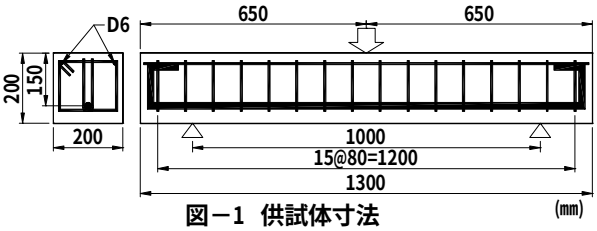
高強度高靭性 RC 部材に必要となる最小主鉄筋径とコンクリート強度の関係

東京理科大学院　学生員　○広瀬　泰之　東京理科大学　正会員　辻　正哲
東京理科大学院　学生員　三田　勝也　東京理科大学院　学生員　佐々木　彬
東京理科大学院　学生員　椎橋　顕一

1．はじめに

近年，コンクリートの高強度化が急速に進んでいるが，高強度コンクリートの破壊は極めて脆性的である．脆性破壊は，耐震性能上，非常に危険な破壊形式であるため，一般には鉄筋の降伏によって靭性を確保できるよう設計されている．しかし，引張主鉄筋が破断するともはや耐荷力を失うこととなるが，こうした課題に対しての検討は未だほとんど行われていない．例えば，設計の規準である現行の土木学会コンクリート標準示方書[設計編]でも，軸方向鉄筋の径は鉄筋工における精度確保に主眼が置かれており，鉄筋の破断に対しては考慮されていない．一方，これまでの研究で主鉄筋の破断を防止する方法として，普通強度コンクリートの場合，同一鉄筋比であっても，ある一定以上の直径の鉄筋を用いることで，主鉄筋がコンクリート中にめり込み破断せず，高い曲げ破壊靭性を確保できる方法を提案してきた[1)]．しかし，同一鉄筋比，同一主鉄筋径であっても，コンクリート強度が高強度となる場合，ひび割れ断面からの鉄筋の抜出しが小さく，また鉄筋がコンクリート中にめり込みにくくなり，主鉄筋が引張り破断しやすくなる可能性がある．

本研究では，高強度コンクリートでは主鉄筋が破断しやすくなることを実験的に明らかにした．また，鉄筋破断の有無を決定づけると考えられる塑性ヒンジ部での力の釣合条件を検討し，鉄筋破断を防止するための最小主鉄筋径を定める設計手法を検討する．



図－1　供試体寸法

表-1　供試体一覧および破断時たわみ

番号	コンクリートの圧縮強度 f'_c(N/mm²)	引張側主鉄筋 種類	引張側主鉄筋 本数	引張鉄筋比 P_t(%)	破断時のたわみ δ_{snap}(mm)
①	27.4	SD295 D13	1	0.42	50.5
②	29.3	SD345 D16		0.66	72.4
③	27.4	SD345 D19		0.96	-
④	40.5	SD345 D16		0.66	111.4
⑤	40.5	SD345 D19		0.96	-
⑥	48.2	SD345 D16		0.66	78.9
⑦	52.0	SD345 D19		0.96	-
⑧	58.6	SD345 D16		0.66	98.1
⑨	58.6	SD345 D19		0.96	-
⑩	69.6	SD345 D19		0.96	99.3
⑪	69.6	SD345 D22		1.29	-
⑫	80.0	SD345 D19		0.96	95.4
⑬	80.4	SD345 D22		1.29	-
⑭	91.1	SD345 D22		1.29	-
⑮	105.1	SD345 D19		0.96	150.0
⑯	98.4	SD345 D22		1.29	-

○：破断せず

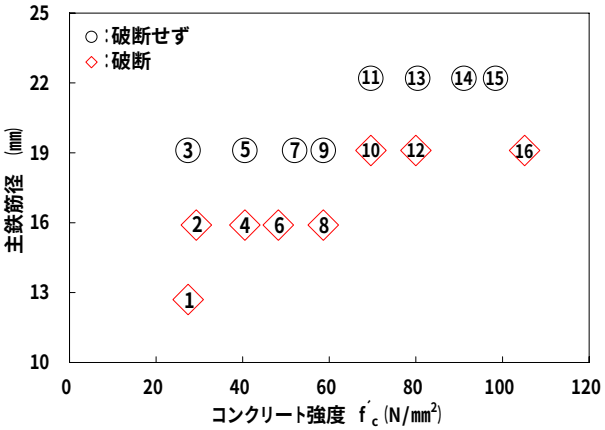


図-2　主鉄筋径と有効高さの関係

2．実験概要

本実験では，**表-1** に示すように，普通強度鉄筋を用い，引張側主鉄筋径を D16 から D22 の範囲で 3 段階，コンクリート強度を概ね 10 N/mm²ごとに 30N/mm²から 100 N/mm²の範囲で 8 段階に変化させ，合計 15 体の供試体を作製した．供試体の寸法例は**図-1** に示す通りである．また，主鉄筋を 1 本としたため，スターラップの変形を防ぐために中間帯鉄筋を配筋した．載荷方法は二等分点載荷による一方向単調曲げ試験とした．載荷は引張側主鉄筋が破断するか，破断しない場合には支間中央のたわみが 200 mmとなるまで行った．

3．実験結果

表-1 は供試体の一覧および主鉄筋破断時のたわみを示したものである． コンクリート強度を約 30 N/mm²とし，主鉄筋に D19 を配筋した供試体③では，主鉄筋がコンクリート中にめり込み，破断することなく高い曲げ破壊靭性を示した．しかし，コンクリート強度を 70N/mm²とし，主鉄筋に D19 を配筋した供試体⑩では，たわみが 99.3 mmで主鉄筋が破断し耐力を急激に失った．一方，コンクリート強度を 70N/mm²とし，主鉄筋に D22 を配筋した供試体⑪で

キーワード　曲げ破壊，鉄筋径，高強度コンクリート，靭性，支圧強度
連絡先　〒278-8510　千葉県野田市山崎 2641　ＴＥＬ04-7124-1501（内線 4054）　E-mail：saori@rs．noda．tus．ac．jp

は，主鉄筋がコンクリートにめり込み，破断することなく高い曲げ破壊靭性を示した．

図-2 は，主鉄筋の破断した供試体と破断せずコンクリート中にめり込んだ供試体を区別し，主鉄筋径とコンクリート強度の関係として整理したものである．コンクリート強度を 30N/mm²から 60N/mm²とした供試体では D19 以上の主鉄筋を,コンクリート強度を 70N/mm²から 100N/mm²とした供試体では D22 以上の主鉄筋を用いることで主鉄筋の破断を防止できることが明らかとなり，コンクリートが大きくなるにつれて破断しなくなる主鉄筋径は大きくなるという傾向が得られた．

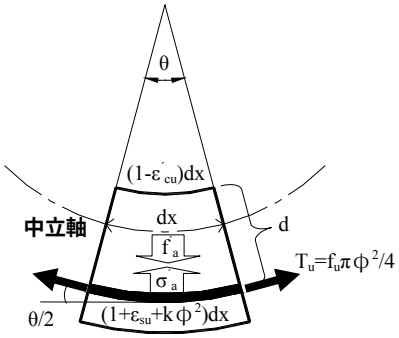


図-3 鉄筋めり込み挙動モデル化概念図

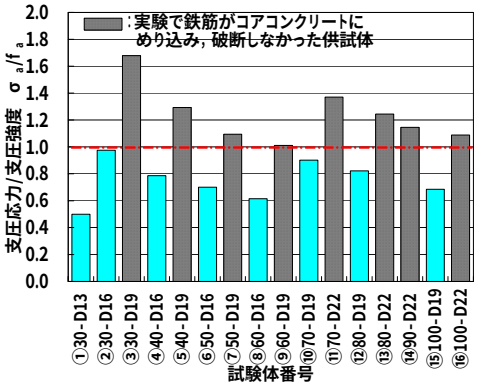


図-4 支圧応力/支圧強度と実験結果との関係

4．鉄筋破断を防止するために必要となる最小主鉄筋径の算定方法

主鉄筋がコアコンクリートにめり込むという挙動を**図-3** に示すようにモデル化し，塑性ヒンジ部における変形後の鉄筋とコンクリートとの鉄筋表面における釣合い条件から鉄筋がコアコンクリートに押付けられる最大の応力(以下，支圧応力)を，式(1)のように仮定した．なお，曲げひび割れ断面からの鉄筋の抜出し量は，鉄筋径の 2 乗に比例すると仮定している．

$$\sigma'_a = 2T_u \cdot \sin(\theta/2)/(\phi \cdot dx) = T_u \cdot (\theta/2)/(\phi \cdot dx)$$
$$= (f_u \pi \phi^2/4) \cdot \{(\varepsilon_{su}+\varepsilon'_{cu}+k\phi^2)dx/d\}/(\phi \cdot dx) = f_u \pi \phi (\varepsilon_{su}+\varepsilon'_{cu}+k\phi^2)/4d \quad (1)$$

ここに，σ'_a:鉄筋がコアコンクリートに押し付けられる最大の応力(支圧応力)(N/mm²)，T_u:鉄筋の引張耐力(N)，θ:RC 部材の曲率，f_u:鉄筋の引張強度(N/mm²)，φ:鉄筋径(mm)，ε_{su}:鉄筋の伸び，d:有効高さ(mm)，ε'_{cu}:コンクリートの終局ひずみ，k:鉄筋の抜出しを考慮する係数である．

一方，コンクリートの支圧強度f'_aは，コンクリート標準示方書では圧縮強度が 40N/mm²以下のコンクリートに対し，式(2)で求められるとしている．しかし，本実験の範囲である高強度領域では新たに支圧強度を算定する必要がある．実験結果をもとに圧縮強度が高くなるとコンクリートの破壊形式が圧縮型から割裂引張型へ移行すると考え，支圧強度f'_aはコンクリートの引張強度 f_t に比例する仮定し，式(3)を提案した．ここでは，コンクリートの支圧強度f'_aは支圧を受ける面積 A_a が小さいためf'_aをコンクリートの圧縮強度f'_cの 2 倍とした．

$$f'_a = (A/A_a)^{1/2} \cdot f'_c \leqq 2 f'_c \quad (2)$$
$$f'_a = (A/A_a)^{1/2} \cdot 13.5 f_t = 27.0 f_t = 6.21 f'^{2/3}_c \quad (3)$$

ここに，f'_c:コンクリートの圧縮強度(N/mm²)，A:コンクリート面の支圧分布面積(mm²)，A_a:支圧を受ける面積(mm²)
f_t：コンクリートの引張強度(N/mm²)である．

そして，支圧応力 σ'_aが,新しく提案した高強度コンクリートでも適用可能なコンクリートの支圧強度 f'_a以上となり，その比 σ'_a/f'_aが 1 以上となれば主鉄筋がコアコンクリートにめり込み破断しないと仮定し，実験結果から逆算により鉄筋の抜け出し量の影響を考慮する係数 k を 0．004 と求めた．**図-4** は，式(1)より求めた支圧応力と式(3)より求めたコンクリートの支圧強度の比 σ'_a/f'_a と各供試体における主鉄筋破断の有無の関係を示したものである．σ'_a/f'_aが 1 以上となった供試体では，鉄筋がめり込み，破断しないという実験結果となっており，高強度コンクリートでも適用可能な鉄筋破断防止のための設計手法を提示できたと考えている．

5．まとめ

主鉄筋径を大きくすることにより鉄筋破断を防止する方法において，普通強度鉄筋を用いた場合，コンクリート強度が高くなるにつれ，鉄筋は破断しやすくなる傾向にあることを明らかにした．また，高強度コンクリートにまで適応可能な支圧強度推定式を提案し，主鉄筋の破断の有無を十分な精度で推定することができる方法を提示した．

参考文献

1) 角直樹，辻正哲，毛利昌登：鉄筋径の相違が RC 部材の曲げ靭性に及ぼす影響，第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会公演概要集，Ⅴ-010