

CFRP 板接着鋼板の欠損部の降伏がはく離せん断応力に与える影響

西日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○河津 公太
大阪大学大学院工学研究科 正会員 大倉 一郎

1. はじめに

現在、引張りを受ける鋼板を CFRP 板で補修する場合、損失した部分に対する伸び剛性以上の伸び剛性を有する CFRP 板が接着される¹⁾。この場合、欠損深さが深くなると、欠損部が降伏する可能性がある。本研究は、欠損部が降伏することが接着剤のはく離せん断応力に与える影響を明らかにする。

2. 基礎式

図-1 に示すように、CFRP 板が上下に対称に接着された、欠損を有する鋼板に引張応力 σ_{sn} が作用している。欠損部の接着剤の厚さは大きいので、欠損部の鋼板から CFRP 板に伝達される力は小さいと仮定して、欠損部に存在する接着剤を無視する。欠損部の鋼板が降伏していない場合に対して、欠損部の鋼板に生じる応力 σ_{sd} 、欠損部の CFRP 板に生じる応力 σ_{cd} 、欠損部の端の接着剤に生じるはく離せん断応力 τ_d と CFRP 板の端の接着剤に生じるはく離せん断応力 τ_l が次の様に与えられる²⁾。

$$\sigma_{sd} = \frac{\xi(1-\xi + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)})}{\frac{t_{sd}}{t_s}(1-\xi) + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)} \left(1 - \xi + \frac{t_{sd}}{t_s} \xi\right)} \sigma_{sn} \quad (1)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{t_s}{2t_c} \left\{ 1 - \frac{\frac{t_{sd}}{t_s} \xi (1-\xi) + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)}}{\frac{t_{sd}}{t_s}(1-\xi) + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)} \left(1 - \xi + \frac{t_{sd}}{t_s} \xi\right)} \right\} \sigma_{sn} \quad (2)$$

$$\tau_d = \frac{\lambda^2 t_s l_d \xi \left(1 - \frac{t_{sd}}{t_s}\right) (1-\xi)}{\frac{t_{sd}}{t_s}(1-\xi) + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)} \left(1 - \xi + \frac{t_{sd}}{t_s} \xi\right)} \sigma_{sn} \quad (3)$$

$$\tau_l = \lambda t_s \sqrt{\frac{1-\xi}{2}} \sigma_{sn} \quad (4)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G_e}{E_s h t_s}}, \quad \xi = \frac{E_s t_s}{2 E_c t_c + E_s t_s}$$

ここに、 E_s と E_c : それぞれ、鋼板と CFRP 板のヤング率、 G_e : 接着剤のせん断弾性係数、 h : 接着剤の厚さ、 l_d : 欠損部の鋼板の半長さ。

式(1)~(4)は、CFRP 板の接着長さ l_s が無限に長いと仮定した場合に対する結果である。

式(1)において、 σ_{sd} を鋼板の降伏応力 σ_{sy} に等しく置いて、欠損部の鋼板が降伏した瞬間の作用応力 σ_{snl} が次式で与えられる。

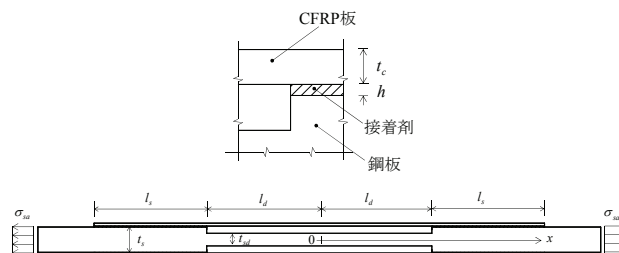


図-1 引張りを受ける CFRP 板接着鋼板

$$\sigma_{snl} = \frac{\frac{t_{sd}}{t_s}(1-\xi) + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)} \left(1 - \xi + \frac{t_{sd}}{t_s} \xi\right)}{\xi(1-\xi + \lambda l_d \sqrt{2(1-\xi)})} \sigma_{sy} \quad (5)$$

この時、欠損部の CFRP 板に生じる応力 σ_{cd} は次式で与えられる。

$$\sigma_{cd} = \frac{t_s}{2t_c} \sigma_{sn} - \frac{t_{sd}}{2t_c} \sigma_{sy} \quad (6)$$

σ_{snl} からの作用応力の増加分 $\sigma_{sn} - \sigma_{snl}$ に対して、欠損部の鋼板の伸びは自由である。したがって、 $\sigma_{sn} - \sigma_{snl}$ に対するはく離せん断応力は、 $t_{sd}/t_s = 0$ を式(3)に代入することによって与えられる。この式に、式(3)の σ_{sn} に σ_{snl} を代入した式を加え合わせることで、欠損部の鋼板が降伏した後のはく離せん断応力が次式で与えられる。

$$\tau_d = \frac{\lambda t_s}{2} \sqrt{\frac{2}{1-\xi}} \left(\xi \sigma_{sn} - \frac{t_{sd}}{t_s} \sigma_{sy} \right) \quad (7)$$

欠損部の鋼板が降伏した後も、 τ_l は式(4)と同形になる。

3. 鋼板応力、CFRP 板応力、はく離せん断応力の特性

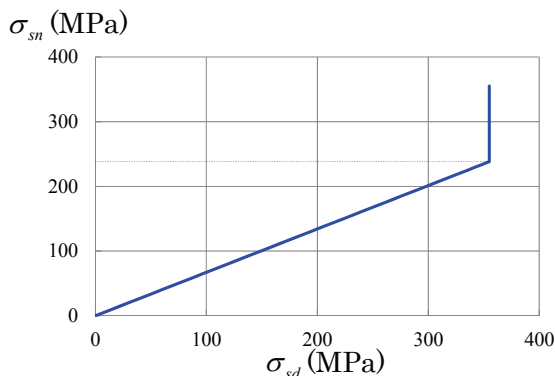
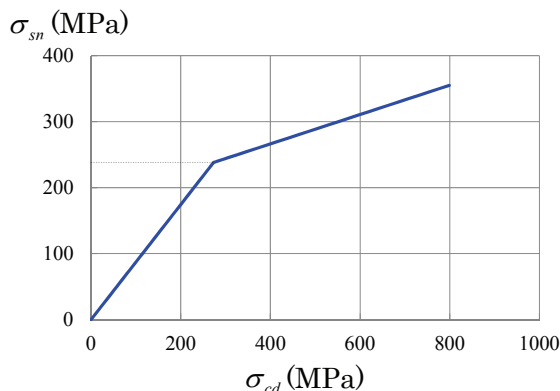
表-1 に示す材料特性を有する CFRP 板接着鋼板において、 $t_{sd}/t_s = 0.5$ 、 $l_d = 40\text{mm}$ 、 $t_c = 1\text{mm}$ ($\xi = 0.845$)、 $h = 0.32\text{mm}$ に対する σ_{sn} と σ_{sd} の関係を図-2 に示す。式(5)が与える σ_{snl} は 238MPa である。 σ_{sn} が 238MPa 以上で σ_{sd} は降伏応力になる。 σ_{sn} と σ_{cd} の関係を図-3 に示す。 σ_{sn} が 238MPa を超えると、 σ_{cd} の増加率が大きくなる。 σ_{sn} と τ_d および τ_l の関係を図-4 に示す。 σ_{sn} が 238MPa を超えても τ_l の増加率は同じである。

表-1 材料特性

鋼板 (SM490Y)	ヤング率 E_s (GPa)	200
	降伏応力 σ_{sy} (MPa)	355
CFRP 板	ヤング率 E_c (GPa)	165
接着剤	せん断弾性係数 G_e (GPa)	1.176

キーワード CFRP 板、欠損、鋼板、はく離せん断応力、降伏

連絡先 〒576-0871 吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 TEL06-6879-7620

図-2 σ_{sn} と σ_{sd} の関係図-3 σ_{sn} と σ_{cd} の関係

が、 τ_d の増加率は大きくなる。

4. 鋼板応力、CFRP 板応力、はく離せん断応力の各応力と鋼板の欠損比の関係

損失した部分に対する伸び剛性に等しい伸び剛性を有する CFRP 板の剛性比と鋼板の欠損比の関係は次式で与えられる。

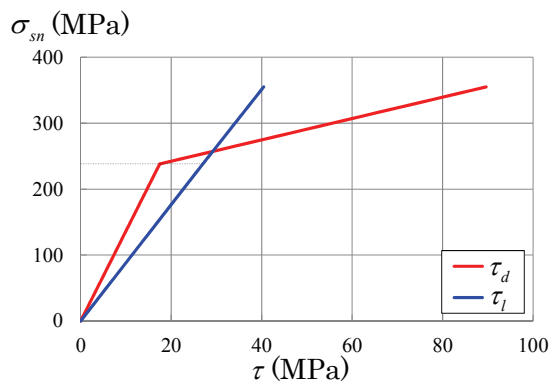
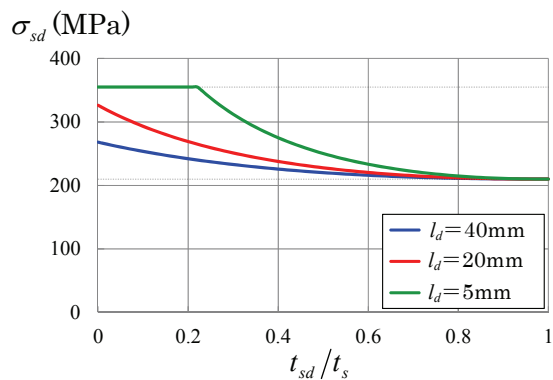
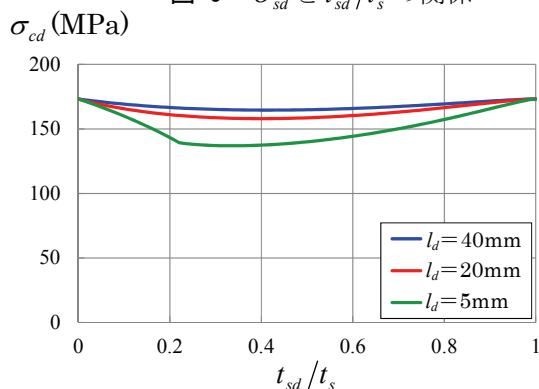
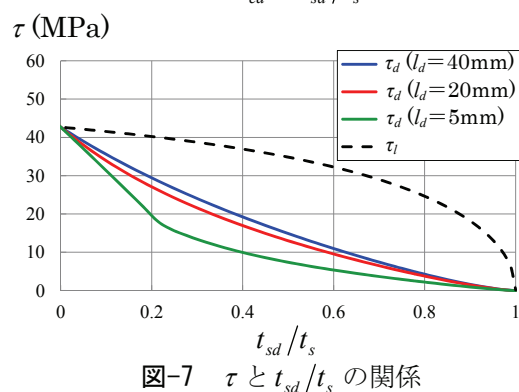
$$\xi = \frac{1}{2 - \frac{t_{sd}}{t_s}} \quad (8)$$

式(8)を満たし、 $\sigma_{sn} = 210\text{MPa}$ に対する σ_{sd} と t_{sd}/t_s の関係を図-5 に示す。 σ_{sd} は 210MPa 以上である。すなわち、 σ_{sd} は常に作用応力 σ_{sn} 以上である。 $l_d = 5\text{mm}$ に対して、 σ_{sd} は降伏する。 σ_{cd} と t_{sd}/t_s の関係を図-6 に示す。欠損部の鋼板の半長さ l_d が小さくなるに従って、 σ_{cd} は低下する。 τ_d または τ_l と t_{sd}/t_s の関係を図-7 に示す。 l_d が小さくなるに従って、 τ_d は低下する。 τ_l は常に τ_d より大きい。

5. 結論

損失した部分に対する伸び剛性に等しい伸び剛性を有する CFRP 板を接着した場合、欠損部の鋼板の応力は作用応力よりも常に大きくなる。欠損部の鋼板の降伏は、欠損部の端のはく離せん断応力に影響するが、CFRP 板の端のはく離せん断応力には影響しない。後者のはく離せん断応力は常に前者のはく離せん断応力より大きいので、欠損部の鋼板の降伏は CFRP 板のはく離に影響しない。

参考文献

図-4 σ_{sn} と τ の関係図-5 σ_{sd} と t_{sd}/t_s の関係図-6 σ_{cd} と t_{sd}/t_s の関係図-7 τ と t_{sd}/t_s の関係

- 1) 土木学会 複合構造委員会：FRP 接着補修による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合レポート 05，2012.
- 2) 河津公太，大倉一郎：CFRP 板接着鋼板の断面欠損部近傍のエポキシ樹脂に生じるせん断応力，第 67 回土木学会年次学術講演会，CS3-016，2012.