

CFRP ロッドで補強したコンクリート梁の曲げ終局強度の算定方法

(その1) 既往の算定方法

Method for Calculating the Ultimate Flexural Strength of Concrete Beams Reinforced with CFRP rods

(Part1) Existing Calculation Method

○新田真麻¹, 矢幡悠², 田嶋和樹³, 長沼一洋³

Martha Nitta¹, Yu Yahata¹, Kazuki Tajima², Kazuhiro Nagamuna²

Abstract: The purpose of this study is to establish a method for calculating the ultimate strength in bending of concrete beams reinforced with CFRP rods. Murakami pointed out that the calculation methods of AIJ and JSCE for the ultimate strength in bending cannot evaluate the ultimate strength in bending and that the FRP rods may fail at ultimate failure if the amount of tensile reinforcement bars is small. Therefore, Murakami proposed a new method for calculating the ultimate strength in bending. In this paper, the validity of the proposed method for calculating the ultimate strength in bending is discussed.

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は鉄筋の腐食により耐久性が低下する。そのため、鉄筋の代替材料として、耐食性に優れた連続繊維補強（以下、FRP）ロッドを用いたコンクリート構造物の研究が国内外で行われてきた。FRP ロッドは破断に至るまで弾性挙動を示す特徴があり、コンクリート梁の引張補強筋に用いた場合、FRP ロッドの破断が圧縮側コンクリートの圧壊によって曲げ破壊に至る。なお、日本建築学会¹⁾や土木学会²⁾では、設計に際し、圧縮側コンクリートの圧壊を先行させることを推奨している。この場合、圧縮側コンクリートの終局ひずみを仮定し、等価ストレスブロック法を用いて曲げ終局強度を算定する。

一方、村上³⁾は、この方法では圧縮側コンクリートが圧壊に至るか保証されず、また、配筋量が少ない場合にはFRP ロッドの破断が生じる可能性を指摘している。さらに、平面保持を仮定した断面解析法を用い、中立軸距離を変数とした逐次解析法によって圧縮側コンクリートの終局ひずみならびに曲げ終局強度を算定する手法を提案している。

本研究では、CFRP ロッドで補強したコンクリート梁の破壊実験³⁾を対象とした非線形 FEM 解析を通じて、コンクリートの圧縮軟化挙動や応力中心間距離の変化に着目し、既往の土木学会の手法ならびに村上の提案手法の妥当性を確認する。本報（その1）では、既往の曲げ終局強度の算定手法を整理するとともに、曲げ終局強度の算定結果と FEM 解析結果を比較する。

2. 既往の曲げ終局強度の算定手法の概要

土木学会²⁾では、等価ストレスブロック法を用いて曲げ終局強度を算定する際に、圧縮側コンクリートの

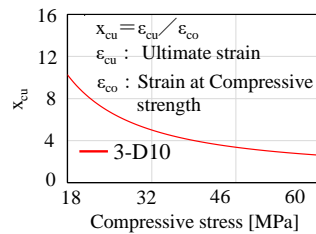


Fig.1 x_{cu} - Compressive stress Relationship¹⁾

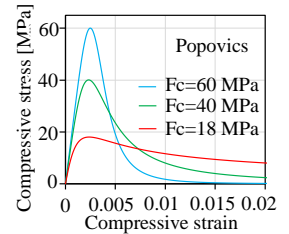


Fig.2 Stress-Strain Curve of Concrete

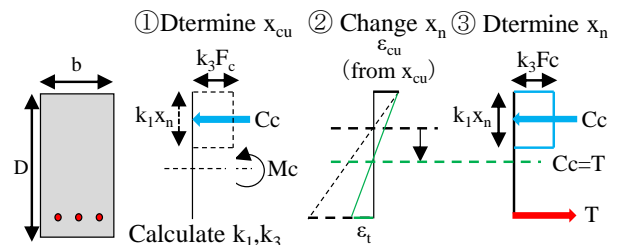


Fig.3 Calculation Method¹⁾

終局ひずみ値として $0.0025 \leq \epsilon_{cu} \leq 0.0035$ を仮定する。一方、村上による算定手法³⁾では、Fig.1を用いてコンクリート強度から x_{cu} を求め、圧縮側コンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} を算定する。なお、 ϵ_{cu} が 0.01 程度となるため、コンクリートの圧縮応力度-ひずみ度曲線には、圧縮軟化領域を表現可能な Popovics 式 (Fig.2) を用いている。

Fig.3 に村上らの算定手法の概念図を示す。Fig.1 から求まる x_{cu} と Fig.2 に示すコンクリートの圧縮応力度-ひずみ度曲線からコンクリートの圧縮合力 C_c と中立軸に関する圧縮合力のモーメント M_c を算定し、ブロック係数 k_1 , k_3 を求める。次に、 x_{cu} から ϵ_{cu} を算定し、圧縮合力 C_c と引張鉄筋合力 T が一致するような中立軸を

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・院(前)・建築 3 : 日大理工・教員・建築

求める。なお、ここでは平面保持が仮定され、コンクリートの引張強度およびFRP ロッドの圧縮強度を無視している。最後に、終局モーメントおよび曲げ終局強度を求める。

3. 解析対象試験体の概要

Fig.4 に解析対象試験体の概要を示す。主筋には CFRP ロッドを用いており、付着を確保するため表面形状をシングルスパイラル型としている。補強筋は D10 とし、引張補強筋は 2~4 本の 3 水準としている。なお、せん断破壊が先行しないようにせん断補強筋比を 1.4%としている。

4. FEM 解析モデルの概要

Fig.5 に要素分割図を示す。本解析では、試験体を二次元でモデル化し、コンクリートは平面応力要素でモデル化した。また、CFRP ロッドは付着すべりを考慮するためにトラス要素とし、あばら筋は埋め込み鉄筋でモデル化した。載荷板は、平面応力要素でモデル化し、剛体とした。なお、解析には、DIANA10.6 を用いた。

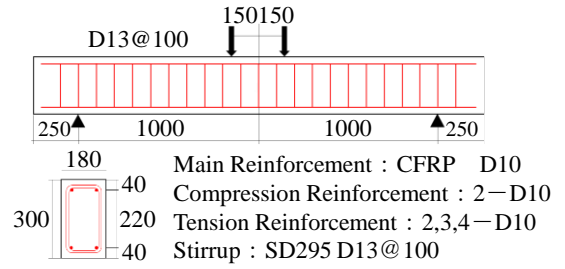
Fig.6 に材料構成側を示す。コンクリートの圧縮特性に Parabolic モデル、引張特性に Hordjik モデルを適用し、破壊エネルギーを考慮した。要素代表長さ L_c は、要素面積の 1/2 乗とした。また、ひび割れ後のせん断伝達特性には、Al-Mahaidi モデルを適用した。鉄筋は bi-linear 型とし、降伏後の二次勾配は初期剛性の 1/100 とした。また、CFRP ロッドは線形弾性モデルとした。付着特性には島らのモデルを適用し、比較のため完全付着についても検討した。

5. FEM 解析結果

Fig.7 に荷重-たわみ関係および曲げ終局強度の算定結果を示す。ここでは 3-D10 の解析結果を示すが、最大耐力および引張補強筋ひずみ度は実験結果と良好に対応した。また、付着のモデル化の影響は小さかった。なお、4-D10 の場合も同様であった。一方、村上による算定結果は、 $\epsilon_{cu}=0.003$ を仮定した土木学会の手法よりは良好であるが、曲げ終局強度をやや低く評価した。ただし、Fig.8 に示す荷重-引張補強筋ひずみ度関係より、引張補強筋のひずみ度は実験および FEM 解析と同等であった。

6. まとめ

CFRP ロッドで補強したコンクリート梁を対象とした村上による曲げ終局強度の算定結果は、実験結果を下回った。また、FEM 解析結果は、曲げ終局強度および引張補強筋ひずみ度について、実験結果と良好な関係を示した。次報(その2)では、曲げ終局強度の算定結果が実験結果を下回った原因について考察する。



Concrete	Compressive Strength : 39.3 MPa Young's Modulus : 28.0 GPa
Main Reinforcement	CFRP rod (D10) Cross Section : 73.3 mm ² Groove Shape : Single Spiral Tension Strength : 2450 MPa Tension Elastic Modulus : 147 GPa
Stirrup	SD295A, D13

Fig.4 Details of Specimen

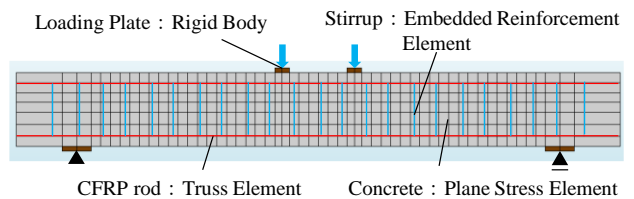


Fig.5 Element Division Diagram

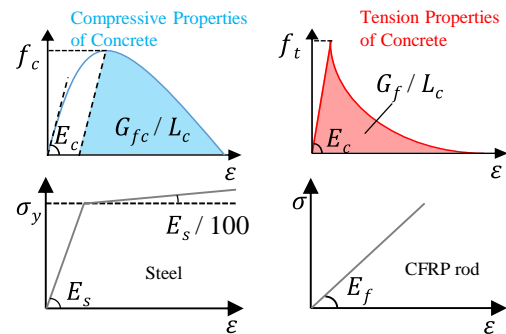


Fig.6 Constitutive Laws for Materials

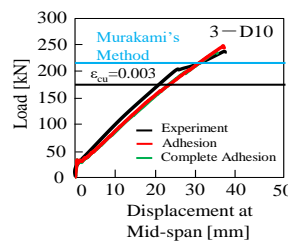


Fig.7 Load-Displacement at Mid-span

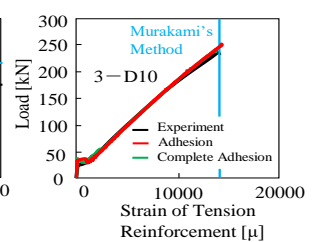


Fig.8 Load-Strain of Tension Reinforcement

参考文献

[1] 日本建築学会:連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002
 [2] 土木学会:コンクリートライブラリー第 88 号「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」, 1996
 [3] 村上聖:連続繊維補強コンクリート梁の曲げ終局限界点の算定, 日本建築学会技術報告書, Vol. 30, No. 75, pp. 791-796, 2024