断面欠損した鋼桁端柱部材の CFRP 板接着補修における接着不良のモデル化と性能回復

首都大学東京　正会員○中村一史　首都大学東京大学院（研究当時）　王俊傑
一般財団法人首都高速道路技術センター　正会員　増井隆・上條崇　首都高速道路㈱　正会員　平野秀一
日本エンジニアリング㈱　正会員　政門哲夫
㈱ダイクレ　正会員　鈴木啓之　㈱ITW PP&F JAPAN　中川健太

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック（以下，CFRP）板を用いた鋼桁端部の断面欠損部の接着補修において，急速施工のために，不陸修正を兼ねた MMA（メチルメタクリレート系）樹脂接着剤を適用する場合，粘度が高いため，接着不良が課題となる．そこで，本研究では，接着不良が接着接合部の荷重伝達に及ぼす影響を解析的に検討するとともに，接着不良が欠損した鋼桁端部の性能回復に及ぼす影響を定量的に把握することを目的とした．

2. ばね要素による接着剤のモデル化と接着不良の検討

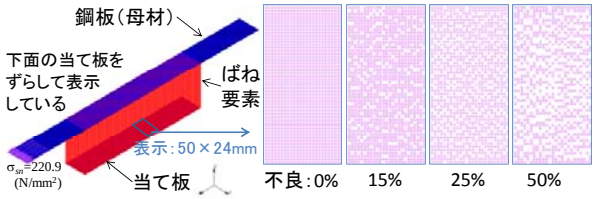
構造試験体において，相対的に寸法，剛性の小さい，接着剤の影響を適切に評価するために，接着剤をばね要素でモデル化し，接着不良については，ばねを除去することで評価した．モデル化の妥当性を，ソリッド要素による解析結果と比較することで検討する．**図-1** に，鋼当て板が接着された鋼板の解析モデルと接着不良を，**表-1** に，当て板試験体の寸法を，**表-2** に，鋼板，接着剤の材料物性値をそれぞれ示す．鋼板はシェル要素，接着剤はばね要素でモデル化した．比較のために，全てをソリッド要素でモデル化した解析モデルを作成した．接着剤の不良は，空隙を想定し，平均的に分布するものと仮定して，ばね要素，ソリッド要素を除去することでパラメトリック（不良率：0，15，25，50%）に検討した．要素サイズは 1×1mm である．引張荷重は 95kN（公称引張応力σ_{sn}=220.9N/mm^2）とした．

解析結果の一部として，**図-2** に，接着剤に生じる応力分布を示す．接着剤の弾性係数が小さいため，作用に対して，接着剤に生じる応力は全体として小さい．ソリッド要素では，空隙の部位で，応力分布に乱れが生じるものの，応力分布の傾向は，シェル要素とばね要素でモデル化した場合と同じあるとこがわかる．また，不良率が大きくなると，せん断応力が高くなるが，垂直応力への不良率の影響は小さいことがわかる．以上のことから，接着不良は，シェル要素とばね要素を用いたモデルにおいて，ばね要素を除去することで評価できることが確かめられた．

3. CFRP 板接着による鋼桁柱部材の性能回復の検討

3.1 試験体のモデル化と解析条件

支点近傍にテーパー状の欠損を有する鋼桁端柱部材の試験体を対象に，その最大欠損量を等価な軸剛性の CFRP 板で補修する設計で，CFRP の必要量を決定し，



(a) 当て板試験体のモデル　(b) 平均的な接着不良と面積率

図-1　当て板が接着された鋼板の解析モデルと接着不良

表-1　当て板試験体の寸法

	鋼板（母材）	鋼当て板	接着剤
長さ L（mm）	600	300	300
幅 B（mm）	50	50	50
厚さ H（mm）	8.6	8.6	1.0

表-2　鋼板，接着剤の材料物性値

項目	鋼板（SM490Y）	接着剤（MA530）
弾性係数 E(N/mm^2)	195,000	759
ポアソン比 ν	0.3	0.34
降伏強度 σ_y(N/mm^2)	350	ー

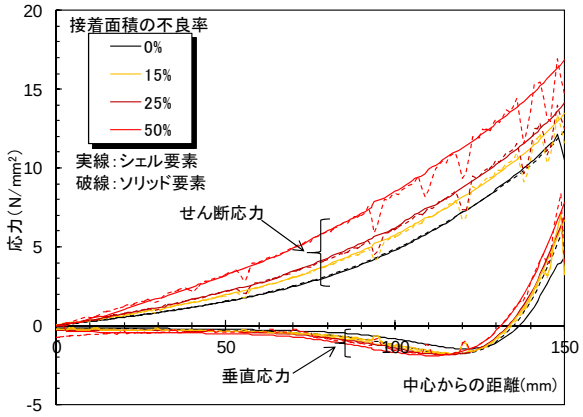


図-2　接着剤に生じる応力の分布

表-3　桁端柱部材の試験体の寸法

桁長 L（mm）	700	フランジ t_f（mm）	12
フランジ幅 b_f（mm）	270	腹板高さ h_w（mm）	800
垂直補剛材幅 b_s（mm）	250	腹板厚さ t_w（mm）	6
垂直補剛材厚さ t_s（mm）	12		

表-4　鋼部材の材料特性

	ウェブ	フランジ	垂直補剛材
弾性係数 E_s（N/mm^2）	208,400	206,300	208,800
ポアソン比 ν_s	0.289	0.285	0.286
降伏強度 σ_y（N/mm^2）	317.5	274.5	286.5
構成則	バイリニア（2 次勾配:E_p=E_s/100）		
硬化側	等方硬化則（isotropic）		

Key Words：接着接合，CFRP 板，接着不良，モデル化，性能回復
連絡先：〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1　TEL.042-677-1111 内線（4564）

それによる性能回復を実験的，解析的に検討する．なお，載荷実験の詳細は，別稿を参照されたい．

表-3，**表-4** に，桁端柱部材の試験体の寸法，鋼部材の材料特性をそれぞれ示す．鋼部材はシェル要素，接着剤はばね要素を用いてモデル化した．ウェブと垂直補剛材の断面欠損部および CFRP の接着範囲の要素サイズは 5×5mm とし，それ以外では 10×10mm とした．**図-3** に，補修試験体の解析モデルを示す．ばね要素を表示するために，CFRP 板をずらして表示している．この検討モデルでは，最大欠損部（75%）を，鋼材の弾性係数で換算した等価な CFRP の剛性で補うこととした．**表-5** に，CFRP 板の積層に必要な炭素繊維（CF）シート量の計算結果を示す．CFRP 板は異方性を考慮して解析を行った．

補修モデルにおける接着不良は，平均的に空隙を有すると仮定して検討する．接着不良は，節点からばねを領域ごとに 50%除去することで，分担面積を考慮してモデル化した．**図-4** に，接着不良のモデル化を示す．実験では，**図-4 (b)** に示すように，まず，CFRP 板を接着した後，一旦取り外して，そのまま再接着する．これは，現場での CFRP 板接着作業で設置位置のずれや間違いなどによる CFRP 板の貼り直しを想定している．**表-6** に，検討シリーズを示す．「健全」は断面欠損のないモデル，「無補修」は断面欠損があり，補修を行わないモデルである．「補修不良なし」，「補修不良あり」は，無補修のモデルに CFRP 板を接着して補修するケースで，それぞれ接着不良がない場合とある場合である．

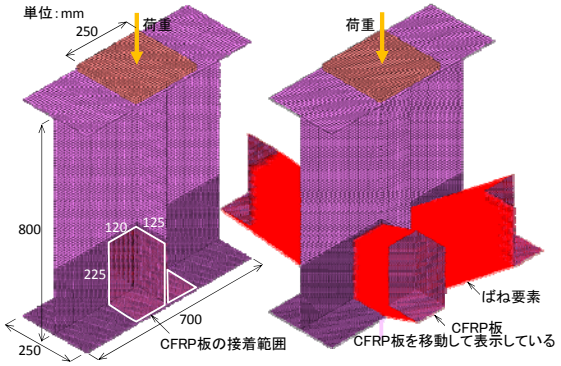
3.2 検討結果と考察

検討結果の一部として，**図-5** に，荷重と鉛直変位の関係を，**表-6** に，最大荷重をそれぞれ示す．補修モデルは，接着不良の有無に関わらず，健全の初期性能まで耐荷力が回復されること，また，解析結果と実験結果で，最大荷重はよい一致を示すことがわかる．なお，最大荷重時の変位は，実験結果に比べ，解析結果では小さく評価された．これは解析では溶接残留応力を考慮していないためと考えられた．

図-6 に，接着不良を考慮したケースの終局時の変形モードを示す．変形モードは両者で，垂直補剛材，ウェブの高さ中央付近での座屈モードであった．これは，健全，接着不良なしと同じであった．なお，図を略したが，接着不良があっても，接着剤に生じる応力は十分小さいことを確認している．

4. まとめ

本研究では，断面欠損を生じた鋼桁端部の CFRP 板接着による性能回復を，接着不良に着目して解析的に検討した．その結果，接着不良が桁端柱部材の圧縮耐力の回復に及ぼす影響は比較的小さく，接着施工の管理水準内であれば，接着不良の影響はほとんどないことが確かめられた．

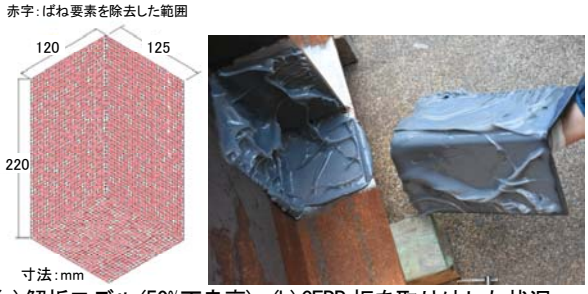


(a) 全体モデル　　(b) CFRP 板とばね要素

図-3　補修モデル

表-5　CFRP 板の積層に必要な CF シート量の計算結果

項目	記号	単位	垂直補剛材	ウェブ
鋼部材の必要厚さ	t_{sl}	mm	9.0	4.5
CF シートの弾性係数	E_{cf}	kN/mm^2	440	440
CF シートの引張強度	σ_{cftu}	N/mm^2	2400	2400
CF シートの鋼換算厚さ	t_{cfs}	mm	4.09	2.05
CF シート設計厚さ	t_{cf}	mm	0.217	0.217
CF シートの積層数	n	-	20	10



(a) 解析モデル (50%不良率)　(b) CFRP 板を取り外した状況

図-4　接着不良のモデル化

表-6　検討シリーズと最大荷重の比較

検討シリーズ	実験値（kN）	解析値（kN）
健全	1502.1	1536.9
無補修	715.7	638.3
補修不良なし	1525.4	1541.7
補修不良あり	1506.7	1534.4

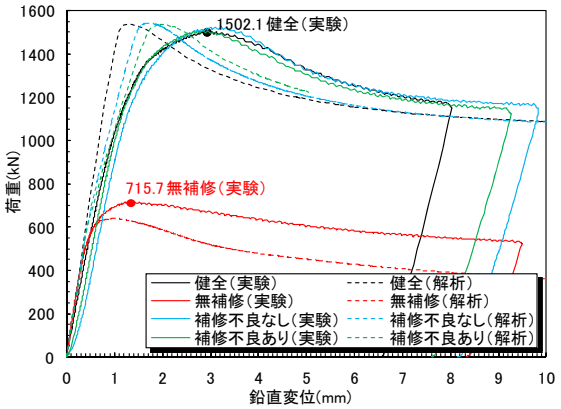
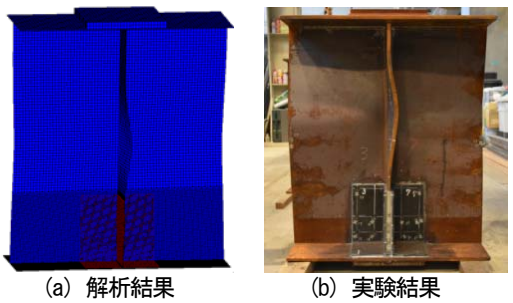


図-5　荷重と鉛直変位の関係



(a) 解析結果　　(b) 実験結果

図-6　接着不良を考慮したケースの終局時の変形モード