

This is "Advance Publication Article".

Category: Paper

Received date: 12 December 2016

Accepted date: 21 April 2017

J-STAGE Advance publication date: 25 June 2017

Publication date: *****

Corresponding author: Nao-Aki NODA (E-mail address: noda@mech.kyutech.ac.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2016.2725

Copyright©2017 Japan Society for Design Engineering

単純重ね合わせ継手を用いて二重重ね合わせ継手と 同一強度を得る方法について

How to Obtain the Adhesive Strength for Double Lap Joint by using Single Lap Joint

野田 尚昭*¹, 李 戎*², 佐野 義一*³, 高瀬 康*⁴, 高木 怜*⁵, 宮崎 達二郎*⁶
(Nao-Aki NODA) (Rong LI) (Yoshikazu SANO) (Yasushi TAKASE)
(Rei TAKAKI) (Tatsujiro MIYAZAKI)

Abstract

In this study, the equivalent conditions of strength for single lap joint (SLJ) and double lap joint (DLJ) are investigated in terms of the intensity of singular stress field (ISSF) appearing at the interface end. Previous studies showed that the adhesive strength can be expressed as a constant value of critical ISSF independent of the adhesive length and adhesive thickness. In the study, first, the ISSF is investigated under the same load with varying adherend thickness. The minimum ISSF of SLJ can be obtained when the adherend thickness t_1 is large enough. Then, the equivalent conditions of strength for SLJ and DLJ is investigated by changing specimen geometry. The results show that the same strength of the DLJ in JIS ($t_1=1.5\text{mm}$) can be obtained by using the SLJ with adherend thickness $t_1=7\text{mm}$. Since the deformation of SLJ is large, it is necessary to use the specimen with thicker adherend thickness. When the adherend thickness $t_1=25\text{mm}$, the strength of SLJ is nearly equal to that of DLJ.

Key words

adhesive, joining, lap joint, stress intensity factor, strength

*¹ 正会員, 九州工業大学大学院工学研究院(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1),
noda@mech.kyutech.ac.jp

*² 非会員, 九州工業大学大学院工学府(同上), lirongxb@163.com

*³ 非会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), sano.yoshikazu029@mail.kyutech.jp

*⁴ 正会員, 九州工業大学大学院工学研究院(同上), takase@mech.kyutech.ac.jp

*⁵ 非会員, 九州工業大学工学部(同上), n104084r@mail.kyutech.jp

*⁶ 非会員, 琉球大学工学部(〒903-0213 中頭郡西原町字千原1番地), t-miya@tec.u-ryukyu.ac.jp

1 緒言

接着剤を用いた接合は広範な工業分野で採用されており，中でも，重ね合わせ接着継手による接合法が多くを占めている．そのため，様々な強度評価に関する研究がなされている^{1)~4)}．著者らはこれまでに，**図 1**に示すような突合わせ継手の強度を特異応力場の強さ (Intensity of Singular Stress Field, ISSF) を用いて評価し，突合わせ継手の強度を種々の材料組合せについて接着層厚さによらず特異応力場の強さ ISSF 一定で表せることを示してきた^{5), 6)}．また，この方法を単純重ね合わせ継手にも応用し，単純重ね合わせ継手の強度も特異応力場の強さ ISSF 一定で表現できることを示した^{7)~10)}．

ところで，重ね合わせ継手接合の強度評価には，単純重ね合わせ継手 (SLJ-**図 2(a)**) と，接合面を 2 面有する二重重ね合わせ継手 (DLJ-**図 2(b)**) が広く用いられており，JIS 規格にも規定されている¹¹⁾．しかし，**図 3**に示すようにこれら 2 つの方法による接着強度には 200%以上の差があり，DLJ の方が強く評価されることが報告されている¹²⁾．このことは，SLJ と DLJ で本来同じであるべき破壊条件が実際には異なることを示唆している．したがって，試験片形状に影響されないせん断条件下の「接着強さ」を求める試験方法の確立が望まれる．そこで本研究では，単純重ね合わせ継手に関して，拘束条件や被着材の厚さに注目し，特異応力場の強さ ISSF の観点から破壊条件に差異が生じる原因を調査し，新たな試験条件と試験方法について検討する．なお，接着強度は組み合わせる材料によって異なってくるので^{10), 12)}，本研究では，同一接着剤と被着材を用いた場合に限定する (後述する**表 2** 参照)．

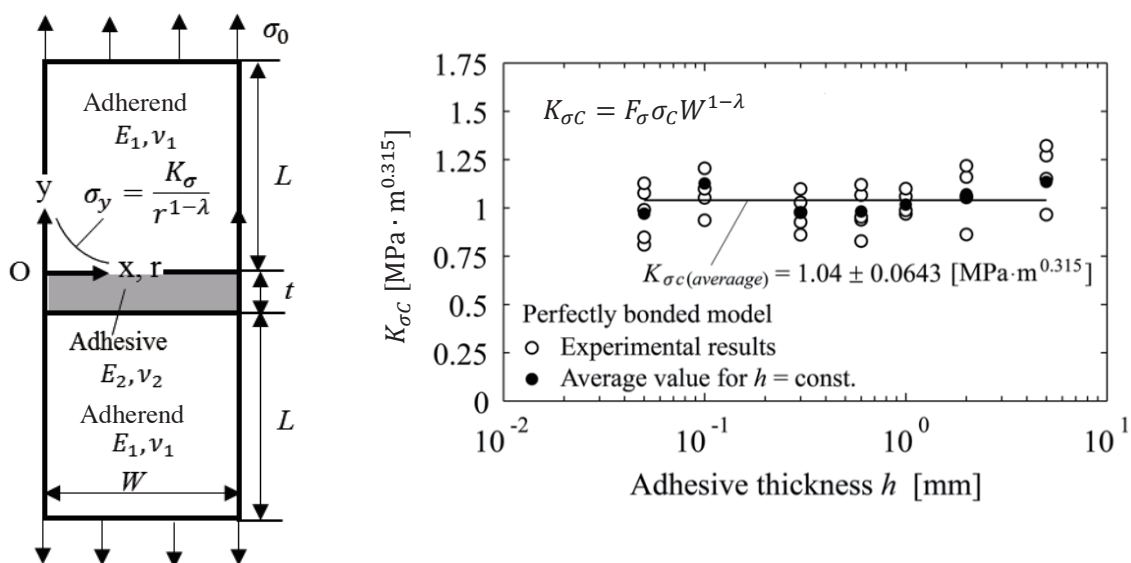


Fig. 1 Butt joint strength expressed as $K_\sigma = \text{const}$



Fig. 2 Two kinds of lap joint specimens for meaning joint strength

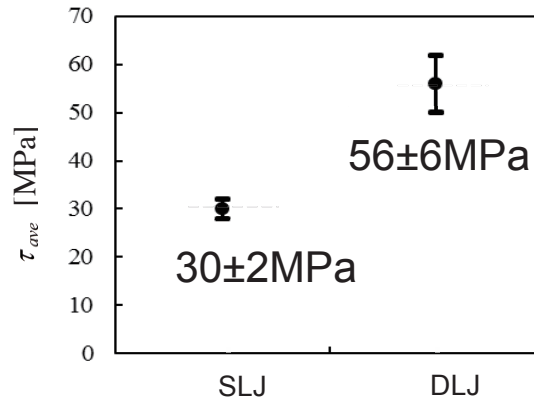


Fig. 3 Adhesive strength for SLJ and DLJ (adherend: S45C, adhesive: epoxy)

2 単純重ね合わせ継手に生じる特異応力場

図4に本研究で考察する単純重ね合わせ継手の解析モデルを示す. Park ら¹¹⁾は表1に示すように試験片全長=225mmとし, 被着材寸法を $t_1=7\text{mm}$, $d=10\text{mm}$, $L=50\text{mm}$ と固定して, 接着層厚さを $t_{ad}=0.15\sim 0.90\text{mm}$, 長さを $l_{ad}=10\sim 50\text{mm}$ の範囲で変化させて接着強度を調べている. 実験では, 被着材にアルミニウム合金 6061-T6, 接着剤にエポキシ系接着剤を用いており, その機械的性質を表2に示す. 接着層界面上(図4(b), $\theta=0$)で, θ 方向の応力 σ_θ は式(1)のように表すことができる^{7),8)}. ここで, λ_1 と λ_2 は界面における2つの応力の特異性指数である.

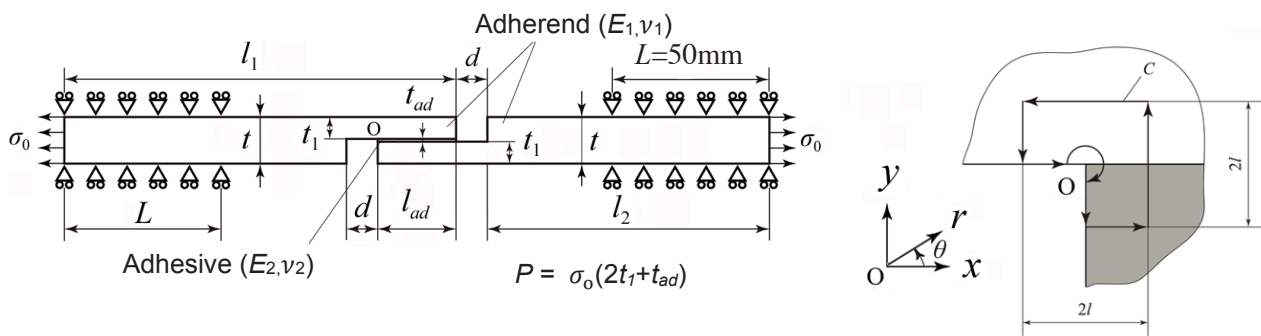
$$\sigma_\theta = \frac{K_{\sigma,\lambda_1}}{r^{1-\lambda_1}} + \frac{K_{\sigma,\lambda_2}}{r^{1-\lambda_2}} \cong \frac{K_{\sigma,\lambda_1}}{r^{1-\lambda_1}} (1 + C_\sigma r^{\lambda_2-\lambda_1}) \quad (1)$$

特異応力場の強さ K_{σ,λ_1} および K_{σ,λ_2} は著者らがこれまでに用いてきた方法を基に求めることができる⁸⁾. 有限要素解析コードには, 市販の MSC Marc 2012 R1 を用いた. 式(1)において特異応力場の強さは上記の接着層の寸法範囲では, K_{σ,λ_1} で支配され, C_σ は式(2)に示すようにほぼ一定値をとる.

$$C_\sigma = -5.321 \pm 0.338 \quad (2)$$

図5は接着層の破壊条件がラップ長さ l_{ad} が短い場合を除いて接着層寸法に依らず $K_{\sigma c}$ =一定で表されることを示している. 実験では荷重中心を接着剤の軸に揃える目的でガイドブロックを用いることがある. 図5(a)はガイドブロックがない場合, 図5(b)はガイドブロックがある場合の結果である. 両者で $K_{\sigma c}$ の値が異なるのは, ガイドブロックを用いることによって接着層内部のボイドの数と大きさが減少するためである¹³⁾と考えられる.

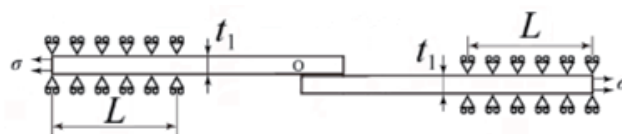
ところで, 上述の Park らの研究では被着材厚さ $t_1=7\text{mm}$ が用いられているが, JISK6850 では $t_1=1.5\text{mm}$ が規定されているため, 通常の単純重ね合わせ継手(JIS)に引張りを加えると, 接着面に生じる面外曲げ変形にともなうはく離力(面垂直応力)の影響によって特異応力場の強さが大きくなり, 破壊強度が低下すると考えることができる. すなわち, 単純重ね合わせ継手を垂直応力のない純粋せん断のもとで破壊させる条件は, 小さい K_{σ,λ_1} に注目し, これを求めることに他ならない. したがって, K_{σ,λ_1} を最小にできるような拘束条件や試験片の形状を検討する必要がある. なお, 特異応力場の強さ K_{σ,λ_1} を解析する方法について, 著者らはさきに, 有限要素法のメッシュに依存しない解析方法を提案している^{7)~10)}. 本研究では, その解析方法を用



(a) Analysis model considered

(b) Detail around corner O

($t_1=1.5\sim 53\text{mm}$, $l_{ad} + 2d + 2l_2 = \text{total length} = 225\text{mm}$)



(c) JIS K6850 specimen ($t_1 = 1.5\text{mm}$, $L = 50\text{mm}$)

Fig. 4 Analysis model and boundary condition

Table1 Dimensions of the adhesive joint specimens and ISSF

Specimen	l_{ad} [mm]	t_{ad} [mm]	$K_{\sigma c} [\text{MPa} \cdot \text{m}^{1-\lambda_1}]$
A20	20	0.15	3.70
A25	25	0.15	4.05
A30	30	0.15	3.95
A35	35	0.15	4.22
A40	40	0.15	4.41
A50	50	0.15	3.96
A25-30	25	0.30	3.92
A25-45	25	0.45	3.86
A25-90	25	0.90	3.86
A30-30	30	0.30	4.40
A30-45	30	0.45	4.13
A30-90	30	0.90	3.91

Table 2 Material properties of adhesive and adherend

Material		Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν	α	β	λ_1	λ_2
Adherend	Aluminum alloy 6061-T6	68.9	0.30	-0.8699	-0.06642	0.6062	0.9989
Adhesive	Epoxy resin	4.20	0.45				

いるので、メッシュサイズ等の詳細を示すことを省略する。

そこで、面外曲がりに対する影響が大きい被着材厚さ t_1 を $1.5\text{mm}\sim 53\text{mm}$ の範囲で変化させて、一定の引張力 $P=14.15\text{N}$ を加え、他の試験片寸法条件を一定にして、特異応力場の強さ K_{σ, λ_1} を求めた。ここで、本研究では Park らが比較的厚い試験片 $t_1 = 7\text{mm}$ のアルミニウム合金被着材を用いて実験を行っているため、Park らの実験と同じ被着材と接着剤の機械的性質を用いて解析を行う。図 6 に $K_{\sigma, \lambda_1} - t_1$ の関係を示す。図 6 によれば、被着材厚さ t_1 が厚くなると共に K_{σ, λ_1} は大きく減少していき被着材厚さ $t_1 = 25\text{mm}$ で最小値 $K_{\sigma, \min} =$

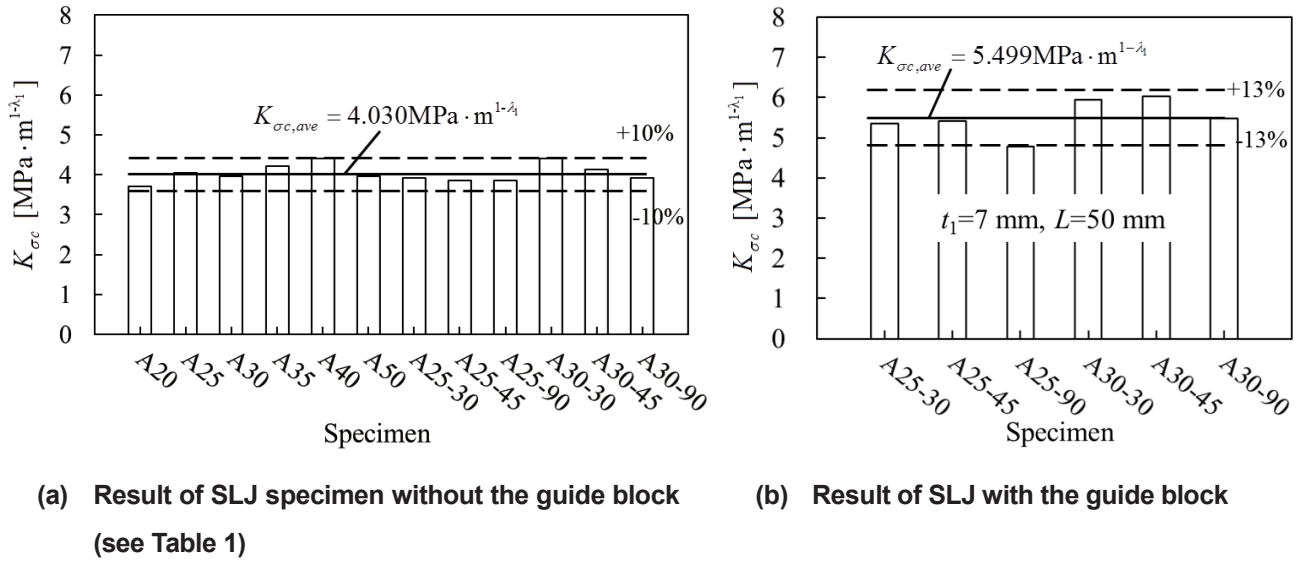


Fig. 5 Debonding fracture criterion $K_{\sigma c}$

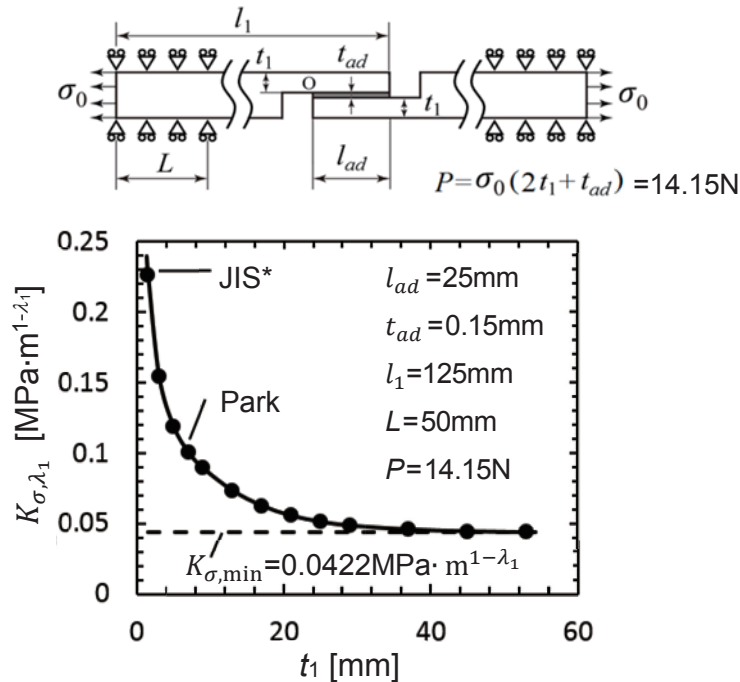


Fig. 6 Effect of adherend thickness t_1 on K_{σ, λ_1} (JIS*: JIS K6850 prescribes specimen details as $t_1 = 1.5 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ mm}$)

0.0422 MPa·m^{1-λ₁}に17%の誤差でおおよそ等しい値をとる．ところで, JIS K6850¹¹⁾で規定されている SLJ ($t_1 = 1.5 \text{ mm}$)の特異応力場の強さ $K_{\sigma, \lambda_1}|_{t_1=1.5 \text{ mm}} = 0.2270 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1-\lambda_1}$ は最小値 $K_{\sigma, \min} = 0.042 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1-\lambda_1}$ より4倍以上大きく, 接着試験片引張り時に生じる曲がりの影響が大きく出ていることがわかる．比較に厚い被着材 ($t_1 = 7 \text{ mm}$)を用いた Park ら¹³⁾の試験片でも, $K_{\sigma, \lambda_1}|_{t_1=7 \text{ mm}} = 0.1010 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1-\lambda_1}$ は最小値より2倍以上大きく, 厚さが不十分であることは明らかである．曲がり効果の少ない, 小さな特異応力場の強さ K_{σ, λ_1} を得るためには, より厚い被着材試験片を用いる必要がある．

3 単純重ね合わせ継手と二重重ね合わせ継手の強度が同じになる条件

ここでは JIS 規格に基づく単純重ね合わせ継手(SLJ)と二重重ね合わせ継手(DLJ)の強度が等しくなる条件を検討する。JIS 規格に準じた 2 種の重ね合わせ継手を用いた試験片で、双方の接着強度が同じ値で求められることが合理的であると考えられる。図 7 はこれら 2 種類の重ね合わせ継手の解析モデルで、 l_{ad} , t_{ad} , l_1 , L は図 6 と同様とする。ここでタブは荷重のかかる部分を接着面の延長線上にし、接着部に生じる曲げモーメントを小さくするために用いる。ここではタブの効果を見るために、タブがある場合とない場合の 2 通りを考える。

二重重ね合わせ継手では、図 7(a), (b)における O_1 点と O_2 点で特異応力場の強さは異なる。そこで、図 8 に O_1 点、 O_2 点での被着材厚さ t_1 と特異応力場の強さ K_{σ, λ_1} の関係を示す。図 8 より、 O_1 点の方が O_2 点より特異応力場の強さが大きく、 O_1 点で接着剤がはく離しやすいことがわかる。また、タブの効果により K_{σ, λ_1} は t_1 が大きい所で減少し、接着強度を増加させることがわかった。したがって、以下では二重重ね合わせ継手

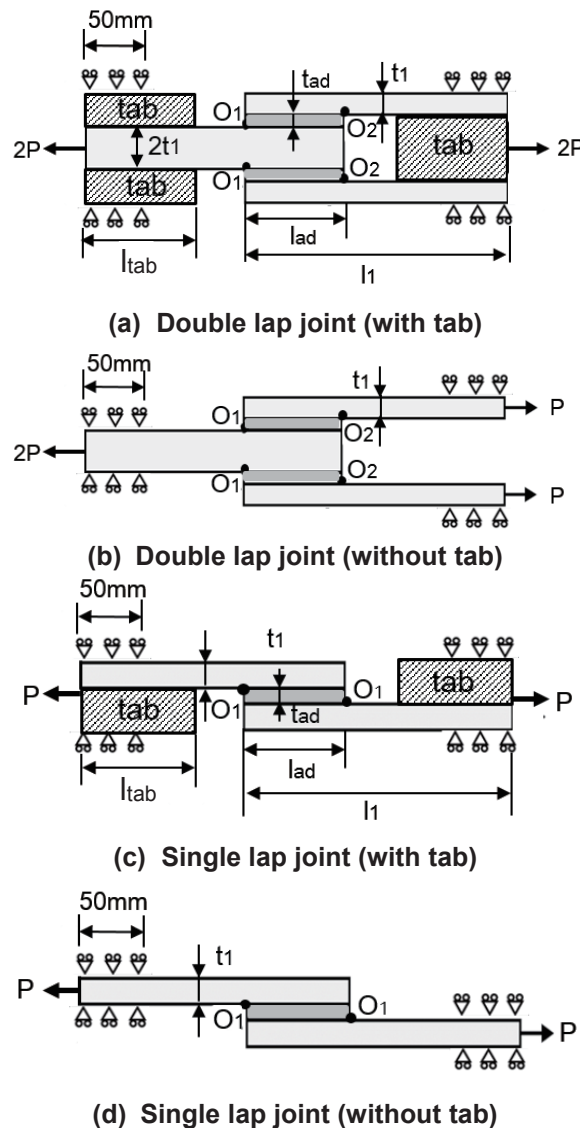


Fig. 7 Model of single lap joint (SLJ) and double lap joint (DLJ)
($l_{ad}=25\text{mm}$, $t_{ad}=0.15\text{mm}$, $l_1=125\text{mm}$, $l_{tab}=90\text{mm}$)

の O_1 点での強度と単純重ね合わせ継手の強度が等しくなる条件を考える．なお，単純重ね合わせ継手では対称性があるため， O_1 点と O_2 点での特異応力場の強さは等しい．

図 9 に O_1 点に注目して，DLJ と SLJ の特異応力場の強さを比較して示す．両者の継手ともに， t_1 が大きくなるにつれ K_{σ, λ_1} は減少し， t_1 が十分大きくなると一定値に収束することがわかる．JIS に規定されている被着材厚さ $t_1 = 1.5\text{mm}$ の DLJ の特異応力場の強さに等しい強さを SLJ で得るためには，SLJ の被着材厚さをおおよそ 7mm にする必要がある．また， $t_1 = 25\text{mm}$ まで厚くすると，二重重ね合わせ継手と単純重ね合わせ継手の特異応力場の強さはほぼ等しくなって，最小値に近い値をとる．

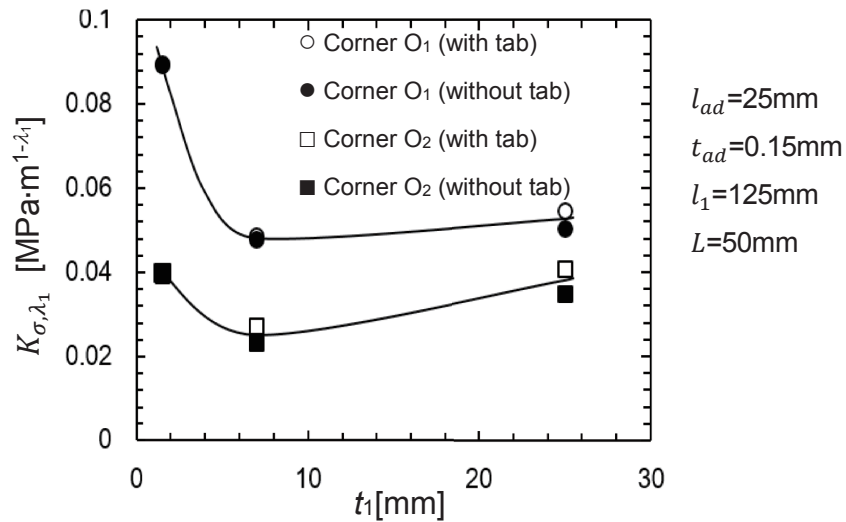


Fig. 8 Comparison between corner O_1 and corner O_2 for DLJ (see Figs. 7(a),(b))

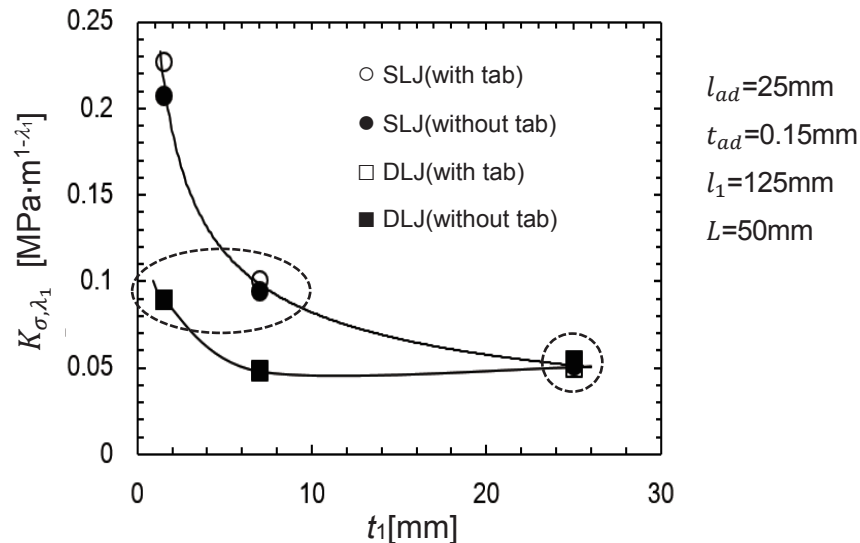


Fig. 9 Comparison between SLJ and DLJ at corner O_1 (see Figs. 7(a)-(d))

4 結言

本研究では，接着強度について接着境界端部における特異応力場の強さの観点から，単純重ね合わせ継手と二重重ね合わせ継手で接着強度が異なる原因について考察した．以下に，得られた結論をまとめる．

- (1) 単純重ね合わせ継手と二重重ね合わせ継手で接着強度が異なるのは単純重ね合わせ継手の変形しやすいため大きな負荷が生じるからである．
- (2) JIS に規定されている二重重ね合わせ継手の被着材厚さ 1.5mm と同じ特異応力場の強さにするには，

単純重ね合わせ継手の被着材厚さを 7mm にする必要がある。これは単純重ね合わせ継手は変形が大きいので試験片を厚くする必要があるためである。

- (3) 被着材厚さが 25mm 以上であれば単純重ね合わせ継手と二重重ね合わせ継手の特異応力場の強さは等しくなる。

参考文献

- 1) Jen, Y.M. and Ko, C.W.: Evaluation of Fatigue Life of Adhesively Bonded Aluminum Single-lap Joints Using Interfacial Parameters, *International Journal of Fatigue*, 32, (2010), 330.
- 2) Tsai, M.Y. and Morton, J.: An Investigation into the Stresses in Double-lap Adhesive Joints with Laminated Composite Adherents, *International Journal of Solids and Structures*, 47, (2010), 3317.
- 3) Li, G., Lee-Sullivan, P. and Thring, R.W.: Nonlinear Finite Element Analysis of Stress and Strain Distributions Across the Adhesive Thickness in Composite Single-lap Joints, *Composite Structures*, 46, (1999), 395.
- 4) Imanaka, M., Ishii, K. and Nakayama, H.: Evaluation of Fatigue Strength of Adhesively Bonded Single and Single Step Double Lap Joints Based on Stress Singularity Parameters, *Engineering Fractures Mechanics*, 62, (1999), 409.
- 5) Zhang, Y., Noda, N.-A., Takaishi, K. and Lan, X.: Effect of Adhesive Thickness on the Interface of Singular Stress at the Adhesive Dissimilar Joint, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 4, 10 (2010), 1467.
- 6) 野田尚昭, 宮崎達二郎, 内木場卓巳, 李戎, 佐野義一, 高瀬康: 接着接合板における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法について, *エレクトロニクス実装学会誌*, 17, 2 (2014), 132.
- 7) 宮崎達二郎, 野田尚昭, 内木場卓巳, 李戎, 佐野義一: はく離強度の便利で正確な評価法の提案, *自動車技術会論文集*, 45, 5 (2014), 895.
- 8) 宮崎達二郎, 野田尚昭, 李戎, 内木場卓巳, 佐野義一: 特異応力場の強さに基づく単純重ね合わせ継ぎ手のはく離破壊基準の検討, *エレクトロニクス実装学会誌*, 16, 2 (2013), 143.
- 9) Noda, N.-A., Miyazaki, T., Li, R., Uchikoba, T., Sano, Y. and Takase, Y.: Debonding Strength Evaluation in Terms of Intensity of Singular Stress at the Interface Corner with and without Fictitious Crack, 61, (2015), 46-64.
- 10) Zhang, Y., Wu, P. and Duan, D.: Corrigendum to “A Mesh-Independent Technique to Evaluate Stress Singularities in Adhesive Joints” [*Int. J. Adhesion Adhesives* 2015:57: 105-117]; Zhang, Y., Noda, N.-A., Wu, P. and Duan, M.: *Int. J. Adhesion Adhesives* 2015 :60:130.
- 11) JIS K6850: 接着剤—剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法, (1999).
- 12) 池上皓三, 京極秀樹, 川越治郎, 杉林俊雄, 能野謙介, 藤井透, 元家勝彦, 吉田総仁: 接着継手強度の総合的評価のためのベンチマークテスト (第 1 報, 突合せ, 単純重ね合せ, 二重重ね合わせ継手および DCB 試験結果), *日本機械学会論文集 (A 編)*, 63, 608 (1997), 830.
- 13) Park, J.H., Choi, J.H and Kweon, J.H.: Evaluating the Strengths of Thick Aluminum-to-Aluminum Joints with Different Adhesive Lengths and Thicknesses, *Composite Structures*, 92, (2010), 2226.