

せん断補強筋のない高強度 RC はりを対象とした 修正圧縮場理論によるせん断耐力評価

長岡工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○石野 亮
福田組 正会員 大塚洋一
長岡工業高等専門学校 正会員 井林 康
東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

1. はじめに

近年，超高強度材料の研究開発が行われ，性能照査型設計法が取り入れられたこれからの設計体系の中において，今後その適用範囲は広がっていくと考えられる．このような現状において，鉄筋コンクリートはりのせん断耐力をより力学的なアプローチで解析的に評価する試みがなされている．その1つに，Collins らの提案した修正圧縮場理論（Modified Compression Field Theory，以下，MCFT）¹⁾がある．本研究では，MCFT を，斜め引張破壊するせん断補強筋のない高強度 RC はりに対して計算できるよう，解析プログラムを作成した．そして，本解析の適用性・妥当性を評価するため，既往の実験結果及び既往のせん断耐力評価式との比較，検討を行った．

2. 修正圧縮場理論による解析手法

2.1 概説

MCFT は，せん断力を受ける RC 要素に対する解析手法であり，ひび割れの発生した RC 要素を，一様な斜めひび割れを持つ連続的要素として捉え，要素内に作用するひずみと応力を平均的に扱うことで，せん断問題を合理的に評価できる解析手法であり，図-1のようにモデル化される．せん断応力 v が作用する RC 要素について，ひび割れ間のコンクリート部分には，部材軸に対し角度 θ で主圧縮応力 σ_2 ，その鉛直方向に主引張応力 σ_1 が作用すると考えられ，その関係はモールのひずみ円により求められる．要素内のひずみは，モールのひずみ円からひずみの適合条件式を導出し，コンクリートと鉄筋の材料構成則を用いることによって，各応力の主鉄筋方向の力（軸力）が算出される．そして，このせん断力によって発生した内力を軸方向に置き換え，軸力の釣合を満たすような RC 要素状態を，繰り返し収束計算で求める手法である．

2.2 コンクリートと鉄筋の材料構成則

a) 圧縮

本研究で対象とする供試体は，130MPa までの高強度コンクリートを使用していることから，コンクリートの主圧縮応力 σ_2 と主圧縮ひずみ ε_2 の関係は，広範囲な圧縮強度に対応可能なものとし式(1)に変更した．

$$\sigma_2 = -\sigma_{2max} \frac{n(-\varepsilon_2 / \varepsilon_c')}{(n-1) + (-\varepsilon_2 / \varepsilon_c')^{nk}} \quad (1)$$

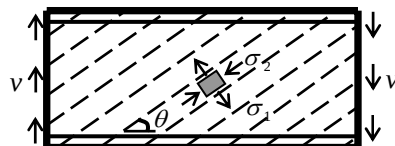


図-1 鉄筋コンクリート要素

表-1 収集した供試体データの変動因子範囲

コンクリート圧縮強度 f'_c	66 - 128 [MPa]
有効高さ d	150 - 685 [mm]
せん断スパン比 a/d	2.5 - 4.0
引張鉄筋比 p_w	1.23 - 2.65 [%]
引張鉄筋降伏強度 f_{sy}	333 - 1050 [MPa]

b) 引張

主引張応力と主引張ひずみの関係は，式(6)で示される引張軟化を考慮した式を用いた．

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_c \varepsilon_1 & (\varepsilon_1 < \varepsilon_{cr}) \\ &= \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} & (\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cr}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに， f_{cr} ， ε_{cr} はコンクリートのひび割れ発生応力とひずみであり， f_{cr} は友澤らの提案式 ($f_{cr} = 0.39 f'_c{}^{0.566}$) を用いる．

ひび割れ幅が拡大すると，要素内の引張応力が制限される．すなわち， σ_1 が σ_{int} を上回るようなひび割れ幅になった場合， σ_1 は σ_{int} と等しくなる

$$\sigma_{int} = v_{ci} \tan \theta \quad (3)$$

ここに， v_{ci} はコンクリートのひび割れ面を介して伝達されるせん断応力である．

c) 鉄筋

鉄筋の応力 - ひずみ関係は引張，圧縮とも降伏点までは線形を保ち，降伏点を越えると一定の降伏応力とする bi-linear 型とした．

3. 既往の実験結果による検証

3.1 解析対象供試体

本研究では，国内外で実施された斜め引張破壊するせん断補強筋のない高強度 RC はりのせん断実験結果を収集し，MCFT を適用するために必要な諸量が明示された実験供試体を選択した結果，8 つの文献から 53 体を得た．これらの供試体の変動因子範囲は，表-1 に示すとおりであり，これらの供試体の載荷方法は 1 点または 2 点集中載荷されたものである．

表-2 実験値に対する本解析値および各算定式値の精度

	平均値(μ)	変動係数(C.O.V.)
本解析	0.95	16.9%
示方書式	1.02	16.9%
二羽式	0.85	13.6%
鈴木式	0.99	14.8%

3.2 検証

(1) 概説

本研究で作成したプログラムを、収集した既往の実験結果および既往のせん断耐力評価式を用いて、その適用性・妥当性を評価した。既往のせん断耐力評価式としては、式(4)に示す示方書で規定される算定式（以下、示方書式）²⁾、式(5)に示す二羽らの提案した式（以下、二羽式）³⁾、式(6)に示す鈴木らの提案した式（以下、鈴木式）⁴⁾を用いた。

$$V_c = 0.23 \sqrt{f'_c} \sqrt{p_w} \sqrt{1000/d} \cdot \beta_n \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

$$V_c = 0.23 \sqrt{f'_c} \sqrt{p_w} \sqrt{1000/d} [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

$$V_c = 0.66 d^{-2/5} \sqrt{p_w} [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w \cdot d \quad (6)$$

ここに、 V_c :せん断耐力[kN]、 f'_c :コンクリート圧縮強度[MPa]、 d :有効高さ[mm]、 a/d :せん断スパン比、 p_w :引張鉄筋比[%]、 b_w :ウェブ幅[mm]、 β_n :軸力に関する補正項（本研究では、軸力は載荷されていないため $\beta_n=1$ ）である。

(2) 算定精度

前述の53体の供試体の実験値を本研究による解析値、もしくは式(4)~(6)による算定値で除したものの平均値(μ)、および変動係数(C.O.V.)を表-2に示した。これより、本解析手法は変動係数が16.9%と他の式に比べ、若干大きいものの、高強度RC部材に対して提案されている示方書式および鈴木式と同程度の平均値および変動係数で、せん断耐力を評価していることがわかる。

(3) コンクリート圧縮強度の影響

収集した実験結果に関し、コンクリート圧縮強度に着目して本解析の精度を検証した結果を図-2に示す。なお、比較の対象として、示方書式の精度も併記してある。

これよりコンクリート圧縮強度の大きさによる精度の偏りはなく、その影響を概ね考慮できたと言える。

(4) 有効高さの影響

図-3は、収集した実験結果に関し、有効高さに着目して本解析の精度を検証した結果を示す。なお、示方書式による算定結果も併記してある。これより、有効高さの影響を1/4乗で考慮している示方書式による算定値は有効高さの影響に関わらず、概ね偏りなく実験値を再現しているのに対し、本解析手法による解析値は、有効高さが大きくなるほど実験値を上回る危険側の評価を与えて、示方書式と異なった値を算定していることが確認される。

(5) 引張鉄筋比の影響

引張鉄筋比についての検討では、本解析手法による解析値

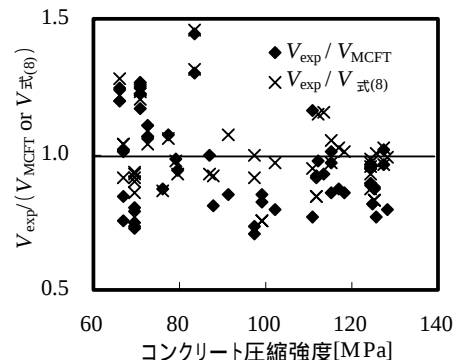


図-2 実験値)/(解析値または示方書式値)とコンクリート圧縮強度の関係

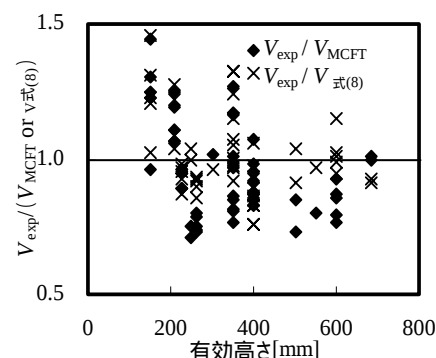


図-3 (実験値)/(解析値または示方書式値)と有効高さの関係

が引張鉄筋比 1.0~1.5%程度の範囲で実験値を上回る危険側の評価を与えていた。引張鉄筋比の影響が考慮されているのは、鉄筋そのもののせん断抵抗を考慮するためであるが、Collins らの提案した本理論においては、このせん断抵抗への寄与は取り込むことができない。

(6) せん断スパンの影響

本解析によるせん断スパン比の影響は、せん断スパン比が3.0の供試体が集中しているため、十分な考察を行うことができなかった。

4. まとめ

算定精度に関しては、実験値と解析値の比の平均値 0.95、変動係数 16.9%と若干変動係数が高く算定された。せん断耐力におよぼすコンクリート圧縮強度の影響は、概ね偏りなく評価可能である。有効高さの影響は、有効高さが大きい領域において、解析値が実験値を上回る危険側の評価を与えることが確認され、今後再検討する必要があると考えられる。

引用文献

- 1) Collins, M. P. and Mitchell, D: Prestressed concrete structures, Prentice Hall, (1991).
- 2) 土木学会:2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], (2002).
- 3) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫:せん断補強鉄筋のないRCはりのせん断補強強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, (1986)
- 4) 鈴木基行, 秋山充良, 王衛倫, 佐藤成禎, 前田直己, 藤澤豊:コンクリート圧縮強度130MPaまでを対象とした腹鉄筋のないRCはりのせん断強度式, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.75-91 (2003).