

論文

[2090] 高強度コンクリート RC はりの最小曲げ引張鉄筋量について

正会員○滝本和志 (清水建設技術研究所)

正会員 塩屋俊幸 (清水建設技術研究所)

正会員 高橋行茂 (東京ガス生産技術部)

峯岸孝二 (東京ガス生産技術部)

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりの最小曲げ引張鉄筋量に関して、土木学会コンクリート標準示方書「設計編」[1]においては、曲げモーメントの影響が支配的な棒部材の引張鉄筋比は、0.2%以上を原則とすると規定されている。また、高強度の鉄筋を用いる場合や計算上必要な鉄筋量よりも著しく多量の鉄筋を用いる場合には、この規定を緩和して0.15%まで鉄筋比を小さくしても、ぜい性的な破壊は生じないとしている。

既往の研究[2][3]によると、低鉄筋比によるぜい性破壊を防止する設計方法として、曲げひびわれ発生荷重 p_{cr} 、鉄筋降伏荷重 p_y 及び最大荷重 p_u の大小関係が $p_u/p_{cr} < 1$ となつてはならず、最も保守的な場合は、 $p_y/p_{cr} > 1$ であればよいとなっている。

本研究は、コンクリートが高強度になった場合にも示方書の規定が適用できるのか、設計基準強度 600kgf/cm^2 の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ実験を行い、最小鉄筋量に関する検討を行ったものである。

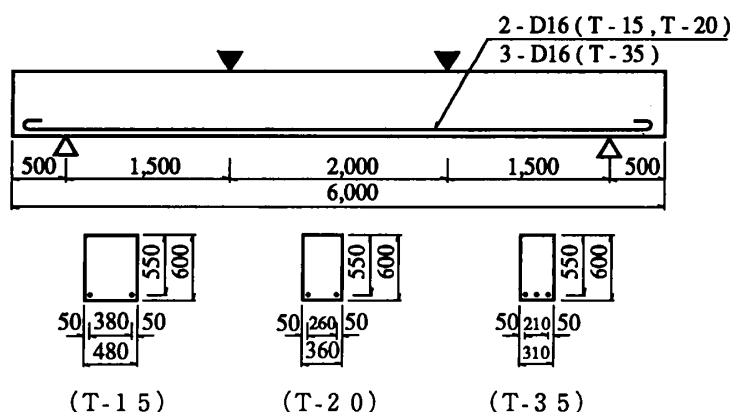


図-1 形状寸法・配筋

2. 実験概要

試験体の一覧を表-1に、

表-1 試験体一覧

試験体名	試験体寸法						コンクリート		鉄筋		主鉄筋比
	有効高	せん断 スパン	せん断 スパン 比	試験体 高さ	試験体 幅	試験体 長さ	圧縮 強度	引張 強度	主鉄筋 径	降伏点	
	d (mm)	a (mm)	a/d	H (mm)	B (mm)	L (mm)	f'_c (kgf/cm^2)	f_t (kgf/cm^2)	D (mm)	f_{sy} (kgf/cm^2)	
T-15	550	1500	2.73	600	480	6000	803	44.2	D16	3320	0.15
T-20	550	1500	2.73	600	360	6000	803	44.2	D16	3320	0.20
T-35	550	1500	2.73	600	310	6000	803	44.2	D16	3320	0.35

形状寸法及び配筋を図-1に示す。試験体は3体とし、主鉄筋にはD16異形鉄筋を2本ないし3本使用した。長さを6m、高さを60cmとして、幅を48cm、36cm、31cmと変化させることにより、鉄筋比をそれぞれ0.15%、0.20%及び0.35%とした。コンクリートの配合を表-2に示す。加力前後の材料試験の結果を平均すると、圧縮強度は803kgf/cm²、引張強度は44.2kgf/cm²であった。また、試験時の材令は56日から61日であった。

支持条件は支点間距離5mの両端単純支持とし、純曲げ区間2mの2点載荷とした。測定項目は載荷荷重、コンクリート表面ひずみ、鉄筋ひずみ、たわみなどである。鉄筋ひずみは、D16鉄筋の縦リブ部分に深さ2mm、幅5mmの溝を切り、純曲げ区間内に5cm間隔で箔ゲージ(ベース4.5mm×1.4mm)を貼りつけて測定した。ひびわれ発生荷重及び降伏荷重は鉄筋ひずみのデータを用いて決定した。また、最大荷重は鉄筋降伏後の最大の荷重とした。

3. 実験結果と考察

3. 1 概要

表-3に実験結果の一覧を、図-2に載荷荷重と試験体中央下面変位の関係を示す。T-15試験体は1本目のひびわれ発生と同時に鉄筋が降伏し、荷重が大きく低下した。加力を続けると2本目のひびわれ発生に伴い荷重が再び大きく低下した。最終的に鉄筋が破断して破壊に至ったが、ひびわれ発生荷重が加力中の最大の荷重であった。ひびわれ発生と同時に鉄筋が破断しなかったのは、試験機の加力速度が遅い

ためである。T-35試験体は主鉄筋が3本入っているために同一変位における荷重が他の2体の約1.5倍になっている。高強度コンクリートを用いているものの低鉄筋比のためにどの試験体も非常に大きな変形を示した。

3. 2 ひびわれ性状

破壊モードは全て曲げ破壊で、T-15及びT-20試験体は主鉄筋が破断して破壊に至り、T-35試験体は圧縮側コンクリートが圧壊して破壊に至った。T-35試験体は、コンクリートが圧壊した後も加力を続けたために左側せん断区間に曲げせん断ひびわれが発生した。

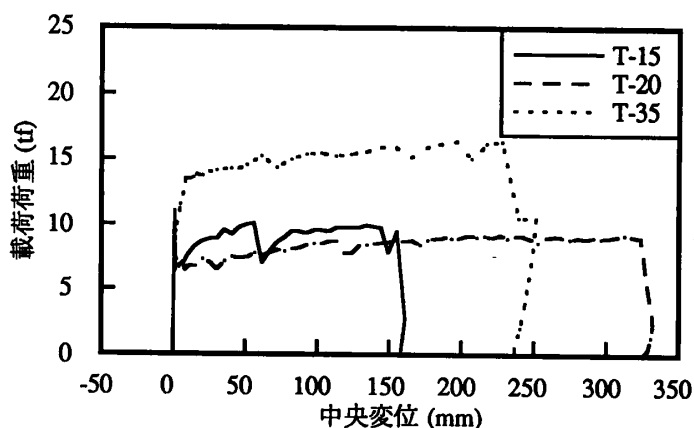


図-2 荷重-変位曲線

表-3 実験結果一覧

試験体名	P _{cr} (tf)	P _y (tf)	P _u (tf)	破壊形式	材令
T-15	11.1	—	9.9	鉄筋破断	61
T-20	5.6	6.8	9.3	鉄筋破断	58
T-35	8.0	13.5	16.4	コンクリート圧壊	56

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン プフロー 値の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混 和 剤 (C×weight%)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤	AE剤
20	60±5	4±1	28.5	40	165	579	648	973	1.70	0.009

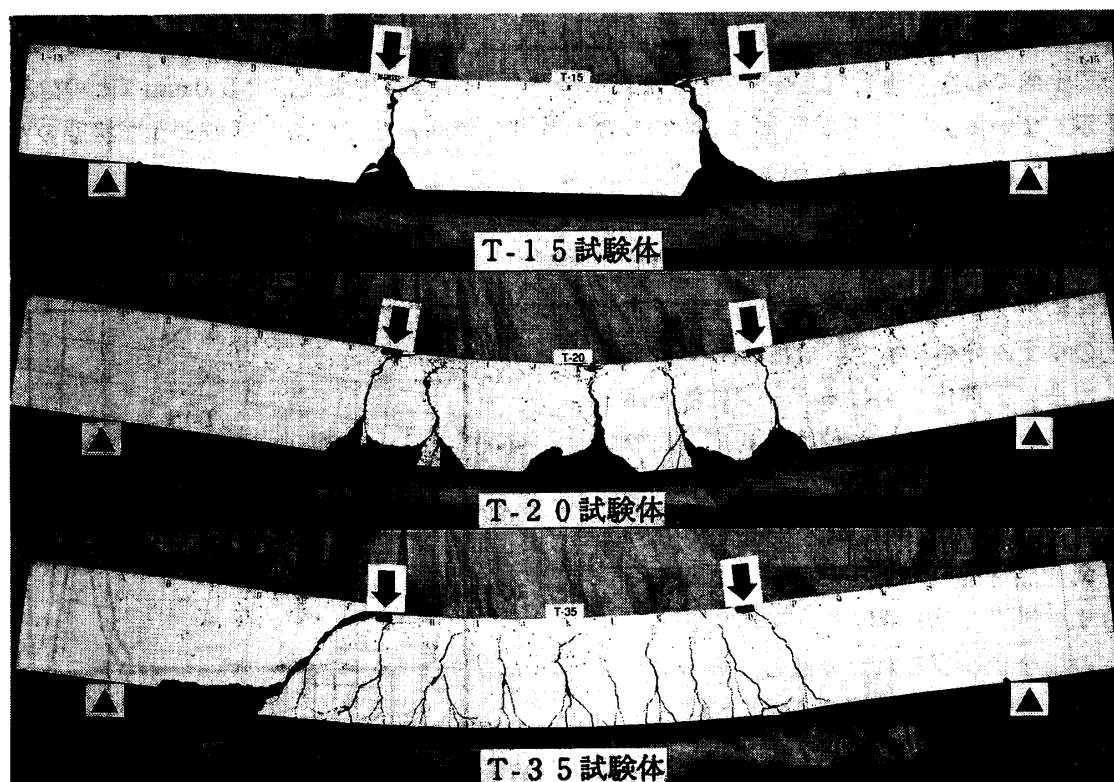


写真-1 破壊状況

写真-1に各試験体の最終的なひびわれ状況を示す。T-15試験体は荷重点付近にそれぞれ1本ずつのひびわれが発生しただけで、全体が3分割された状態になっている。T-20試験体も5本の大きな曲げひびわれが発生しただけである。これら2体のひびわれ部分では、かぶりコンクリートがすっかり剥落してしまい、T-20試験体中央のひびわれにおいては鉄筋が30cm以上むき出しになってしまった。このように0.2%の鉄筋量を確保している試験体においても、コンクリートのみを高強度とした試験体の場合は、ひびわれが分散せずに一部に集中して、その1本1本が大きく開いて、通常のRC構造物のひびわれ性状とは違う様相を示すことが確認された。

3.3 コンクリートひずみ

図-3に試験体表面上部に貼りつけたコンクリートひずみの結果を示す。横軸はゲージの貼りつけ位置を示しており、

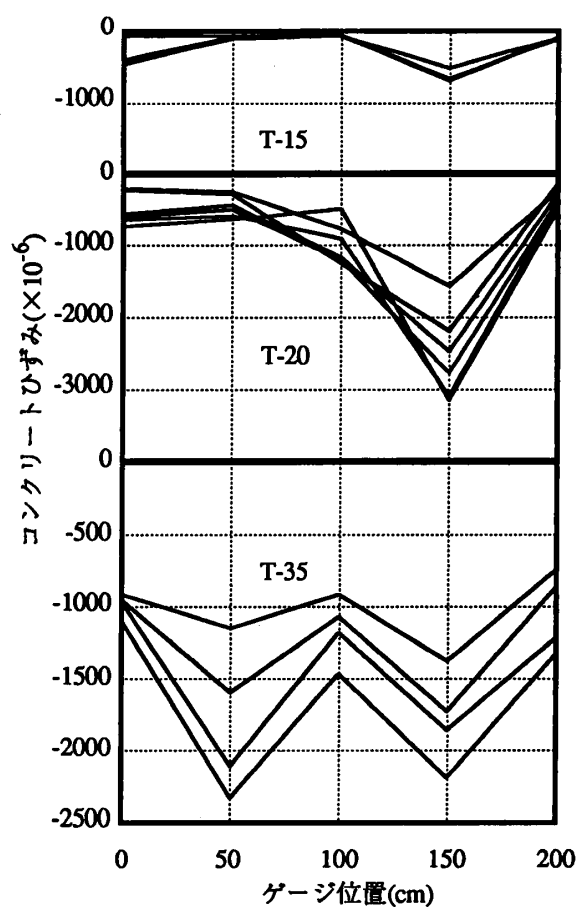


図-3 コンクリートひずみ分布

0 cmが左の荷点、200 cmが右の荷点位置になっている。なお、荷点部分は荷板があるので上面ではなく側面の上端にゲージを貼りつけた。図-3は中央変位で50 mmごとの分布状態を示している。T-15試験体は2本のひびわれ部分で回転しているだけのような状態のために、曲げ区間内ではほとんど圧縮力を受けていない。

3. 4 鉄筋ひずみ

図-4に最初のひびわれが発生した時点と中央変位が10 mmに達した時点における主鉄筋のひずみ分布を示す。横軸は図-3と同じく、曲げ区間内におけるゲージ位置を示している。ほぼひびわれ位置に対応したひずみ分布になっている。T-15試験体の場合、ひびわれが2本しか入らなかったため、荷点付近のひずみだけが大きくなっており局部的に力を受けている。T-35試験体の場合はひびわれが分散しているためひずみも全体的に分布している。

3. 5 計算値と実験値の比較

表-4に各荷重の計算結果の一覧を示す。それぞれの荷重ごとに表-3の実験結果の値との比較を行った。ひびわれ発生荷重は式(1)に示す寸法効果を考慮した曲げ引張強度[4]を用いて計算した。

$$f_b = 0.48 f_c'^{2/3} (H/15)^{-1/4} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、Hははりの高さ (cm) である。応力の単位は (MPa) である。 P_{ud} は設計曲げ引張終局耐力、 P_u は鉄筋のひずみ硬化を考慮して鉄筋が破断して破壊に至るとした場合の最大荷重で、繰り返し計算により求めた。断面における力のつりあい条件より P_u に達したときの鉄筋ひずみを ϵ_u とした。式(1)は高さ10 cmの曲げ強度試験体にお

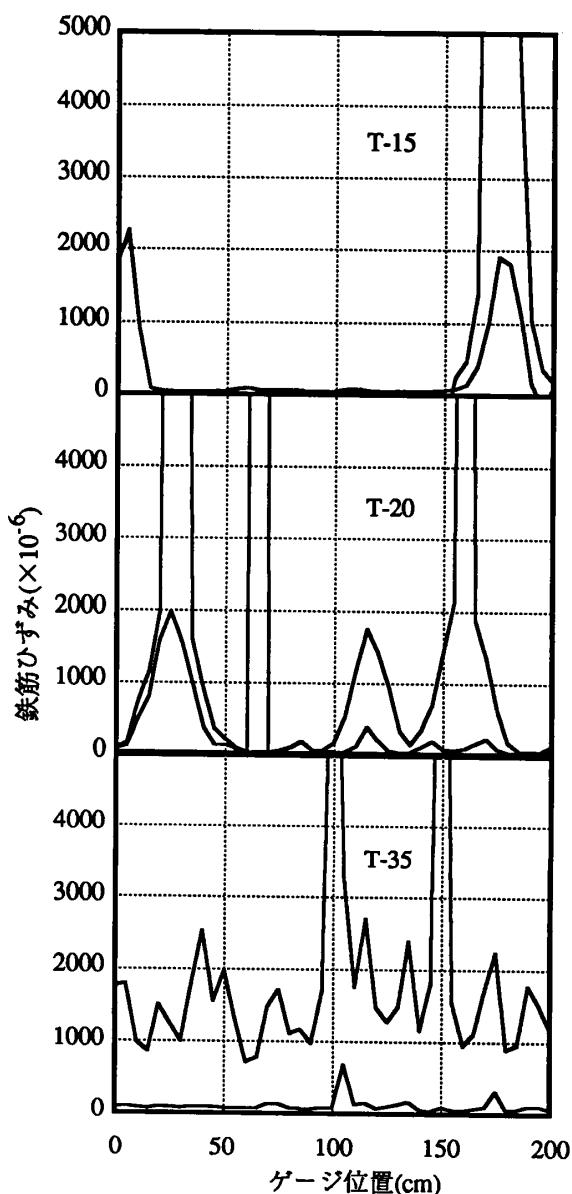


図-4 鉄筋ひずみ分布

表-4 計算結果一覧

試験体名	P_{cr} (tf)	実/計	P_y (tf)	実/計	P_{ud} (tf)	実/計	P_u (tf)	実/計	ϵ_u
T-15	21.5	0.52	6.4	—	6.7	1.48	10.3	0.96	0.22
T-20	16.1	0.35	7.1	0.96	7.5	1.24	10.9	0.85	0.16
T-35	13.9	0.58	12.7	1.06	13.3	1.23	18.9	0.87	0.09

いては高強度コンクリートの場合にも良好な結果が得られたが、3体ともに計算値の半分程度の荷重でひびわれが発生した。この原因としては自重によるクリープなどが考えられる。 P_{ud} は P_y とほぼ同じ値で、実験値の方が大きくなっている。 P_u は P_{ud} の約1.5倍になっており逆に実験値の方が P_u より小さくなっている。ひずみ硬化を考慮した最大荷重よりも実験値が下回った原因としてはT-15、T-20試験体の場合はひびわれ幅が大きくなりすぎて平面保持が成り立っていないためと考えられる。また、T-35試験体の場合は鉄筋が破断する前にコンクリートが圧壊したために鉄筋破断の仮定で求めた最大荷重までは達しなかったものと考えられる。鉄筋のひずみ硬化域における応力-ひずみ関係は式(2)を用いた。

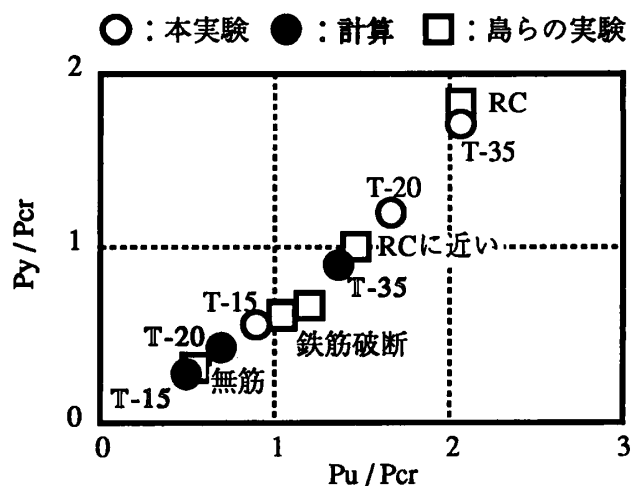


図-5 p_y/p_{cr} 及び p_u/p_{cr} と破壊形式との関係

図-5 p_y/p_{cr} 及び p_u/p_{cr} と破壊形式との関係

$$\sigma = f_{sy} + (1 - \exp((\epsilon_{sh} - \epsilon)/k))(1.01 f_{su} - f_{sy}) \quad \dots \quad (2)$$

ただし、 $k = 0.032 \times (400/f_{sy})^{1/3}$ であり、 ϵ_{sh} はひずみ硬化開始ひずみ(0.016)である。応力の単位は(MPa)を使用している。終局ひずみ ϵ_{su} は式(2)において鉄筋の応力が引張強度に達したときのひずみで、その時点で鉄筋が破断するものとしている。鉄筋の引張強度試験結果より $\epsilon_{su} = 0.14$ となる。表-4よりT-15及びT-20試験体の終局時のひずみ ϵ_u は ϵ_{su} よりも大きくなるので、この2体は計算上も鉄筋が破断するものと推測できる。

3.6 普通強度コンクリートとの比較

本実験結果及び計算結果を普通強度コンクリートを使用した低鉄筋比はりの曲げ実験結果[2]と比較したものを図-5に示す。T-15試験体の降伏荷重は全て計算値を用いた。ここでは、最大荷重の計算値として繰り返し計算で求めた P_u を用いることとする。図中のコメントは普通強度コンクリートの破壊形式である。本実験結果の場合、T-20試験体はひびわれが集中し、主鉄筋が破断して破壊に至っていることよりRCに近い破壊とはいえ、普通強度コンクリートの場合とは違った結果となっている。これは実験においてひびわれ発生荷重が非常に小さかったためと考えられる。計算結果の場合は普通強度コンクリートの破壊形式とよく一致している。

文献[2]では鉄筋の破断を防ぐ最小鉄筋比(p_{min})を求めるための式として式(3)を提案している。

$$p_{min} = f_{cu} \epsilon_{cu} / ((\epsilon_{cu} + \epsilon_{su}) f_y) \quad \dots \quad (3)$$

ただし、 f_{cu} 及び ϵ_{cu} はコンクリートの強度及び終局ひずみであり、 $f_{cu} = 0.85k_1 f'_c$ 、 $\epsilon_{cu} = 0.003$ としている。 $f'_c = 803 \text{ kgf/cm}^2$ より $k_1 = 0.65$ 、式(2)より $\epsilon_{su} = 0.14$ として必要最小鉄筋比を求めると $p_{min} = 0.28\%$ となる。これは、T-15及びT-20試験体では鉄筋量が不足

し、T-35 試験体では必要最小鉄筋比を確保していることになり、今回の実験結果と一致する。

4. まとめ

実験結果及び計算結果から、以下の結論を得た。

- (1) 示方書に従って0.2%以上の鉄筋量を確保していても、使用する材料の強度の組み合わせによってはぜい性破壊が起こる場合も考えられる。
- (2) 低鉄筋比のために高強度コンクリートを使用していても変形は大きい。
- (3) 低鉄筋比になるとひびわれ本数が少なく、ひびわれ部分に損傷が集中する。
- (4) 鉄筋のひずみ硬化を考慮した場合としない場合での最大荷重の計算値は大きく違い、ひずみ硬化を考慮した場合の方が実験値に近い値となる。
- (5) 鉄筋のひずみ硬化域における応力-ひずみ関係より、鉄筋の破断が推定できる。
- (6) 高強度コンクリートを使用した場合においても $p_u/p_{cr} > 1$ であればぜい性的な破壊は防止することができ、 $p_y/p_{cr} > 1$ であれば十分にRCとしての挙動が期待できる。

以上のことより高強度コンクリートを使用する場合には、ぜい性破壊を防止するために必要な鉄筋比が0.2%を越えることも考えられる。そこで、ぜい性破壊を防止するためには、 p_y/p_{cr} 、 p_u/p_{cr} を評価する必要がある。また、鉄筋破断とコンクリート圧壊のどちらの破壊形式になるかを検討する方法も考えられる。いずれの場合にも鉄筋のひずみ硬化まで考慮した検討が必要になる。

<謝辞>本研究は、東京ガス、大林組、鹿島建設、清水建設の共同研究であり、本研究を御指導頂いた東京大学土木工学科岡村甫教授に対してここに謝意を表します。

<参考文献>

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書、1991年
- [2] 島・二羽・岡村：曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討、土木学会論文集、第378号/V-6、p.p.231~237、1987年2月
- [3] 六車・岸本：鉄筋コンクリート曲げ材の最小鉄筋比に関する研究、日本建築学会論文報告集、第172号、p.p.1~6、1970年6月
- [4] 塩屋・川崎：鉄筋コンクリートはりのせん断強度の寸法効果に関する検討、RC構造の有限要素解析に関するコロキウム 論文集、p.p.151~158、1984年12月