

論文 RC造柱・梁部材の圧縮ヒンジ領域長さと曲げ降伏後のせん断破壊時変形の評価

中村 聡宏*1・勅使川原 正臣*2

要旨: 靱性に依存する耐震設計では、各種構造部材の変形性能を評価することが重要である。本論文では、曲げ降伏後にせん断破壊する柱・梁部材の限界変形を評価するための簡易評価式において、せん断補強によるコアコンクリート拘束効果と圧縮ヒンジ領域の関係に関して考察した。既往の文献における知見を整理し、拘束効果と圧縮ヒンジ領域に關係が有ることを示した。また、実験結果を整理し、拘束効果と圧縮ヒンジ領域長さの關係式を提案した。提案する關係式により圧縮ヒンジ領域を評価することで、限界変形を適切に評価できることを示した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 圧縮ヒンジ領域, せん断破壊, 拘束効果

1. はじめに

靱性に依存する耐震設計では、部材の各限界状態を適切に設計する必要があるため、各種構造部材の変形性能を評価することが重要である。曲げ降伏が他の破壊形式よりも先行する部材では、曲げ降伏後にせん断破壊や付着割裂破壊が生ずることで、耐力が著しく低下する場合がある。

既往の簡易な曲げ降伏部材の変形性能の評価方法としては、耐震診断基準¹⁾に示される、せん断余裕度 Q_{su}/Q_{mu} に基づいた靱性指標評価式や、靱性保証指針²⁾に示される変形性能評価式がある。坂下ら³⁾は、靱性保証指針式におけるせん断余裕度と限界変形角の關係を数式的に明らかにしており、いずれの評価式もせん断余裕度 Q_{su}/Q_{mu} に依存している。一方、保有水平耐力計算における部材種別では、せん断応力度比や引張鉄筋比、軸力比といったパラメータから総合的に判断することとなっており、各種パラメータと限界変形角の關係を理論的に明らかにすることは重要である。

勅使川原ら⁴⁾は、鉄筋コンクリート造耐震壁や柱・梁部材を対象として、軸応力度やせん断応力度比、補筋筋によるコアコンクリートの拘束効果等の、限界変形に影響する因子を含んだ簡易限界変形評価式を提案した。提案評価式は、限界変形角を概ね評価できることが確認されたが、部材端部の圧縮ヒンジ領域長さの設定が重要な課題となった。

本論文では、勅使川原らの提案式における、ヒンジ領域長さの設定方法について、せん断補強によるコアコンクリートの拘束効果とヒンジ領域長さの關係という観点から考察する。

2. 鉄筋コンクリート部材の限界変形評価法⁴⁾

2.1 評価法の概要

ここでは、勅使川原ら⁴⁾の提案する限界変形評価法の概要を示す。詳細については文献⁴⁾を参照されたい。

外力(軸力, せん断力, 曲げモーメント)を受ける柱・梁部材には、せん断力を一方の端部から他方の端部に伝達するために、圧縮束が部材内に形成される。圧縮束はトラス機構とアーチ機構が複合した状態にある。この時、部材端部(曲げモーメントが最大となる位置)では、圧縮束により伝わってきた圧縮力が、断面内の中立軸より圧縮側の面において伝達すると考えられる。曲げ降伏後のせん断破壊は、圧縮束方向に直交する面の圧縮応力がコンクリートの圧縮強度に達することで生ずると考える。

提案する評価手法での荷重変形關係の概念図を図-1に示す。本手法では、曲げが進行するにつれて中立軸長さが短くなるため、圧縮束の断面が小さくなり、せん断強度が低下すると考える。曲げ降伏後のせん断破壊時変形(図-1中の限界変形点)は、低下したせん断強度が曲げ降伏強度を下回る点で定義できる。

変形性能を評価するにあたり、柱・梁部材の場合は、終局状態ではかぶりコンクリートは応力を負担できないと考え、図-2に示すように、コアコンクリート断面のみを対象として検討する。

この時、部材脚部では、圧縮ストラットによる力の伝達により、図-3のような応力状態となっていると考えられる。この時、図-3の応力状態にもとづいて釣り合い式を立式すると式(1)となる。

$$\frac{Q_u}{\sin \theta} = K \sigma_{bc} X_n^* \cos \theta \quad (1)$$

*1 名古屋大学大学院 環境学研究科 助教・博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科 教授・工博(正会員)

(独立行政法人建築研究所 客員研究員)

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q_u}{N + a_t \sigma_y} \right) \quad (2)$$

ここで、 X_n^* : 平面保持を仮定して算出したコア部分の中立軸位置(mm), b_c : コア部分の柱幅(mm), σ_B : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), K : 拘束効果による強度上昇係数, θ : 圧縮束の角度(式(2)による), N : 軸力, a_t : 引張鉄筋断面積, σ_y : 引張鉄筋降伏強度である。

コアコンクリートはせん断補強筋により拘束されていることから、圧縮強度や終局時歪が拘束効果により向上し、変形性能の向上に寄与していると考えられる。本提案式では、孫・崎野の提案する応力歪関係式⁹⁾に従い、拘束効果による圧縮強度や終局時歪の向上を考慮する。

$$\sigma_p = \sigma_B + \kappa \rho_{wk} \sigma_{wy} = K \sigma_B \quad (3)$$

$$\kappa = 11.5 \cdot \left(\frac{d_w}{c} \right) \left(1 - 0.5 \frac{s}{j_e} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{c0} \left\{ 1.374 + 0.108K - 0.102K^{-4} \frac{\sigma_B}{42} \right\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c0} = \begin{cases} \varepsilon_c \cdot (1 + 4.7(K - 1)) & (K \leq 1.5) \\ \varepsilon_c \cdot (3.35 + 20(K - 1.5)) & (K > 1.5) \end{cases} \quad (6)$$

$$\varepsilon_c = 0.93 \sigma_B^{1/4} \times 10^{-3} \quad (7)$$

ここで、 σ_p : 拘束効果を考慮したコンクリート強度, ε_{c0} : 拘束効果を考慮したコンクリートの圧縮強度時歪, ε_p : 拘束効果を考慮したコンクリートの終局歪, ρ_{wk} : せん断補強筋の体積比, σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度, ε_c : コンクリートの無拘束時圧縮強度時歪, d_w : せん断補強筋の公称直径, c : せん断補強筋の直交横支持長さ, s : せん断補強筋間隔である。

破壊形式はスラット方向の応力で決定されるため、変形性能を評価するためのコンクリート終局時歪をスラット角度に応じて低減して用いるものとする。

$$\varepsilon_u = (\cos^2 \theta) \cdot \varepsilon_p \quad (8)$$

曲げ降伏後は、図-4 に示すように、塑性ヒンジ領域での回転角が支配的になると考えられるため、限界変形角 R_u を終局時曲率 ϕ_u とヒンジ領域長さ l_p の積として評価する。また、ヒンジ領域長さは、部材の短辺長さ b_{min} に比例すると考える。以上より、変形性能評価式の一般式は次のように導かれる。

$$R_u = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon_u \cdot \sin 2\theta}{2(\tau_u / K \cdot \sigma_B)} \quad (9)$$

ここで、 α : コア部分の面積と全断面積の比(= $b_e d_e / b_c D_c$, 柱・梁部材のみ), β : 部材の短辺長ささと部材せいとの比(= b_{min} / d_e , 柱・梁部材のみ), γ : ヒンジ領域の部材短辺長さに対する係数, τ_u : 最大耐力時平均せん断応力度である。

式(9)では、一般的に変形性能に影響すると考えられて

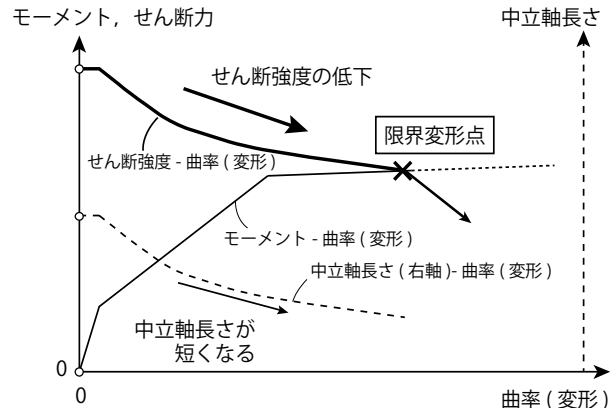


図-1 限界変形角の定義

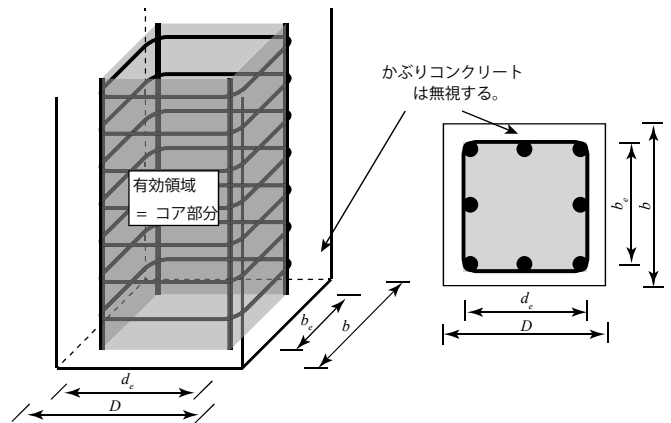


図-2 柱梁部材における有効領域

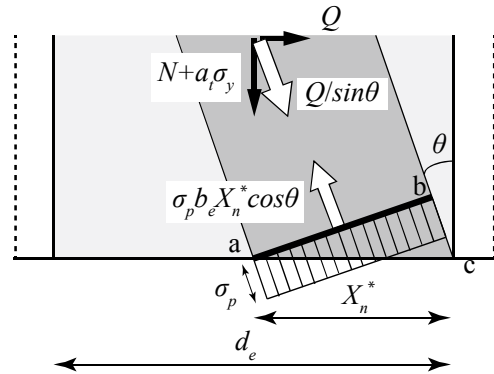


図-3 柱梁部材における脚部応力状態の仮定

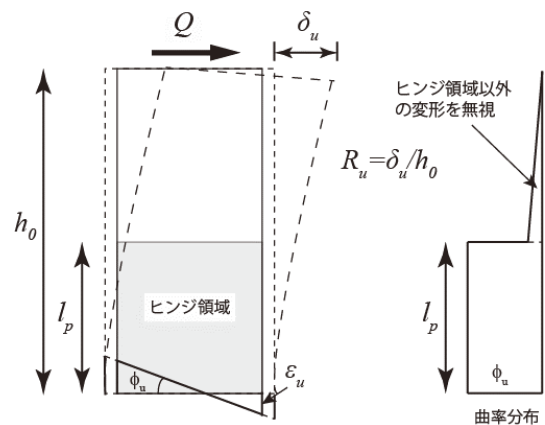


図-4 部材の変形状態の仮定

いる，せん断応力度比や軸力比，引張鉄筋比といった因子が全て含まれている。また，ヒンジ領域のせん断補強筋量を増やすことで靱性能が向上する点が，拘束効果として反映されている。

3. ヒンジ領域長さについて

提案式(9)では，ヒンジ領域長さの部材短辺長さに対する係数 γ の設定が重要である。そこで，本稿では，拘束効果がヒンジ領域長さに与える影響について考察する。

無拘束コンクリートの圧縮ヒンジ領域長さに関しては国内外で数多く報告されている。Markeset ら⁷⁾は，軸力を受ける部材に関して，図-5 に示すような，ヒンジ領域の歪と局所ひび割れの変形を考慮したモデルを仮定し，実験における平均化応力歪関係と適合するように逆算することで，ヒンジ領域長さが部材せいの 2.5 倍程度と推定している。また，Lertsrisakulrat ら⁸⁾は，複数のひずみゲージを貼り付けたアクリル棒を埋め込んだ試験体の実験結果にもとづき，ヒンジ領域における歪エネルギーが全体の歪エネルギーの 15% となる領域を圧縮ヒンジ領域と定義し，ヒンジ領域長さは等価部材せい（断面積の平方根）の 0.57~1.36 倍と推定している。

一方，せん断補強筋により拘束されたコンクリートのについても幾例か報告されている。秋山ら⁹⁾は，せん断補強筋により拘束した角型コンクリートの圧縮実験を実施し，Lertsrisakulrat ら⁸⁾と同様の定義に基づく圧縮ヒンジ領域長さについて報告している。秋山らの報告したヒンジ領域長さと拘束効果を表わす指標 pe/σ_{co} (pe :有効横拘束圧， σ_{co} :コンクリートの有効圧縮強度)の関係を図-6 に示す。図より，拘束効果とヒンジ領域長さには相関が見られることが分かる。

西村ら¹⁰⁾は，塑性論に基づいた三軸降伏条件について考察し，鉄筋により拘束されたコンクリートの圧縮破壊について理論的に考察している。西村らの仮定する破壊モデルを図-7 に示す。西村らの考察によると，圧縮破壊面の角度 β は，圧縮強度に対するせん断補強筋量の効果 κ と相関があることが示されている。すなわち，拘束が大きくなるほど破壊線が立ち上がり，破壊領域が広くなると言える。

以上のように，コンクリートの拘束効果が大きいほど，ヒンジ領域長さ（局所圧縮破壊領域）が長くなることが推察され，特に本論文で対象とする柱・梁部材ではその影響を適切に評価する必要があると考えられる。

4. 拘束効果を考慮したヒンジ領域長さの評価

3章で示したように，拘束効果 K とヒンジ領域長さには相関があると考えられる。そこで，既往の実験結果を整理することで拘束効果とヒンジ領域長さの関係を表わ

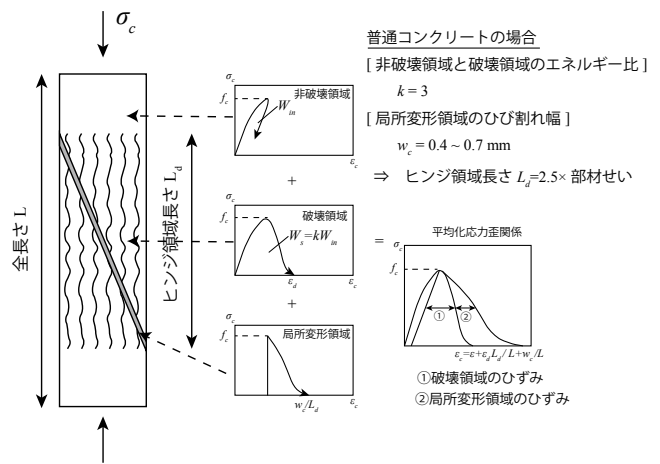


図-5 Markeset らの変形モデル⁷⁾

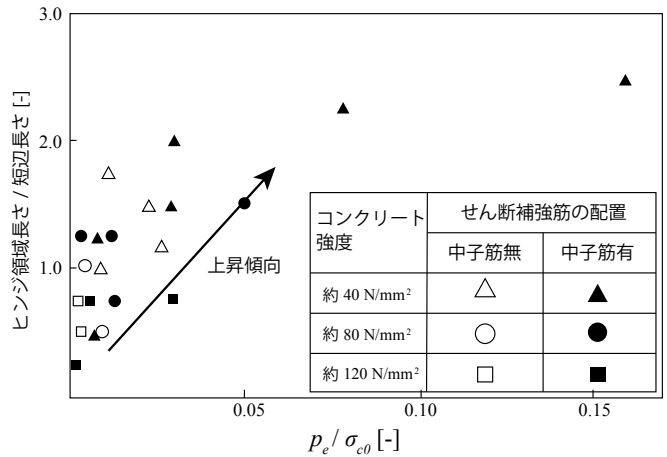


図-6 破壊領域長さと拘束量の関係⁹⁾

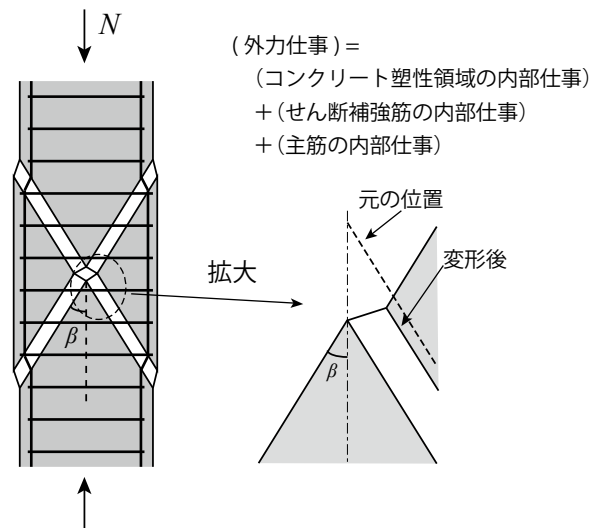


図-7 圧縮破壊モデル¹⁰⁾

表-1 試験体の主要パラメータ範囲

	梁	柱
試験体数	56	18
コンクリート強度 [N/mm ²]	23.7-167.0	23.5-165.0
引張鉄筋比 [%]	0.76-2.36	0.72-0.73
せん断補強筋 $p_w \sigma_{wy}$ [N/mm ²]	0.63-12.1	1.53-7.21
軸力比 [-]	0	0.14-0.31

す評価式を提案する。

対象とした論文は、1992年~2009年に日本建築学会もしくはコンクリート工学協会の発行する論文集に掲載された論文11)~24)である。論文中の記述から、A)加力方法が正負交番繰返載荷であるもの、B)軸力作用条件を一定軸力としたもの、C)荷重変形関係もしくは限界変形角(80%耐力低下点)が記載されているもの、D)破壊性状が「曲げ降伏後の部材端部でのせん断(圧縮)破壊」とされているもの、E)主筋や補強筋の破断、付着割裂破壊、部材中央部のひび割れが広がるせん断破壊が生じていないものを抽出した。試験体の主要パラメータ範囲の一覧を表-1に示す。試験体数は梁部材56体、柱部材18体である。柱部材の断面は全て正方形であり、梁部材の断面は、部材幅と部材せいの比(部材幅/部材せい)が0.42~0.74の長方形である。

限界変形角(曲げ降伏後のせん断破壊時変形角)は、せん断破壊により耐力が急激に低下する点と考える。実験では、正負の繰返しサイクルの影響で、最大耐力点が限界変形点となるとは限らないため、耐力が最大耐力の80%まで低下した点を、せん断破壊により耐力が急激に低下し始めた点と考える、限界変形角とした。限界変形角(80%耐力低下点)が明記されていない試験体に関しては、論文中の荷重変形関係から耐力が最大耐力の80%を下回る点を読み取り、限界変形角とした。

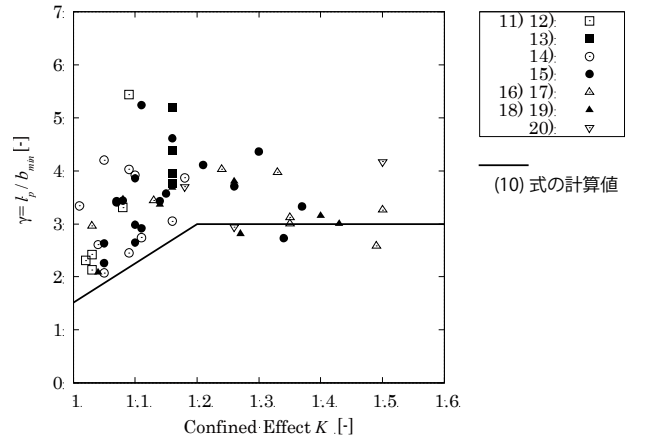
式(9)において、ヒンジ領域を表わす比例係数 γ 以外の数値を代入し、実験値からヒンジ領域を表わす比例係数 γ を逆算する。梁部材および柱部材試験体において、拘束効果を表わす係数 K と逆算値 γ の関係を図-8に示す。図-8では、各論文における試験体シリーズごとに点種を変えている。図より、柱部材、梁部材ともに、拘束効果 K が1.0~1.2の間では、 γ に上昇傾向が見られる。拘束効果 K が1.2を超える範囲では、 γ がばらつきが見られるが、概ね3.0を超えていることが分かる。

図-8の結果にもとづき、拘束効果 K とヒンジ領域を表わす比例係数 γ の関係を、(10)式のように提案する。

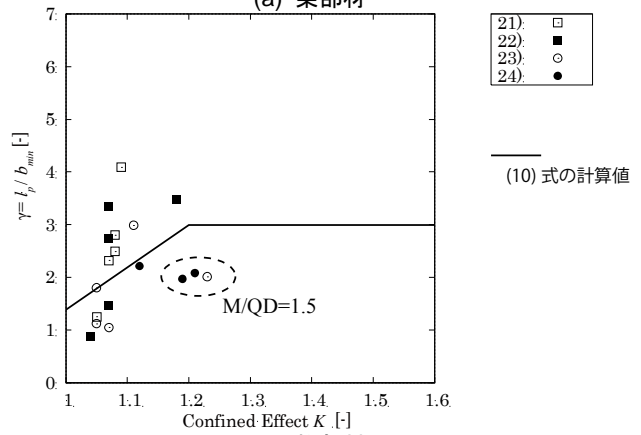
$$\gamma = \begin{cases} (K-1)/0.2 \times 1.5 + 1.5 & (K \leq 1.2) \\ 3.0 & (K > 1.2) \end{cases} \quad (10)$$

上記提案式の計算結果を図-8中に合わせて示す。式(10)は、拘束効果を表す係数 K とヒンジ領域を表す比例係数 γ の関係の傾向を捉えている。柱部材試験体では一部傾向から外れている試験体があるが(図-8(b)の点線部)、これらの試験体はいずれもせん断スパン比が1.5であり、式(10)のヒンジ領域長さよりも部材長が短くなるため、計算上は頭打ちとなる。

上記提案式に基づいてヒンジ領域長さを評価し、式(9)により変形性能を評価する。計算限界変形角と実験値を比較した結果を図-9に示す。実験値/計算値の平均値、

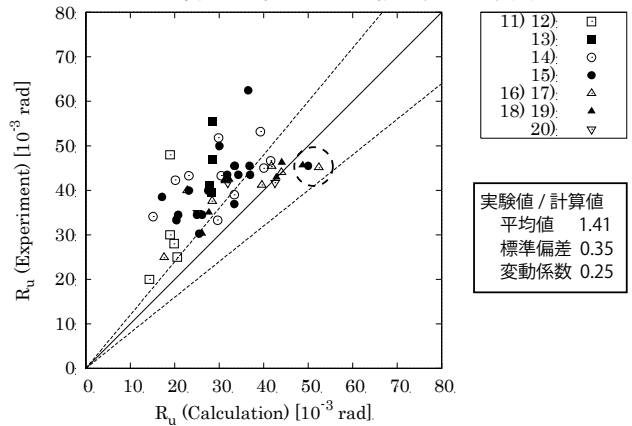


(a) 梁部材

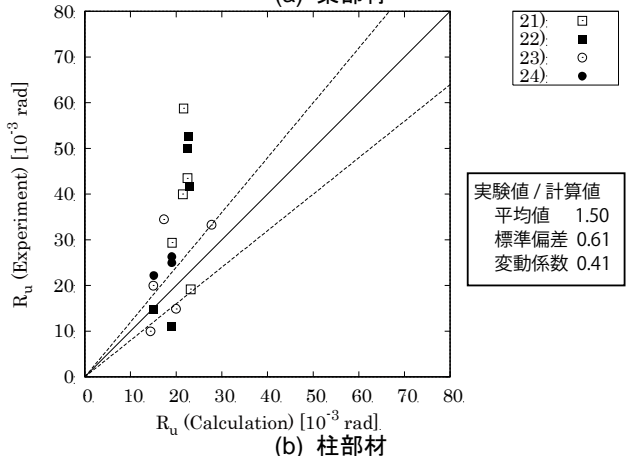


(b) 柱部材

図-8 拘束効果とヒンジ領域長さの関係



(a) 梁部材



(b) 柱部材

図-9 限界変形角の実験値と計算値の比較

標準偏差, 変動係数を同図中に示す。図より, 梁部材では, 計算値は実験値を概ね安全側に評価できており, 傾向を捉えられているが, 拘束効果の大きい試験体で一部がやや危険側の評価となった(図-(a)の点線部)。これらの試験体は, せん断補強筋比が1.2%を超えるような試験体であり, 拘束効果を過大評価している可能性がある。柱部材では, 計算値は 30×10^{-3} rad.程度で頭打ちとなっており, 実験値の傾向を捉えられていない。その要因としては, 軸力の影響や, 断面形状の違いの影響, せん断補強筋による拘束効果の相違等が考えられるが, 不明確であるため, 今後の課題としたい。

提案評価式をもとに, 梁部材の限界変形角と実験因子の関係について検討する。梁部材に関しては, 作用角度 $\sin 2\theta$ は概ね0.7となり, b_e/d_e は概ね0.5となる。よって, 提案評価式では, せん断応力度比 τ_u/σ_B と, 拘束効果 K が限界変形角の指標となる。そこで, せん断応力度比 τ_u/σ_B と限界変形角の関係を拘束効果 K ごとに分類して図-10に示す。また, 同図中に, 提案評価式に基づいたせん断応力度比 τ_u/σ_B と限界変形角の関係を拘束効果 K ごとに示す。ただし, 作用角度 $\sin 2\theta$ は0.7, b_e/d_e は0.5とし, コンクリート強度 σ_B は 24 N/mm^2 (対象とした試験体のコンクリート強度の最小値), コアコンクリートの面積と全断面積の比($=b_e d_e/bD$)は0.64とした。また, 保有水平耐力計算における梁部材の部材種別²⁵⁾も同図中に示した。

図より, 各拘束レベルごとの実験値では, せん断応力度比が大きいほど限界変形角が小さくなるのが分かる。提案式による計算値は, その低下傾向を概ね捉えられており, 評価は妥当であると判断される。また, せん断応力度比が小さいものでも, 拘束が十分でない場合には変形性能が小さい可能性があり, 拘束効果とせん断応力度比に基づいた総合的な判断が必要であることを示した。

4. まとめ

本論文では, 曲げ降伏後にせん断破壊する柱・梁部材の限界変形を評価するための簡易評価式において, せん断補強によるコアコンクリート拘束効果と圧縮ヒンジ領域の関係に関して考察した。既往の文献における知見を整理し, 拘束効果と圧縮ヒンジ領域に関係が有ることから, 実験結果からその関係式を提案した。提案する関係式により圧縮ヒンジ領域を評価することで, 限界変形を適切に評価できることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 2001年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999

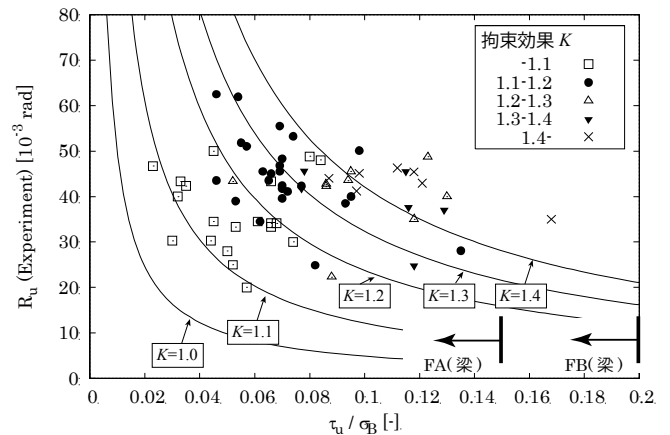


図-10 梁部材のせん断応力度比と限界変形角の関係

- 3) 坂下雅信, 石川裕次, 田畑卓, 岸本剛, 北山和宏: 曲げ降伏する鉄筋コンクリート梁部材の限界変形の評価, 構造工学論文集, Vol.57B, pp.597-609, 2011.3
- 4) 勅使川原正臣, 川崎愛, 田内浩喜, 中村聡宏, 日比野陽: 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断破壊形式と曲げ降伏後のせん断破壊時変形の評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, pp.2037-2043, 2010.11
- 5) 勅使川原正臣, 中村聡宏, 日比野陽: RC柱・梁部材の曲げ降伏後のせん断破壊時変形評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.683, pp.157-164, 2013.1
- 6) 孫王平, 崎野健治, 吉岡智和: 直線型横補強筋により拘束された高強度RC柱の曲げ性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 486, pp.95-106, 1996.8
- 7) Markeset, G. and Hillerborg, A.: Softening of concrete in compression localization and size effects, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp. 702-708, 1995
- 8) Lertsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M. and Niwa, J.: Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, J. Materials, Concrete Structures, Pavements, JSCE, No. 669/V 50, pp. 309-321, 2001
- 9) 秋山充良, 洪起男, 鈴木将, 佐々木敏幸, 前田直己, 鈴木基行: 普通強度から高強度までの構成材料を用いたRC柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-歪関係, 土木学会論文集, No.788, Vol. 67, pp. 81-95, 2005.5
- 10) 西村康志郎, 山下卓人, 堀田久人: 中心圧縮を受けるRC柱内のコンクリートの3軸降伏条件に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 668, pp.1827-1835, 2011.10
- 11) 嘉村武浩, 石川裕次, 濱本学, 小谷俊介, 青山博之: 鉄筋コンクリート針部材の変形能に関する実験的研究(その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講

- 演梗概集, 構造IV, pp.737-738, 1992.8
- 12) 嘉村武浩, 大水敏弘, 小谷俊介, 青山博之: 鉄筋コンクリート梁部材の変形能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.2, pp.335-340, 1993.7
 - 13) 杉浦泰樹, 松崎育弘, 中野克彦, 平川勝基: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート梁部材の履歴性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.825-826, 1994.9
 - 14) 小林信子, 柏崎隆志, 野口博: RC 梁の曲げ降伏後のせん断劣化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, 1995.7
 - 15) 黒川祐介, 小曾根茂雄, 小山政英, 太田勤, 松崎育弘, 園部泰寿: 高強度材料(コンクリートおよびせん断補強筋)を用いた RC 梁部材の靱性能に関する実験研究(その1 実験概要および結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.901-902, 1999.9
 - 16) 金子順一, 中野克彦, 黒川祐介, 松崎育弘, 清水弥一: 高強度材料(コンクリートおよびせん断補強筋)を用いた RC 梁部材の構造性能に関する実験研究(その1 実験概要および実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.493-494, 2000.9
 - 17) 石飛直樹, 平野直人, 中野克彦, 松崎育弘: 多機能人工骨材を用いた RC 梁の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.451-456, 2003.7
 - 18) 池寄大輔, 青山将也, 鈴木美奈子, 杉山智昭, 武藤剛, 松崎育弘: 超高強度コンクリート($F_c=150\text{N/mm}^2$ 級)を用いた RC 梁部材のせん断付着性状に関する実験的研究(その1 梁部材実験概要および実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.297-298, 2006.9
 - 19) 池寄大輔, 杉山智昭, 松崎育弘: 塑性ヒンジ領域のせん断補強筋が RC 梁部材の変形性能へ及ぼす効果に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.485-486, 2008.9
 - 20) 鈴木真悠美, 松崎育弘, 平野直人, 太田勤, 中野克彦, 許斐光生: 高強度せん断補強筋を用いた RC 梁部材の構造性能に関する実験研究(その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.253-254, 2002.9
 - 21) 熊澤敬輔, 伊藤一隆, 中野克彦, 松崎育弘, 園部泰寿, 清原俊彦: 785N/mm^2 級高強度せん断補強筋と高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の構造性能に関する実験研究(その1 実験概要および実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.839-840, 1999.9
 - 22) 松本至, 中野克彦, 藤田将輝, 中野克彦, 清水弥一: 高強度コンクリートと高強度せん断補強筋を用いた柱部材の構造性能に関する実験的研究(その1 実験概要および実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.195-196, 2000.9
 - 23) 鹿野仁史, 前田博之, 中野克彦, 松崎育弘, 太田勤, 許斐光生: 高強度せん断補強筋を用いた RC 柱部材の構造性能に関する実験的研究(その1 実験概要および結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.419-420, 2002.8
 - 24) 前田博之, 鹿野仁史, 中野克彦, 松崎育弘: 超高強度コンクリート(150MPa 級)柱部材の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.325-330, 2003.7
 - 25) 日本建築センター: 2007 年度版建築関係技術基準解説書, 2007