

SD490 級を超える高強度鉄筋を主筋に用いた鉄筋コンクリート梁の復元力特性の評価

Evaluation of restoring force characteristics of RC beams using high-strength rebars exceeding SD490 class as longitudinal rebars

東京大学地震研究所 准教授 毎田 悠承

1. 序

従来の鉄筋コンクリート（以下、RC）造の純ラーメン構造では、レベル2相当の地震時には梁端を降伏させることで地震エネルギーを吸収して建物の倒壊を防ぐ設計が主であったが、近年では地震後の建物継続使用性が求められている。また、レベル2を超えるような巨大地震動に対する建物の耐震性も求められている。そのため、RC梁の主筋に降伏点が 490N/mm^2 （SD490級）を超えるSD590やSD685などの高強度鉄筋を用いて梁の弾性域を拡大して建物の損傷を小さくし、建物全体の減衰機構は制振部材等に期待することで、地震後の建物継続使用を実現する構造が考えられている。しかし、高強度鉄筋を主筋に用いたRC梁の復元力特性に関する研究は未だに少ないのが現状である。

RC梁の復元力特性では、荷重-変形関係において剛性が急減する降伏点の耐力・変形と、繰り返し载荷による履歴法則の評価が重要である。現行の設計では、降伏変形の評価には多数の実験結果の回帰式に基づいて提案されている菅野式¹⁾が一般的に用いられている。しかし、筆者ら²⁾が過去に行った実験では、菅野式では高強度RC梁の降伏変形を精度良く評価できないことが分かった。そこで本研究では、SD590やSD685などの高強度鉄筋を主筋に用いたRC梁（以下、高強度RC梁）の復元力特性について、降伏変形と履歴法則の評価精度を向上させることを目的とする。本報告ではまず、高強度RC梁の構造実験を行い、降伏変形の評価について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1. 試験体

試験体諸元をTable 1に、試験体の断面例・配筋詳細をFig.1に示す。試験体は計7体とし、40%スケールの片持ち梁形式とした。RC梁断面は全試験体共通で幅 $B \times$ せい $D=280 \times 320\text{mm}$ とした。せん断スパン a は 1400mm 、コンクリートの設計基準強度 F_c は55を基準とした。試験体No.1~No.3については、主筋量は $4+2-D16$ とし、主筋強度を違えた。No.2, 3に対し、No.4, 5は主筋量を減らし、 $4-D16$ とした。また、No.2, 3に対し、No.6, 7はせん断スパンを 1600mm とした。梁主筋材種については、No.1はSD345, No.2, 4, 6はSD490, No.3, 5, 7はSD685とした。せん断補強筋は全て $4-D6@50(\text{SD785})$ とした。全ての試験体は梁曲げ降伏先行型とし、せん断破壊や付着破壊が先行しないように設計した。

2.2. 载荷

セットアップをFig.2に示す。加力は試験体を90度回転させ、スタブを反力フレームに固定した片持ち梁形式とし、梁部材角（ $R=\delta$ （スタブと加力点の相対水平変位）/ l （せん断スパン））で制御した。 $R=\pm 1/1600\text{rad}$, $1/800\text{rad}$, $1/400\text{rad}$, $1/200$, $1/100$, $1/67$, $1/50$,

1/33rad を 2 回ずつ正負交番繰り返し载荷した後，±1/25 rad を 1 回正負交番繰り返し载荷し，+1/12.5rad を 1 回载荷し，実験を終了した。

Table 1 試験体諸元

試験体		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
梁	断面寸法 (mm)	280×320						
	主筋	4+2-D16 (SD345)	4+2-D16 (SD490)	4+2-D16 (SD685)	4-D16 (SD490)	4-D16 (SD685)	4+2-D16 (SD490)	4+2-D16 (SD685)
	せん断スパン(mm)	1400					1600	
	あばら筋	4-D6@50 (SD785)						
スタブ	断面寸法 (mm)	700×400×1400						
	主筋	14-D19 (SD490)						
	せん断補強筋	6-D13@100 (SD295)						
コンクリート強度 F_c (N/mm ²)		55						

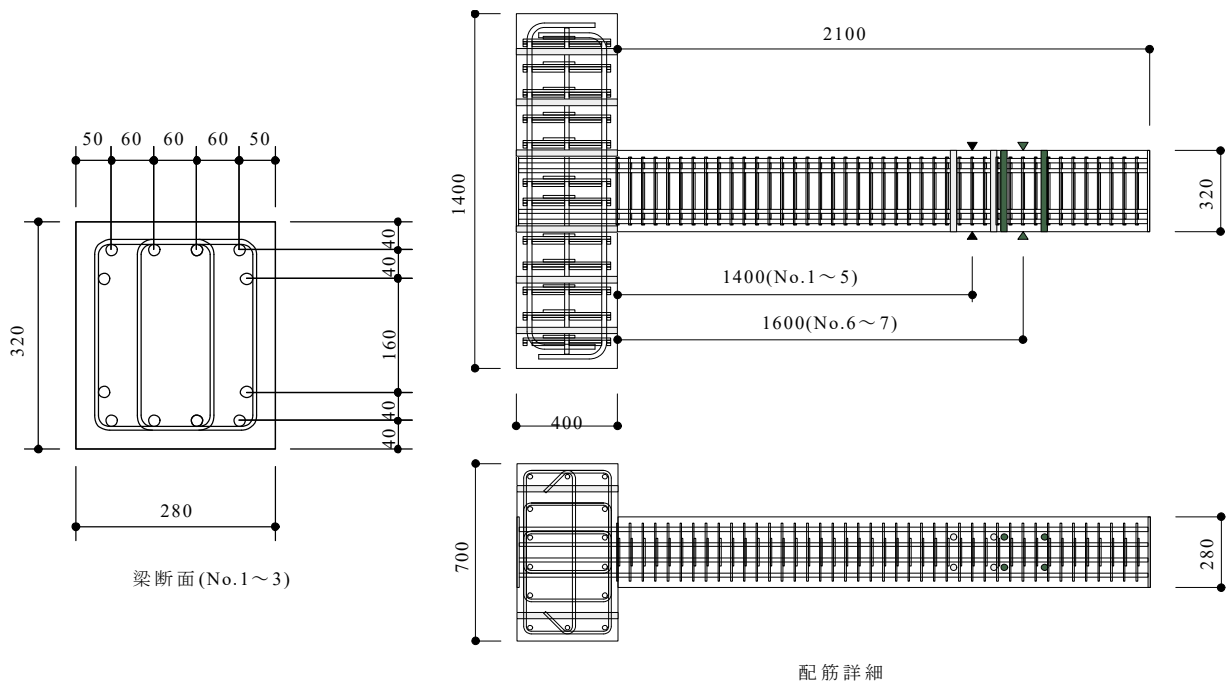


Fig. 1 試験体の断面例・配筋詳細

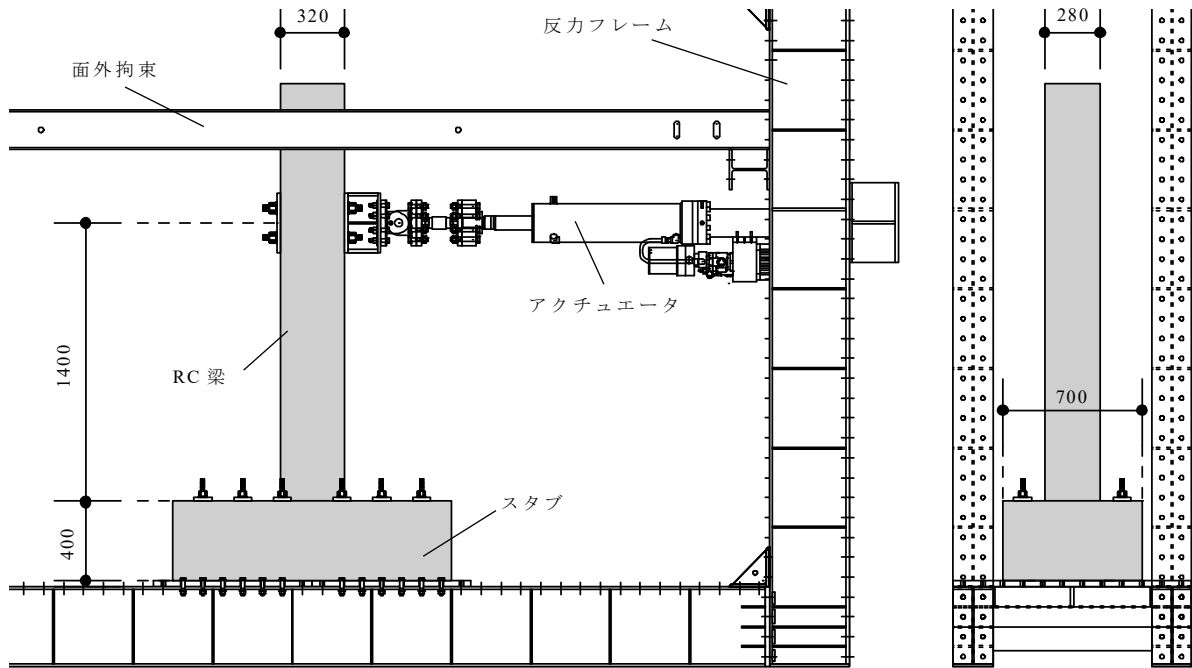


Fig.2 セットアップ

3. 実験結果

3.1. 梁のせん断力-部材角関係

梁のせん断力 Q -部材角 R 関係を Fig.3 に示す。

主筋に 4+2-D16(SD345)を用いた試験体 No.1 では $R=1/120\text{rad}$ 付近で、4+2-D16(SD490)を用いた試験体 No.2 では $R=1/80\text{rad}$ 付近で、4+2-D16(SD685)を用いた試験体 No.3 では $R=1/50\text{rad}$ 付近で梁主筋が降伏した。全ての試験体で $R=1/12.5\text{rad}$ まで荷重低下などは確認されなかった。

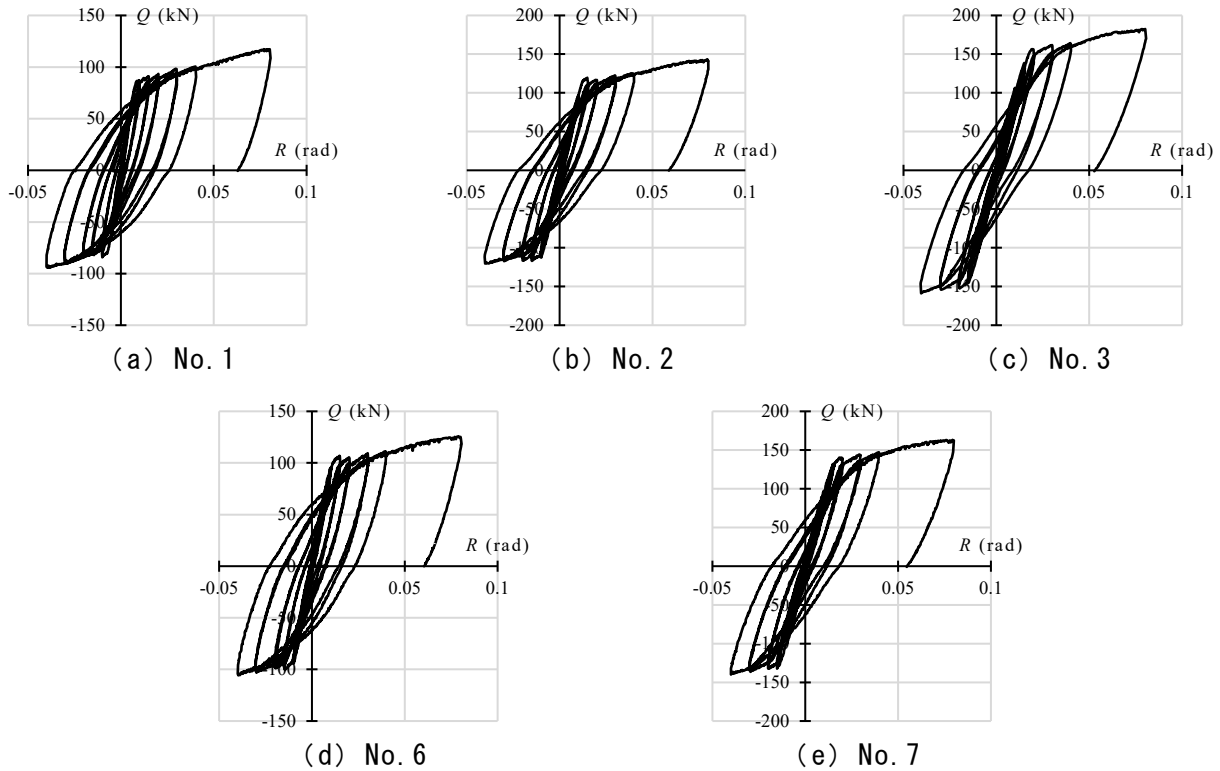


Fig. 3 せん断力 Q —部材角 R_b 関係

3.2. 降伏時剛性低下率の検討

降伏時剛性低下率 α_y について検討する。降伏時剛性低下率 α_y は式 (1) に示す菅野式¹⁾ が現行用いられている。

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.64np_t + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33\eta_0 \right) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 n : ヤング係数比, p_t : 引張鉄筋比, a : せん断スパン, D : 梁せい, d : 梁の有効せい, η_0 : 軸力比である。

しかし、高強度材料を用いた RC 梁の降伏時剛性低下率は菅野式では降伏変形を精度良く評価できない場合がある。筆者らは、既報²⁾において、式 (1) の鉄筋に関する第 2 項に係数を乗じて補正を行った補正式 (2) による降伏時剛性低下率 α'_y を提案している。

$$\alpha'_y = \left(0.043 + 1.64np_t \left(\frac{345}{\sigma_y} \right) + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33\eta_0 \right) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (2)$$

補正の詳細については文献 2) を参照されたい。この α'_y を用いて本実験試験体の骨格曲線の評価する。

本研究で行った実験結果の曲げモーメント M —部材角 R 関係と菅野式 (1), 補正式 (2) により降伏時剛性低下率を算出した骨格曲線の比較を Fig.4 に示す。骨格曲線は 3 折れ線で表現される。3 折れ線の設定に用いるコンクリートのヤング係数 E_c , 鉄筋のヤング係数 E_s , 曲げひび割れモーメント M_c は、材料試験結果から得られたコンクリート圧縮強度から AIJ の RC 規準³⁾ に示される値, および式を用いて算出した。曲げ降伏モーメント M_y は AIJ の靱性指針⁴⁾ に示される方法 (ACI のストレスブロック) により、平面保持を仮定して算出した。初期剛性 K_E は、曲げとせん断を考慮した弾性剛性とし、降伏時剛性低下率を用いて、

第 2 折れ点の部材角は式 (3) で算出する。

$$M_y = (\alpha_y \cdot K_E) \cdot R_y \quad (3)$$

ここで、 R_y ：曲げ降伏モーメント時の梁部材角である。

実験時の曲げモーメント M —部材角 R 関係と菅野式 (1) による α_y を用いた 3 折れ線を比較すると、第 2 折れ点の部材角を過小評価している。補正式 (2) による α'_y を用いた 3 折れ線は、菅野式 (1) による α_y では大きく過小評価していた第 2 折れ点の部材角を、実験値により近い評価とできていることが見て取れる。

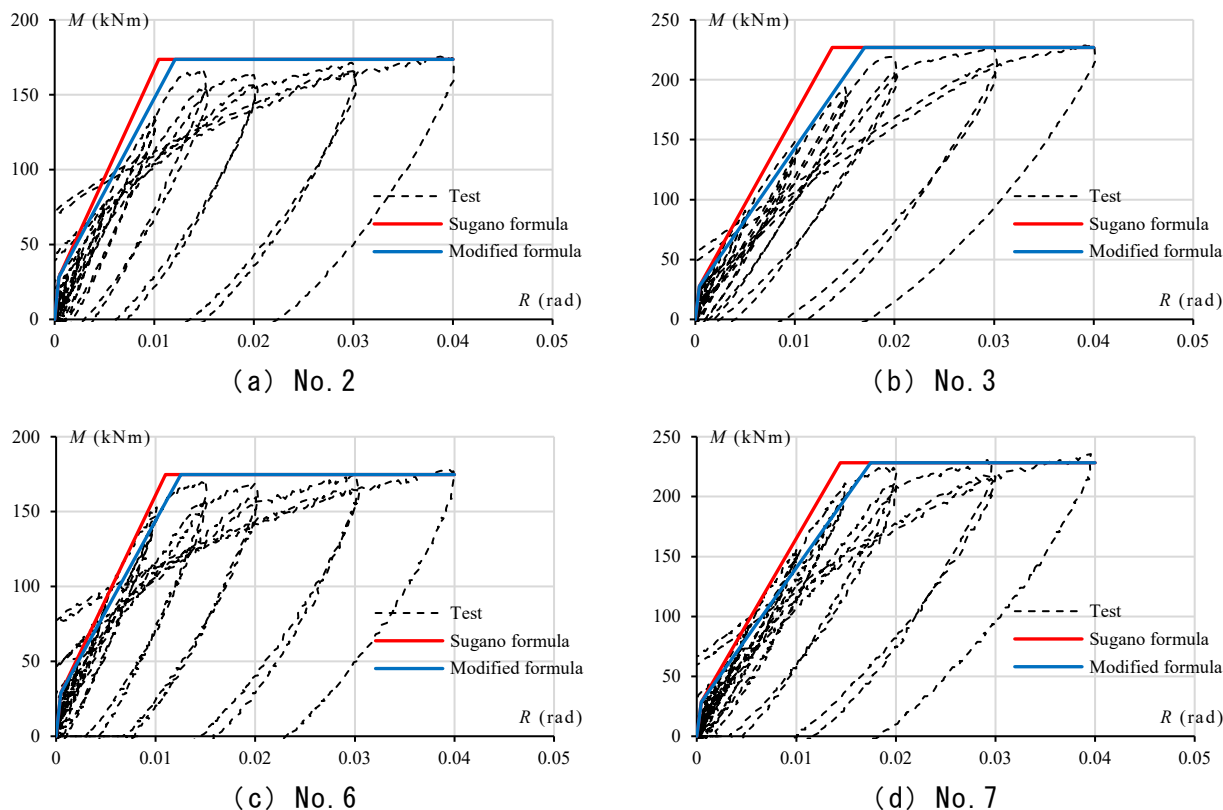


Fig. 4 曲げモーメント M —部材角 R 関係

4. 結

本報告では、高強度鉄筋を主筋に用いた RC 梁の降伏変形の評価精度向上を目的に、高強度 RC 梁の構造実験を行い、降伏変形の評価法について検討を行った。菅野式 (1) による α_y では高強度 RC 梁の降伏変形を過小評価していたが、筆者らが既報で提案している式を用いることでより実験値に近い評価となった。今後は、他の手法による降伏変形の評価も行い、より精度の高い評価法の検討を行う。さらに、履歴法則の評価精度についても検討を行い、高強度 RC 梁の復元力特性の評価について更なる検討を重ねていきたい。

【参考文献】

- 1) 菅野俊介：鉄筋コンクリート構造物の塑性剛性に関する研究 その 6，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.739-740，1971.11
- 2) 毎田悠承，濱田聡，竹中啓之，白瓊，和泉信之：高強度鉄筋コンクリート梁の損傷と復元力特性，日本建築学会構造系論文集，第 751 号，pp.1295-1305，2018.9

- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 2010.6
- 4) 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, 1999.8