

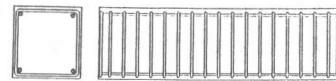
論文

[2073] 高強度材料を用いたRC造角柱の軸方向加力実験の評価に関する研究

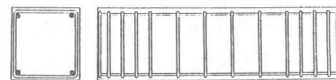
正会員 加藤大介 (新潟大学工学部)

1. 序

本研究の目的は、長方形帯筋により横拘束を受けるコアコンクリートの平均的な軸応力度と軸歪度関係を実験的に求めることである。特に、高強度コンクリートおよび高強度帯筋を用いた場合についての挙動の解明に重点をおくが、実験はコンクリートおよび帯筋の強度を主要なパラメータとした。また、データの解析の際には低強度材料を用いた試験体の実験結果¹⁾も含めた。最大応力度時の帯筋歪度の評価モデルは、文献²⁾で示したように最大応力度時の試験体の軸歪と帯筋歪の関係の評価する考え方に基づいて作成した。また、RC部材が一般に横拘束筋を有する長方形断面であることを考慮し、その拘束圧が均一にはならないことに着目し、その効果を取り入れている。本報告では実験の概要とコアコンクリートの最大応力度点と負勾配の剛性の評価について示す。



(a) 帯筋間隔30mmシリーズ



(b) 帯筋間隔60mmシリーズ

図1 試験体配筋図

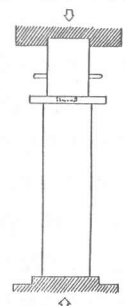


図2 加力装置

2. 実験概要

表1に試験体の諸元を、図1に閉鎖型帯筋を用いた試験体の配筋図を示す。試験体は15cmx15cmx53cmの直方体で、コンクリート強度(約400, 600, 800kg/cm²)、帯筋強度(約4000, 8000, 12000kg/cm²)、帯筋間隔(S=30, 60mm)、および、帯筋種類(溶接閉鎖型筋、角スパイラル)をパラメータとした3シリーズ(各シリーズでコンクリート設計強度が同一)の計26体である。試験体の名前は、例えば、F4Y4S30がコンクリート設計強度が400kg/cm²で、帯筋に降伏強度約4000kg/cm²のもを用い、帯筋間隔Sを30mmとしたものを意味する。帯筋種類は、閉鎖型帯筋を基本型とし、コンクリート設計強度が800kg/cm²のシリーズでスパイラルのものを製作した(F8SP30, F8SP60)。試験体のコア幅

表1 試験体の諸元と実験結果

試験体番号	試験体名	帯筋径	ピッチS(mm)	コア内帯筋比Pw(%)	コア内体積比ρ(%)	最大耐力Pmax (ton)	最大耐力時縦歪ε (micro)	
シリーズ1	1	F4Y4S30	φ 5.5	30	1.13	2.26	103.7	3803
	2	F4Y4S60	φ 5.5	60	0.57	1.13	94.5	2726
	3	F4Y8S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	106.5	3498
	4	F4Y8S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	93.5	2714
	5	F4Y12S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	100.9	3205
	6	F4Y12S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	96.1	3099
	7	F4P-1	-	-	-	-	99.5	2594
	8	F4P-2	-	-	-	-	95.8	3424
シリーズ2	9	F6Y4S30	φ 5.5	30	1.13	2.26	156.8	3404
	10	F6Y4S60	φ 5.5	60	0.57	1.13	149.1	3152
	11	F6Y8S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	160.1	4698
	12	F6Y8S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	155.3	3978
	13	F6Y12S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	160.3	3624
	14	F6Y12S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	153.9	3321
	15	F6P-1	-	-	-	-	148.0	2814
	16	F6P-2	-	-	-	-	149.0	2726
シリーズ3	17	F8Y4S30	φ 5.5	30	1.13	2.26	177.9	3183
	18	F8Y4S60	φ 5.5	60	0.57	1.13	158.0	3313
	19	F8Y8S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	178.8	4115
	20	F8Y8S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	168.1	2865
	21	F8Y12S30	φ 5.0	30	0.93	1.87	181.5	4217
	22	F8Y12S60	φ 5.0	60	0.47	0.93	170.1	3516
	23	F8P-1	-	-	-	-	-	-
	24	F8P-2	-	-	-	-	174.0	2895
25	F8SP30	φ 5.0	30	0.93	1.87	173.0	3944	
26	F8SP60	φ 5.0	60	0.47	0.93	165.9	2902	

※主筋は全試験体共通でφ4を4本使用(帯筋の隅角部に配筋)

Dcは14cmとし、また無拘束コンクリート以外には主筋(φ4)を各隅角部に配筋した。

加力は図2に示すように、両端固定の一方方向加力を行った。軸方向の変形は表裏の2面において、並列して2箇所(計4箇所)で測定した。測定長は30cmである。また、帯筋の歪度は部材長さ中央付近の2つの帯筋についてそれぞれ帯筋の溶接点以外の3辺の中央で外と内の2枚の歪ゲージで測定した。使用した鉄筋とコンクリートの材料の性質を表2(a)(b)に示す。Y12シリーズの帯筋以外は降伏点が認められたが、Y12シリーズの帯筋は明確な降伏点が認められず、除荷したときの残留歪度が0.2%になる点を降伏点とした。コンクリートは各シリーズで2バッチで打設し、それぞれ、無拘束試験体を作製したが、シリーズ3の1バッチ目の試験体の加力に失敗したため、2バッチ目の最大応力度をコンクリートシリンダー強度 F_c の比で換算した値を無拘束試験体の最大応力度の推定値とした($\sigma_{max}=773 \cdot 911/935=753\text{kg/cm}^2$)。

3. 実験結果

表1の後半に最大耐力、そのときの全測定区間の平均軸歪度の実験値を示す。各試験体の最終的なコアコンクリートの剥落長さを各面3箇所測定し計12箇所での平均を試験体の破壊領域とし、コンクリート強度を横軸にして図3に示す。その長さは帯筋間隔が30mmのもので大きく、60mmのもので短くなる傾向があったが、試験体間でのばらつきが大きい。全試験体の平均は断面せいよりやや大きい16.6cmであった。

本報告では文献1)と同様の手法により、断面全体の平均応力度-測定区間での平均軸歪度をコアコンクリートの平均応力度-破壊領域内の軸歪度関係に修正した。すなわち、最大耐力後は破壊領域を想定し破壊領域外では除荷されるとして、破壊領域内の平均軸歪度を推定した。なお、破壊領域の長さは前述のコアコンクリート剥落長さの全試験体の平均値の16.6cmとした。次に、かぶりコンクリートと主筋の応力度-歪度関係より求めた負担分を減じてコア内の平均軸応力とした。ただし、かぶりコンクリートは文献3)のモデルを用い、主筋は完全弾塑性とした。図4に試験体F8Y12S30の生データより破壊領域内の断面の平均軸応力-軸歪度関係と、コア内の平均軸応力-破壊領域内の平均軸歪度関係を求めた例を示す。

なお、本報ではコア内の平均軸応力-破壊領域内の平均軸歪度の関係を評価する。

図5に全試験体のコア内の平均軸応力-破壊領域内の平均軸歪度の関係を帯筋強度をパラメータにして示す。各

図より帯筋強度の違いによる差は最大応力度点よりも

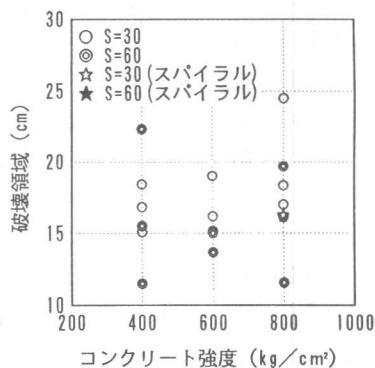


図3 破壊領域の軸方向長さ

表2 材料の性質 (a)コンクリート

		シリーズ1 (Fc=400)	シリーズ2 (Fc=600)	シリーズ3 (Fc=800)			
対応試験体番号		1, 3, 5, 7	2, 4, 6, 8	9, 11, 13, 15	10, 12, 14, 16	17, 19, 21, 23, 25	18, 20, 22, 24, 26
φ10cmのシリンダーの最大応力度 (kg/cm ²)	1	5 1 6	4 8 7	7 3 8	8 1 7	9 1 9	9 2 1
	2	5 3 7	5 2 4	7 8 4	7 5 3	-	9 4 0
	3	-	4 9 9	-	7 8 2	9 0 3	9 4 3
		5 2 7	5 0 3	7 6 1	7 8 4	9 1 1	9 3 5
無拘束コンクリートの最大応力度 (kg/cm ²)		4 4 2	4 2 6	6 5 8	6 6 2	- (7 5 3)	7 7 3
		4 3 4		6 6 0		7 6 3	

(Fc=800シリーズの無拘束コンクリートの強度は773*(911/935)より推定。)

(b)鉄筋

	Y4シリーズ (φ5.5)	Y8シリーズ (φ5.0)	Y12シリーズ (φ5.0)	スパイラル (φ5.0)	主筋 (φ4.0)
断面積 (cm ²)	0. 2 3 8	0. 1 9 6	0. 1 9 6	0. 1 9 6	0. 1 2 6
降伏応力度 (kg/cm ²)	3 7 4 0	8 1 8 0	1 0 7 7 0	1 3 8 1 0	5 9 9 0
降伏軸歪度 (micro)	3 8 6 0	5 9 7 2	7 2 5 8	6 9 0 0	4 9 6 8

むしろ最大応力度点以後の負勾配およびその後の応力度が安定した領域に表れることが分かる。なお、通常フックを有する帯筋を用いた文献1)の実験では、応力度が安定する領域は無くフックのはずれにより徐々に応力度が低下した。すなわち、この安定した終局応力度の領域は帯筋が閉鎖型あるいはスパイラル筋であることの影響である。

最後に、実験で得られた破壊領域内のコアコンクリートの最大耐力後の剛性と安定した終局応力度を評価しておく。最大耐力後の剛性は軸歪レベルにより変化しその評価は難しいが、安定した終局応力度と最大応力度の平均の応力度の点と最大応力度点を結ぶ勾配とした。また、安定した終局応力度は後述する図6の□の点以降のなだらかな下り勾配の領域を指すが、本報告ではその応力度を帯筋破断直前か破壊領域内の平均軸歪度が50000microの点の応力度で代表させた。表3に各試験体のコア内の最大平均軸応力度、最大応力度時の破壊領域内の平均軸歪度と横歪度、安定終局応力度、さらに、最大耐力後の負勾配の剛性を示す。なお、横歪度は測定した帯筋の歪度の全平均とした。

4. 拘束されたコンクリートの軸歪度-軸応力度-横歪度-帯筋応力度関係

図6は試験体F8Y12S30の軸歪度-軸応力度-横(帯筋)歪度-帯筋応力度関係である。図中の○は最大応力度点であるが、このときの帯筋の応力度は降伏点にはまだかなりの余裕がある(帯筋の応力度-歪度関係は同図中に破線で示してある)。これは、高強度帯筋を用いた場合には、最大応力度が帯筋強度にあまり影響されない事実と一致する。この後、帯筋の応力度は増加し□の点で歪度が増加し、あたかも降伏したような挙動となる。これは、帯筋の引張側と圧縮側に添付した歪ゲージ

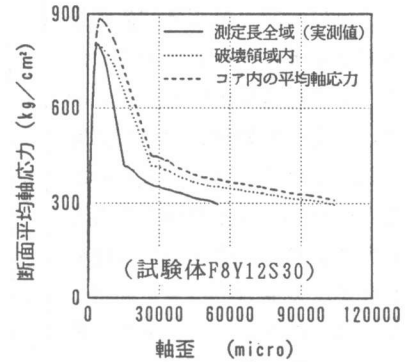


図4 実験データの修正例

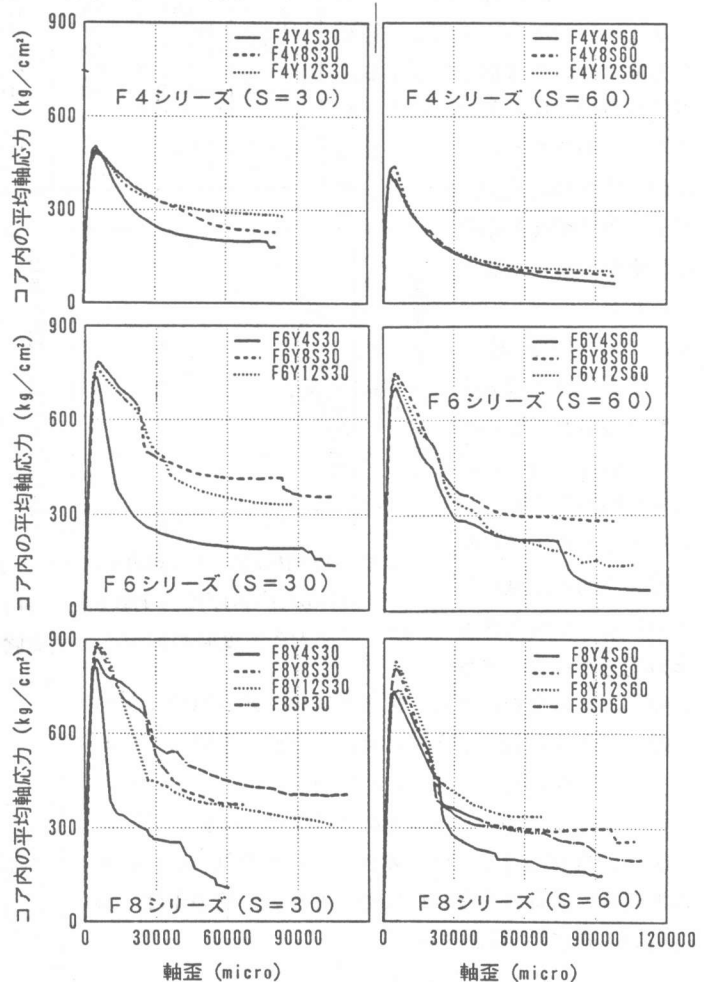


図5 コア断面平均軸応力度-破壊領域平均軸歪度関係

の内、曲げモーメントのために引張側の歪だけが大きく伸びることによる。すなわち、拘束コンクリートの軸応力度-軸歪度関係の最大点およびその後の負勾配を評価するためには帯筋の○の点との関係を、安定した終局状態の応力度を評価するためには□の点との関係を明らかにする必要があることがわかる。なお、帯筋が低強度の場合には○の点は□の点に近づき、あるいは、同一となるために、最大応力度は帯筋強度に影響される。本報では、最大応力度点と負勾配の剛性の評価について示し、終局応力度については別稿にゆずる。単位は特記しない限り kg と cm を用いた場合について示し、符号は軸歪度と軸応力度が縮みと圧縮が正、帯筋歪度と帯筋応力度が伸長と引張が正とした。

5. 最大点の評価

図7(a)(b)に最大応力度時の帯筋歪度の測定値と(3)式を使って得られた拘束応力度と最大応力度とその時の軸歪度の無拘束試験体からの増分 $\Delta\sigma_{cp}$ と $\Delta\varepsilon_{cp}$ の関係を示す。文献

1)のデータも含み、また、図中の実線は式(1)(2)で表す文献4)による評価式であり、ほぼ実験値を推定している。

$$\Delta\sigma_{cp} = \sigma_{cp} - \sigma_c = 4.1 \cdot \sigma_{tp} \quad (1)$$

$$\Delta\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{cp} - \varepsilon_c = 0.00015 \cdot \sigma_{tp} \quad (2)$$

次に、拘束応力度 σ_{tp} を評価することを試みる。最大応力度時の拘束応力度 σ_{tp} はそのときの帯筋の歪度 ε_{tp} を用いて式(3)で表される。

$$\sigma_{tp} = K_{cf} \cdot \varepsilon_{tp} \quad (3)$$

$$K_{cf} = (a_w \cdot E_s) / (D_c \cdot S) \quad (4)$$

表3 整理された実験データのまとめ

試験体番号	試験体名	コア最大応力度 σ_{cp} (kg/cm ²)	コア最大応力度時軸歪 ε_{cp} (micro)	コア最大応力度時横歪 ε_{tp} (micro)	コア終局応力度 σ_{up} (kg/cm ²)	最大耐力後のコアの勾配 E_{up} (t/cm ²)	
シリーズ1	1	F4Y4S30	491	5038	1000	191	-12.9
	2	F4Y4S60	415	3030	836	84	-13.0
	3	F4Y8S30	503	4932	1374	313	-6.5
	4	F4Y8S60	411	3101	999	137	-12.9
	5	F4Y12S30	478	5016	970	412	-5.0
	6	F4Y12S60	439	4942	1537	164	-19.4
	7	F4P-1	442	2399	657	0	-33.0
	8	F4P-2	426	2583	487	0	-119.8
シリーズ2	9	F6Y4S30	735	4880	1586	191	-35.7
	10	F6Y4S60	705	5290	1230	84	-18.3
	11	F6Y8S30	785	5448	1785	313	-13.6
	12	F6Y8S60	753	4948	1386	137	-14.5
	13	F6Y12S30	769	5135	1338	412	-11.0
	14	F6Y12S60	737	5135	1511	164	-13.7
シリーズ3	15	F6P-1	659	2814	2117	0	-10.8
	16	F6P-2	664	2726	662	0	-10.9
	17	F8Y4S30	811	4990	1473	191	-47.8
	18	F8Y4S60	736	4141	1053	84	-14.4
	19	F8Y8S30	878	5148	1047	313	-12.2
	20	F8Y8S60	815	5248	1436	137	-14.1
	21	F8Y12S30	889	5113	1326	412	-13.7
	22	F8Y12S60	827	5141	1552	164	-16.4
	23	F8P-1	-	-	-	-	-
	24	F8P-2	775	2985	974	0	-13.6
25	F8SP30	837	4770	1300	529	-10.7	
26	F8SP60	740	6723	1539	181	-16.7	

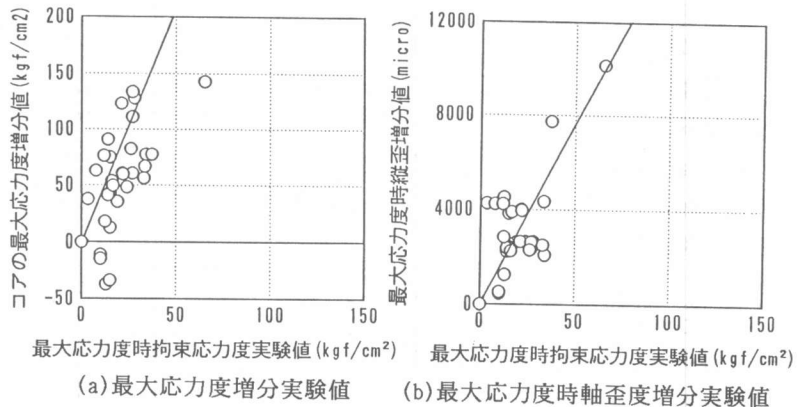


図7 最大応力度時の拘束応力度実験値の最大応力度点に対する影響

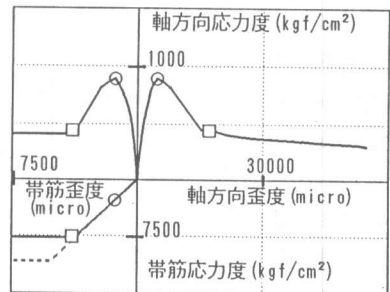


図6 軸方向歪度-軸方向応力度-帯筋歪度-帯筋応力度関係 (F8Y12S30)

ここで、 K_{cf} は拘束剛性で、 a_w は帯筋の一方方向全断面積、 E_s は帯筋のヤング係数、 ε_{tp} は最大応力度時の帯筋の歪度、 D_c はコア長さ、 S は帯筋間隔である。(1)～(3)の3式の独立した未知数は σ_{cp} 、 ε_{cp} 、 σ_{tp} 、 ε_{tp} の4つであり、例えば、 ε_{cp} と ε_{tp} の関係が特定できれば、最大点が評価できることになる。図8(a)は実験で得られた σ_{cp} より式(1)により逆算された σ_{tp} を用いて、式(2)(3)で求めた ε_{cp} と ε_{tp} の比を縦軸に、式(4)で示す拘束剛性を横軸にとって示したものである。ただ

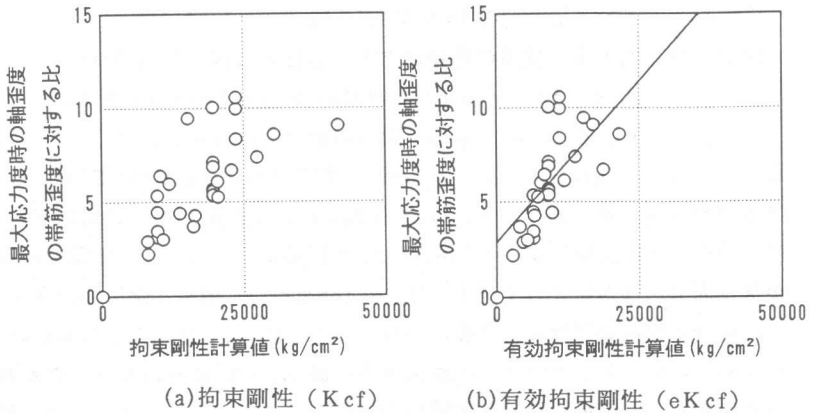


図8 拘束剛性と最大応力度時のポアソン比の関係

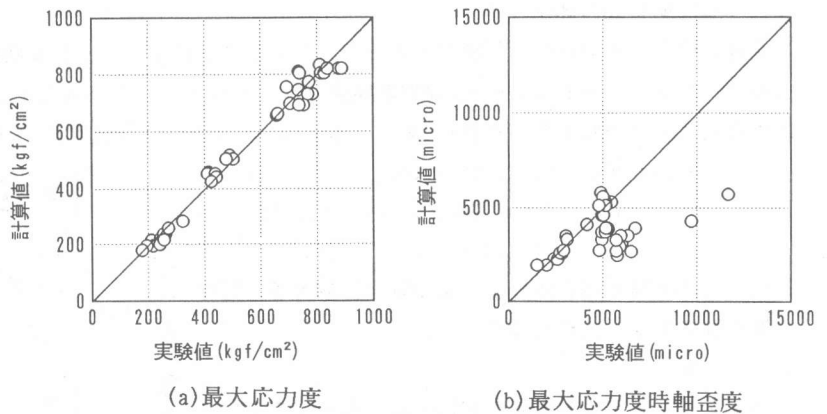


図9 最大応力度点の実験値と計算値の比較

し、実験値による σ_{tp} が負になるものと中間筋のあるものは除いた。縦軸は最大応力度時のポアソン数となるが、図から明らかのように右上がりの傾向を示している。これは帯筋による拘束応力が一部に集中して加わるため、その点での横歪度が拘束コンクリート全体の横歪度を代表していないことを意味している。すなわち、拘束剛性が大きいほどコア全体の平均的な横歪度に対して帯筋の歪度が小さくなっていくと解釈しうる。以上の解釈によると、最大応力度時のポアソン数は同一の拘束剛性でも帯筋間隔 S （あるいは S/D_c ）に比例する傾向があることも推定しうる。そこで、式(5)の形で拘束が不均一であることを考慮した有効拘束剛性 eK_{cf} を定義する。

$$eK_{cf} = K_{cf} \cdot f(\alpha) \cdot g(N_{BUN}) \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \sqrt{\alpha} \quad (\alpha = S/D_c)$$

ここで、 $f(\alpha)$ は集中拘束係数で、 $f(\alpha)$ は帯筋間隔が0で K_{cf} に無関係に0（すなわち集中無し）、 α の増大により大きくなるように決めた。なお、 $g(N_{BUN})$ は中間筋のある場合に拘束集中度が緩和されることを表す関数であり、 N_{BUN} は帯筋による断面の分割数であるが、本実験シリーズでは中間筋のあるものはないため（文献1)の低強度のものには存在する）、とりあえず、 $g(N_{BUN}) = 1$ としておく。従って、(5)式は $eK_{cf} = K_{cf} \cdot f(\alpha)$ となる。

図8(b)は横軸に有効拘束剛性をとり(a)図を修正したものである。これを最小自乗法により推定したのが式(6)であり、図中の実線である。

$$\varepsilon_{cp} / \varepsilon_{tp} = 2.8 + 0.00035 \cdot e \cdot K_{cf} \quad (6)$$

以上より、最大応力度時の拘束応力度 σ_{tp} は式(2)(3)(6)を用いて、

$$\sigma_{tp} = \varepsilon_{cp} / ((2.8 + 0.00035 \cdot e \cdot K_{cf}) / K_{cf} - 0.00015) \quad (7)$$

(ただし、 $0 \leq \sigma_{tp} \leq \sigma_{tup}$ 以外の時は、 $\sigma_{tp} = \sigma_{tup}$)

となる。なお、式(3)は σ_{tp} が 0 から σ_{tup} までで成立し、 σ_{tup} で頭打ちになるために、上記 () 内の制約が生じる。また、 σ_{tup} は本来図 6 の □ 点に対応する終局拘束応力度であるが、ここでは帯筋の降伏応力度を用いた拘束応力度で代用する。なお、本実験例の場合には帯筋の降伏点のかなり前で σ_{tp} が決まっているので、 σ_{tup} を用いた場合と降伏応力度を用いた拘束応力度を用いた場合では結果はほとんど変わらなかった。結局、(7)式より求められた σ_{tp} を式(1)(2)に代入することにより、 σ_{cp} と ε_{cp} が求まる。図 9 (a)(b) に σ_{cp} と ε_{cp} の実験値と計算値を比較したものを示す。 σ_{cp} の計算値は実験値を概ね推定している。また、 ε_{cp} は軸歪度が小さい範囲では精度がよいことが分かるが、 ε_{cp} の軸歪度が大きい領域での精度が悪く今後の検討課題である。

6. 負勾配 E_{up} の評価

E_{up} は拘束応力度 σ_{tp} と相関があると考えた。図 10 は横軸に σ_{tp} を縦軸に実験より得られた E_{up} をとったものであるが、横軸が 0 で無拘束コンクリートと一致し無限大で 0 に漸近する式として最小自乗法で求めたものが式(8)であり、図中にコンクリート強度別に示した。

$$E_{up} = E_u / (1 + 1.26 \cdot \sigma_{tp}) \quad (8)$$

$$E_u = (\sigma_c - 100) / (\varepsilon_c - 0.005)$$

$$\varepsilon_c = 1.37 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_c + 0.00169$$

E_u 、 ε_c は無拘束試験体の負勾配の剛性と最大応力度時の軸歪度であり、文献 3) に従った。

7. 結論

コンクリートおよび帯筋の材料強度の組合せを主なパラメータにして、正方形帯筋により横拘束を受ける鉄筋コンクリート造柱の軸方向加力を行った。また、最大応力度時のポアソン数を拘束が不均一であることを考慮した有効拘束剛性を用いて推定することにより、破壊領域内のコアコンクリートの最大軸応力度、軸歪度および負勾配の剛性の評価式を実験的に求めた。その結果、 σ_{cp} の計算値は実験値を概ね推定し、また、 ε_{cp} は軸歪度が小さい範囲では精度がよかったが、 ε_{cp} の軸歪度が大きい領域での精度が悪く今後の検討課題となった。

[謝辞] 本研究は文部省科学研究費補助金・総合研究(A)(課題番号:01302048、研究代表者:東京大学青山博之教授)により行った。閉鎖型帯筋は住友電工工業(株)より、また、スパイラル筋は高周波熱錬(株)よりいただいた。また、実験およびデータ解析を行うに当たり安藤正貴氏(当時新潟大学卒研究生)と高田義久氏(同)に御協力いただいた。ここに関係各位に謝意を表します。

[参考文献] 1) 加藤大介、羽廣重夫:鉄筋コンクリート造角柱試験体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集1989、pp.287-292、2) 加藤大介:帯筋により拘束された鉄筋コンクリート柱の最大軸応力度の評価法、日本建築学会大会昭和62年、3) 野口博、他:New Rc 総プロ平成元年度報告書、高強度鉄筋分科会報告書、4.構成方程式・有限要素法WGの研究成果、4.1コンクリートモデルの構築、4) Richart, F.E., et. : A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stress, Bulletin No.185, University of Illinois Eng. Experiment Station, Urbana, Nov. 1928

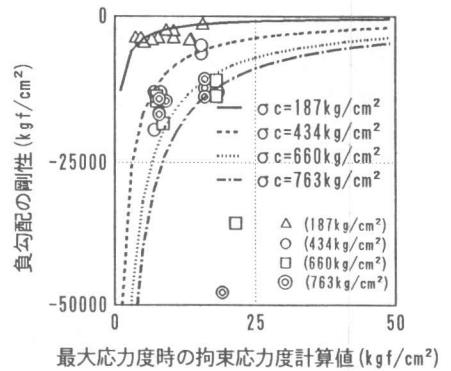


図 10 最大耐力後の剛性の推定