

FRP 材と鋼材との接着界面の力学性状とその構造ヘルスモニタリング

Mechanical Behavior of FRP-Steel Bond Interface and its Structural Health Monitoring

山田 聖志*, 中島 慎一*, 吉田 安寿*, 山田 聡**, 小宮 巖***

Seishi Yamada, Shin-ichi Nakajima, Yasukazu Yoshida, Satoshi Yamada, Iwao Komiya

*豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

**トピー工業 (〒441-8074 愛知県豊橋市明海町 5-29)

***福井ファイバーテック (〒441-3196 愛知県豊橋市中原町岩西 5-1)

The mechanical and delamination behavior of bond interface between FRP and steel plate has been investigated in the present study. Eleven FRP reinforced steel strips and nine FRP-steel lap joints have been subjected to tension loading. Simple analytical stress distribution considering bond layer shear stress has been obtained and compared with experimental results. Fiber Bragg grating sensors have been installed in the bond interface for structural health monitoring. The fiber Bragg grating power spectra have shown to inform the initial occurrence of delamination. Alternative new methods of structural health monitoring for the bond interface have been discussed in the present paper.

Key Words : delamination, bond interface, pultrusion product, fiber Bragg grating sensor.

キーワード: 剥離, 接着界面, 引抜成形品, 光ファイバセンサ

1. はじめに

近年, 既存構造物の補修や補強に, 複合材料が採用されはじめている^{1)~5)}. 様々な自然災害に対する構造物の健全性を評価し, それに備えることは極めて重要であり, そのための構造ヘルスモニタリングが種々検討されるようになった. こうした構造ヘルスモニタリングは長期的に行われるものが多く, 高精度・高安定性のセンサが必要となる. 筆者らは, 光ファイバセンサ (FBG センサ) を用いることで, 高精度な歪計測が可能であることや, センサの波形を計測することで FBG センサ装着部の異常を捉えることが可能であることを実験的に明らかにしてきた^{6)~9)}. その中で, 光パワスペクトルの形状変化が, 局所的な応力集中による歪分布の不均一性によるもので, 例えば, FRP では樹脂 (マトリックス) のマイクロクラックの発生が原因であることや, 鋼材では降伏後の歪の偏り (Lunders 帯) によるものであることを示してきた.

本報では, 鋼材と FRP との接着界面の剥離損傷について, 補修・補強を想定した場合の補強タイプ試験体, 並びに, 鋼ガセットを介した FRP トラス部材の継手接合を想定した接合タイプ試験体の 2 種類について, 引張載荷実験を行った結果を報告する. 応力伝達の基礎的な解析では, 鋼材の軸方向応力と接着層のせん断

応力の分布性状に注目し, 実験での計測結果との比較も検討している. 最後に, 構造ヘルスモニタリングの可能性を検討するため, FBG センサを接着界面に装着し, FBG センサの光パワスペクトルの変化から剥離損傷開始時点を予兆する新しい方法を検討・提案している.

2. FRP 材接着補強タイプ

2.1 実験概要

図-1 に補強タイプ引張試験体概要を示す. 長さ 200mm, 厚さ 4mm, 幅 25mm の FRP 材を, 長さ 500mm, 厚さ 12mm, 幅 25mm の鋼材に接着補強している. FRP 材は繊維体積含有率 57 % の一方向材でヤング係数は 45GPa である. FRP 材と鋼材の接着にはエポキシ系接着剤を用い, 接着長さは FRP 材による補強長さと同じ 200mm を採用した. 表-1 には試験体の名称と, FRP 材の補強数および FBG センサの有無を示す.

本実験で使用した市販の FBG センサは, 光を搬送するコア部とその外側のグラッド部から構成されており, コア部には長さ 10mm のセンサ部に約 20000 個のブラッグ回折格子が書き込まれている. この格子に入射された光のうちブラッグ波長 λ_B (格子間隔に依存) と呼ばれる特定の波長成分が反射する. λ_B は格子間隔の変

化に伴って変化し、その変化量 $\Delta\lambda_B$ を次の校正換算式に代入することでその歪値を得ることができる。

$$\varepsilon(\mu\text{strain}) = 833(\mu\text{strain}/\text{nm}) \times \Delta\lambda_B(\text{nm}) \quad (1)$$

購入時は単一ピーク型光パワースペクトルのものとして生産されたセンサが、鋼材の降伏後には複数ピーク型のそれを有するように変化する⁶⁾。

補強タイプ試験体では、図-1に示す A-A'断面の鋼材側と FRP 材側の各々の接着する面に溝を設置して、その溝内に予め FBG センサを接着しておいた後に、両者を接着剤で一体化した。鋼材に装着した FBG センサからの出力を FBG-S、電気式歪ゲージからのそれを ESG-S とおく。同様に、FRP 材に装着した FBG センサからの出力を FBG-F とし、電気式歪ゲージからのそれを ESG-F1~ESG-F4 とおく。FBG センサの接着にはエポキシ系接着剤 EB2 (商品名)、鋼材と FRP 材の接着はエポキシ系接着剤 AW106 (商品名) を用いた。接着の厚さは、できるだけ薄くするように努めたが、いずれの試験体も実験後の計測で 0.4mm 程度であったことを確認している。

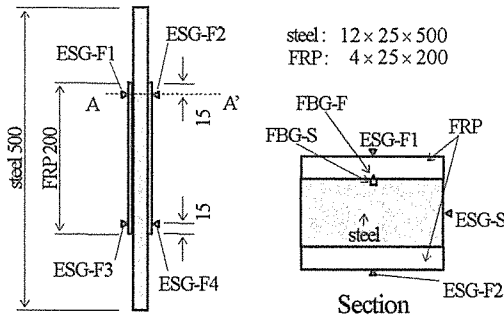


図-1 補強タイプ試験体：TD-series

表-1 補強試験体の名称リスト

No.	memo	
TG61N	single	without FBG
TG62F	single	with FBG
TG63F	single	with FBG
TD71N	double	without FBG
TD72N	double	without FBG
TD73N	double	without FBG
TD74F	double	with FBG
TD75F	double	with FBG
TD76F	double	with FBG
TD77F	double	with FBG
TD78F	double	with FBG

2.2 応力解析

図-2は TD78F の場合の結果で、载荷の初期状態である 60kN 時の応力分布を示したものである。実線は解析解である。尚、グラフの横軸の原点は、試験体の中央にとっており、100mm までが補強範囲である。解析は、試験体の中央を x 座標の原点とした次式の微分方

程式をもとに実施した。

$$\frac{d^2 S_s}{d\xi^2} - \lambda^2 S_s = -\frac{PG_a l^2}{2E_f t_f t_a} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \lambda = \sqrt{\frac{G_a l^2}{t_a} \left(\frac{2}{E_s t_s} + \frac{1}{E_f t_f} \right)}, \quad G_a = \frac{E_a}{2(1+\nu_a)}, \quad \xi = \frac{x}{l}.$$

E_s, E_f, E_a は鋼材, FRP 材, 接着材のヤング係数である。

t_s, t_f, t_a は鋼材, FRP 材, 接着材の厚さであり, ν_a は接着剤のポアソン比である。 $x = \pm l$ (図-1 の試験体では $l = 100\text{mm}$) での境界条件を与えることで、式(2)は以下のような結果を得る。

$$\sigma_s = \frac{2S_s}{bt_s} = \frac{P}{bt_s} \left(\frac{2}{2+k} \right) \left(\frac{k}{2} + \frac{\cosh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_f = \frac{S_f}{bt_f} = \frac{P}{2bt_f} \left(\frac{2}{2+k} \right) \left(1 - \frac{\cosh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \right) \quad (4)$$

$$\tau = \frac{P}{2lb} \lambda \left(\frac{2}{2+k} \right) \frac{\sinh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \quad (5)$$

$k \equiv E_s t_s / (E_f t_f)$ である。本試験体の場合には、 $E_s = 205\text{GPa}$, $E_a = 2.7\text{GPa}$, $E_f = 45\text{GPa}$, $t_a = 0.4\text{mm}$, $\nu_a = 0.36$ を採用する。式(3) は $-l < x < l$ での鋼材の軸方向応力、式(4) は FRP 材の軸方向応力、式(5) は接着剤に生ずるせん断応力である。

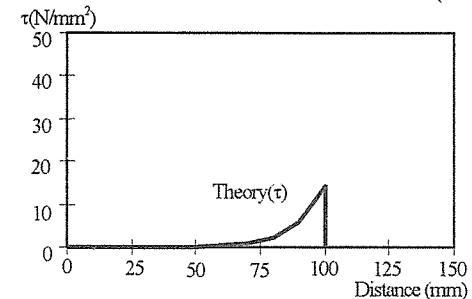
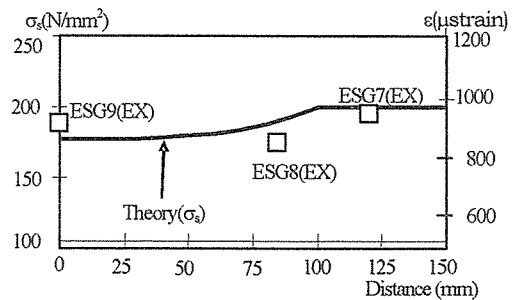
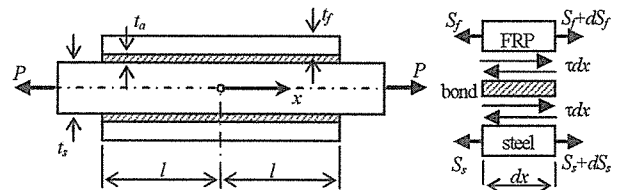


図-2 応力分布の例：P = 60kN (TD78F)。

2.3 結果と考察

図-3 に A-A'断面での荷重-歪関係を示す。ESG-F_{av} は ESG-F1 と ESG-F2 の平均値をとっている。TD77F の剥離荷重は $P_{max}=81.1\text{kN}$ であった。FBG-F と ESG-F_{av} は同程度の歪が発生しており、FBG-S と ESG-S もよい一致の傾向がみられる。FRP の歪と鋼材の歪の曲線の傾向は明らかに異なっている。この歪の差が接着界面のシエララグによると解釈できる。TD77F では $P=78.3\text{kN}$ で FRP 材に歪が大きく減少することが注目される。これは剥離損傷によって FRP の応力負担が解放されたためであり、その影響で鋼材の負担応力は増加する。また、ほぼ同程度の荷重で鋼材の歪は 1500μ を超え、塑性域に入ったことを示している。したがって TD77F は、鋼材の塑性化と FRP の剥離がほぼ同時に発生していたといえる。FRP の剥離が目視で確認できたのは、こうした歪曲線の大きな変化が生じた後の実験終了時である。センサによらない限り早期の剥離損傷の検出は困難であるといえる。

図-4 に補強タイプ試験体の剥離状況を示す。剥離面の鋼材面には接着剤は残留していない。これより、FRP の剥離は接着層と鋼材の間で発生したといえる。

図-3 中の○で示した時点における、FBG-F の波形測定結果を図-5 に示す。図-5 中 (a)図は $P=0$ の状態で単一ピーク型である。(b)図は、FBG-F のピーク形状が釣鐘型に変化している。この時点での FBG-S の波形は単一ピーク型であった。(c)図は、FBG-S が複数ピーク型に変化したときの FBG-F の波形である。(d) 図は FBG-F が単一ピーク型に戻ったときの波形である。剥離損傷の影響が FBG センサ装着域に影響を及ぼし始めると、FBG センサ部の歪分布が不均一化し、釣鐘型あるいは複数ピーク型になると考察できる。また FRP が完全に剥離すると、歪分布が再度均一化した結果、単一ピーク型に戻ると考える。FBG-F の波形変化をモニタリングすることで、剥離損傷の早期状態を検知することが可能と考察される。検知の早期性については、FBG センサを装着する位置に依存することは事実である。本実験では FBG センサの装着位置と最終的に目視できた剥離破壊箇所とはいずれも相違したが、完全破壊が目視できない部分にも剥離損傷は生じており、それを検知できたと言える。すなわち、最終剥離位置にかならずしも設置しなくても FBG センサの波形計測によって剥離予兆を検知できる可能性が示された。

FBG-S と FBG-F で計測された歪の差を接着層による増分歪 ($\Delta\varepsilon$) と定義し、グラフの特性が大きく変化することもわかった。これは、剥離損傷によるシエララグの変化を意味すると考えられたため、それを剥離損傷発生時点と定義した。すなわち、界面剥離が生じた場合の接着層の状態を、以下の 3 段階に分ける。第 1 段階は接着層が健全な状態。第 2 段階は接着層に微小

亀裂が入り始め接着層が損傷している状態。第 3 段階は完全剥離（目視レベル）が生じた状態である。接着層の状態変化は、被接着部材の接着表面の歪差で評価できると考え、最小二乗法によって求めた。

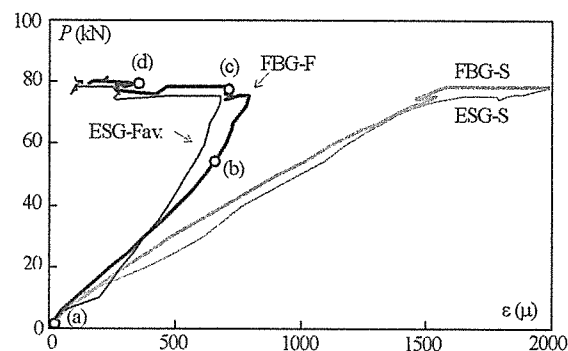


図-3 荷重・歪関係曲線の例：TD77F

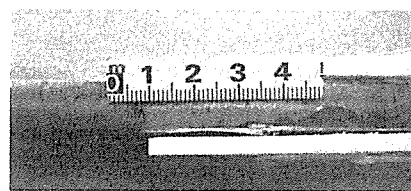


図-4 剥離状況

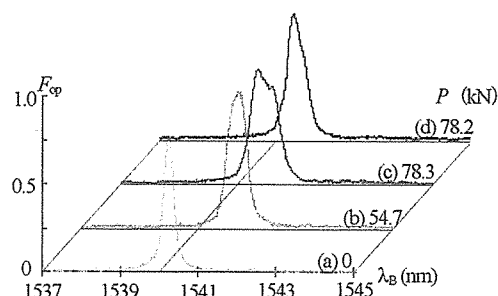


図-5 光パワースペクトル形状変化の例：TD77F

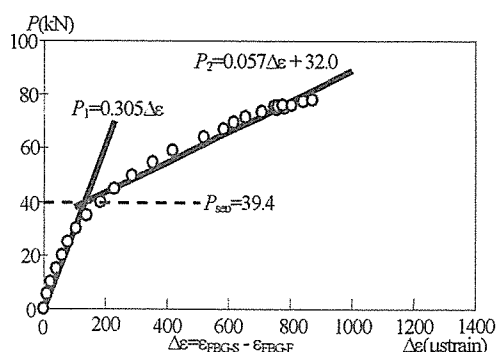


図-6 荷重・歪差 $\Delta\varepsilon$ 関係の例：TD77F

図-6にその結果の例を示す。図中の P_{sep} は剥離損傷開始荷重を意味する。荷重-増分歪のプロットをデータとしてバイリニア近似した。この例では、 $P_{sep} = 39.4\text{kN}$ 、 $P_{sep}/P_{max}=0.48$ であり、剥離破壊荷重の半分程度の荷重レベルで、接着層に損傷が生じた可能性が考えられる。

3. 鋼ガセット・FRP 材接着接合タイプ

3.1 実験概要

図-7に接合タイプ引張試験体の概要を、表-2に試験体名称、接着層厚および FBG センサの有無を示す。長さ 300mm、厚さ 19mm、幅 50mm の鋼ガセットプレートの両側に、長さ 280mm、厚さ 4mm、幅 50mm の FRP 材を接着接合した重ね継手を想定した。接着剤にはエポキシ系接着剤（商品名 E250）を用い、接着長さは 80mm とした。ここでは接着作業の際に鋼球を分散添加し、接着層厚を制御した。すなわち、接着層厚を 0.4mm、0.8mm、1.2mm とした。接着層厚が FBG センサの外径 150 μm を十分上回るので、接着層内に直接 FBG センサ（FBG-A）を装着した。図-7の A-A'断面に FBG センサと電気式歪ゲージの装着位置を示している。鋼材に装着した電気式歪ゲージを ESG-S1, S2 とし、FRP 材に装着した電気式歪ゲージを ESG-F1~F4 とした。

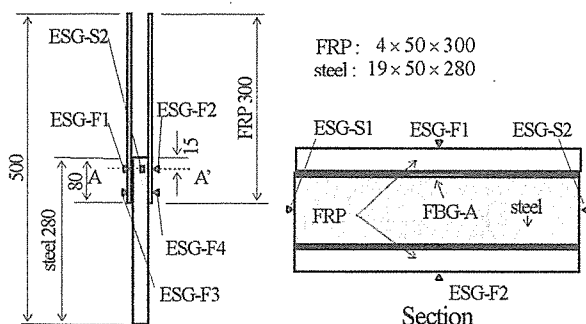


図-7 接合タイプ試験体：JD-series

表-2 接合試験体の名称リスト

No.	bond thickness	memo
JD04-1	0.4 mm	without FBG
JD04-2	0.4 mm	without FBG
JD08-1	0.8 mm	without FBG
JD08-2	0.8 mm	without FBG
JD12-1	1.2 mm	without FBG
JD12-2	1.2 mm	without FBG
JD04F	0.4 mm	with FBG
JD08F	0.8 mm	with FBG
JD12F	1.2 mm	with FBG

3.2 応力解析

図-8に、荷重 22.8kN 時の応力分布をプロットした。図中の実線は、鋼材の軸方向応力 σ_s とエポキシ系接着剤に作用するせん断応力度 τ の解析解である。図-8に示す接着長さ 80mm の中央を x 座標の原点にとることで、補強タイプと同様、式(2)が得られ、結果として次の解析解を得た。

$$\sigma_s = \frac{P}{bt_s} \left\{ -\frac{\sinh \lambda \xi}{2 \sinh \lambda} + \left(\frac{2-k}{2+k} \right) \frac{\cosh \lambda \xi}{2 \cosh \lambda} + \frac{k}{2+k} \right\} \quad (6)$$

$$\sigma_f = \frac{P}{2bt_f} \left\{ \frac{\sinh \lambda \xi}{2 \sinh \lambda} - \left(\frac{2-k}{2+k} \right) \frac{\cosh \lambda \xi}{2 \cosh \lambda} + \frac{2}{2+k} \right\} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{P}{4bl} \lambda \left\{ \frac{\cosh \lambda \xi}{\sinh \lambda} - \left(\frac{2-k}{2+k} \right) \frac{\sinh \lambda \xi}{\cosh \lambda} \right\} \quad (8)$$

ここで、式(6)は $-l < x < l$ での鋼材の軸応力、式(7)は FRP 材の軸応力、式(8)は接着剤に生ずるせん断応力である。なお本実験では、接着層厚 t_a が 0.4mm のものを JD04 シリーズ、0.8mm を JD08 シリーズ、1.2mm を JD12 シリーズとしている。

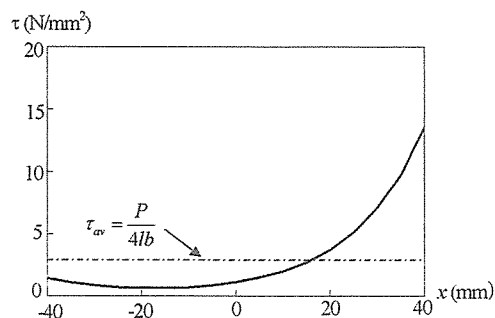
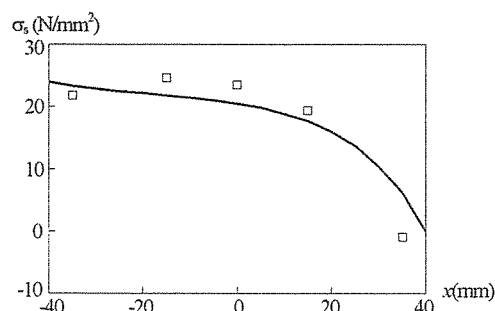
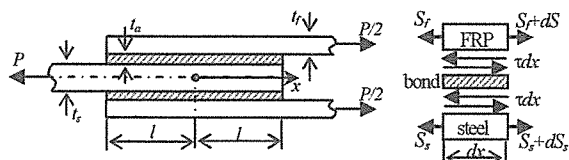


図-8 応力分布の例： $P = 22.8\text{kN}$ (JD08N).

3.3 結果と考察

図-8 中の軸方向応力の解析解をプロットしたグラフには、 $P=22.4\text{kN}$ なる初期荷重段階での鋼板表面での電気式歪ゲージによる計測結果を四角印で表示した。計測結果にばらつきはみられるが、傾向は同様となっている。図-8 中の接着層に働くせん断応力分布から、それが接着端部で大きく変化することが示されている。FBG センサの反射波形の変化はセンサ部の歪分布の不均一性によって生ずるので、材軸(x)方向にセンサを装着すると、損傷検出の観点からは適切でないと推測できたので、今回は、板幅方向にFBG センサを配置することとした。すなわち、FBG センサにより板幅方向の歪を計測し、接着のポアソン比 0.36 を用いて材軸方向の歪値を算出している。

図-9 は JD12F の剥離後の状態の写真である。鋼材表面に FRP 繊維が付着していることが確認できる。これより、接合部の剥離は FRP の表層剥離（層間剥離）によるものであることがわかった。図-10 は FBG センサで計測した荷重-歪曲線であり、最大荷重直前での歪値の急な増加が認められる。

図-11 は FBG センサによる反射光パワースペクトルの計測例であり、図-10 中の○印 (JD04F)、△印 (JD08F)、□印 (JD12F) 時点と対応する。荷重の増加に伴う波形の変化に注目すると、どの試験体とも最大荷重よりもかなり小さな荷重レベルで、光パワピーク値（基準光のパワで正規化された無次元量）が載荷前のそれよりかなり低下する傾向が認められる。JD04F ではスペクトル幅は釣鐘状になり、(c1) 時点で複数ピーク型へと変化した。ここで、光パワ減少率 ΔF を、「初期状態での光パワピーク値から任意の荷重点での光パワピーク値を差し引いた値」と本研究では定義した。

図-12 からわかるように、ある荷重点から曲線の傾きが低下している。この荷重レベルは接着層が厚いほど、小さくなる傾向にあるものの、ほぼ同程度である。すなわち、波形計測で得られた光パワピーク値の低下をモニタリングすることで、接着層に発生する損傷の程度を知ることができるようになる可能性がある。

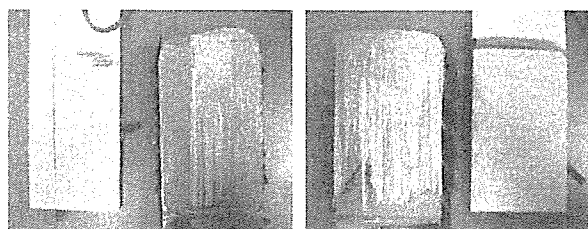


図-9 剥離破壊の状況：JD12F

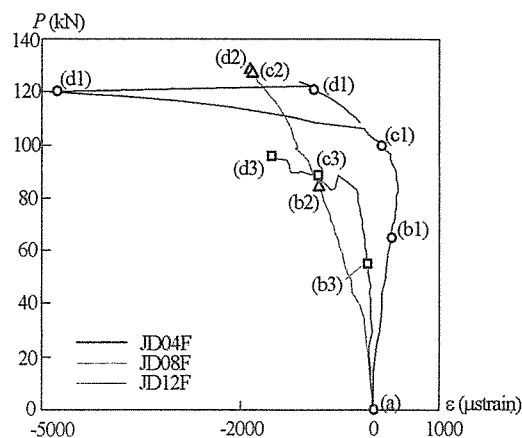


図-10 荷重・歪関係曲線の例

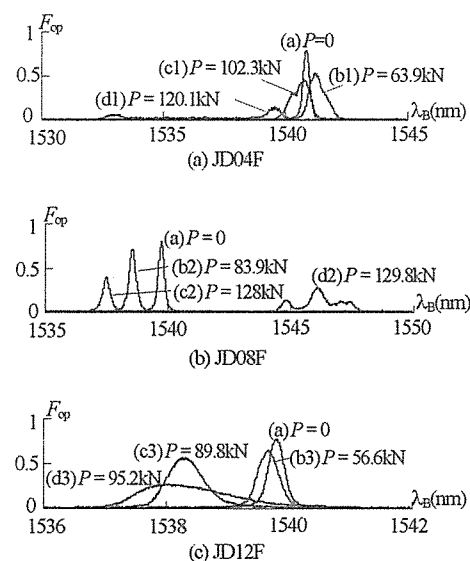


図-11 光パワースペクトル形状の例：JD-series

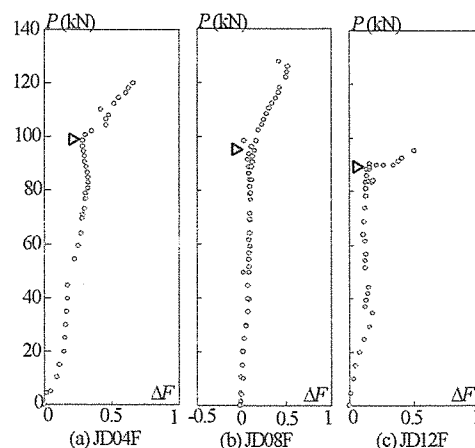


図-12 荷重と光パワ減少率 ΔF 関係：JD-series

4. 結 論

本研究では、鋼部材と FRP との接着界面の剥離損傷について、補修・補強を想定した場合の補強タイプ試験体、並びに、鋼ガセットを介した FRP トラス部材の継手接合を想定した接合タイプ試験体の 2 種類について、引張載荷実験を行い、その特性を明らかにした。応力伝達に関する基礎的解析も平行して実施し、使用した FRP、鋼材、接着剤の物性値を用いることで、線形応力分布はほぼ実験の傾向とあうことにも言及した。接着界面の構造ヘルスマモニタリングの可能性を検討するために実施した、FBG センサを用いた光ファイバセンシング結果から、光パワスペクトルの変化特性を利用して、剥離損傷開始時点を予兆する新しい方法を提案した。その結果、本実験の場合には、完全剥離荷重（最大荷重）の半分程度の荷重レベルで界面に損傷が生じている可能性を示唆することができた。

謝 辞

本研究の内容は、吉田安寿（現・ドーコン）が 2009 年 3 月に提出した豊橋技術科学大学修士学位論文の一部である。斎藤翔研究員（豊橋技術科学大学山田研究室）には、実験に際して多大な協力を戴いた。また、コニシ(株)浦和研究所研究開発第 4 部北澤英宏氏には、接着工法について、多くのご指導を戴いた。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) Al-Emrani, M., Linghoff, D. and Kliger, R. (2005). "Bonding strength and fracture mechanisms in composite steel-CFRP elements" *Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, IIFC, 433-441.
- 2) Luke, S. (2001). "The use of carbon fibre plates for the strengthening of two metallic bridges of an historic nature in the UK" *Proceedings of International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong.
- 3) Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R. and Hastings, J.N. (2001). "Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 6(6), 514-522.
- 4) Schnerch, D., Stanford, K., Sumner, E. and Rizkalla, S. (2005). "Bond behavior of CFRP strengthened steel bridges and structures" *Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, IIFC, 443-451.
- 5) Täljsten, B. (1997). "Strengthening of beams by plate bonding", *Journal of Materials in Civil Engineering*,

ASCE, 9(4), 206-212.

- 6) Yamada Seishi, Komiya, I., Matsumoto, Y. and Hiramoto, T. (2006). "Fiber Bragg grating sensing for the connection failure of fiber reinforced polymer composite structures", *Proceedings of the International Colloquium on Application of FRP to Bridges*, ICAFB2006, JSCE, Tokyo, 77-80.
- 7) Yamada Seishi and Nishizaki, I. (2007). "Research and construction developments on hybrid application of FRP to bridges in Japan", *CD-ROM Proceedings of the JSCE-KSCE-CICHE/TCI Joint Seminar on Hybrid Structures*, Tokyo.
- 8) Yamada Seishi, Yoshida, Y., Saito, S., Yamada Satoshi and Komiya, I. (2007). "Fibre optic sensing for the delamination behaviour of FRP reinforced steel girders", *Proceedings of Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*, APFIS, Hong Kong, 587-594.
- 9) Yamada Seishi, Yoshida, Y., Saito, S., Yamada Satoshi and Komiya, I. (2008). "Damage Sensing of Bond Interface between FRP Reinforcement and Steel Girders", *CD-ROM Proceedings of 40th SAMPE International Technical Conference*, Memphis, USA, M005.1-12.