

論文 炭素繊維シート又は鋼板で曲げ補強した RC 梁の端部剝離破壊に対する解析的研究

宋 成鏞*1 船山 哲*2 金刀 督純*3 李 翰承*4

要旨: 炭素繊維シート又は鋼板で曲げ補強した RC 梁に関する既往の実験の中から, 補強材端部の早期剝離破壊が発生した結果に着目して整理を行った。次に, 補強材端部の応力を理論的に表現した Roberts 式を基に, 端部剝離破壊を考慮した断面解析法を策定しその妥当性を検討した。また, ひび割れを考慮した非線形有限要素解析法により端部剝離破壊の発生要因を確認すると共に, パラメータ計算を行うことにより, 曲げ補強 RC 梁の早期破壊の要因となる端部剝離破壊を防止するための補強方法を提案した。

キーワード: RC 梁, 端部剝離破壊, Roberts 式, 有限要素解析, 補強方法

1. はじめに

炭素繊維シート(以下, シート)と鋼板で曲げ補強した RC 梁の端部剝離破壊は図-1 のように発生し, 既往の設計理論で予測された最大耐力に到達する前に突然の脆性破壊性状を示す。既往の研究によると, この破壊は補強材の端部にせん断応力と垂直応力が集中するために発生すると言われている。Jones¹⁾は補強材の端部界面でせん断応力が 3MPa~5MPa, 垂直応力が 1MPa~2MPa となった時, コンクリートの割裂破壊による補強材の剝離が生じ最終破壊に達するとしている。Alfarabi Sharif²⁾は実験より曲げ補強した梁の耐力は補強材端部接着剤のせん断応力が 3.5MPa 程度としなった時としている。このようなせん断応力と垂直応力の評価方法について, Roberts³⁾が剝離荷重予測理論を提案した。

本研究ではシート又は鋼板で曲げ補強した RC 梁の端部剝離破壊について Roberts の理論式を基礎にした断面解析とひび割れを考慮した非線形有限要素解析の 2 種類の解析を行い, 解析結果と既往実験結果を比較検討して断面解析と有限要素解析の妥当性を検証し, 補強材の端部剝離による早期破壊を防止するための補強方法を提案した。

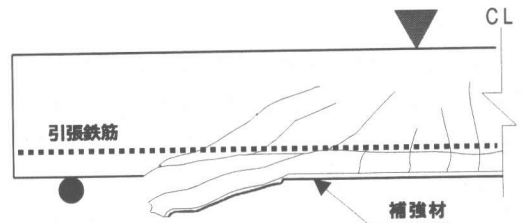


図-1 端部剝離破壊

2. 補強材端部の剝離荷重予測

2.1 Roberts の剝離荷重予測式

Roberts は補強された RC 梁のコンクリート, 接着剤, 補強材が一体挙動すると仮定し, 剝離破壊を予測する近似式 (1), (2) を提案した。

$$\tau_0 = \left\{ F_0 + \left(\frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} M_0 \right\} \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h) \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \tau_0 d_p \left(\frac{K_n}{4E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

式(1), (2)は端部の断面 2 次モーメント値によって大きい影響を受ける。Roberts は補強材をスパンに十分な長さで補強を行った場合は, 引張側のコンクリートを無視した材料の線形挙動を仮定してひび割れ断面 2 次モーメント(I_{cr})を適用した。

*1 (株)トータル・インフォメーション・サービス 工修 (正会員)

*2 (株)トータル・インフォメーション・サービス (正会員)

*3 (株)トータル・インフォメーション・サービス (正会員)

*4 漢陽大学校越大形構造システム研究センター研究助教授 工博 (正会員)

$$I_{cr} = \frac{E_c b_c h^3}{3} + A_s (h_s - h)^2 + b_p d_p (h_s - h)^2 \quad (3)$$

また、短い長さで補強を行った場合は、主筋を無視したコンクリートが引張力を支えると仮定して全断面に対する断面2次モーメント(I_g)を適用した。

$$I_g = \frac{E_c}{E_p} \left\{ \frac{b_c d_c^3}{12} + b_c d_c \left(h - \frac{d_c}{2} \right)^2 \right\} + b_p d_p (h_p - h)^2 \quad (4)$$

2.2 断面2次モーメントに関する Roberts 式の修正

Roberts 式(1)で補強材を長くした場合は、補強材の端部に掛かるモーメントが小さくなり、端部のせん断応力が減少する。このことから高い荷重で補強材端部が終局に至るのでひび割れ断面2次モーメント(I_{cr})を使用する。補強材が短い場合は、補強材の端部に掛かるモーメント値が大きくなって補強材端部のせん断応力も大きくなる。これから、低い荷重で補強材端部の耐力に至るため、全断面2次モーメント(I_g)を使用する。従って、補強材の長さによって断面2次モーメントが変化すると仮定できる。このような仮定によって既往の試験体でスパン(L)に対する補強材の長さ(L_p)の比が 0.75 ~ 0.95 である試験体を分析した。その結果、スパン(L)と補強長さ(L_p)の比(L_p/L)、全断面2次モーメント(I_g)と修正断面2次モーメント(I_{mod})の比(I_{mod}/I_g)を、式(5)、(6)で表現した。

For, Caborn Fiber Sheet

$$\text{If, } 0.95 \geq \frac{L_p}{L} \geq 0.7$$

$$\frac{I_{mod}}{I_g} = 1.442 \left(\frac{L_p}{L} \right) - 0.092 \left(\frac{L_p}{L} \right)^2 \quad (5)$$

For, Steel Plate

$$\text{If, } 0.95 \geq \frac{L_p}{L} \geq 0.6$$

$$\frac{I_{mod}}{I_g} = 1.56 \times 10^{-4} + 3.712 \left(\frac{L_p}{L} \right) - 3.167 \left(\frac{L_p}{L} \right)^2 \quad (6)$$

3. 修正された Roberts の式による断面解析

3.1 材料モデル

3.1.1 コンクリートモデル

コンクリートモデルは修正 Kent&Park モデル⁴⁾で最大応力度 Kf'_c の時、ひずみは $0.002K$ になると仮定した。また、コンクリートの引張軟化も考慮した。応力-ひずみ曲線を図-2 に示す。

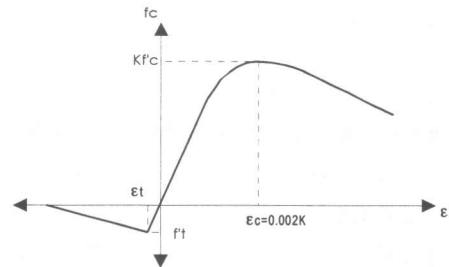


図-2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

3.1.2 補強材と鉄筋のモデル

シートは完全弾性体としてモデル化し、鋼板と鉄筋のモデルは完全弾塑性モデルを用いた。補強材の応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。

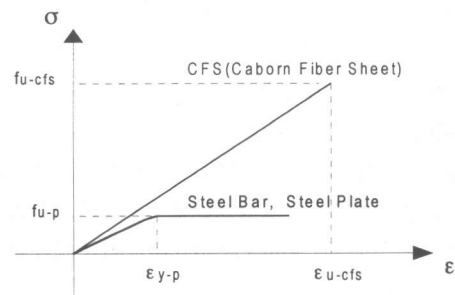


図-3 補強材と鉄筋の応力-ひずみ曲線

3.2 解析方法

単調加力時の曲げモーメントによる曲率は梁の平面保持の仮定、ひずみの適合条件及び力の釣り合いから求められる。RC 梁の断面からそれぞれの材料のひずみが求められる。梁の曲率を増加させて、ひずみを算出し、材料毎の応力-ひずみ曲線から耐力を求める。梁の支点からスパン中央までのモーメント-曲率を積分することにより断面1次モーメントが求められるので、スパン中央のた

わみが算出される。

3.3 補強材の端部剥離破壊強度の算定

Roberts 式(1)に修正断面 2 次モーメントを導入して、補強材端部のせん断応力と垂直応力を計算した。その後、せん断応力(τ_0)と垂直応力(σ_0)を用いて式(7)により計算した主応力がコンクリートの曲げ引張強度(f_b)より大きくなった時、補強材端部が破壊すると仮定した。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + \tau_0^2} \geq f_b \quad (7)$$

3.4 解析順序

解析順序は、表-1 の材料値を Roberts 式に入力し、求めた主応力がコンクリートの曲げ引張強度(f_b)より大きくなる様に、補強材端部剥離耐力

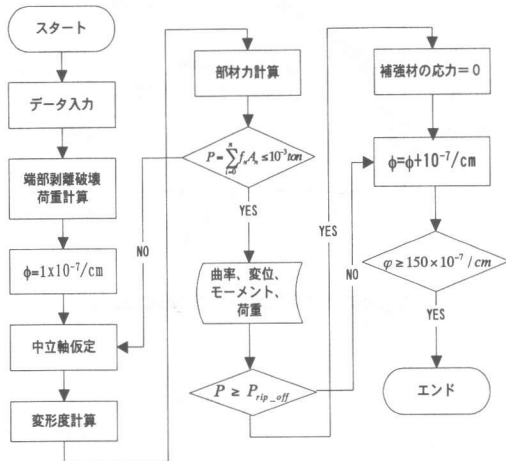


図-4 端部剥離破壊を考える解析順序

($P_{rip-off}$)を trial-error で探す。その後、曲率を変数として図-4 の順序で解析を行う。

4. 非線形有限要素解析

4.1 解析方法及び要素分割

解析はそれぞれ試験体の対称性を考えて左側半分を対象とし、図-5 に示すような要素分割を行った。解析方法は材料の非線形性を考慮した 2 次元平面応力解析とし、荷重は強制変位により与えた。

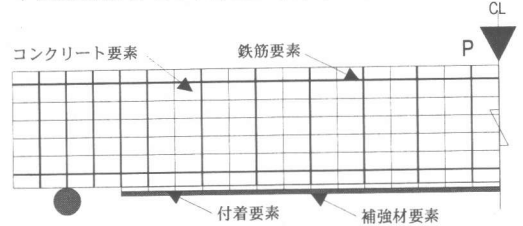


図-5 試験体の要素分割

4.2 各材料の物性

(1) コンクリート : コンクリートの最大圧縮強度までは Kupfer の理論を用い、最大圧縮強度以後では軟化を考慮した 2 直線モデルを使った。引張強度はひび割れ発生前まで線形弾性とし、ひび割れ発生の後には指数型の引張軟化を考慮した。コンクリート要素には、4 節点アイソパラメトリック平面応力要素を用いた。(図-6(a), (b))

(2) 鉄筋及び鋼板 : 鉄筋及び鋼板はトラス要素で表現した。また、降伏条件に関しては Von Mises の降伏条件を使用した。(図-6(c))

(3) 鉄筋とコンクリートの付着 : コンクリートと鉄筋の付着に対しては 4 節点アイソパラメトリック板ボンド要素を使った。その物性は既往論文⁵⁾を参照して Bi-linear で表現した。(図-6(d))

(4) 炭素繊維シート : 炭素繊維シートは完全弾性体とした。(図-6(e))

表-1 解析対象試験体の入力材料特性値(単位 : MPa, mm, m)

研究者	試験体	f_c	bc	dc	ba, bp	dp	da	$E_s(x10^5)$	$E_p(x10^5)$	L	L_p	荷重
李利衡	Bc2a	28.2	150	250	150	0.23	2.0	1.98	2.40	2.7	2.5	2点
崔完喆	F2*130*1.9	22.2	150	250	130	0.23	2.0	2.04	2.35	2.0	1.9	1点
崔完喆	S2*130*1.7	22.2	150	250	130	2.30	4.0	2.04	1.90	2.0	1.7	1点
沈種成	S2*1.5	22.0	150	250	130	2.30	4.0	1.96	2.00	2.0	1.5	1点
沈種成	S4*1.5	22.0	150	250	130	4.00	4.0	1.96	2.00	2.0	1.5	1点

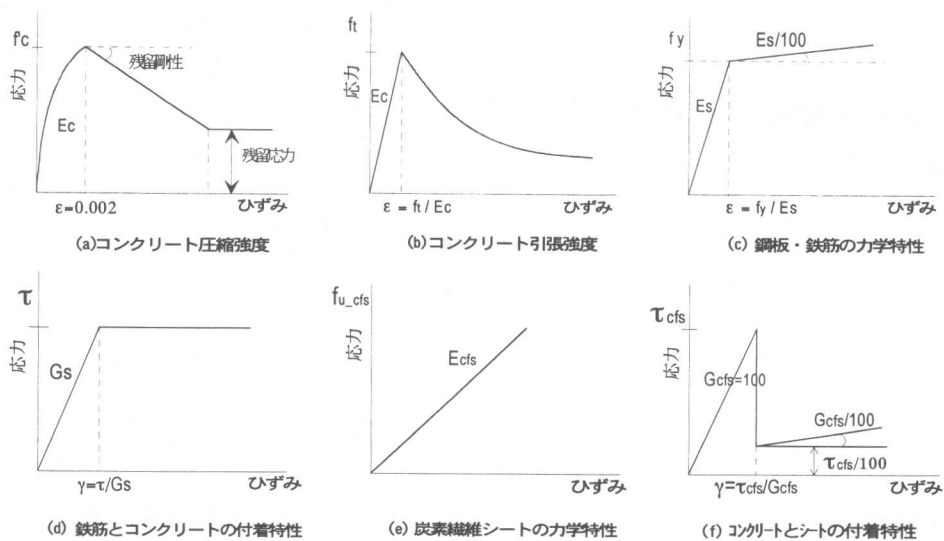


図-6 各材料物性のモデル化

(5) 補強材とコンクリートの付着：鉄筋の付着要素と同様に4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を使った。物性値は既往の論文⁵⁾を参照して変位曲線と一致するように解析を行った。また、最大付着応力(τ)を変化させながら実験の荷重-剥離を表現するために最大付着応力に到達時せん断応力を解放して、同時にせん断剛性を減少させるモデルで表現した。(図-6(f))

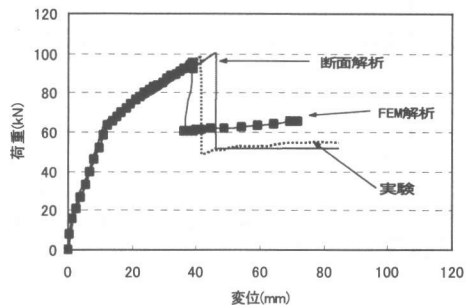


図-7 漢陽大李利衡⁶⁾の試験体(Bc2a)

5. 解析結果と実験結果の比較分析

5.1 対象試験体

本論文で解析した試験体は既往の論文中端部剥離破壊された試験体でシート補強2種類及び鋼板補強3種類を対象とした、解析対象試験体の入力材料特性値は表-1に示す通りである。

5.2 解析結果

図-7~11に示すようにシート又は鋼板で曲げ補強した試験体ではRoberts理論による断面解析と有限要素解析がよく一致している。しかし、試験体(S4*1.5)ではRoberts理論による断面解析結果は実験結果と多少乖離した。この理由は補強鋼板の板厚を厚くした場合にRoberts理論による端部のせん断応力と垂直応力が過大評価され、早期に破壊するためと考えられる。

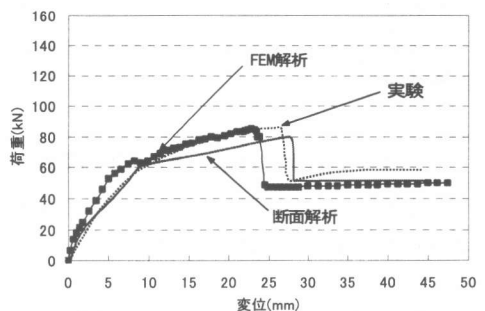


図-8 崇實大崔完結⁷⁾の試験体(F2*130*1.9)

5.3 補強材による破壊モード

有限要素解析結果を見ると、炭素繊維シートで曲げ補強した試験体では梁に大きい変位が発生した後、圧縮側のコンクリートに一部圧壊が生じ、剥離破壊に至っている。図-13に示すように梁中

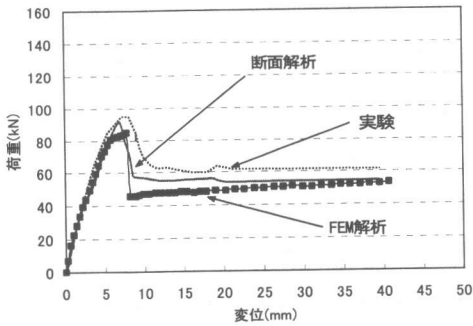


図-9 崇實大崔完結⁷⁾の試験体(S2*130*1.7)

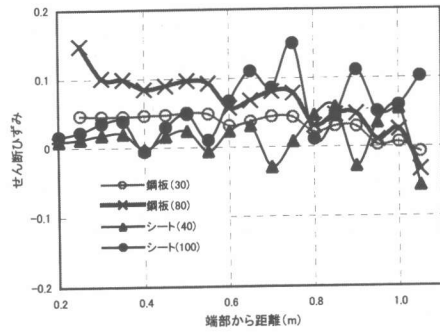


図-12 接着剤せん断ひずみ(荷重 stage)

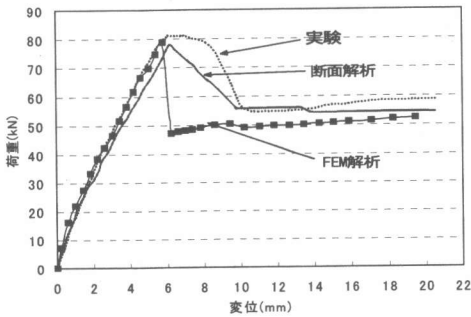


図-10 漢陽大沈種成⁸⁾の試験体(S2*1.5)

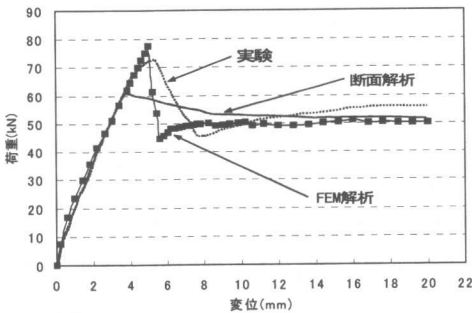


図-11 漢陽大沈種成⁸⁾の試験体(S4*1.5)

中央部のコンクリートの曲げひび割れにより、接着剤にひずみが発生して端部の方に進展しシートが剥離した。従って、補強材の長さを長く補強するのが効果的と判断された。また、鋼板で曲げ補強した試験体では図-12に示すように端部の方に応力が集中し端部の接着剤にひずみが発生して、中央部の方に進展し剥離した。従って、補強材の長さを長くして端部にU字型で定着補強するのが効果的と判断された。

5.4 補強接着剤の厚さを変数として解析

図-13は試験体(S2*1.5)を有限要素解析する時、同じ荷重段階で補強接着剤の厚さをパラメータとして接着剤のせん断ひずみを表した。接着剤の厚さが厚いほどせん断ひずみが小さく同じ荷重段階で剥離破壊が発生しなかった。従って、接着剤の厚さを厚くすることにより補強材の端部剥離破壊を防止するのに効果的と判断される。

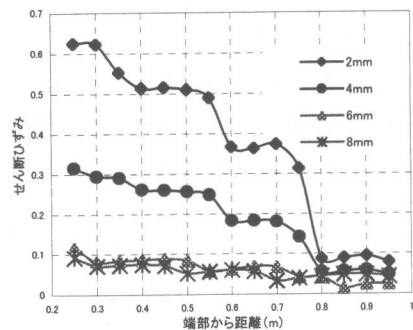


図-13 補強接着剤の厚さによるせん断ひずみ

6. まとめ

補強材で曲げ補強した試験体の解析で次のような結論を得た。

- 1) Roberts式の断面2次モーメントを修正して使用した断面解析とひび割れを考慮した非線形有限要素法解析は、曲げ補強した試験体の端部剥離破壊解析に効果であることが確認できた。
- 2) 炭素繊維シートで補強する場合、スパンに対して補強材の長さ比を0.95以上するのが効果的と判断された。

3) 鋼板で補強する場合、スパンに対して補強材の長さ比を 0.95 以上すると、補強材の端部に U 字型で定着補強するのが効果的と判断される。

4) 補強接着剤の厚さを厚く補強することにより接着剤のせん断ひずみが減少するため、端部剥離破壊を防止する効果があることが判明した。

参考文献

- 1) Jones, R. and Swamy, R.: Plate Separation and Anchorage Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates, The Structural Engineer Vol. 66, No. 5, pp. 85~94, Mar 1988
- 2) Sharif, A. and Al-Sulaimani, G. J.: Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates, ACI Structural Journal, pp.160~168, Mar-Apr, 1994,
- 3) Roberts, T. M.: Approximate analysis of shear and normal stress concentrates in the adhesive layer of Plated RC Beams, The Structural Engineer Vol. 67, No. 12, pp. 222~233, June 1989
- 4) Park, K. and Pualay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Interscience Publication 1993
- 5) 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 鹿毛忠継 : 炭素繊維シートによって曲げ補強した RC 梁の有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 1, pp. 1065~1070, 1996
- 6) 宋成鏞, 羅正敏, 李容擇, 李利衡 : 炭素繊維シートで補強した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的な研究, 建築學會秋季學術發表會 論文集, pp. 347~352, 1998
- 7) 崔完喆, 洪起燮, 洪榮均, 申永洙 : RC 構造物の補強性能評価及び補強設計法に関する研究, 崇實大生産技術研究所, 5. 1997
- 8) 裴仁煥, 沈種成 : 鋼板又は炭素繊維シートで補強した RC 梁に関する解析的な研究, コンクリート学会誌 9 卷 6 號, pp. 129~137, 12. 1997

記号定義

τ_0 = 接着材のせん断応力
 ρ_0 = 接着材の垂直応力

F_0, M_0 = 補強材端部のせん断力, モーメント

K_s, K_n = 接着材のせん断剛性, 垂直剛性

E_c = コンクリートの弾性係数

E_p = 鋼板の弾性係数

E_{cfs} = シートの弾性係数

E_s = 鉄筋の弾性係数

b_a, d_a = 接着材の幅, 厚さ

b_p, d_p = 補強材の補強幅, 厚さ

h_p = 補強させて断面から補強材中心まで距離

h_s = 補強させて断面から鉄筋中心まで距離

h = 中立軸の距離

L = 梁のスパン

L_p = 補強材の長さ

I_g = 全断面 2 次モーメント

I_{cr} = ひび割れ断面 2 次モーメント

A_s = 鉄筋の断面積

b_c, d_c = コンクリートの断面サイズ

$K = 1 + (\rho_s \times f_{yh} / f'_c)$

ρ_s = 主鉄筋比

f_{yh} = せん断補強筋の降伏強度

$f_{u,cfs}, \epsilon_{u,cfs}$ = CFS の降伏強度, ひずみ

$f_{u,p}, \epsilon_{u,p}$ = 鋼板の降伏強度, ひずみ

f_b = コンクリートの曲げ引張強度

f_t = コンクリートの引張強度

σ_0 = 補強材端部の垂直応力

τ_0 = 補強材端部のせん断応力

G_s = 鉄筋とコンクリートのせん断付着剛性

G_{cfs} = コンクリートとシートのせん断付着剛性