

(20) GFRPを接合したブラインドリベットの引抜挙動に関する検討

櫻庭 浩樹¹・西崎 到²・宇佐美 惣³・石田 雅博⁴

¹正会員 土木研究所 先端材料資源研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail:hiro-sakura@pwri.go.jp

²正会員 土木研究所 先端材料資源研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

³非会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail o-usami@pwri.go.jp

⁴正会員 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: ishida@pwri.go.jp

本研究では、ブラインドリベットで接合されたGFRPパネルの安全性の検討を目的とし、ブラインドリベットで接合されたGFRPパネルが桁下面に適用されたGFRP歩道橋の外観調査とブラインドリベットの引抜試験を行った。外観調査では、ブラインドリベットで接合されたGFRPパネルの設置状況を確認した。引抜試験の結果より、ブラインドリベット先端の形状や外径の大きさがその引抜耐荷力に及ぼす影響を示した。また、引抜試験で得られたブラインドリベットの引抜耐荷力を用いて、ブラインドリベット接合部に作用する死荷重および風荷重との比較を行い、それらの荷重よりも引抜耐荷力の方が大きいことが確認された。

Key Words : blind rivet, joint, GFRP, put-out behavior, load-carrying capacity

1. はじめに

GFRPの接合方法の一つとしてブラインドリベット接合がある¹⁾。ブラインドリベットは、接合部の片面からの施工が可能であり、接合部の両側からの施工が必要なリベット接合よりも施工性に優れている。このような特徴から、ブラインドリベット接合は、床版橋形式GFRP歩道橋の構造部材の接合方法として提案され、ブラインドリベットのせん断強度を用いることで安全側に接合部の強度を算定できることが示されている²⁾。これらのブラインドリベットは、せん断に抵抗する機構で構造部材を接合する用途に使用されている。

一方、GFRP歩道橋の桁下面に設置されたGFRPパネル（非構造部材）を接合する方法として、ブラインドリベットを用いた事例がある。この事例では、ブラインドリベットが片面からの施工が可能で、施工性に優れていることを活用しているが、せん断に抵抗する機構ではなく、引抜きに抵抗する機構で適用されていた。しかしながら、2012年に発生した台風の通過後、GFRP歩道橋の桁下面に設置されたGFRPパネルが落下したことが確認されている。

非構造部材の落下に対する安全性に関しては、日本建

築学会から指針³⁾が発刊されるなど、その重要性が高まってきている。よって、GFRP歩道橋の桁下面からGFRPパネルが落下した原因を究明し、安全性を検討することは重要であると考えられる。

そこで、本研究では、ブラインドリベットで接合されたGFRPパネルの安全性の検討を目的とし、GFRP歩道橋の外観調査とGFRPを接合したブラインドリベットの引抜試験を行った。また、引抜試験の結果に基づき、GFRPパネルに作用する荷重との比較を行った。

2. GFRP歩道橋の外観調査

(1) 対象橋梁の構造

外観調査の対象としたGFRP歩道橋（以下、A橋と称す）の諸元を表-1に示す。橋長は37.760 m、橋梁形式は2径間連続桁橋であり、主桁にはハンドレイアップ成形GFRP（C形チャンネル）が用いられている。

図-1は、A橋の断面概要を示す。対傾構は引抜成形GFRP（H形材）であり、対傾構の下弦材にはステンレス製のM22ボルトで接合された引抜成形GFRP角パイプが設置されている。下弦材に接合されたGFRP角パイプ

表-1 調査対象橋梁の諸元

橋梁名	A 橋
橋長	37.760 m
幅員 (有効幅員)	4.0 m (3.5m)
主桁高さ	1.6 m
橋梁形式	2 径間連続 GFRP 桁歩道橋
竣工年	2000 年 (平成 12 年)

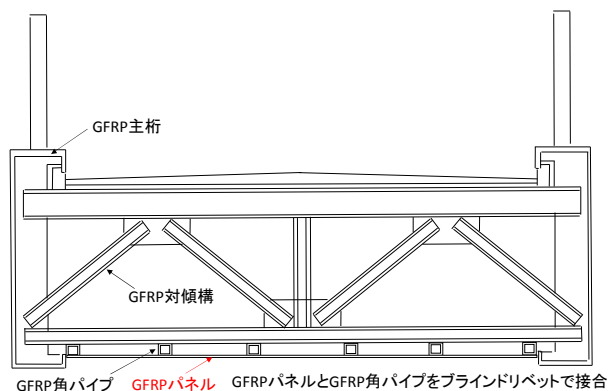


図-1 A橋の断面概要

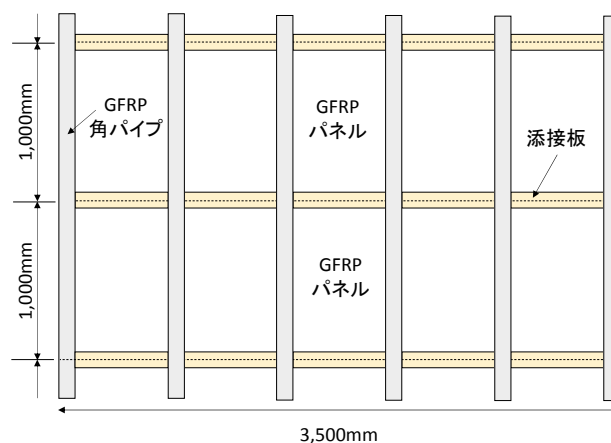


図-2 GFRPパネルの設置状況概要

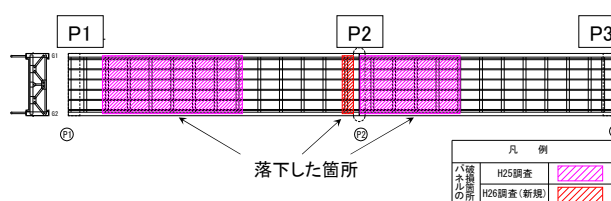


図-3 GFRPパネルの落下位置

には、ステンレス製のブラインドリベットによって、引抜成形GFRPパネル（以下、GFRPパネル）が接合されている。図-2にGFRPパネルの設置状況を示す。GFRPパネルの寸法は、板厚4mm、橋軸方向1,000mm、橋軸直角方向3,500mmであり、GFRPパネル1枚当たりのブラインドリベットの数は42本（6列×7本）である。GFRPパネル同士は、添接板（引抜成形GFRP板、板厚4mm、幅100mm、長さ585mm）とブラインドリベット14本もしくは12本（2列×7本、両端部の添接板は2列×6本）で接合されている。また、GFRPパネルには、ふっ素樹脂塗料が両面に施されている。

(2) 調査結果

A橋では、2012年に発生した台風の通過後、図-3に示す箇所のGFRPパネルが落下したことが確認された。本研究では、GFRPパネルが落下したP1付近において、外観調査を行った。外観調査は、高所作業車を用い、桁下面の近接目視により、ブラインドリベットの接合部を中心に調査した。

図-4は、P1付近のGFRPパネルの落下状況を示す。GFRPパネルとともに、GFRP角パイプも落下していることが確認された。図-5は、ブラインドリベットの引抜状況を示す。ブラインドリベットが引き抜かれた箇所によっては、下穴径がやや拡大して変形し、その近傍が削られたような跡が認められた。

図-6は、落下したGFRPパネル（以下、回収GFRPパネル）の一部を示す。幅は3,500mm、高さは約1,400mmである。なお、図-6のパネルが図-3のどの位置から落下し



図-4 P1付近のGFRPパネルの状況



図-5 ブラインドリベットが引き抜かれた箇所の例

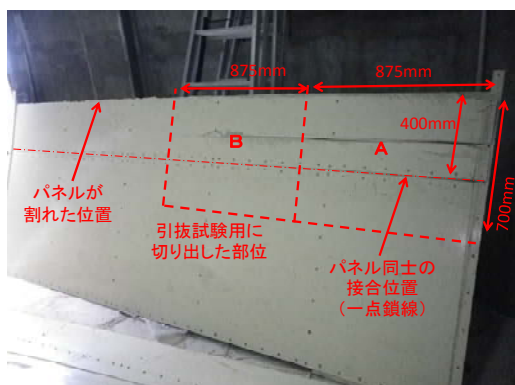


図-6 回収GFRPパネル

たのかは不明である。回収GFRPパネルは、2枚のGFRPパネルが接合されたものであるが、片側のパネルは端部から約400mmの位置で割れていた。本研究では、赤点線の部分を切断して回収し、ブラインドリベットの引抜耐荷力を検討するため、パネル間の接合部（添接板の部分）を用いた引抜試験を行った。

3. ブラインドリベットの引抜試験

(1) 概要

ブランドリベット単体の引抜耐荷力を検討するため、回収GFRPパネルのパネル同士の接合部を切り出して供試体を作製し、ブラインドリベットの引抜試験を行った。

また、現地調査においてブラインドリベットが引き抜かれた箇所の形態を確認した結果、下穴径が変形してやや拡大していることが確認された。下穴径が拡大した場合を検討するため、回収GFRPパネルと同等品質のGFRP板（以下、新規GFRP板）を作製し、下穴径を大きくした場合の引抜試験も実施した。

(2) 供試体

a) 回収GFRPパネル供試体

図-7は、回収GFRPパネルから切り出した供試体の位置を示す。GFRPパネルと添接板がブラインドリベットで接合されている部分から、幅100mm、高さ50mm（板厚は4mm）となるように切り出した。施工されたブラインドリベットの外径は4.8mmである。図-8は、ブランドリベット先端の形状と外径を示す。ブランドリベットの先端が全体的に広がって寸胴な形状となり、先端の外径は5.5mmであった。なお、使用されたブランドリベットのせん断耐力等の材料特性は不明である。

b) 新規GFRP板供試体

新規GFRP板は、落下したパネルと同等品質のものとし、表-2に示す材料特性（公称値）を有するものとした。作製したGFRP板を、寸法が幅100mm、高さ50mm、板厚

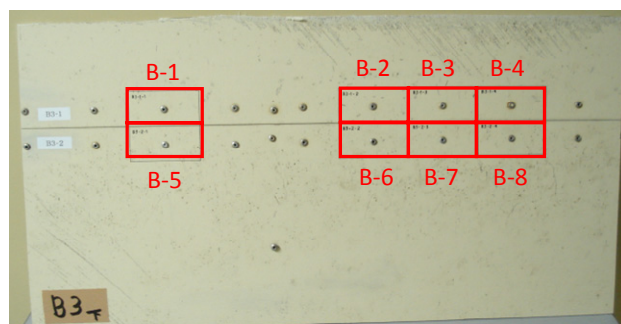
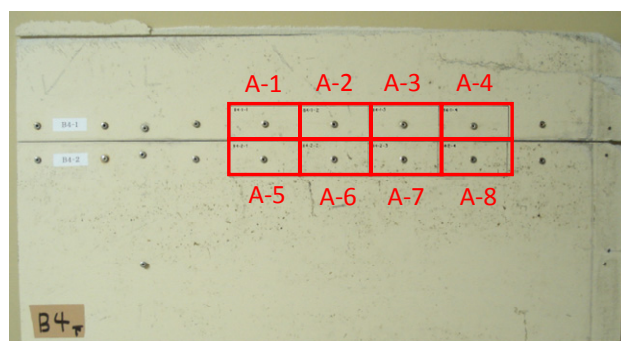


図-7 回収GFRPパネルから切り出した供試体の位置

表-2 新規に作製した GFRP 板の諸元

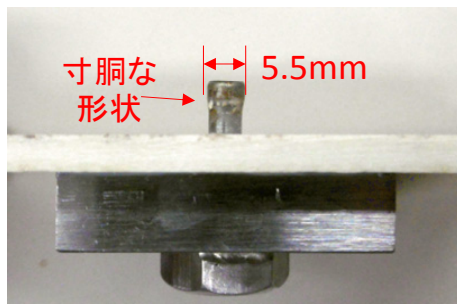
成形方法	引抜成形
引張強度	250-550 MPa（公称値）
引張弾性係数	20-30 GPa（公称値）
ガラス繊維質量含有量	45-60%（公称値）
比重	1.6-2.0（公称値）

表-3 新規 GFRP 板供試体に用いたブラインドリベットの諸元

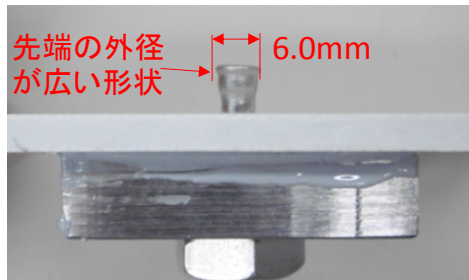
材質	ステンレス
引張耐力	6.50 kN（公称値）
せん断耐力	5.30 kN（公称値）
フランジ頭径	9.6 mm
リベット外形	4.8 mm
リベット長さ	13.5 mm

4mmとなるように切断し、切断した2枚のGFRP板を表-3に示すブラインドリベットを用いて接合した。ただし、表-3に示すブラインドリベットは、回収GFRPパネルに使用されているものと材質と外寸は同等であるが、異なる製品であると思われる。ブラインドリベットの施工には、エアーリッターを使用し、圧縮空気の圧力は0.8MPaとした。

ブランドリベットの外径が4.8mmの場合、下穴径の標準は4.9mmであるが⁹⁾、下穴径が拡大した場合を想定するために、下側（リベット先端側）のGFRP板の下穴径を、4.9mm、5.0mm、5.2mmの3種類として供試体を作製した。1種類の下穴径に対して5体の供試体を用意し、引



a) 回収GFRPパネル供試体



b) 新規GFRP板供試体

図-8 ブランドリベット先端の形状と外径

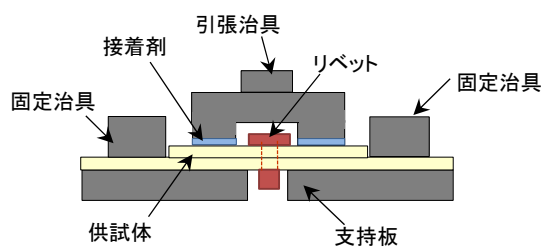


図-9 載荷方法の概要

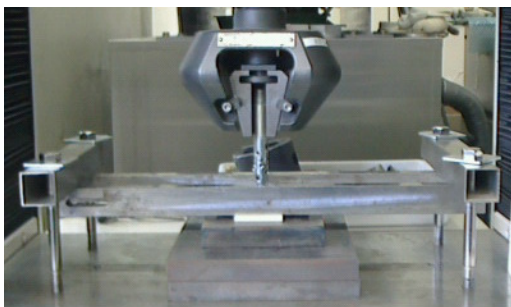


図-10 引抜試験の実施状況

抜試験を行った。図-8は、ブランドリベット先端の形状と直径を示す。回収GFRPパネル供試体と比較してブランドリベットの先端の外径が広い形状であり、その外径は6.0mmであった。

(3) 載荷方法

図-9は、載荷方法の概要を示す。接合された2枚のGFRPを直交するように回転させ、下側のGFRPを固定治具で抑え、上側のGFRPに40×40×10mmの鋼製引張治具を接着した。鋼製引張治具の中央部には直径11mmの穴

が開いているため、ブランドリベットのフランジ頭径（頭径は約10mm）は接着されていない。鋼製治具と供試体の接着には、エポキシ樹脂系接着剤を用いた。

図-10は、引抜試験の実施状況を示す。接着剤の硬化後、鋼製引張治具にボルトを接合し、そのボルトを掴み具に固定して引張力を作用させることで、引抜試験を実施した。引抜試験には、荷重容量100kNの万能試験機を用い、変位制御により1mm/minの速度で載荷した。測定項目は、荷重および載荷ヘッドの変位ストロークとした。

4. 引抜試験の結果と考察

(1) 回収GFRPパネル供試体

図-11は、回収GFRPパネル供試体の荷重-変位関係を示す。最大荷重は1.34～2.49kNの範囲（平均2.00 kN、変動係数：13.7%）となり、最大で1kN程度の差があることが確認される。変位ストロークが2～4mmに達した時に最大荷重に達し、その後は急激に荷重が低下している。また、変位ストロークが約8mmに達した時に、荷重が0となっている。

図-12は、回収GFRPパネル供試体（B-1～B-4）の破壊形態の例を示す。破壊形態は、下側のGFRP板の下穴の周囲に割れが生じるものであり、その他の破壊形態は確認されなかった。引抜試験後の下穴径は、5.05～5.37mmの範囲であり、下穴径の基準値4.9mmと比較して、0.15～0.47mm大きい結果であった。

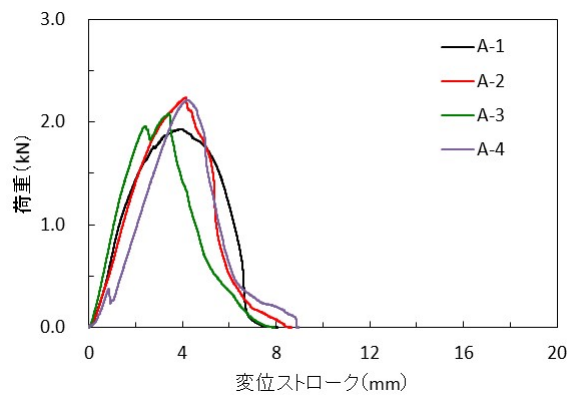
(2) 新規GFRP板供試体

図-13、新規GFRP板供試体の荷重-変位関係を示す。最大荷重は1.10～1.55kNの範囲（平均1.55kN、変動係数は8.4%）となり、回収GFRPパネル供試体の結果よりも小さい値となった。変位ストロークが約2mmに達した際に最大荷重に達し、その後は急激に荷重が低下している。また、変位ストロークが9～16mmに達した後に、荷重が0となっている。

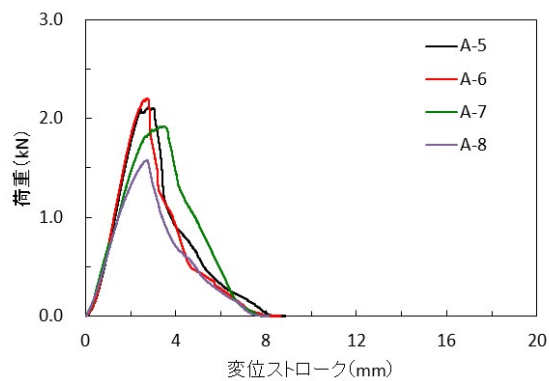
図-14は、新規GFRP板供試体（下穴の直径4.9mm）の破壊形態を示す。破壊形態は、引き抜かれた板の中央部が折れるような破壊形態であり、回収GFRPパネル供試体のそれとは異なる結果が確認された。引抜試験後の下穴径は、図-14に示すように供試体中央部に割れが生じ、下穴の周囲に乱れが生じたため、測定できなかった。

(3) 考察

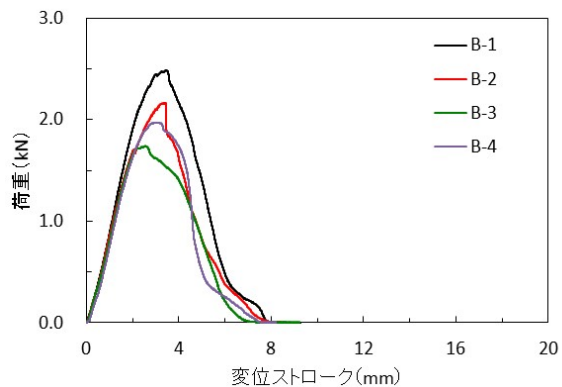
回収GFRPパネル供試体と新規GFRP板供試体の最大荷重を比較すると、後者の方が小さい結果であった。これは、同等の材料特性を有するGFRPを用いていることおよびブランドリベットの材質や軸の直径は同じものを用



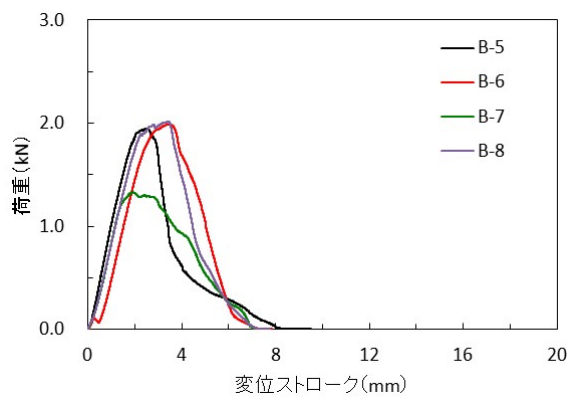
a) 切り出し部位A-1～A-4



b) 切り出し部位A-5～A-8



c) 切り出し部位B-1～B-4



d) 切り出し部位B-5～B-8

図-11 回収GFRPパネル供試体の荷重－変位関係

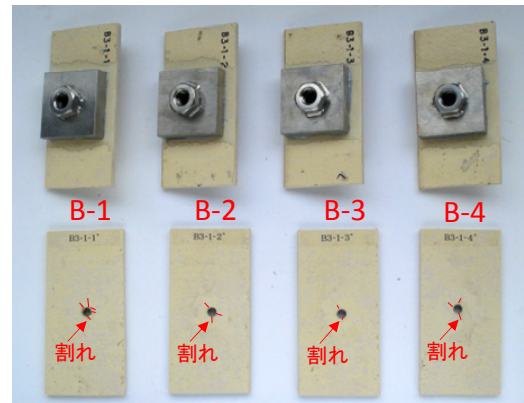
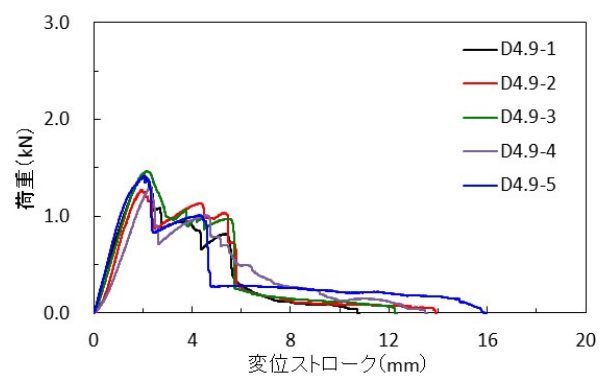
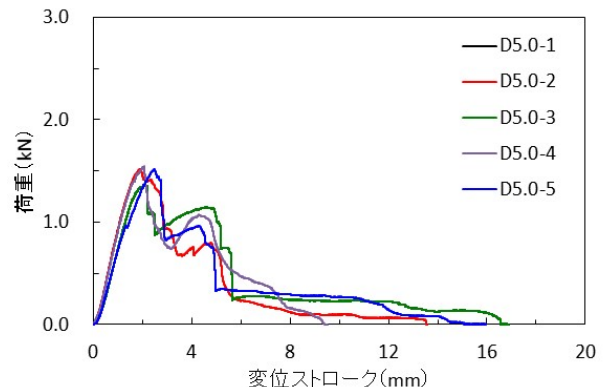


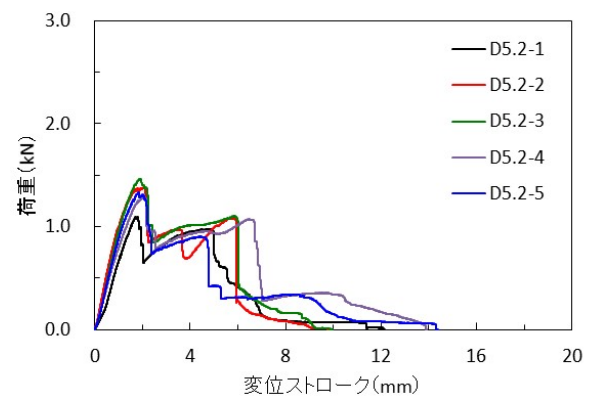
図-12 回収GFRPパネル供試体の破壊形態の例



a) 下穴径4.9mm



b) 下穴径5.0mm



c) 下穴径5.2mm

図-13 新規GFRP板供試体の荷重－変位関係

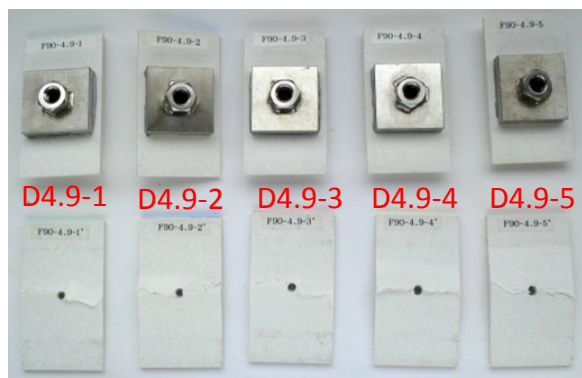


図-14 新規GFRP板供試体の破壊形態の例（下穴径4.9mm）

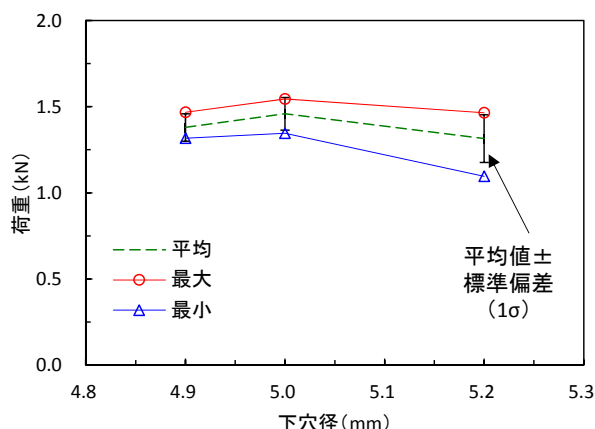


図-15 新規GFRP板供試体の荷重と下穴径の関係

いていることを考慮すると、ブランドリベット先端の形状と外径が異なるためと推察される。よって、引抜に抵抗する機構でブランドリベットを用いる場合は、ブランドリベット先端の形状と外径の施工管理が重要であると思われる。また、紫外線等による樹脂の劣化については、化学分析等による検討が必要であるが、GFRPパネルの両面にふっ素樹脂塗装が施されていたことから、その影響は少なかったものと思われる⁴⁾。

図-15は、新規GFRP板供試体の荷重と下穴径の関係であり、最大値、平均値、最小値および平均値±標準偏差（1σ）の範囲を示している。下穴径が5.2mmとなった場合、下穴径4.9mmおよび5.0mmの結果と比較して、平均値および最小値が小さくなったが、その傾向は明確ではない。

5. 荷重に対する安全性の検討

本研究では、ブランドリベットに作用する荷重として、GFRPパネルの永続荷重（死荷重）および変動荷重（風荷重）を算定し、引抜試験で得られた結果を用いて算定される引抜耐荷力との比較を行った。図-16は、荷重に

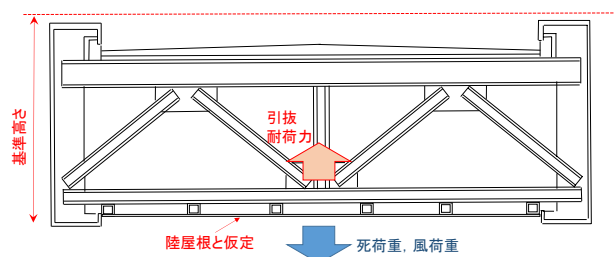


図-16 荷重に対する安全性検討の概要

対する安全性検討の概要を示す。なお、風荷重については、GFRPパネルを陸屋根と仮定し、建築物荷重指針・同解説⁵⁾を参考に算定した。

(1) 算定方法

a) 引抜耐荷力

単位GFRPパネル当たりの引抜耐荷力を算定し、単位パネルが有する面積に作用する荷重との比較を行う。単位GFRPパネルは、42本のブランドリベットにより接合されている。4章で得られた、回収GFRPパネル供試体の平均の最大荷重にブランドリベットの本数を乗じたものを引抜耐荷力とし、次式で算定する。

$$R_p = r_p N \quad (1)$$

ここに、 R_p ：ブランドリベットの引抜耐荷力（N）， r_p ：引抜試験で得られた最大荷重の平均値（N）， N ：ブランドリベットの総本数

b) 死荷重

永続荷重としてGFRPパネルの死荷重を考慮する。死荷重を死荷重は、GFRPの単位体積重量に、GFRPパネルの体積を乗じることで算定する。

$$W_D = \gamma_G B L t \quad (2)$$

ここに、 W_D ：死荷重， γ_G ：GFRPの単位体積重量（ kN/m^3 ）， B ：橋軸直角方向のGFRPパネルの長さ（3.5m）， L ：橋軸方向のGFRPパネルの長さ（1.0m）， t ：GFRPパネルの板厚（0.004m）

c) 風荷重

変動荷重として、GFRPパネルに作用する風荷重を考慮する。GFRPパネルは、非構造部材であるため、建築物荷重指針・同解説における外装材用風荷重が適用されると考えられる。すなわち、GFRPパネルを陸屋根と仮定し、風荷重の算定を行う。陸屋根の基準高さは、主桁の高さ（1.6m）とする。

外装材用の風荷重は式(3)で与えられる。

$$W_C = q_H \hat{C}_C A_C \quad (3)$$

ここに、 W_C ：外装材等の風荷重（N）， q_H ：速度圧（ N/m^2 ）， $\hat{C}_C$ ：ピーク風力係数， A_C ：外装材等の荷重負

表-4 荷重の算定に用いたパラメータ

種類	記号	数値
GFRPの単位体積重量	γ_G	19.6kN/m ³
ピーク風力係数	$\hat{C}_C$	-7.3 (負圧)
外装材等の荷重負担面積	A_C	3.5m ²
空気密度	ρ	1.22
基本風速	U_0	50 m/s
設計風速	U_H	50 m/s
基準高さ	H	1.6m

表-5 引抜耐荷力と荷重の算定結果

種類	記号	数値
引抜耐荷力	R_p	84.0kN
死荷重	W_D	0.274kN
風荷重	W_C	39.0kN
死荷重+風荷重	W_D+W_C	39.274kN
引抜耐荷力と死荷重の比	R_p/W_D	306
引抜耐荷力と風荷重の比	R_p/W_C	2.15
引抜耐荷力と死荷重+風荷重の比	$R_p/(W_D+W_C)$	2.14

担面積 (m²) , なお, 安全側の評価を行うため, ピーク風力係数については, 風荷重が最大となる値を仮定した。

速度圧は, 式(4)で与えられる。

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2 \quad (4)$$

ここに, ρ : 空気密度 (kg/m³) , U_H : 設計風速 (m/s)

設計風速は, 式(5)で与えられるが, 安全側の評価となるように, 本算定では $U_H = U_0$ と設定する。すなわち, U_0 以外の係数を1.0とみなす。

$$U_H = U_0 K_{Rw} K_D K_S E_H \quad (5)$$

ここに, U_0 : 基本風速 (m/s) , K_{Rw} : 再現期間換算係数, K_D : 風向係数, K_S : 季節係数, E_H : 風速の鉛直分布係数 E の基準高さ H (m) における値

(2) 結果と考察

表-4に荷重の算定に用いたパラメータ, 表-5に引抜耐荷力と荷重の算定結果を示す。その結果, 死荷重, 風荷重および死荷重と風荷重の組合せのいずれに対しても引抜耐荷力の方が大きく, これらの荷重に対しては, GFRPパネルの安全性は確保されていたと考えられる。また, GFRPパネルに作用する荷重として風荷重の寄与が卓越していることを確認できる。

一方, 現地調査では, 下穴径がやや拡大して変形し, その近傍が削られたような跡が(図-5)確認された。実環境では, 風には強弱があるため, ブランドリベット接

合部には圧力変動⁹⁾による疲労が生じたと思われる。今後, 引抜に抵抗する機構でGFRPをブラインドリベットで接合する場合は, 疲労の検討も必要と考える。

6. まとめ

本研究では, ブランドリベットで接合されたGFRPパネルの安全性の検討を目的とし, ブランドリベットで接合されたGFRPパネルが桁下面に適用されたGFRP歩道橋の外観調査とブラインドリベットの引抜試験を行った。以下に, 本研究で得られた知見を示す。

外観調査では, 台風の影響によってGFRPパネルが落下した箇所を確認した。また, ブラインドリベットが引き抜けた箇所では, 下穴径がやや拡大して変形し, その近傍が削られたような跡が認められた。

ブラインドリベットで接合されたGFRP表面に鋼製治具を接着し, その治具を引っ張ることでブランドリベットの引抜試験を行った。本引抜試験より, ブランドリベット単体の引抜荷重が得られることを示した。

現地調査で回収したGFRPパネルのブラインドリベット接合部を用いて供試体および回収したGFRPパネルと同等のGFRP板を用いた供試体を作製し, 引抜試験を実施した。その結果, ブランドリベットの先端の形状や外径が, ブラインドリベットの引抜荷重に影響を及ぼすことを示した。また, 供試体の下穴径をパラメータとして引抜試験を行った結果, 下穴径を基準値から0.3mm大きくした範囲では, 引抜荷重が低下する傾向は確認されなかった。

引抜試験の結果に基づいて算定した引抜耐荷力とGFRPパネルの死荷重および風荷重を比較した結果, 前者の方が大きくなり, これらの荷重に対しては安全であったと考えられる。今後, 風による疲労の検討が必要と思われる。

謝辞: 本研究は, 文部科学省・科学技術振興機構によるCOIプログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～」により進められたものである。

参考文献

- 1) 土木学会: FRP 歩道橋設計・施工指針 (案), pp.59-69, pp.123-126, 丸善出版, 2012.
- 2) 北川暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡邊哲也, 瀬戸内秀規: 床版形式 GFRP 歩道橋のリベット接合と接着接合を併用した連結構造の開発, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.936-948, 2013.
- 3) 日本建築学会: 天井等の非構造部材の落下に対する安全対策指針・同解説, 丸善出版, 2015.

- 4) 西崎到, 櫻庭浩樹, 富山禎仁: GFRP 引抜成形材の屋外環境における劣化と表面保護塗膜による劣化抑制効果に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 71(2015) No. 5, 複合構造論文集第 2 巻, pp. II_13-II_21, 2015.
- 5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善出版, pp.12-73, 2015.
- 6) 在家善之, 原口圭, 文野正裕, 中澤真司, 山中祐一: 列車通過時の圧力変動を受ける駅天井地下材に関する研究 (その 2 圧力変動の測定およびクリップ材の疲労試験), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.859-860, 2012.

STUDY ON THE PULL-OUT BEHAVIOR OF BLIND RIVET JOINTING GFRP

Hiroki SAKURABA, Itaru NISHIZAKI, Osamu USAMI and Manohiro ISHIDA

This paper presents a study on the pull-out behavior of a blind rivet jointing GFRP in order to confirm its safety against dead and wind loads. A pedestrian bridge with GFRP panels jointed by blind rivets to sway bracings was investigated because some of the GFRP panels dropped after a typhoon. A pull-out test of a blind rivet jointing GFRP, which was retrieved from the GFRP panels, was conducted to obtain the pull-out load capacity. Test results show that the edge shape and the outside diameter of the blind rivet affect the pull-out load capacity. It is confirmed that the pull-out load capacity is higher than the dead load of the GFRP panels and wind load calculated on the assumption that the GFRP panels are flat roofs.