

# 複合構造レポート 09

## FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術

### 目次

#### 第 1 部 FRP 部材接合の設計思想と強度評価

第 1 章 FRP 構造物の接合部	3
1.1 FRP 材料	3
1.2 FRP 構造物における各種接合方法の分類と典型的な部位	3
1.2.1 接合方法の種類	3
1.2.2 FRP 構造物における接合部	9
1.3 国内外における FRP 接合部の設計思想	13
1.3.1 FRP 接合部の設計に関する基準およびマニュアル	13
1.3.2 FRP 接合部の設計思想の比較	14
1.4 用語の解説	15
参考文献	16
第 2 章 ボルト／リベットによるせん断支圧接合	17
2.1 接合方法の特徴	17
2.1.1 はじめに	17
2.1.2 せん断支圧接合の荷重伝達メカニズムと破壊形式	17
2.2 各破壊形式に対する耐力の評価方法	19
2.2.1 EUROCOMP における評価	19
2.2.2 CNR-DT205/2007 における評価	20
2.2.3 ASCE Pre-Standard における評価	21
2.2.4 Composites for Construction における評価	26
2.3 特性値の評価方法	27
2.3.1 支圧強度の評価方法	27
2.3.2 支圧強度の評価事例	30
2.3.3 その他の特性値の評価方法	31
2.4 設計方法および推奨値	32
2.4.1 適用範囲	32
2.4.2 設計方法と安全係数	33
2.4.3 ボルトおよびボルト孔に関する接合の諸元	37
2.4.4 多列の場合の荷重分担	38
2.5 施工における留意点	38
2.5.1 ボルト軸力の取り扱い	38

2.5.2	ボルトの嵌合性の向上策	39
2.6	維持管理	39
2.7	解決すべき課題	40
	参考文献	40
<b>第3章</b>	<b>接着接合および機械接合と接着接合の併用接合</b>	<b>43</b>
3.1	接合方法の特徴	43
3.1.1	はじめに	43
3.1.2	適用範囲	43
3.1.3	荷重伝達メカニズムと破壊形式	45
3.2	継手部の強度評価方法	46
3.2.1	各基準で規定されている接着接合の破壊形式	47
3.2.2	各基準で規定されている接着接合の強度・耐力評価	47
3.2.3	接着接合の強度評価に関する研究事例	50
3.2.4	併用接合の強度評価に関する研究事例	55
3.3	設計方法および推奨値	60
3.3.1	各基準における接着接合の設計方法および推奨値	60
3.3.2	各基準で記述されている併用接合の取り扱い	64
3.4	施工における留意点	65
3.4.1	EUROCOMPにおける規定	65
3.4.2	実務面からの留意事項	66
3.5	維持管理	67
3.5.1	劣化現象と維持管理技術	68
3.5.2	接着接合の維持管理に関する研究事例	68
3.6	解決すべき課題	71
	参考文献	71
<b>第4章</b>	<b>ボルトによる摩擦接合への展望</b>	<b>75</b>
4.1	接合方法の特徴	75
4.1.1	はじめに	75
4.1.2	適用範囲	75
4.1.3	摩擦接合継手の荷重伝達メカニズムと破壊形式	76
4.1.4	既往の研究事例の調査概要	77
4.2	耐力評価方法	79
4.2.1	摩擦接合継手の耐力算定方法	79
4.2.2	摩擦接合継手のすべり係数およびすべり耐力評価方法	79
4.2.3	摩擦接合継手のすべり係数およびすべり耐力に関する研究事例	80
4.2.4	継手試験における破壊形式	86
4.3	設計方法および推奨値	89

4.3.1	設計方法	89
4.3.2	すべり係数	89
4.4	施工における留意点, 維持管理	90
4.4.1	リラクセーションによる軸力の低減	91
4.4.2	リラクセーションに関する研究事例	91
4.5	実施例/開発事例	98
4.6	解決すべき課題	99
	参考文献	99
<b>第5章</b>	<b>FRPの特徴を活用したその他の接合方法</b>	<b>101</b>
5.1	接合方法の分類	101
5.2	コーン型座金を用いた高強度ボルト接合の開発事例	102
5.3	細径ピンでの穿孔および細径ボルトの密集配置による接合の開発事例	104
5.4	インモールド処理による高靱性界面を有する接着接合の開発事例	107
5.5	FRP-金属一体成形の開発事例	111
5.5.1	ニットファブリックを用いた金属ボルト埋込み一体成形継手	111
5.5.2	孔空処理法によるGFRP/金属一体成形継手	113
5.5.3	Inter-Adherend Fiberを用いたGFRP/アルミニウム合金一体成形継手	115
5.6	嵌合接合系の実施例/開発事例	117
5.6.1	FRP床版用Tongue-and-groove継手・Snap-fit継手	117
5.6.2	Snap継手	118
5.6.3	Dovetail継手	119
5.7	その他の形式の実施例/開発事例	122
5.7.1	コンクリート充填FRP管の定着	122
5.7.2	CFRPロッドの鋼製スリーブへの定着	124
5.7.3	CFRP管の鋼製スリーブへの定着	126
5.7.4	CFRP板の鋼製矩形断面定着体への定着	127
5.8	熱可塑性樹脂複合材料に対する溶着接合系の開発事例	128
5.8.1	CFRTPの超音波溶着	128
5.8.2	CFRTPの導電性を利用した自己抵抗溶着	130
5.9	土木構造物への応用性	132
	参考文献	133
<b>付録1</b>	<b>FRP橋梁における接合部の設計と施工</b>	<b>135</b>
付録1.1	はじめに	135
付録1.2	沖縄ロードパーク橋の床組構造の接合部	135
付録1.3	はまなす橋の連結部	139
付録1.4	ものづくり大学第2連絡橋のガセット接合部	141
付録1.5	渡橋(暴露試験装置)の連結部	143

付録 1.6 玄若橋の連結部	146
参考文献	150
付録 2 ASCE Pre-Standard における引張破壊に対する耐力評価の係数	151
参考文献	157

## 第 2 部 鋼構造物の補修・補強のための FRP 接着接合の評価

第 1 章 FRP 接着による鋼構造物の補修・補強工法の概要	161
1.1 FRP 接着による鋼構造物の補修・補強工法	161
1.2 補修・補強材料	162
1.3 FRP 接着による補修・補強方法の概要	162
1.3.1 軸力を受ける部材の補修の特徴	163
1.3.2 曲げモーメントを受ける部材の補修・補強の特徴	165
1.3.3 耐疲労性向上を目的とした FRP の利用	165
1.3.4 桁端腐食部の FRP 接着補修の概要	166
1.4 指針・ガイドラインの整備状況と調査の目的・範囲	167
参考文献	167
第 2 章 FRP と接着剤の性質と評価方法	169
2.1 鋼部材の補修・補強に用いる各材料の概要と性質	169
2.1.1 FRP の種類と性質	169
2.1.2 接合材料の種類と性質	173
2.2 複合材料のモデル化	176
2.2.1 一方向材の主軸方向フックの法則 (2 次元 : LT 平面)	176
2.2.2 複合則 (2 次元 : LT 平面)	177
2.2.3 3 次元への拡張	178
2.2.4 FRP 板の線膨張係数	179
2.3 材料物性値の評価方法	180
2.3.1 FRP の評価方法	180
2.3.2 接合材料の評価方法	181
参考文献	183
第 3 章 接着接合のモデル化と応力評価	185
3.1 FRP が接着された鋼部材の力学的特徴	185
3.2 FEM 解析による FRP 接着鋼部材のモデル化	187
3.3 理論解析および数値解析による FRP 接着鋼部材のモデル化	191

3.3.1	軸力を受ける部材	191
3.3.2	曲げモーメントを受ける部材	196
3.4	FRP が接着された軸力部材の応力分布	201
3.4.1	CFRP 板が接着された軸力を受ける鋼板に生じる応力	202
3.4.2	CFRP 板を接着して2枚の鋼板が接合された部材が軸力を受けて生じる応力	202
3.4.3	3枚のCFRP 板が接着された軸力を受ける鋼板に生じる応力	202
3.4.4	CFRP 板によってプレストレスが導入された鋼板に生じる応力	203
3.4.5	CFRP 板が接着された鋼板に生じる熱応力	203
3.5	FRP が接着された曲げ部材の応力分布	209
3.5.1	CFRP 板が接着された等曲げモーメントを受ける鋼部材に生じる応力	209
3.5.2	CFRP 板が接着された集中荷重を受ける鋼部材に生じる応力	210
3.5.3	CFRP 板が接着された鋼部材に生じる熱応力	210
	参考文献	214
<b>第4章 接着接合の定着長と破壊の評価手法</b>		<b>217</b>
4.1	FRP の定着長と応力の収束値	217
4.1.1	軸力を受ける部材	217
4.1.2	曲げモーメントを受ける部材	218
4.1.3	複数枚のFRP を接着した場合のFRP の定着長	219
4.2	FRP 接着接合の破壊	220
4.3	FRP 接着接合の破壊の予測手法	222
4.3.1	接着剤のせん断応力を用いた破壊評価手法	223
4.3.2	接着剤の最大主応力を用いた破壊評価手法	223
4.3.3	接着剤の合成応力度を用いた破壊評価手法	224
4.3.4	エネルギー解放率を用いた破壊評価手法	224
4.4	FRP の端部処理によるはく離荷重の改善	226
4.4.1	FRP の端部にテーパを設けた場合	226
4.4.2	FRP の端部に段差を設けた場合	227
4.4.3	FRP の端部に低弾性接着剤を用いた場合	227
	参考文献	231
<b>第5章 FRP 接着接合の施工例と注意点</b>		<b>233</b>
5.1	FRP 接着接合の施工の現状調査	233
5.1.1	FRP 接着接合の現状	233
5.1.2	設計要領・施工マニュアルの調査	233
5.1.3	接着接合の施工事例の調査	235
5.1.4	接着接合の施工フロー	235
5.2	材料の取り扱い上の注意点	235
5.3	FRP 接着施工に対する注意点	240

5.3.1	施工環境条件	240
5.3.2	鋼材表面の下地処理	241
5.3.3	接着	241
5.3.4	養生	244
5.3.5	仕上げ	244
5.4	施工品質の確保に対する注意点	245
5.4.1	施工中および施工後の品質の確保	245
5.4.2	FRPの品質の確保	245
5.4.3	現場出来形管理の例	245
5.5	維持管理	245
5.5.1	施工後の維持管理	245
5.5.2	点検・補修・取替	246
5.6	施工・維持管理に対する検討事例	247
5.6.1	供用中の構造物への接着施工	247
5.6.2	ガルバニック腐食	248
	参考文献	250
<b>第6章</b>	<b>FRP接着接合の耐久性</b>	<b>251</b>
6.1	接着接合の耐久性に関する課題	251
6.2	使用部材の耐久性	252
6.2.1	FRPの耐久性	252
6.2.2	接着剤の耐久性	254
6.3	熱応力	257
6.3.1	FRP接着接合部の温度履歴特性	258
6.3.2	熱応力低減の試み	260
6.4	繰返し荷重に対する性能（疲労耐久性）	262
6.5	クリープに対する性能	264
	参考文献	265
<b>付録1</b>	<b>数値解析手法の基礎理論とプログラム例</b>	<b>269</b>
付録1.1	数値解析手法の基礎理論	269
付録1.2	数値解析手法による一軸引張応力状態に対する解	271
付録1.3	数値解析のプログラム例	272
	参考文献	276
<b>付録2</b>	<b>国内文献調査リストと文献調査シート</b>	<b>277</b>