC590)

4.3 塑性域の大きさの算出

十字形引張等厚継手の応力拡大係数 K_I の近似式は文献(3)で与えられる⁽²⁾. これを用いて, 図 1 のはく離試験片の応力拡大係数を算出し, 線形破壊力学によりモード I のき裂先端周りの塑性域の大きさ r_p を計算した⁽³⁾. その結果を図 7 に示す. SPCE では, 接合面から板厚方向に $r/t=1.4$ 程で, 板厚を超える大きな塑性域であるのに対し, SPFC590 は $r/t=0.25$ 程ととても小さい. この結果より, SPCE が過大荷重の影響を受け大きな塑性域を生じていることが分かる. また, き裂進展経路であるナゲット端から板厚方向では, はく離継手の塑性域は引張せん断継手に比べて大きいことが分かる.

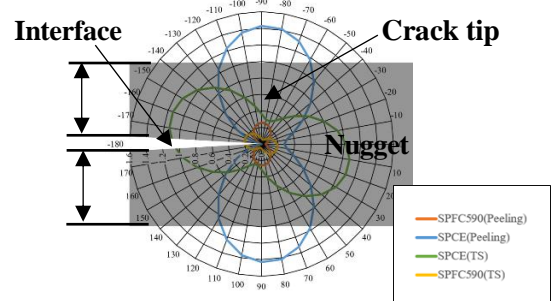


Fig.7 The size of the plastic zone

5. 結言

二段多重変動振幅荷重下における単点スポット溶接した, はく離継手の SPCE と SPFC590 の疲労寿命特性の差異を調査した.

- (1) その結果, 引張せん断継手と同様, はく離継手も過大荷重によりナゲット部近傍に塑性域が生じ, き裂の進展に遅延が起きて疲労寿命が延びることを硬さ試験および試験片断面の観察により明らかにした.
- (2) 過大荷重の影響の度合いは, はく離継手の方が引張せん断継手より大きいことが分かった. その要因は, はく離継手の塑性域がき裂進展経路であるナゲット端から板厚方向に大きく生成しているためであることを理論的に明らかにした.

参考文献

- (1) 大橋雅樹, 松園俊介, 富岡昇, 二段多重変動振幅荷重下のスポット溶接継手の疲労寿命評価, M&M2016 材料力学カンファレンス講演論文集, No.16-3, pp.823-825
- (2) 自動車技術会疲労信頼性部門委員会, スポット溶接継手疲労強度データ集(1987) 日本機械学会 材料力学ハンドブック<応用編> pp31-33