

## FRPボルト接合における軸力の効果に関する実験的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 木嶋 健  
 旭硝子マテックス 渡邊哲也  
 独立行政法人土木研究所 明嵐政司

## 1. はじめに

FRPを橋梁等の構造部材に適用する場合には、FRP部材接合を考慮する必要がある。FRP部材の接合形式としては接着接合やボルト接合が考えられるが、ここでは橋梁部材を接合するという観点からボルト接合について検討を行うこととした。FRPの材料強度は、引張強度については鉄鋼系材料とほぼ同等であるが、圧縮強度やせん断強度については鉄鋼系材料よりも低い。FRP部材のボルト接合強度は圧縮強度やせん断強度に支配されるため、鉄鋼系材料に比べて低くなると考えられる。従って、部材接合を考える場合には、支圧形式のボルト接合よりも摩擦形式のボルト接合を適用するのが現実的と考えられる。本報告では、軸力を加えて摩擦形式としたボルト接合について実験的に検討した結果を記述する。

## 2. 実験概要

FRP部材のボルト接合強度を検討するに当たっては、基本的な特性を把握する観点から、ダブルラップボルト接合を対象とした。接合試験はASTM D 953に準拠するものとし、両端に単孔（5.2）を空けたFRP試験体をM5ボルトおよび添接板により両側から引張した。FRP試験体は基材構成比の異なる3種類のCF/GFハイブリッドFRP積層板、添接板は鋼材SS400としている。積層構成は、いずれの試験体についてもマット/クロス/トウ/クロス/マットの5層構成である。なお、マット層およびクロス層はガラス繊維で構成されているが、トウ層は炭素繊維で構成されている。また、樹脂としては耐候性のあるビニルエステル樹脂を用いている。FRP試験体の形状については、厚さを3.2mm、FRP試験体幅とボルト孔径との比( $w/d$ )を5、縁端距離とボルト孔径の比( $e/d$ )を5とした。試験にあたっては、軸力を加えない支圧形式のボルト接合の他、軸力を3種類に変化させた摩擦形式のボルト接合を対象とした。

最大荷重に関する試験結果を表-1に、軸力と最大荷重との関係を図-1に示す。図-1を見ても分かるように、軸力の増大に伴って最大荷重も増大している。ただし、軸力と最大荷重との関係は非線形となっており、軸力の初期において最大荷重が著しく増大していることが分かる。

表-1(a) 支圧形式ボルトの最大荷重(N)

試験体	No.1	No.2	No.3	平均
1	8275	7547	7591	7804
2	8877	8534	8434	8615
3	8878	8320	8809	8669

表-1(b) 摩擦形式ボルトの最大荷重(N)

トルク 試験体	3N・m	6N・m	12N・m
1	9683	10252	11327
2	10472	11458	11875
3	11439	12350	13683

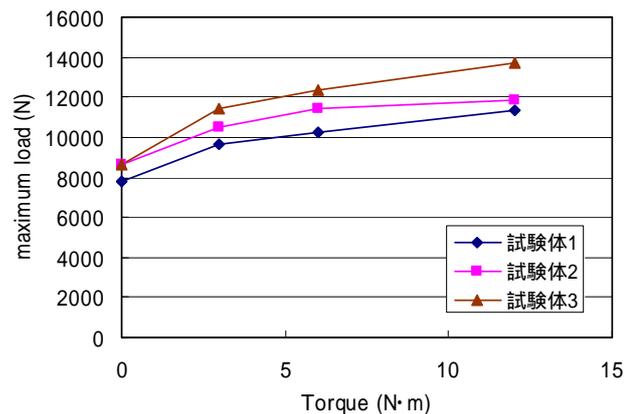


図-1 最大荷重と軸力との関係

破壊後の試験体の状況を図-2に示す。図-2(a)は軸力を加えない試験体に対する状況を示したものであるが、これによると2種類の破壊形式が観察される。一つは、円孔周辺の材料が面外方向に圧縮破壊する形式であり、もう一つは、円孔から縁端にかけてせん断破壊する形式である。一方、図-2(b)は軸力を加えた試験体に対する状況を示したものである。軸力を加えた場合には、円孔から縁端にかけてのせん断破壊が明瞭に観察された  
 キーワード： FRP、ボルト接合、ボルト軸力、最大荷重

連絡先： 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 (Tel: 029-879-6763, Fax: 029-879-6733)

が、円孔周辺の材料が面外方向に圧縮破壊する破壊形式は軸力を加えない場合程には明瞭に見られなかった。

引張荷重と引張試験機の変位との関係は図-3に示す通りである。



図-2(a) ボルト軸力無の破壊状況



図-2(b) ボルト軸力有の破壊状況

図-3(a)は軸力を加

えない試験体、図-3(b)は軸力を加えた試験体に対する荷重-変位線図である。軸力を加えない場合、荷重が5500N程度まで荷重-変位線図はほぼ線形に増大するが、その後は非線形となり最大荷重に達している。最大荷重に達した後は、変位が増大しても荷重が余り低減しない傾向にある。軸力を加えた場合、荷重-変位線図は全体的に非線形に推移して最大荷重に達している。最大荷重に達した後は、変位の増大と共に荷重が減少する傾向にある。軸力を加えない場合には、初期においては試験体の層間剥離とそれに伴う圧縮破壊により部分的に破壊したと考えられ、その後、上記の圧縮破壊が連続的に発生して最終的にはせん断破壊したと考えられる。一方、軸力を加えた場合には、基材構成比により最大荷重が異なっていることや荷重-変位線が非線形に推移していることから、添接板は最大荷重に達する前に滑動し、摩擦力ではなくせん断強度により最大荷重が達成されたと考えられる。初期においては添接板の摩擦力により荷重が支持されたと考えられるが、その後、添接板による側方変位の拘束効果により試験体の層間剥離や圧縮破壊が防止されて最終的にせん断破壊したと考えられる。

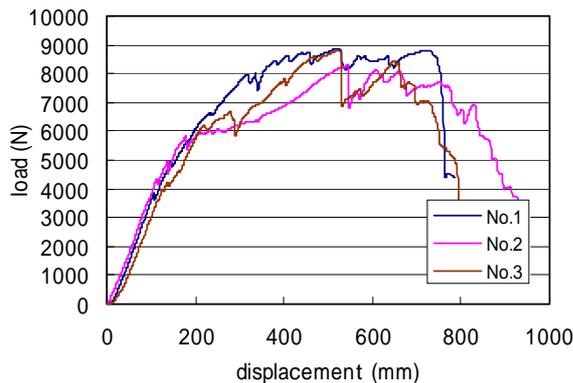


図-3(a) ボルト軸力無の荷重-変位線

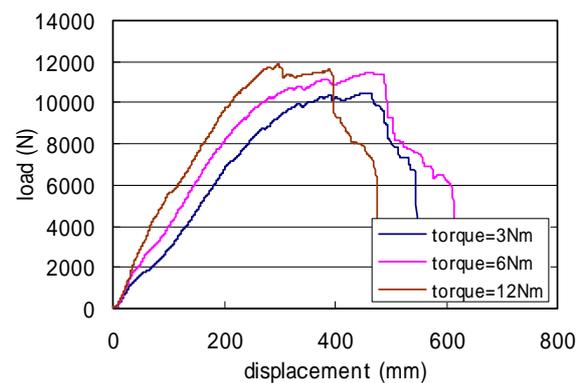


図-3(b) ボルト軸力有の荷重-変位線

### 3. ボルト軸力の効果

接合強度に及ぼすボルト軸力の効果としては、軸力によるFRP試験体の側方拘束効果、FRP試験体と添接板であるSS400の摩擦効果の2種類が考えられる。図-1を見ると、軸力を加えない試験体を除けば、軸力と最大荷重との関係はほぼ線形になっていることが分かる。軸力を加えたボルト接合の破壊メカニズムが同一であると仮定し、摩擦力の差が最大荷重に反映されたと考え、FRP材料と添接板との摩擦係数は0.1程度になる。添接板を鉄鋼系材料とした場合に、FRP材料との摩擦係数は0.13と報告された例があり、今回の実験結果はこの値にかなり近い値となっている。一方、軸力を加えない試験体については、軸力を0として外挿された計算値が実験値よりも高くなる。これは、軸力を加えない試験体の破壊メカニズムが異なるためと考えられ、試験体の層間剥離とそれに伴う圧縮破壊が主要因であったと推察される。軸力を加えた試験体では、接合面に滑りが生じると構造としての機能が失われることから、滑動をもって接合強度とするのが適当という考え方がある。軸力を加えたボルト接合について、摩擦係数を仮に0.1として計算された値を接合強度とすると、接合強度は最大荷重を大きく下回る。接合強度の設定方法は、今後の大きな検討課題であると考えられる。

### 4. 今後の課題

今回の実験によって得られた結果を数値計算により検証すると共に、ボルト軸力による樹脂クリープの長期的挙動を予測することが必要である。