高強度材料を用いた鉄筋コンクリート部材性能

丸田　誠＊

１．はじめに

1974 年に建設された 18 階建の鉄筋コンクリート造建物である椎名町アパートに 30 N/mm^{2}のコンクリートが用いられてから日本の高強度コンクリートの歴史は始まる。高層集合住宅の誕生とその高層化により，コンクリートの高強度化が進んできたと言えよう。それでも 20 年前には，建築で言う高強度コンクリートとは，36 N/mm^{2}を超える程度の強度であった。コンクリートの高強度化が一気に進んだのは 1988 年から 1993 年まで行なわれた建設省総合技術開発プロジェクト「総プロ New RC」においてである。その間にも 60 N/mm^{2}を用いた超高層建物の建設が始まり，2002 年には，100 N/mm^{2}を使用した建物が竣工し，現在では，200 N/mm^{2}を使用した建物が建設中である。

鉄筋も「総プロ New RC」において SD980 までの鉄筋が試製作された。その中で SD685 の主筋が実用化された。更なる超高層化や大スパン化，新たな構造形式の提案等により，今後も鉄筋コンクリート材料の高強度化は，進んでいくと考えられる。

日本建築学会では，1991 年に当時の高強度コンクリートに関する技術資料をまとめた「高強度コンクリートの技術の現状」を出版し，2009 年にその改定版を発刊した。この改定版中より，注意点や設計法を抜粋してここに示す。詳細は本を購入，熟読いただきたい。

２．構造材の基本性能

2.1　コンクリート

ここではヤング係数とクリープ係数について示す。

○ヤング係数

図 1 に圧縮強度とヤング係数の関係を示している。文献の発表時期の関係で，図中には 36 N/mm^2 までは 1999 年以前の日本建築学会 RC 構造設計規準の式を示し，36N/mm^2 を超える範囲では New RC 式で示している。現在の 1999 年版の日本建築学会 RC 構造設計規準式は 60 N/mm^2 までは New RC 式において $k_1=k_2=1$ とした式である。骨材種類によるばらつきは大きいものの，平均的には式と実験値とは適合している。

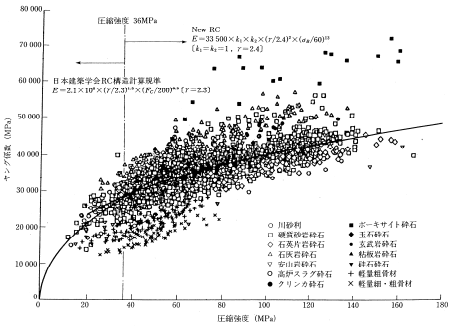


図１　種類別の圧縮強度とヤング係数の関係 [1)]

○クリープ

図 2 にはコンクリート結合材として普通ポルトランドセメントにスラグ石膏およびシリカフュームを使用したコンクリートのクリープ係数を示している。図中で「プレーン」と表示されたものがコンクリートシリンダーの結果であり，「RC」と表示されたものが RC 柱試験体の結果である。コンクリート強度が高いほどクリープ係数も小さくなる。100 N/mm^2 を超える RC 柱試験体のクリープ係数は，1.0 以下であり，高強度化により係数としては小さくなることが伺える [2)]。

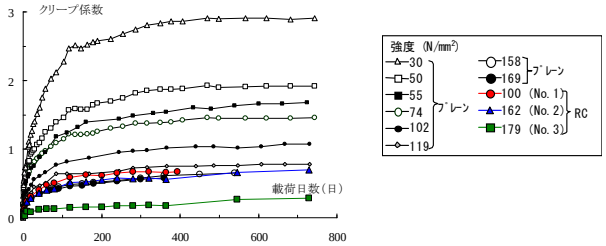


図２　クリープ係数の推移 [2)]

2.2　鉄筋

近年，降伏点が 590～685N/mm^2 の高強度鉄筋が実際の工事で利用されるようになってきた。しかし，JIS G 3112-1987（鉄筋コンクリート用棒鋼）には，降伏点が 490N/mm^2 を超えるような高強度鉄筋は規定されていない。降伏点が約 685N/mm^2 までの鉄筋は大臣認定品として流通している。鉄筋の応力－ひずみ関係の典型例 [3)] を図 3 に示す。これらは次のようにまとめられる。

1) ヤング係数は強度に関係なく，2.0～2.05x10^{5}N/mm^2 である。
2) SD785 級以下の鉄筋では明瞭な降伏点を示すが，これを超えるような鉄筋は明瞭な降伏点を示さない。
3) 降伏比（降伏点強度／引張強度）は高強度になるほど大きくなる。図 3 に括弧で示されているように，SD785 で 0.85，PC 鋼材では，0.9 を超えるものもある
4) 鉄筋の破断伸びは高強度になるほど小さくなる。また，曲げ加工性も低下する。

３．柱・梁部材の曲げ性状

柱や梁部材の曲げ性状は設計上重要となる。曲げひび割れ強度は，従来の評価方法 [4)] と大きく異ならない。降伏変形角は従来菅野式 [4)] を用いて算定されているが，高強度になると式の適用外であり若干精度が落ちる。文献 5 に示される熊谷式を用いた結果，　図 4 に示すように，SD685 鉄筋を主筋に用いる場合も含め，概ね降伏変形角を表わすことができている。

曲げ強度は，ACI318 のストレスブロックを用いること

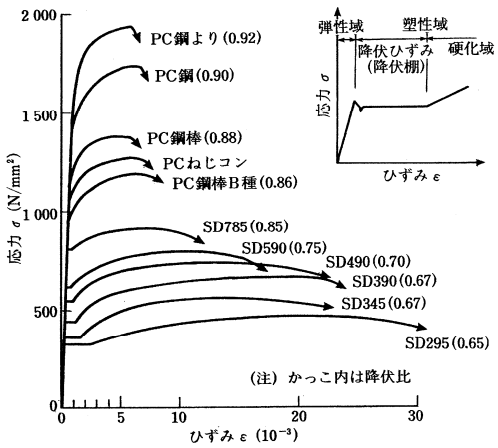


図３　各種鋼材の応力ーひずみ関係曲線[3)]

を基本に考える。図５にコンクリート強度と ACI による曲げ強度の実験値／計算値の関係を示す。概ね安全側に評価できるが，高強度になると過大評価となる場合も多い。高強度コンクリートを用いた柱の曲げせん断実験を行うと，かぶりが剥落した際に生じる１次ピークとせん断補強筋の降伏やコアコンクリートの圧壊時に生じる２次ピークが観察されることも，この過大評価の一因として考えられる。(図６参照)

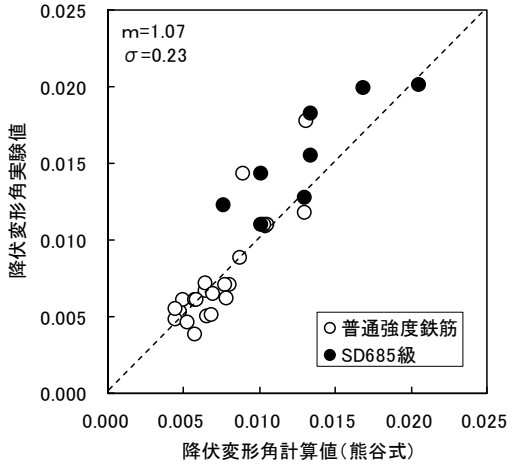


図４　降伏変形角計算値（熊谷式）と実験値の比較

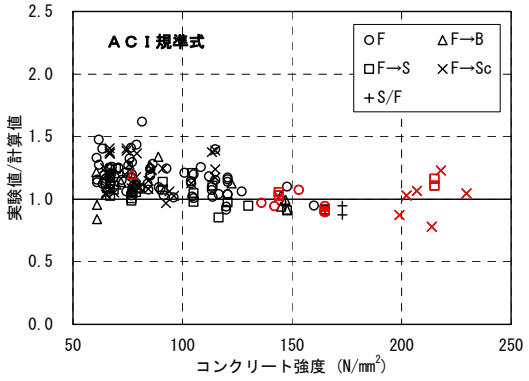


図５　ACI 規準による曲げ終局強度算定精度[6)]

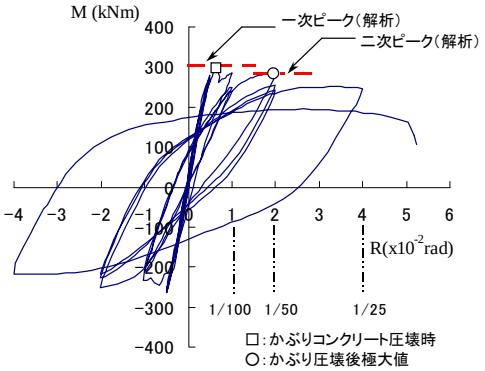


図６　高強度コンクリート柱の荷重変形関係[7)]

４．柱・梁部材のせん断性状

柱や梁部材のせん断性状の中で，せん断ひび割れ強度は，図７に示すように靭性保証型指針[8)]に示している，主応力度式でおおむね評価可能なことが分かる。コンクリートが高強度化しても傾向は大きく変わらない。

最大強度は，図８に示すように靭性保証型指針式[8)]と修正荒川 mean 式での検討を行っているが，120N/mm² を超える高強度となってくると危険側の評価の実験結果もあるが，概ね良好な結果と言える。高強度コンクリートを用いた部材のせん断の注意点としては，図９に示すように，せん断力ー変形関係で，正負で性状が異なる点が挙げられる。普通強度のコンクリートを用いた場合は正負で大きな違いはないが，高強度コンクリートで違いが出るのは，せん断ひび割れが平滑で骨材の噛合いが期待できず[12)]，負側で一体性が損なわれているという事も言われているが，明確には分かっていない。

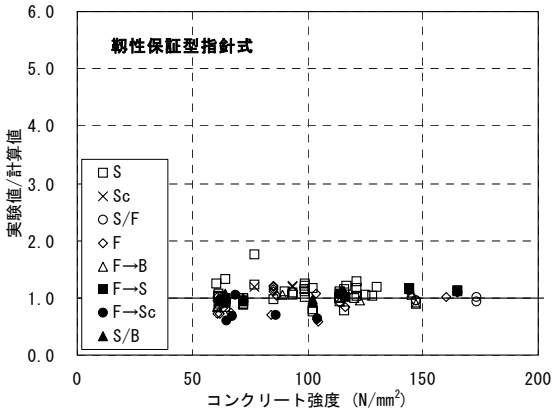


図７　せん断ひび割れ発生強度算定精度[9), 10)]

高強度コンクリートと鉄筋の付着性状に関しては良好となると考えられる。Fc150 程度の柱の実験で付着破壊させたものもある。評価式として，靭性保証型指針式と高強度せん断補強筋式[13)]を用いた検討結果を図 10 に示す[14)]。靭性保証型指針式[8)]では，設計式として付着割裂した実験の下限値を取るよう設定されているため安全側の評価となったと示されている。

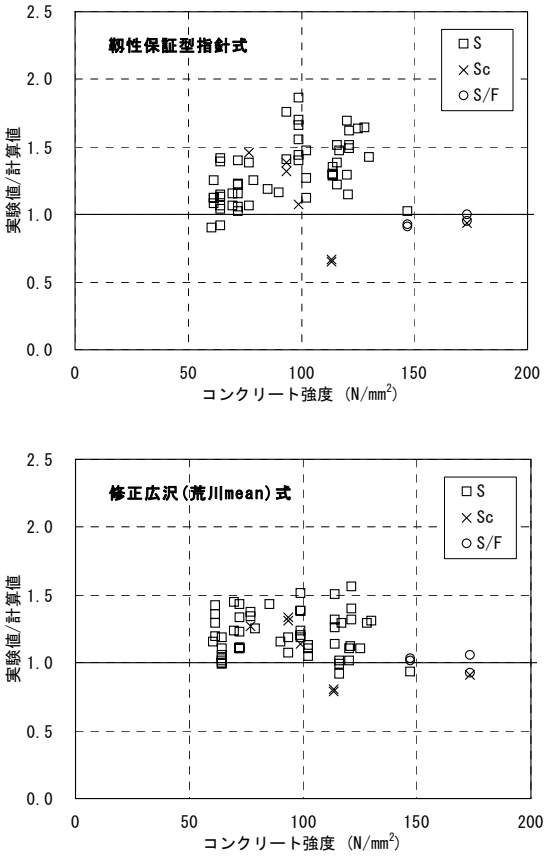
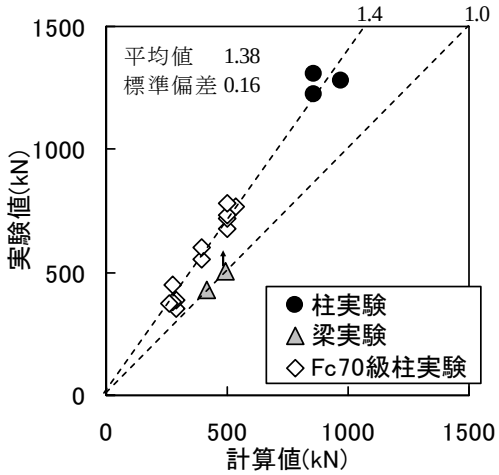


図８　柱部材の各せん断強度算定式の精度[9),10)]

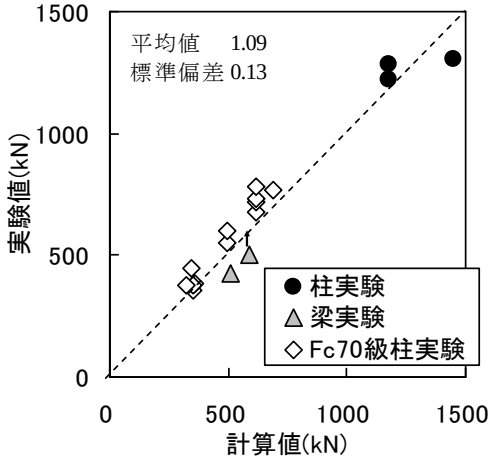
５．柱梁接合部のせん断性状

柱・梁接合部では，せん断ひび割れ強度とせん断強度について示す。せん断ひび割れ強度は，主応力度式で評価する場合が多い。図 11 に σ_B 70N/mm² 以上の接合部ひび割れの実験値と計算値の比を示している。この式中の引張強度には $c\sigma t=0.5\sqrt{\sigma_B}$ とした値を用いている。概ねひび割れ強度は捉えられるが，高強度となると精度は低下する。これは自己収縮の影響もあるとしている[15)]。

接合部のせん断強度は，靭性保証型指針式[8)]を多くの設計者が用いている。図 12 には十字型接合部のせん断応力度と靭性保証型指針式の関係を示している。コンクリートが高強度となると靭性保証指針式では危険側の評価を与えることを示している[16)]。ト形接合部に関しても靭性保証指型針式の値が危険側の評価を与える場合もある



(a)　　靭性保証型指針式



(b)　　高強度せん断補強筋式

図 10　付着割裂破壊せん断耐力の比較[10), 13), 14)]

としている報告もある[17)]。

近年，ト形接合部の梁主筋定着には機械式定着を用いる場合が多い。破壊形式としては，定着長が 2/3D（D：柱せい）以上あれば側面剥離となると言われており，図 13 に評価式と実験結果の比較を示している。益尾・窪田式で高強度コンクリートまで側面剥離耐力を評価できることが分かる[18)]。

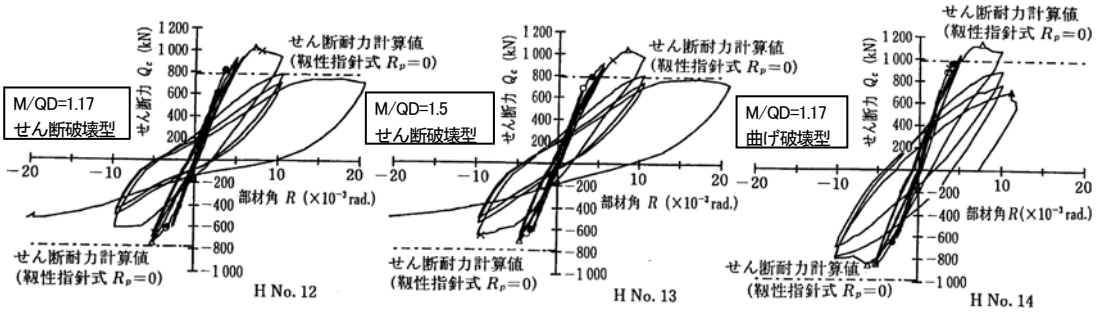


図９　RC 短柱の曲げせん断実験[11)]

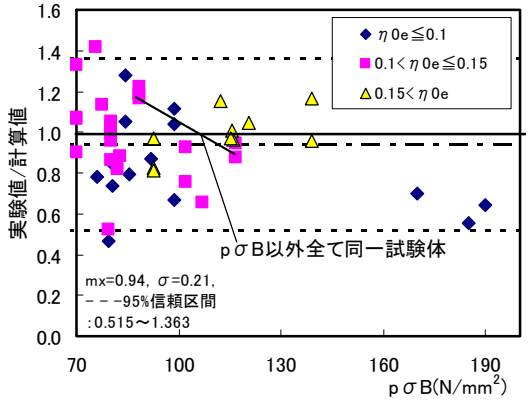


図 11　接合部せん断ひび割れ強度計算値の精度 [15)]

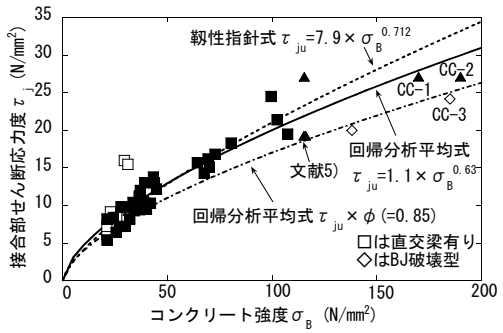


図 12　十字型接合部のせん断応力度 [16)]

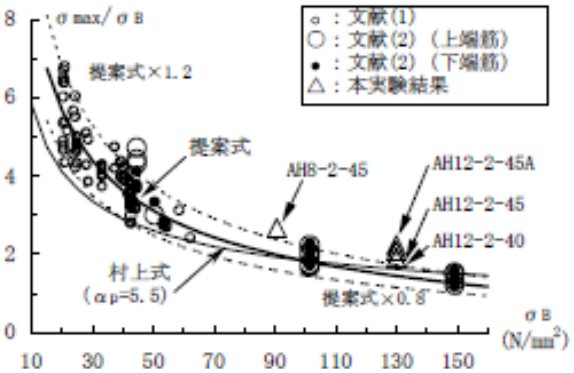


図 13　側面剥離強度と評価式の関係 [18)]

6.おわりに

鉄筋コンクリート部材に高強度材料を用いる場合，従来の設計式を直接使用できるのかなどの疑問に対して，「高強度コンクリートの技術の現状」(2009 年版)では，最新の知見に基づき論文等の提示と解説，評価式の提示を示している。本報は，その一部を掻い摘んで示したものである。基本的には，普通強度材料を対象とした算定式や評価式の延長で対応可能だが，ACI の曲げ強度式や靭性保証型指針の接合部せん断強度評価式等，高強度コンクリートを用いる場合には危険側になる場合もあるので注意が必要となる。耐震壁，適用建物を始めとして柱梁の初期剛性や軸圧縮性能についてここでは示していないが，2009 年度版には詳細に記述しており，是非見ていただき，高強度材料の使用についての検討，設計や施工監理などに総合的に役立ててほしい。

謝辞：本文は，日本建築学会・高強度鉄筋コンクリート構造小委員会(2004 年～2008 年　主査：稲井栄一山口大学教授)により取りまとめられた資料に基づくものであり，委員会メンバーに心から感謝する。

参考文献

1）　陣内浩，並木哲，黒岩秀介，渡邊悟士：高強度コンクリートの各種力学特性に関する研究　高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会　報告書・論文集，日本コンクリート工学協会 pp. 396-403, 2006. 7

2）　松戸正士，西田浩和，片寄哲務，安部武雄：高温過熱後の超高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究　日本建築学会構造系論文集　第 603 号　pp. 171-177 2006. 5

3）　宇佐美滋，「鉄筋コンクリート造柱・はり用高強度鉄筋に要求される機械的性能」コンクリート工学 Vol. 38, No. 10, 2000. 10, pp. 22-33

4）　日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, pp. 72-77

5）　熊谷仁志：「高強度材料を用いた RC 梁の降伏変形評価方法」，高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会報告書・論文集, pp. 482-487, 2006 年 7 月

6）　日本建築学会：高強度コンクリート技術の現状（2009）第 3 編 3. 5　曲げ性状　pp. 300-303

7）　村松晃次，小室努，今井和正，是永健好，西山峰広：超高強度鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力算定用ストレスブロック，日本建築学会構造系論文集　第 604 号，2006 年 6 月，pp. 127-134.

8）　日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説。1999 年

9）　黒沢俊也・森本敏幸・市川昌和・中岡章郎：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱および梁部材の実験結果データベースによる各種強度算定式の適合性の検討，コンクリート工学, Vol. 44, No. 2, 2006. 2

１０）　日本建築学会：高強度コンクリート技術の現状（2009）第 3 編 3. 6 せん断性状 pp. 305-321

１１）　寺岡勝　ほか：鉄筋コンクリート構造の耐震設計と部材性能評価についてのいくつかの疑問, コンクリート工学, Vol. 41, No. 4, pp. 37-46, 2003 年 4 月

１２）　香取慶一，長谷川了一，大泉康平，篠原保二，林静雄：100N/mm2 を超える高強度コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達挙動に関する研究（その 1）～（その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），構造 IV，pp. 57-6，2004 年 8 月

１３）　JFE テクノワイヤ：高強度せん断補強筋「リバーボン 1275」を用いた鉄筋コンクリート部材の設計施工指針・同解説, pp. 18-19, 2004. 4

１４）　熊谷仁志，中澤春生，塚越英夫，黒瀬行信：超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の構造性能，清水建設研究報告　第 74 号，pp. 43-53，2001. 10

１５）　寺岡勝，狩野芳一，佐々木聡，林和也：鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部における通し梁主筋の降伏前の付着挙動の評価，材料，Vol. 48，No. 8，pp. 927～933，1999 年 8 月.

１６）　丸田誠，真田暁子：170N/mm² を超える高強度コンクリートを用いた内部柱梁接合部の挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 2，pp. 469～474，2004 年

１７）　林和也，高森直樹，寺岡勝：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造柱・梁接合部のせん断強度に関する調査・研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 2，pp. 295～300，2006 年

１８）　益尾潔，足立将人，今岡達也：梁主筋 USD590 を機械式定着した RC ト形接合部の終局耐力（その 1，その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp. 25～28，2006. 9

＊：島根大学大学院　総合理工学研究科　教授