

論文

[2001] 高強度コンクリートと高強度の主筋を用いた RC ばりの曲げ耐力と靱性

正会員 〇中江晃彦 (大阪工業大学大学院)

正会員 倉本 洋 (鴻池組 技術研究所)

正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の高層化に伴い、その使用材料である鉄筋およびコンクリートに対して、高強度あるいは超高強度なものが要求されてきている [1]。しかしながら、高強度コンクリートや、高強度鉄筋の力学的性質に関する基礎データについては、材料レベルでは少なからず蓄積されているものの、RC 部材としては非常に少ない。

本研究は、高強度のコンクリートと高強度の主筋で構成された RC はり部材に関し、基礎資料を得ることを目的に行った。ここでは、RC 単筋ばりの曲げ耐力とその靱性能を実験的に調べ、既往の曲げ解析の高強度材料に対する適合性を検討する。

2. 実験計画

2.1 実験変数

コンクリート強度および主筋の降伏応力度を実験変数とし、設計時の強度として、コンクリート強度を $F_c = 300, 500, 700 (\text{kgf/cm}^2)$ の 3 種類、主筋の降伏応力度を $\sigma_y = 3000, 5000, 13000 (\text{kgf/cm}^2)$ の 3 種類とした。試験体数は、これらの実験変数の組合せにより計 9 体を製作した。試験体名は 3 桁の数字で表し、百の位はコンクリート強度を表し、残りの 2 桁で鉄筋の降伏応力度を表している。試験体一覧と材料の機械的性質を表-1 に示す。なお、材料強度の実強度は実験時の強度を示す。また、実測したコンクリートと主筋の応力-ひずみ関係を図-1 に示す。

2.2 破壊モードと引張り鉄筋比

コンクリートの応力ブロックの形状を検討するために $\sigma_y = 13000 (\text{kgf/cm}^2)$ のシリーズでは曲げ

表-1 試験体一覧および材料の機械的性質

試験体名	コンクリート強度 $F_c (\text{kgf/cm}^2)$		主筋の降伏応力度 $\sigma_y (\text{kgf/cm}^2)$	
	(設計強度)	実強度	(設計強度)	実強度
303	(300)	239	(3000)	3397
503	(500)	412	(5000)	3397
703	(700)	597	(3000)	3397
305	(300)	239	(5000)	5584
505	(500)	412	(5000)	5584
705	(700)	597	(5000)	5584
313	(300)	239	(13000)	14360
513	(500)	412	(13000)	14360
713	(700)	597	(13000)	14360

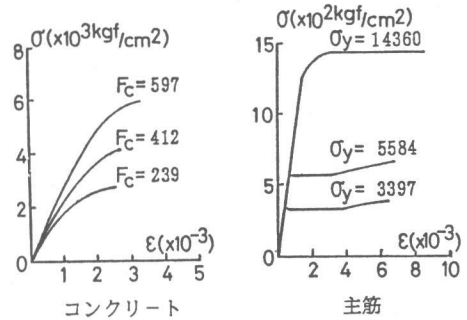


図-1 応力-ひずみ関係

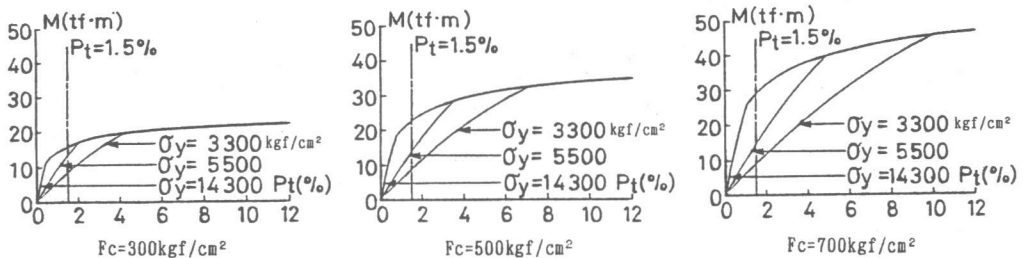


図-2 終局曲げ耐力 M_u と引張り鉄筋比 P_t との関係

圧縮破壊を生じさせ、それ以外の試験体はすべて曲げ引張り破壊を生じるように計画した。終局曲げ耐力 M_u と引張鉄筋比 P_t との関係は、ACI によるコンクリートの応力ブロックを長方形とする終局強度理論 [2] によって求め、図-2 に示すような値を得た。これにより、上記の条件を満たすものとして一点鎖線で表される $P_t = 1.5\%$ を選定した。なお、この計算は、コンクリートに対して設計強度を、主筋に対して設計強度の割増しの強度を用いて行われている。

2.3 試験体形状

試験体の形状寸法および断面構成を図-3 示す。試験体は、断面が $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ で、全長 246cm の単筋ばりとし、主筋は二段配筋とした。試験区間は、試験体中央 70cm の部分とし、載荷点から支点までの 70cm の部分にはせん断力に抵抗するように、あばら筋を配した。なお、両端 18cm は主筋の定着部とした。

3. 実験方法

載荷装置を図-4 に示す。試験区間を純曲げ状態とするために、単純支持形式の二点載荷とした。コンクリートの局部破壊を防ぐために、載荷点で $30\text{cm} \times 6\text{cm}$ 厚さ 2.5cm の支圧板を、反力点で $30\text{cm} \times 15\text{cm}$ 厚さ 2.5cm の支圧板を挿入し、石膏によって試験体に圧着させている。

荷重は、球座と油圧ジャッキの間にロードセルを介して測定した。たわみ量は、両端の支点位置に埋め込まれたボルトに測定フレームを取り付けることによって、測定フレームに固定された電気式変位計により、はり底面の変位量を測定した。

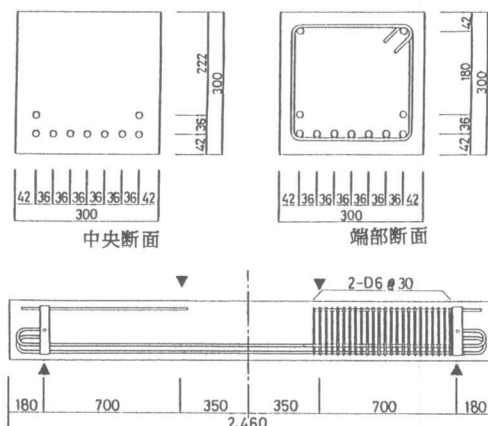
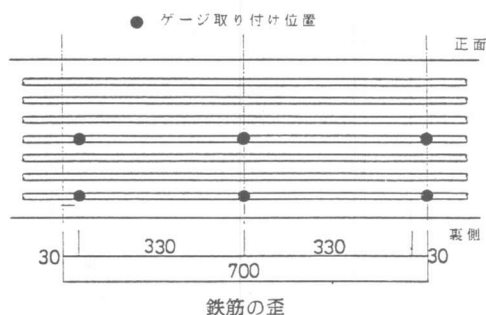


図-3 形状寸法および断面構成

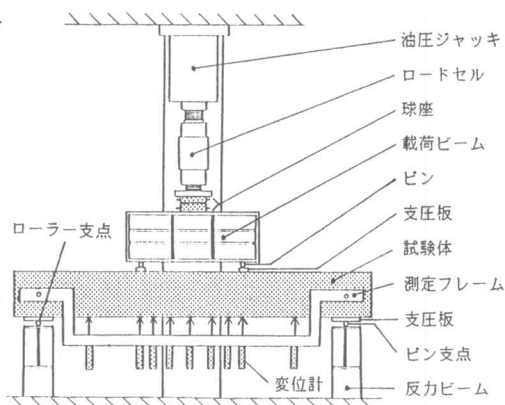


図-4 載荷装置

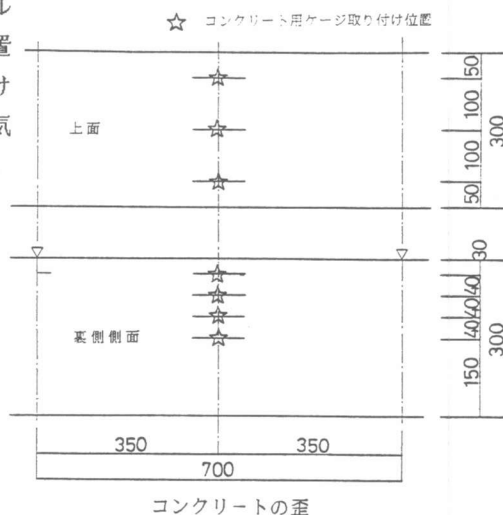


図-5 測定位置

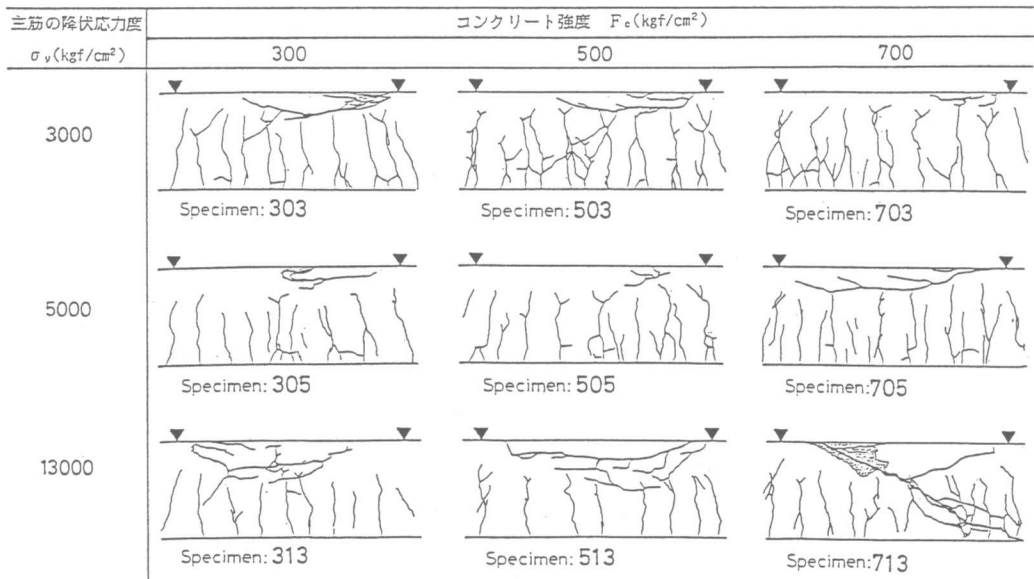


図-6 最終ひび割れ状況

また、ワイヤー・ストレイン・ゲージを用い、コンクリートについては、試験体中央のひずみを上面で3カ所、側面は予想される圧縮域で4カ所それぞれ測定する。一方、鉄筋については、断面中央の主筋と端部の主筋において載荷点と試験体中央のひずみを鉄筋の上端と下端で測定し、その平均値を主筋のひずみ値とした。ひずみの測定位置を図-5に示す。

4. 実験結果

4.1 ひび割れ状況

各試験体において、純曲げ状態にある試験区間の最終ひび割れ状況を図-6に示す。なお、図中の▼印は載荷点を表している。各試験体とも実験変数のいかに関わらず、曲げ引張りひび割れはひび割れ発生後、終局状態に至るまでコンクリートの引張り領域で発生した。また、実験変数のいかに関わらず、最終破壊時はコンクリートの圧縮域において材軸方向に発生したひび割れにより釣合状態が壊れ、荷重の維持ができなくなった。一般に、ひび割れは引張り主応力線に直交するという性質から、曲げ引張りひび割れは主筋による引張り主応力線に直交して発生している。逆にコンクリート圧縮域でのひび割れは、圧縮主応力線の方向にひび割れが発生すると考えられるので、圧縮主応力線に直交する成分では、圧縮領域でもコンクリートに引張り応力が働いたものと考えられる。本実験において圧縮領域でのひび割れは、コンクリートの圧壊よりも、コンクリートの圧縮領域で材軸方向に働く引張り力によるひび割れが顕著に現れた。なお、コンクリート圧縮域のひび割れ領域は、主筋の降伏応力度が上がるにしたがって、より下方に広がっていることが観察され、主筋の引張り力の増加に比例して、終局状態でのコンクリート圧縮負担断面積は増加することが確認された。 $F_c=700$ (kgf/cm²)、 $\sigma_y=13000$ (kgf/cm²)の組合せの713の試験体では、圧縮域でのひび割れが直線状に延び、試験区間全体を横切る斜めひび割れの様相を示して最終破壊に至った。また、この斜めひび割れは断続的に成長したものでなく、圧縮破壊によるひび割れが目視されると同時に生じたものである。

4.2 中央断面のひずみ状況

各試験体の中央断面におけるひずみ状況の代表的なものを図-7に示す。図の○印は曲げひび

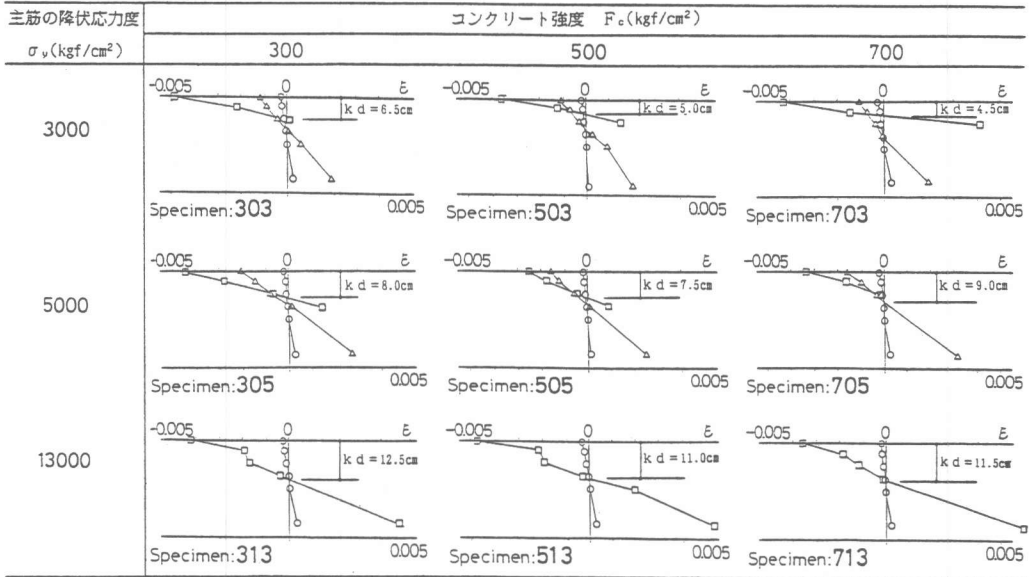


図-7 中央断面におけるひずみ状況

割れ発生時、△印は主筋降伏時、□印は最終破壊時を示す。なお、図中の $k d$ はひずみの状況から想定される最終破壊時の中立軸距離である。 $\sigma_v=3000$ (kgf/cm²) と $\sigma_v=5000$ (kgf/cm²) のシリーズでは、ほぼ平面保持が成立していると考えられ、主筋の降伏と共に中立軸の位置も中央から徐々に上端部に移行していくことが確認されるが、 $\sigma_v=13000$ (kgf/cm²) のシリーズでは、主筋が降伏しないため、中立軸の位置は徐々に深くなることを確認された。しかし、上端部より 3cm の位置のコンクリートのひずみ量に平面保持の仮定から若干逸脱した値が測定された。なお、 $k d$ で示された中立軸の深さと、先に図-6 で示した最終破壊時の圧縮ひび割れの領域は良く対応していることが観察された。

4.3 荷重-たわみ曲線

各試験体の荷重-たわみ曲線（荷重はロードセルにより測定、たわみは試験体中央の変位量によって測定した）を図-8に示す。各試験体ともたわみ量が 0.5mm を越えた辺りで、曲げひび割れが発生した。 $\sigma_v=3000$ (kgf/cm²) のシリーズでは、変位量が 5mm を越えた付近で主筋が降伏し、40mm から 50mm の変位で圧縮側コンクリートの急激な圧壊をともなって耐力低下をおこした。 $\sigma_v=5000$ (kgf/cm²) のシリーズは、10mm を越えた付近で主筋が降伏し、25mm から 27mm の間に最大耐力を示し、圧縮側コンクリートの急激な圧壊をともなって耐力低下を生じた。

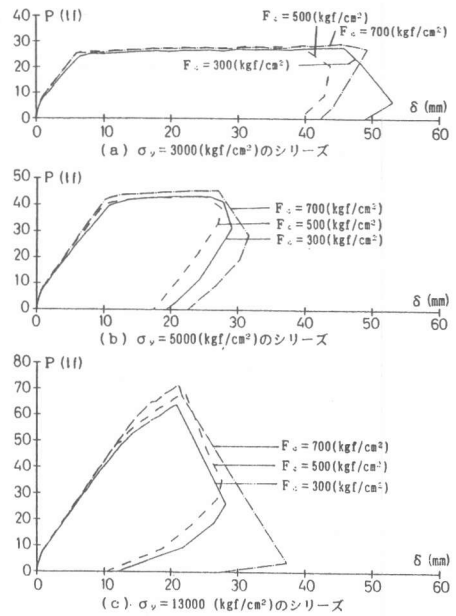


図-8 荷重-たわみ曲線

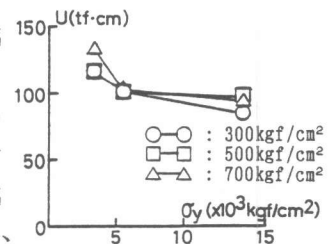


図-9 エネルギー消費能力

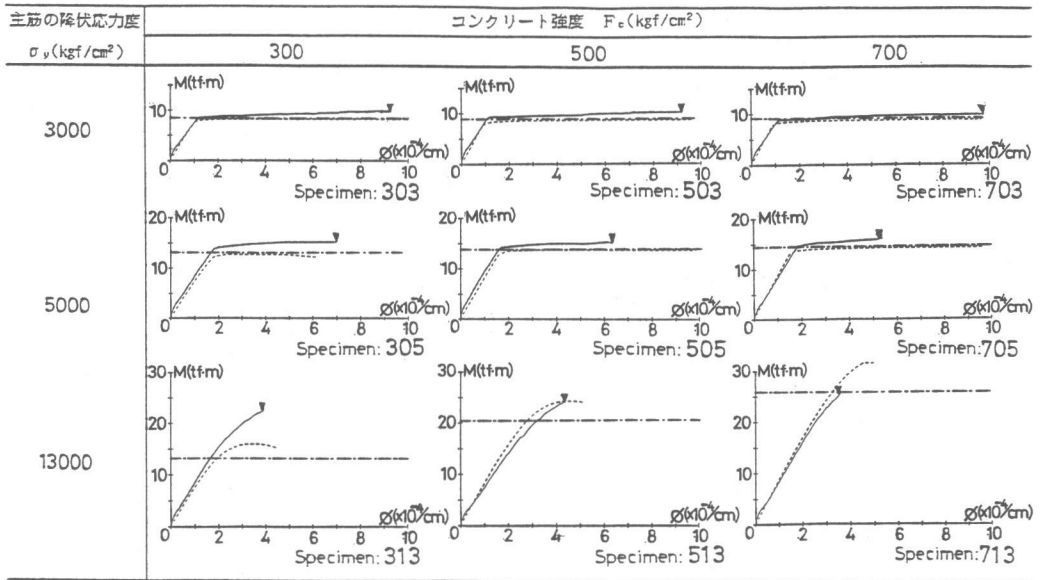


図-10 モーメント-曲率関係

— 実験値
 - - - 弾塑性理論値
 - · - 終局強度理論値

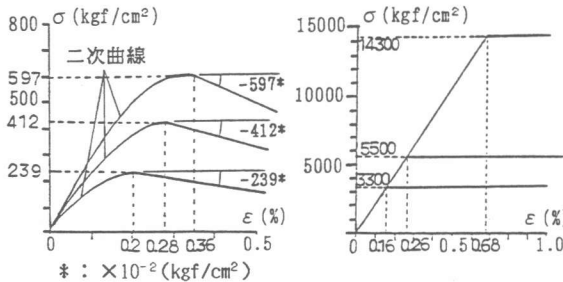


図-11 材料の応力-ひずみモデル

一方、圧縮破壊を起こすように計画した $\sigma_y=13000$ (kgf/cm²)の主筋を用いたシリーズは、コンクリート強度にかかわらず、13mm程度たわんだ所から圧縮破壊が始まり、剛性は若干小さくなるが、コンクリート強度が大きい程その低下量は小さい。その後実験変数のいかに関わらず3体とも、20mmを越えた辺りから急激なコンクリート圧縮部の圧壊をともって最終破壊に至った。

全般にコンクリート強度が大きくなるに連れて曲げひび割れ発生後の剛性の低下率は小さくなる傾向が観察された。また、耐力の劣化を引き起こす変形量までのエネルギー消費能力を図-9に表す。 $\sigma_y=3000$ (kgf/cm²)のシリーズはやや高めエネルギー消費能力を示すが、 $\sigma_y=5000$ (kgf/cm²)と $\sigma_y=13000$ (kgf/cm²)の主筋を用いたシリーズを比較すると、耐力や変形能力で見られるほどの違いは認められず、エネルギー消費能力： $U=100$ (tf·cm)程度と考えられる。

4.4 モーメント-曲率関係

図-10に各試験体の実験から得られたモーメント-曲率関係を実線で示している。なお、曲率は圧縮側コンクリートに貼付られたコンクリート用ゲージによって測定したひずみから、平面保持の仮定により次式によって求めた。

$$\phi = (\epsilon_{c7} + \epsilon_{c7}) / a$$

ここで、 ϵ_{c7} はコンクリート上面のひずみ、 ϵ_{c7} は上端から7cmの位置のひずみ、 a は両ひずみ間の距離 ($a=7$ cm)である。なお、同図には破線で、弾塑性解析による結果も併せて示している。理論解析では、図-11で示されるようなモデル化を行った材料の応力-ひずみ関係を用いた。モデル化に当たって、以下に示す仮定を設けた[2]。

コンクリートの応力ひずみ関係を最大応力時のひずみ ϵ_0 を境に次の2式で表す。

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 : f_c = F_c \{ 2\varepsilon_c / \varepsilon_0 - (\varepsilon_c / \varepsilon_0)^2 \}$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_0 : f_c = F_c \{ 1 - 100(\varepsilon_c - \varepsilon_0) \}$$

ここで、 f_c はコンクリートの応力、 F_c はシリンダー強度、 ε_c は任意のコンクリートの歪を表す。なお、 ε_0 はコンクリート強度によって変化することが考えられるので、次式で表す[3]。

$$\varepsilon_0 = 2F_c / E_c$$

$$E_c = 10600\sqrt{F_c} + 0.7 \times 10^5$$

また、図-10に示された一点鎖線はACIによる終局強度理論に基づく耐力計算値である。

引張り破壊を起こすシリーズで、初期剛性は理論値よりかなり高い値を示し、ひび割れ発生後の剛性は理論値に近い値を示している。また、主筋降伏後は理論値より安全側の値を示している。これに対し、圧縮破壊を起こすシリーズでは $F_c = 300(\text{kgf/cm}^2)$ で弾塑性理論による終局耐力の3割増、終局強度理論による耐力の5割増の実験値を得た。 $F_c = 500(\text{kgf/cm}^2)$ は弾塑性理論による終局耐力とほぼ等しく、終局強度理論による耐力の2割増の実験値を、 $F_c = 700(\text{kgf/cm}^2)$ は弾塑性理論終局耐力・終局強度理論耐力とも実験値を上回り過大評価となった。弾塑性理論・終局強度理論における各コンクリート強度の応力ブロックを考えると、弾塑性解析を行う場合、コンクリートの応力-ひずみ関係における最大応力後の下り勾配を、今回行った仮定以上に $F_c = 300(\text{kgf/cm}^2)$ のコンクリートは傾きをゆるく、 $F_c = 500(\text{kgf/cm}^2)$ と $F_c = 700(\text{kgf/cm}^2)$ のコンクリートでは、高強度になるに連れて傾きを急にする必要が考えられる。

6. まとめ

本研究において、鉄筋コンクリート単筋ばりの構造性能に及ぼす材料の高強度化の影響を実験的に検討した結果、以下に示す結論を得た。

- 1) 曲げひび割れ荷重およびその時の曲率や発生位置に、コンクリートおよび鉄筋の使用材料による大きな差異は認められなかった。
- 2) 同じ強度の主筋に対しては、コンクリート強度が増加するにしたがって、曲げひび割れ発生後の剛性の低下率は小さくなる。
- 3) 引張り鉄筋比を一定とした場合、主筋の降伏応力度の変化によって、最大耐力・変形能力はいずれも、影響を受けるが、耐力劣化が開始するまでのエネルギー消費能力としては、コンクリート強度および主筋の降伏応力度のいかに関わらずほぼ等しくなる。
- 4) 曲げ引張破壊を起こすシリーズでは、終局耐力に関する実験値は終局強度理論・弾塑性理論のいずれに対しても安全側の値を示す。
- 5) 曲げ圧縮破壊を起こすシリーズは、終局強度理論における解析値も弾塑性理論における解析値も、 $F_c = 300(\text{kgf/cm}^2)$ では過小評価に、 $F_c = 700(\text{kgf/cm}^2)$ では過大評価となる。
- 6) 弾塑性理論解析を行う場合、コンクリートの応力-ひずみ関係における最大応力後の下り勾配は、 240kgf/cm^2 程度のコンクリート強度のものでは今回行った仮定以上に傾きをゆるく仮定し、逆に、高強度になるに連れて傾きを急にする必要あるとが考えられる。

<参考文献>

- [1] 平石久廣：ニューR/Cへの挑戦、コンクリート工学、Vol.26 No.1、1988、pp.83-86
- [2] Park,R. and Paulay,T. :Reinforced Concrete Structures, JOHN WILEY & SONS, 1975, 769pp.
- [3] State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete : ACI Journal, Vol.81 No.4, 1984, pp.364-411