（43）建設構造用ＧＦＲＰの静的荷重載荷状態での屋外暴露試験による耐久性評価

西崎　到[1]・佐々木　厳[2]

[1]正会員　独立行政法人土木研究所　材料地盤研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

[2]正会員　独立行政法人土木研究所　材料地盤研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:isasaki@ pwri.go.jp

FRP は軽量，腐食しないなど，従来の建設構造材料では得難い性能を有するため，近年，橋梁などの建設構造物に，FRP を主たる構造材料とした複合構造としての適用が進みつつある．その材料の耐久性については，腐食に強いということが分かっているものの，詳細な特性は十分に知られておらず，これを明らかにすることが必要となっている．特に，FRP は常時荷重を受ける環境条件では，荷重の無い場合に比べて劣化特性が異なる可能性もあることから，荷重の影響も併せた検討が重要である．筆者らは，建設構造用として多く用いられている，GFRP 引抜成形材を対象として，静的曲げ荷重をかけた状態で 14 年程度の期間，屋外暴露試験を実施した．回収した供試体について，残留たわみ量および力学物性の変化を主に評価した．回収供試体は表面状態には明確な劣化が認められたものの，力学物性としては，非接合供試体については，曲げ弾性率の変化は暴露試験後も認められなかった．暴露試験中の静的荷重は，破壊荷重に対して最大で 57%と比較的大きいことから，曲げ破壊荷重は若干の低下を示したものの実用的な性能は十分に保持しているものと考えられる．また接合供試体についても試験が行われ，曲げ弾性率では明確な低下が認められたが，破壊荷重には低下が認められない結果となった．

Key Words : *FRP, pultruded, exposure test, static load, durability*

1. はじめに

近年，引抜成形FRPの土木構造用途としての適用事例が増加しつつある．FRPは軽量，腐食しないなどの優れた特徴を有するが，その長期的な耐久性については不明の点が多いのが現状である．これまでの研究において屋外暴露試験などによってその耐久性を明らかにしようとの報告もある[1)]が，その多くは荷重をかけない状態での事例であった．筆者らは引抜成形GFRPの中空角柱供試体を用いて，これに一定の曲げ荷重を加えた状態で約14年間の屋外暴露試験を実施した．ここでは，この暴露試験から回収した供試体の力学物性の変化を始めとする調査の結果について，既報の未劣化の供試体に対する同様の試験結果[2)]との比較を含めて報告する．

2. 実験方法

(1) 供試体

引抜成型法によって製造されたGFRP中空角柱パイプ(SP50, 50㎜ x 50㎜, 厚さ4㎜, 旭硝子マテックス㈱製PLALLOY）を供試体の材料として使用した．マトリックス樹脂はビニルエステル樹脂，繊維含有率は70%，密度は1.9g/㎤である．フィラーは含まれていない．表面塗装は施さなかった．このパイプを1700㎜の長さに切断したしたものを，非接合供試体とした．接合供試体は，このパイプを850㎜に切断したもの２つを，図-1に示すように，ソケットプラグを用いて，ブラインドリベットと接着剤で接合して製作した．接合供試体の長さも1700㎜である．

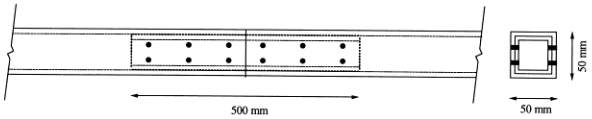

図-1　接合供試体の接合部分

(2) 暴露試験

屋外暴露試験は，茨城県つくば市西沢の独立行政法人

土木研究所構内で実施した．表-1に暴露試験の試験条件を示す．すべての供試体は暴露架台に水平に設置した．静的荷重を加えながらの暴露試験の実施には，図-2に示す載荷装置を備えた暴露架台を使用して実施した．非接合供試体の曲げ破壊荷重は8.59kNであったので，N250およびN500はそれぞれ，破壊荷重の28%と57%の静的荷重を加えられた状態で暴露試験に供されたこととなる．暴露暴露試験は1995年に開始し，2009年に全ての供試体の回収を行った．暴露期間はおよそ14年間である．図-3および4に暴露試験中の供試体の様子を示す．

表-1　暴露試験の試験条件

記号	種類	暴露試験中の載荷荷重	供試体の数
N0	非接合供試体	0 kN	11
J0	接合供試体	0 kN	6
N250	非接合供試体	2.45 kN	5
N500	非接合供試体	4.9 kN	4
J250	接合供試体	2.45 kN	4

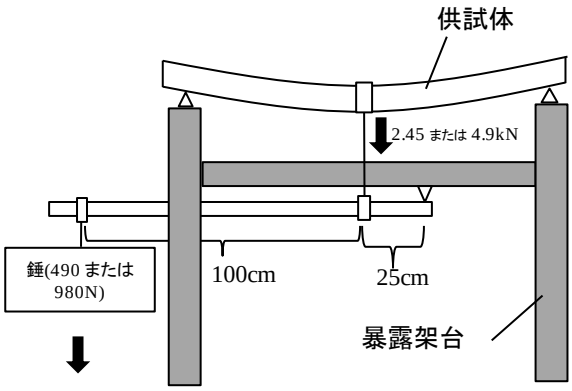

図-2　静的荷重載荷暴露試験のための暴露架台

図-3　供試体暴露状況（載荷状態の供試体）

図-4　供試体暴露状況（非載荷状態の供試体）

(3) 評価試験

回収した供試体は主に，残留たわみと三点曲げ試験による力学特性の初期値との変化によって評価した．

a) 残存たわみの測定

荷重条件下で暴露された供試体は，載荷状態における２つの支点の延長線からの中心点の変位を，たわみ量として専用のスケールで測定した後に，おもりを外すことにより除荷し回収した．除荷後の供試体は，直ちに実験室に搬送し，1組（N250，N500，J250）の供試体については，暴露架台と同じ長さの支点に設置し，変位計を供試体中心部に設置し，たわみ量の変化を約1ヶ月間，連続的に測定した．その他の供試体も，同様の支点に設置したが，変位計によるたわみ計測は行わなかった．

b) 三点曲げ試験

回収した供試体の力学物性の変化を調べるために，三点曲げ試験を実施した．曲げ試験方法は JIS K7055（ガラス繊維強化プラスチックの曲げ試験方法）に準拠し，表-2 に示すケースと条件について万能試験機を用いて実施した．荷重と中心部の変位を計測するとともに，中心部と中心部から 125mm 離れた位置の供試体下面に歪みゲージを設置し，歪み量を測定した．なお，接合供試体については，中心部から 125mm 離れた位置と，250mm 離れた位置に歪みゲージを設置した．

表-2　三点曲げ試験の試験ケースと条件

供試体記号	供試体長さ (mm)	支点間距離 (mm)	載荷速度 (mm/min)	繰り返し数
N0	1700	1500	75	3
N0	950	800	25	2
N0	750	600	12	2
N250	1700	1500	75	2
N500	1700	1500	75	2
J0	1700	1500	75	2
J250	1700	1500	75	2

3. 実験結果

(1) 回収供試体の劣化状況

三点曲げ試験の実施にさきだち，回収供試体の劣化状況を確認した．図-5に回収供試体の表面状況写真を示す．回収した供試体は表面の樹脂が脱落し，補強繊維の露出が顕著に認められる状態であった．繊維の露出は，日がよく当たる上面の方が，側面や下面に比べて著しかった．また，樹脂が黄色に変色するとともに，特に供試体上面は黒色の汚れが顕著に認められた．

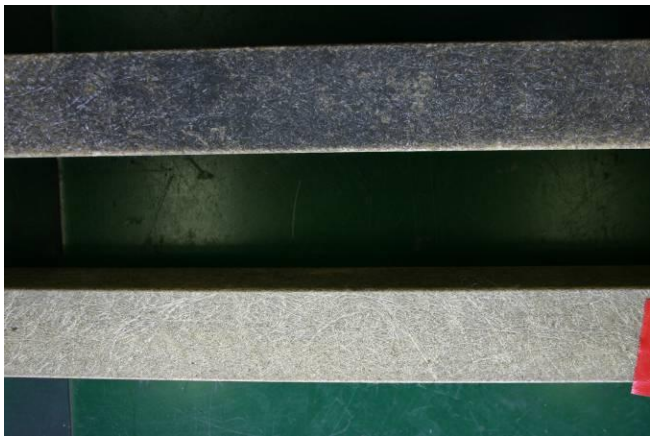

図-5　回収供試体の外観（上：上面，下：下面）

(2) たわみ量の測定

静的荷重載荷状態暴露供試体の除荷直前の供試体のたわみ量（供試体中央部）は，N250でおよそ-21mm，N500およびJ250ではともに-40mm程度であった．除荷直後のたわみ量は，N250でおよそ-2mm，N500では-4mmであるのに対し，J250ではおよそ-15mmと，比較的大きな残留たわみ量を示した．供試体除荷・回収後の残留たわみ量は，始めの数週間は時間とともに少しづつ回復を示し，ほぼ1ヶ月で顕著な変化が無い状態となった．図-6は除荷後1ヶ月後の残留たわみを示す．供試体中央部の残留たわみ量は，N250で-1.3mm，N500で-2.6mm，J250で-11.9mmであった．N250とN500では，軸方向の供試体のたわみは曲げたわみと同様の曲線を示しているのに対し，J250では接合部において折れ曲がった形状となっていることから，接合部のソケットが曲げクリープ破壊をおこすなどの理由によりヒンジとして働いたものと推定できる．

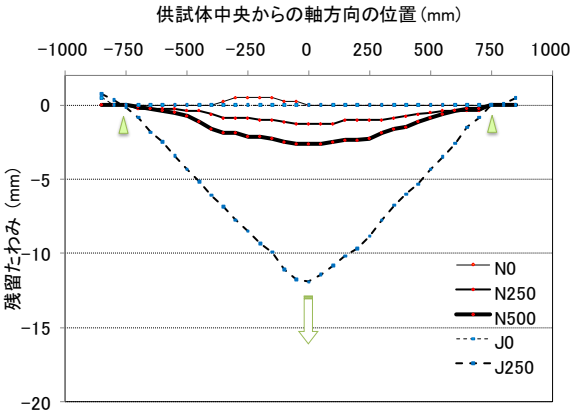

図-6　暴露供試体の残留たわみ

(3) 三点曲げ試験

図-7に三点曲げ試験により得られた，回収供試体の曲げ弾性率の結果を，また図-8には曲げ破壊荷重の結果を，既報の未暴露供試体の結果（暴露試験開始時期に今回と同様の方法により実施）[2]とあわせて示す．14年暴露した供試体の曲げ弾性率の結果は，未暴露の供試体と殆ど同じであった．曲げ破壊荷重についても，支点間距離が短い場合にはやや低下が見られるものの，最小のケースでもその比は0.92であり，なお，実用的な力学物性としては十分に保持していると考えられる結果となった．

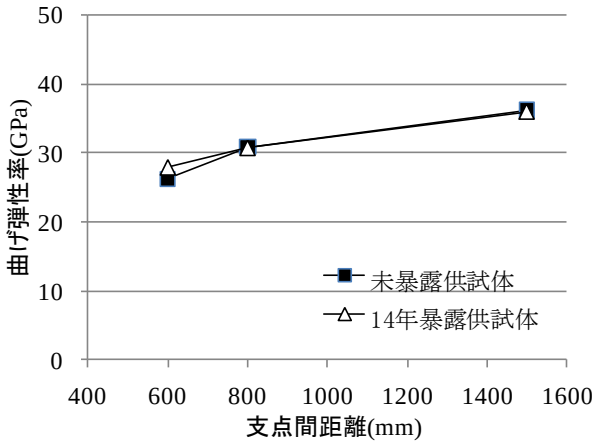

図-7　三点曲げ試験の結果（曲げ弾性率）
（異なる支点間距離におけるN0の結果）

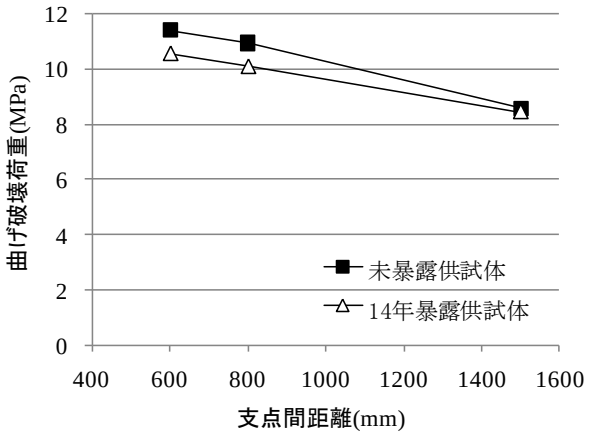

図-8　三点曲げ試験の結果（曲げ破壊荷重）
（異なる支点間距離におけるN0の結果）

三点曲げ試験の実施の結果，暴露供試体は未暴露供試体と同様に，上部載荷治具直下の，角パイプ上部の角部の破壊（図-9）により破壊した．また，特に支点間距離が短い場合には，上部載荷治具が供試体に陥入する破壊がこれに追加して発生した．特に支点間距離による曲げ弾性率の相違には，この治具の陥入が影響を及ぼしているものと考えられる．

図-9　三点曲げ試験中の供試体の様子

図-10は，静的荷重載荷状態で暴露された供試体の，三点曲げ試験による曲げ弾性率の結果を，図-11は同様に曲げ破断荷重の結果を示す．非接合供試体については，弾性率については暴露試験時の載荷荷重が破断荷重の57%であるN500の場合でも，未暴露供試体と比べて明確な差は認められなかった．曲げ破断荷重については，未暴露供試体に比べて0.98（N0），0.94（N250），0.89（N500）と若干の低下を示した．

一方，接合供試体については，曲げ弾性率は静的荷重が無い場合でも未暴露供試体に比べ明確な低下（14年暴露J0／未暴露J0＝0.87）を示し，また暴露供試体同士でも静的荷重のある場合の方が低下を示した（J250／J0＝0.84）．一方で，曲げ破壊荷重については，暴露供試体は未暴露供試体に対してむしろ高い荷重を示す結果となった．

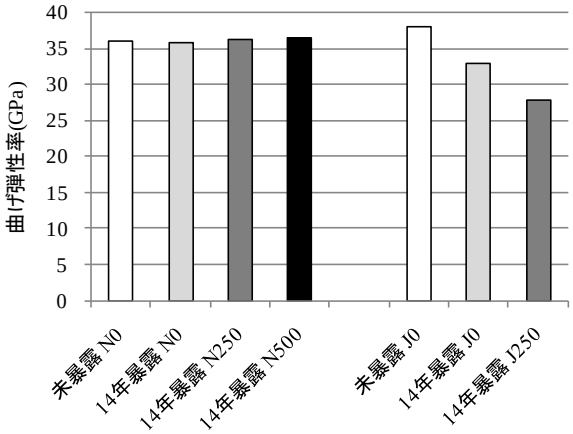

図-10　三点曲げ試験の結果（曲げ弾性率）
（暴露中の静的荷重の影響）

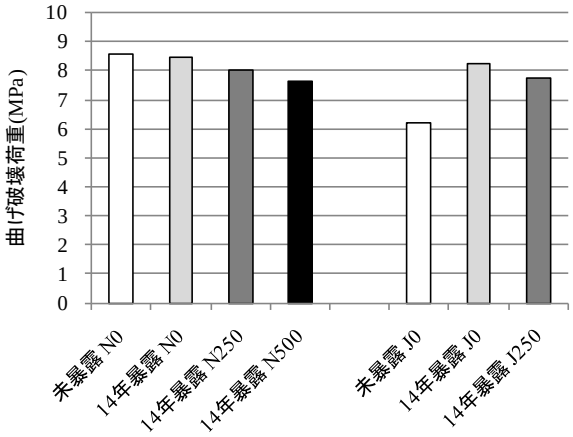

図-11　三点曲げ試験の結果（曲げ破壊荷重）
（暴露中の静的荷重の影響）

4. まとめ

引き抜き成形FRP角パイプから作成した暴露供試体により，静的曲げ荷重を常時載荷しながら行う屋外暴露試験を14年間継続して実施した．回収した供試体は，力学的特性の未暴露供試体に対する変化を中心に評価を行った．曲げ弾性率は接合部のない供試体については，暴露による変化は認められなかった．曲げ破壊荷重は未劣化供試体に比べて，わずかな低下を示したが，もっとも苛酷な条件（破壊荷重の57%の静的荷重下の暴露試験）においても，初期値の0.89を保ったことから，実用的には

十分な耐久性を有するものと考えられる結果となった．内部ソケットとブラインドリベットを利用した接合部分についても同様の試験を実施した結果，弾性率が多少低下したものの，破壊荷重については未暴露に比べて大きな値を示した．

参考文献

1) Nishizaki, I., Kishima, T. and Sasaki, I. (2007). "Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests", *Proceedings of the third International Conference on Durability and Field Applications of FRP Composites for Construction (CDCC 2007)*, 159-166.

2) Nishizaki, I., Sasaki, I., Sakamoto, H. and Katawaki, K. (1996). "Feasibility Study of the Application of FRP to Pedestrian Bridges", *Proceedings of the first International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI'96)*, 1174-1185.

EVALUATION OF DURABILITY OF STRUCTURAL GFRP THROUGH OUTDOOR EXPOSURE TEST UNDER STATIC LOAD

Itaru NISHIZAKI and Iwao SASAKI

Durability of pultruded FRP has not been sufficiently clarified although this material is increasingly used as a structural material, and more studies are required. The authors tried to clear the durability of pultruded GFRP, which is well selected as a structural material of FRP superstructure, and focused in the durability of GFRP under static load. Outdoor exposure test were performed for square-sectioned pipe specimens made of pultruded GFRP under a bending load. Jointed specimens were also prepared and exposed. The specimens were retrieved from the outdoor exposure test with bending load after fourteen years, and investigated with several properties including the residual mechanical performance. The results showed that bending modulus of no-joint specimens did not show any difference. Bending break load of no-joint specimens showed slight decrease from the initial values, the results that the residual bending break load was 0.89 of the initial values even in the most severe case (static load at 57% of the ultimate load) suggest that its practical durability seems to be still good. Jointed specimens were also tested in the similar methods. Elastic modulus of jointed specimens showed remarkable decrease, however bending break load of these specimens showed larger values than unexposed specimens.