

FRPによる鋼部材補強効果の数値的評価 に関する基礎的検討

Fundamental study on numerical evaluation
for performance of retrofit of steel members by FRP

構造強度学研究室

高橋 一生

2019年2月7日



鋼構造の断面修復や補強(性能向上)の手段に **FRP接着**が提案され、活用されつつある。

→FRP(繊維強化プラスチック)材を
接着剤で鋼桁に貼付け、複合構造化。



複合構造の照査：複数の材料の一体化が前提

最新のFRP接着補修の指針では… (土木学会による指針(案))

補強部は鋼とFRPの
合成断面として計算

鋼とFRPが**確実に接着**され
一体化しているか確認

補強部の限界状態(特に**接着**)が**明確に**されていない。

限界状態を規定・照査するため、**はく離の発生・進展を予測**したい。

接着接合部の照査方法

- 模型実験 (石川ら(2008), 服部ら(2018) など)
→試験体作成のコストが伴う.
- 理論式 (石川ら(2012) など)
→弾性論なので, 応力を基準とした破壊開始点の予測に限られる.

有限要素解析

連続体の計算なので, 一般にはく離の表現は難しい.

→接着剤層ふくめ連続体としてモデル化.

- 弾性計算 (杉江ら(2013))
- 破壊を考慮して連続体計算 (Narmashiri et al. (2012))

進行性のはく離の
再現は行われず

ところで...

著者ら既往研究

鋼-コンクリート界面など異種材料界面の
付着・破壊を表現できる界面モデル

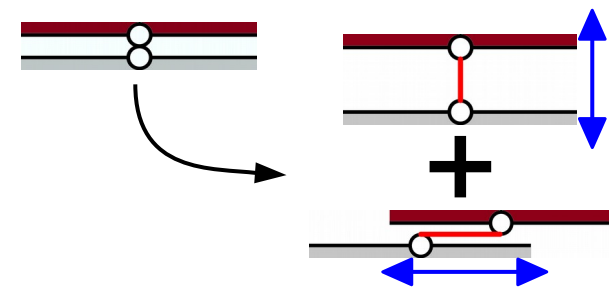
⇒接着剤による接着のモデル化に応用



**接着接合部の
はく離を表現できる
界面モデルを提案**

節点間接触モデルによる計算を試みる.

⇒弾塑性penaltyばね(接触面の直方向・せん断方向)
により節点間で接触力を伝達.
ばねの降伏により, **付着(接着)の破壊を表現.**

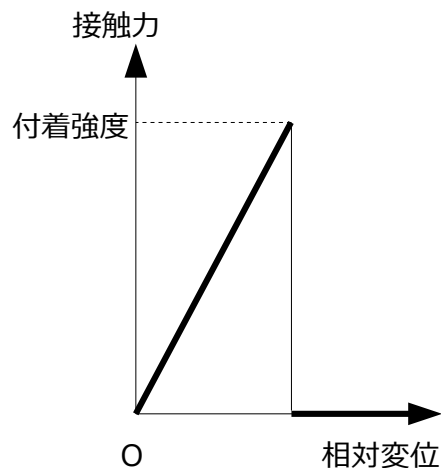


従来のモデル化： 応力基準

接触力が付着強度に達した段階で
「はく離した」と判定.



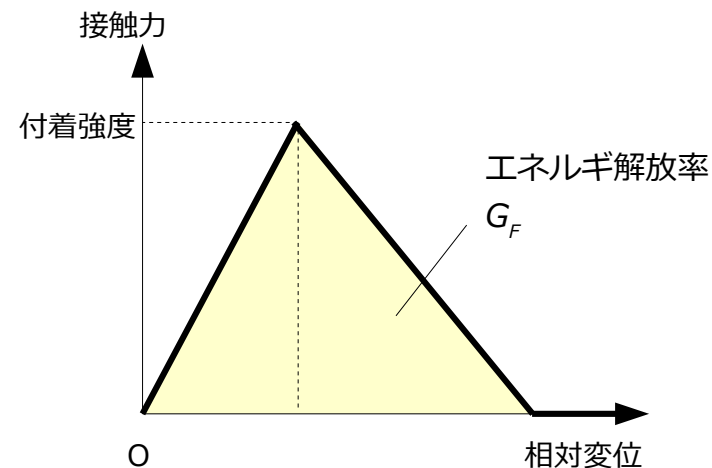
計算結果が
要素寸法に
依存する.



提案モデル：

エネルギー解放率による基準

はく離による界面生成の
エネルギー収支を考慮.
→ 結果が要素寸法に依存しない.



提案する界面モデルにより，要素寸法依存性が解消されていることを確認する．

検証用FEモデル (要素 10,20,50,100分割)

部材1

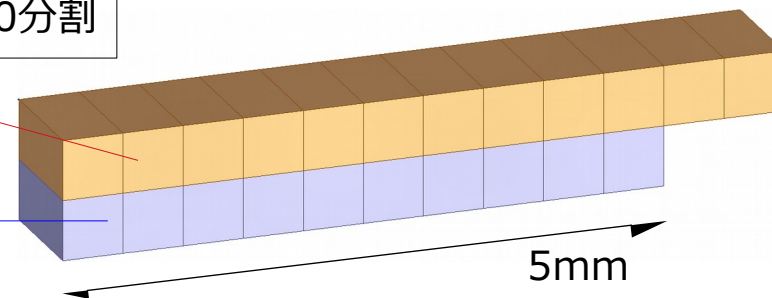
$$E = 210 \text{ GPa}, \nu = 0$$

部材2

$$E = 21 \text{ GPa}, \nu = 0$$

幅 1 mm, 貼付長 5 mm

10分割



接着剤…界面モデル

- エネルギー基準(提案モデル)

付着強度 23 MPa

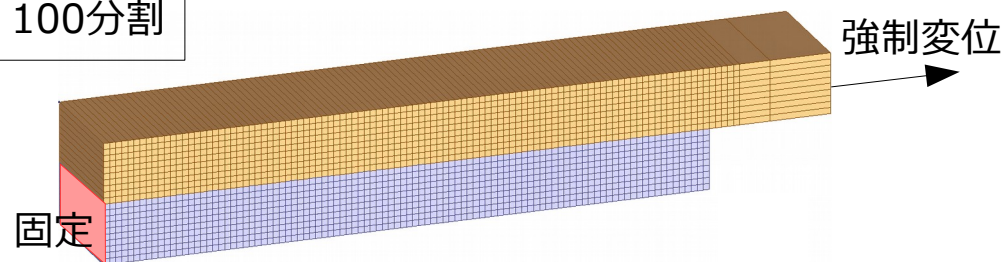
$$G_f = 0.1 \text{ N/mm}$$

(法線・接線)

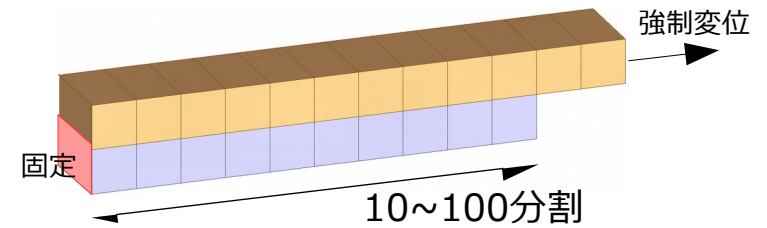
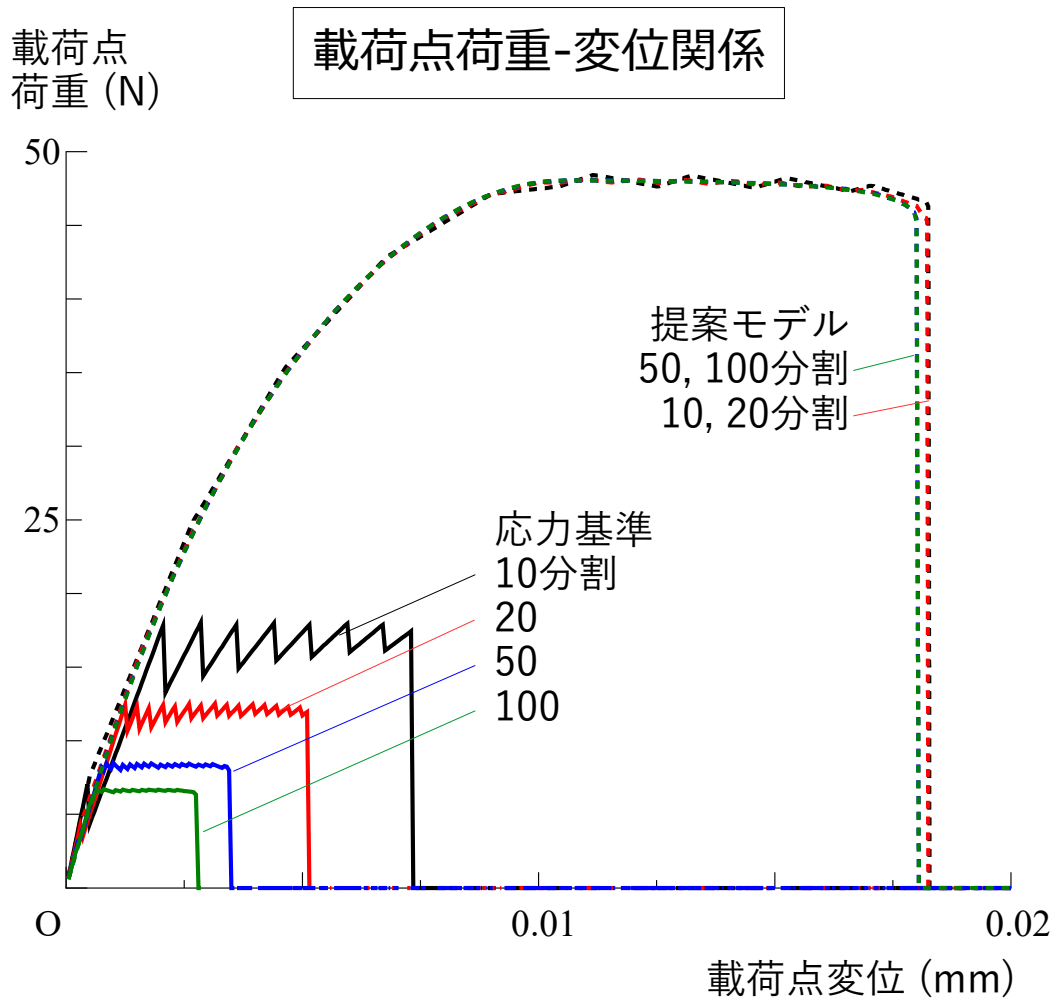
- 応力基準(従来のモデル)

付着強度 23 MPa

100分割



⇒部材2を固定し部材1に強制変位を与え，荷重を測定．



応力基準での計算

⇒分割数によりピークの荷重と
終局時の変位がいずれも変化.

提案モデルによる計算

⇒分割数によらず荷重-変位関係
の計算結果が収束.

はく離の挙動が**界面部の要素寸法によらず計算できた.**

石川ら(2006)が行った引張試験。
鋼板の両面にFRPを貼り付けた
試験片を引っ張る。

鋼…弾性

$$E = 203.5 \text{ GPa}, \nu = 0.28$$

FRP板…横等方・弾性

軸直交面内で等方

$$\text{軸方向} : E = 141.4 \text{ GPa}$$

接着剤…

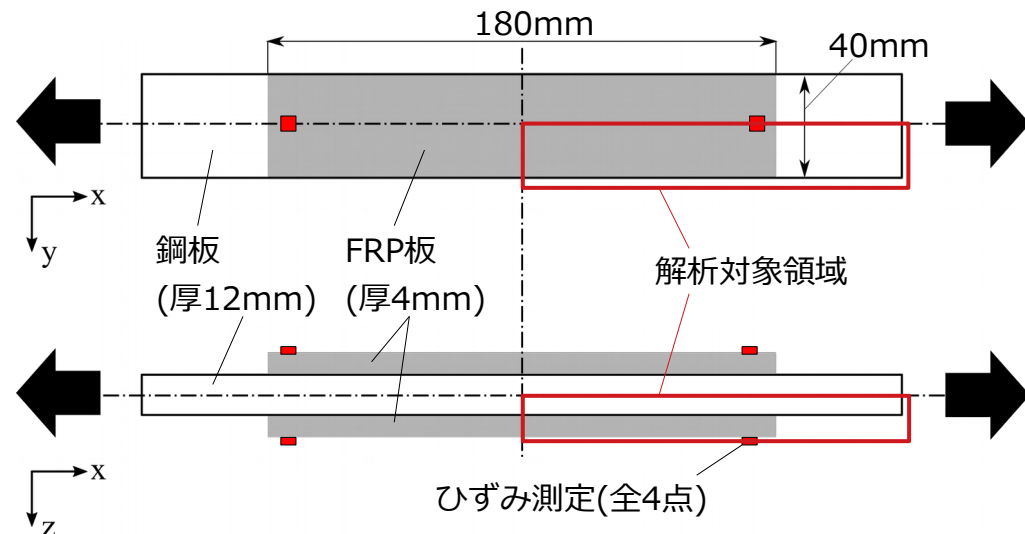
提案する界面モデル

付着強度 22 (接着剤せん断強度)

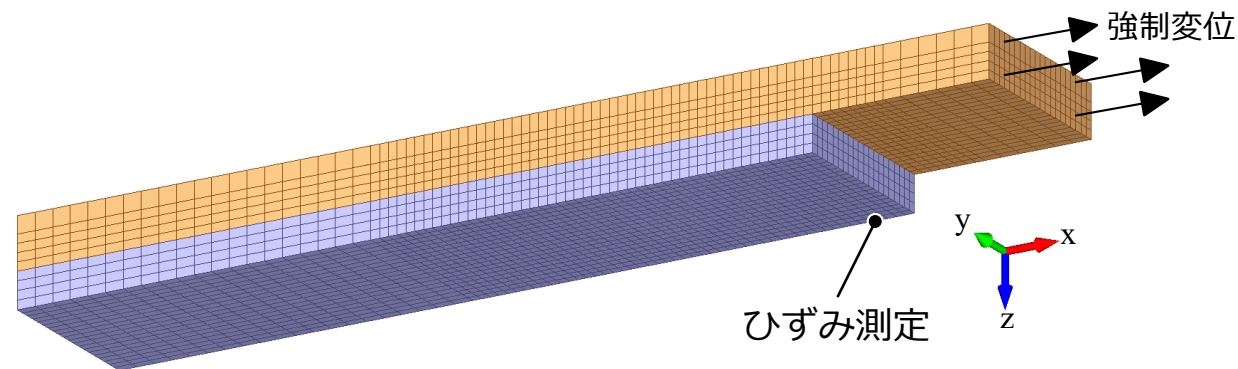
(MPa) 37 (実験値→理論式)

$G_F = 0.1 \text{ N/mm}$ (接線)

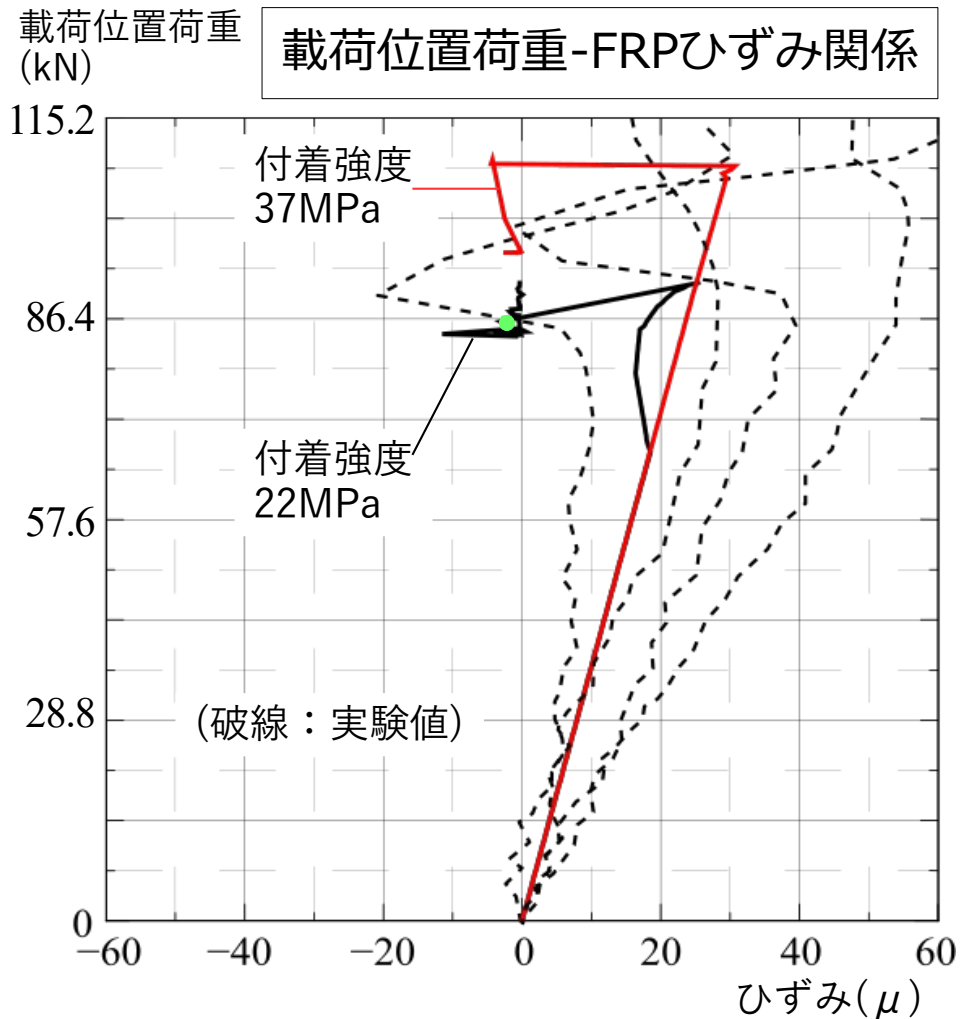
0.2 N/mm (法線)



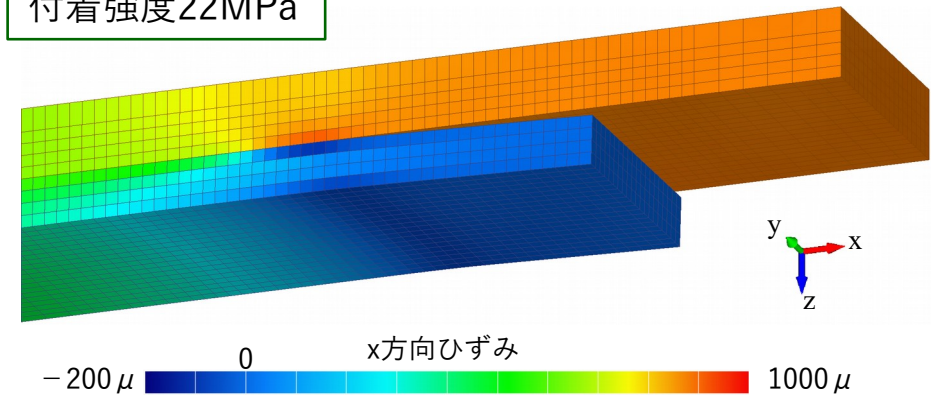
FE Model (1/8モデル, 要素の最小寸法1mm)



⇒鋼材端面に強制変位を与え, ひずみを測定。



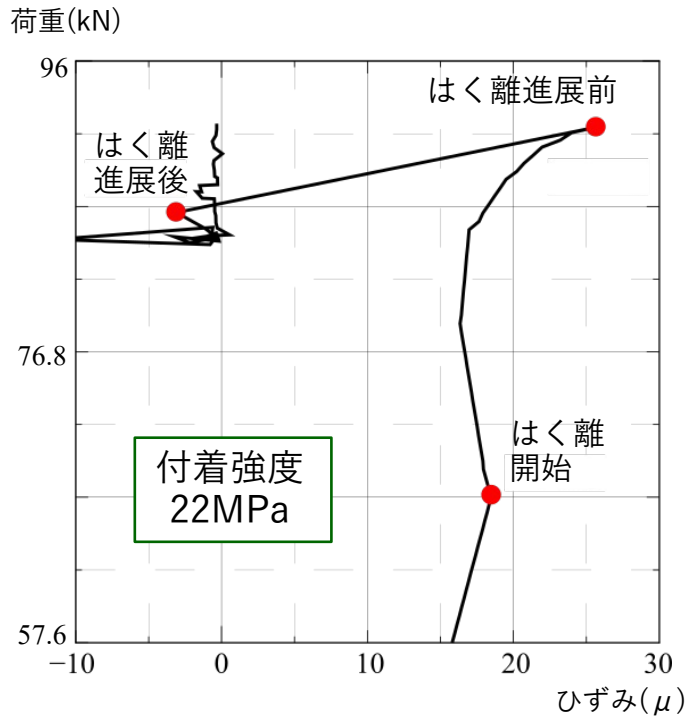
付着強度22MPa



- FRP端部のはく離に伴いひずみの急減が発生した。
- 付着強度の増加により，はく離発生の荷重は増加した。
- 付着強度22MPaケースでののはく離発生の荷重が，実験のひずみ低下時の荷重に最も近い値となった。

実験結果のはく離荷重を予測できた。

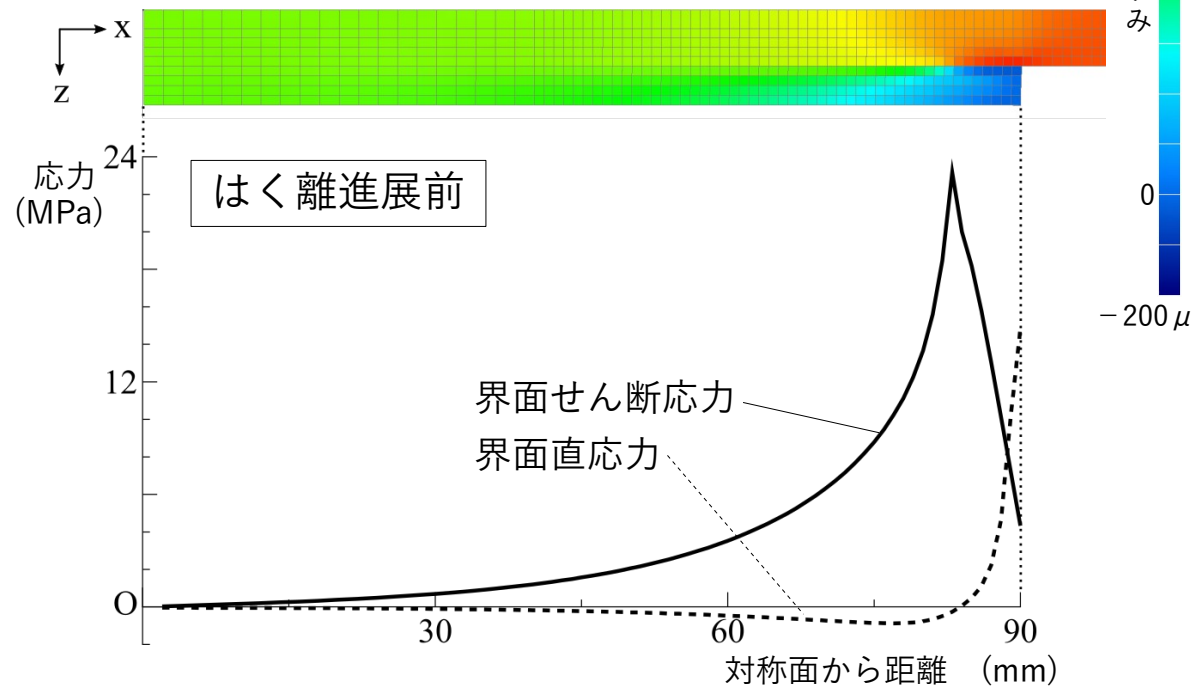
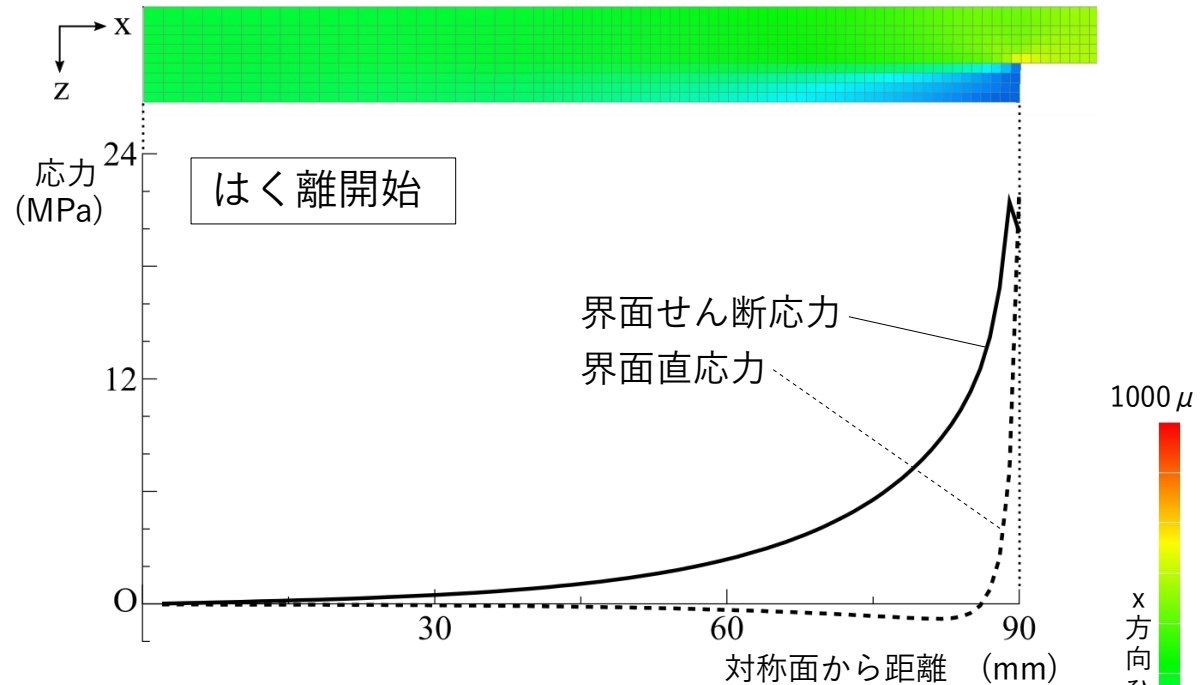
界面の応力分布(はく離開始～進展直前)



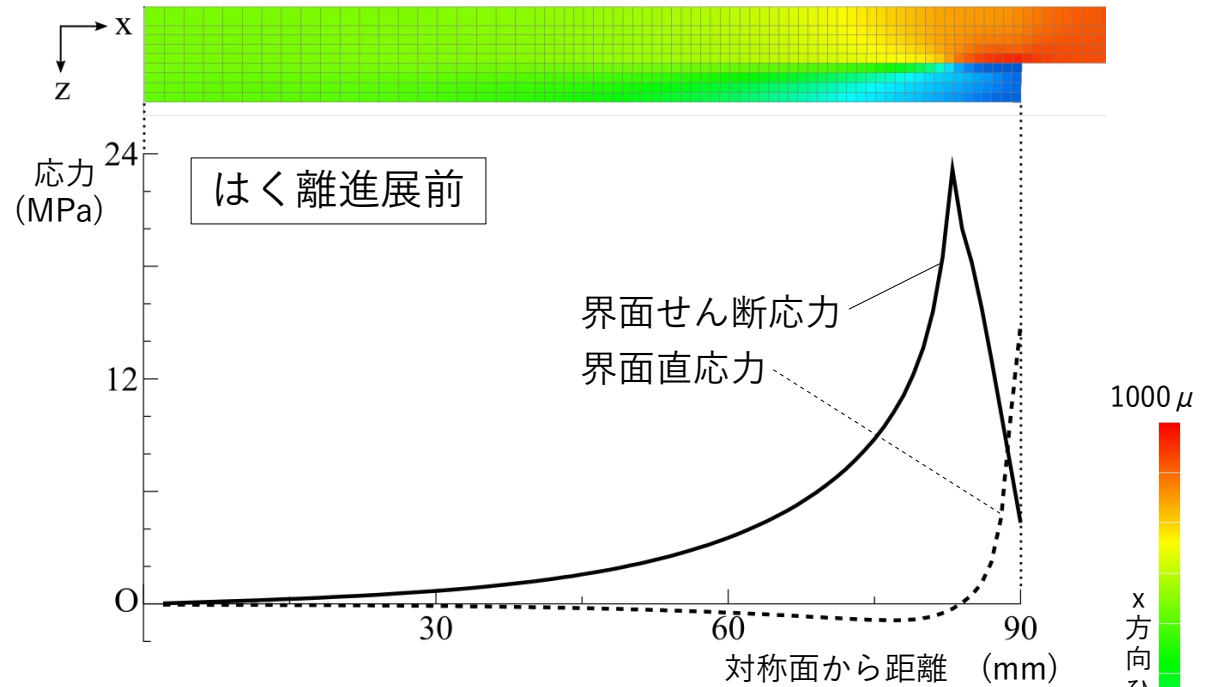
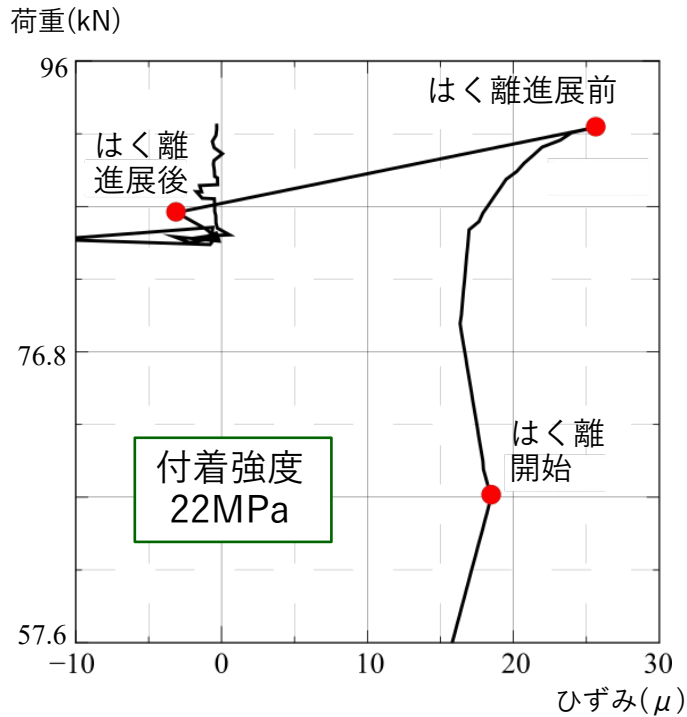
貼付端部の界面せん断応力が付着強度に到達し, 界面のはく離が始まる.



载荷進行に伴い界面せん断応力のピーク位置が移動.

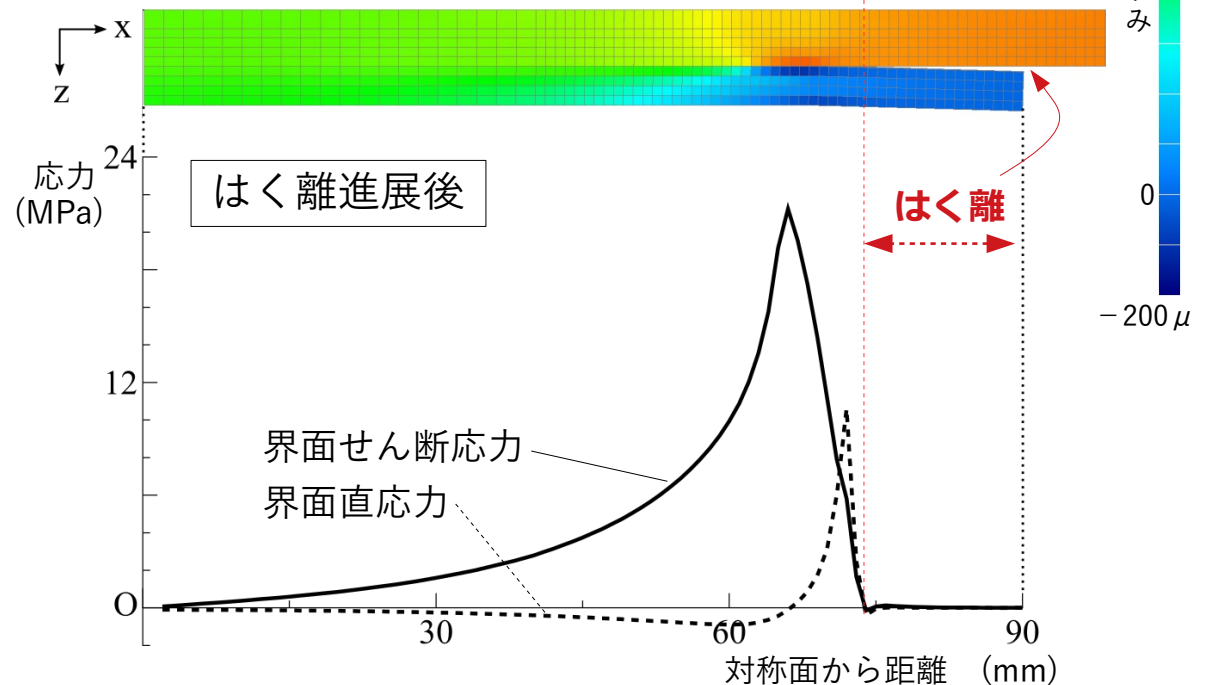


界面の応力分布(はく離進展前後)



端部から界面応力がゼロまで低下し, はく離が進展した. 界面せん断応力のピーク位置は引き続き移動した.

⇒ **はく離発生**の表現と, **応力分布の変化の追跡**が可能.



FRP接着された鋼部材の有限要素解析について、
鋼材へのFRP材接着・はく離を表現した界面モデルを提案した。

- 界面モデルにエネルギー解放率による破壊基準を組み込むことで、結果が要素寸法に依存しないことを確認した。
- 提案する界面モデルでFRP材の接着とはく離を表現できた。
はく離の進展に伴う、界面の応力分布の変化を追跡できた。
- 提案する界面モデルでの計算結果は、接着部の限界状態の設定や照査に活用可能である。