

論文

[2041] 多段配筋を有するコンクリートはりの曲げひび割れ性状

正会員○酒井公生（新潟県）

正会員 丸山久一（長岡技術科学大学）

清水敬二（長岡技術科学大学）

中村裕剛（長岡技術科学大学）

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物が大型化するにつれ、使用する鉄筋も太くなり、原子力発電所の格納容器や液化天然ガスの貯蔵タンクの床スラブなどではスラブ厚が3m~5mになり、D51(異形鉄筋、直径51mm)クラスの鉄筋が通常使用されている。このクラスの鉄筋を用いても、耐力上、軸方向鉄筋は5~6段の過密配筋とならざるを得ず、さらに太い鉄筋(D57、D64)の開発、使用が検討されている。

大型の鉄筋コンクリート構造物の耐力算定において、現行の手法を適用する際、主たる問題点が2つある。1つは曲げひびわれ性状であり、他の1つはせん断耐力である。曲げ耐力の算定方法は構造物の大小にかかわらず、適用可能と考えられるが、使用状態で発生が予想される曲げひびわれ幅は、構造物の大型化に伴って、相似的に大きくなり、鉄筋の発錆等、耐久性上の問題が生じてくる。一方、せん断耐力の算定法に関しては、現行の算定式は、限られた範囲の供試体による実験式であって、多段配筋を有する大型構造物への適用の可否については未知である。

そこで、本研究では、軸方向に多段配筋となる鉄筋コンクリート部材の性状について、①曲げひびわれ幅の算定方法を実験的に検討することとした。実験供試体の寸法は、試験設備の容量から、想定される実構造物の1/2~1/4とならざるを得ず、したがって②スケール効果も検討に加えることとした。

2. 実験方法

供試体形状及び諸寸法と断面形状の一例を図1に、その諸元を表1に示す。断面形状は500mm×200mmの矩形、せん断スパン比 $a/d=2.5$ とし、主たるパラメータは軸方向鉄筋の配筋状態(段数、鉄筋径、鉛直あき)である。なお、主筋の端部定着を完全とするため、供試体外側で主筋を鋼板及びナットにより、固定した。

図2に載荷装置を示す。載荷は変位制御の対称2点集中載荷とし、左右の荷重差をなくすため、荷重分配桁の下に相互をパイプで連結した油圧ジャッキを用いた。また支承には軸方向の拘束をなくし、左右の変形を等しくするため、両端とも

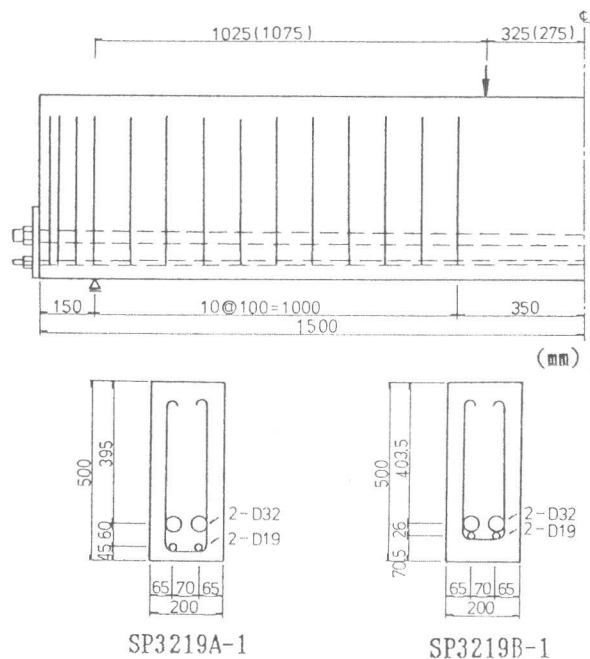


図1 供試体形状及び諸寸法

ローラー支承とした。使用材料においては、コンクリートは呼び強度300 kgf/cm<sup>2</sup>のレデーミクストコンクリートで、その示方配合を表2に示す。また鉄筋はSD345のねじふし異形鉄筋で、その機械的性質を表3に示す。

供試体は気中養生とし、試験時材令は20日～35日であった。

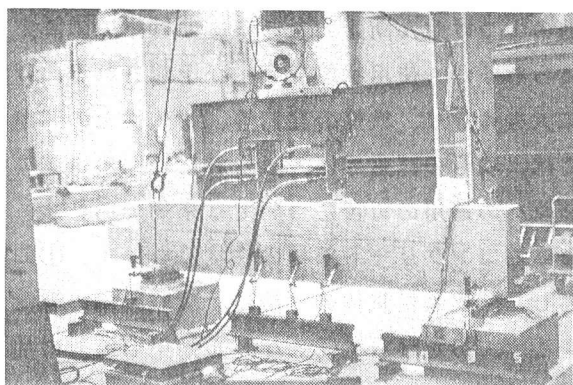


図2 荷重装置

### 3. 実験結果及び考察

表4に耐力に関する実験結果を示す。算定値は、曲げひび割れ発生荷重は弾性計算により、また曲げ耐力は曲げ理論により求めた。またスターラップのないはりのせん断耐力は岡村楡貝式[1]で、スターラップがある場合は、それにスターラップ

の効果を45°トラスモデルで求めて加算した。本実験の供試体は、破壊形式でもわかるように本来はせん断性状が卓越するものであるが、純曲げ区間での鉄筋応力が2000kgf/cm<sup>2</sup>程度までは曲げ性状が支配的であったため、これらの供試体の結果により、以下の曲げひび割れ幅に関する議論を進めることとした。

表1 供試体諸元

供試体名	配筋			はり高 h(cm)	引張鉄筋比* (%)	スターラップ比(%)	
	配筋状態	1段目	2段目				3段目
SP32-0	1段配筋	2-D32	—	—	50	1.85	—
SP32-1	〃	〃	—	—	〃	〃	0.32
SP22-0	2段配筋	2-D22	2-D22	—	〃	〃	—
SP22-1	〃	〃	〃	—	〃	〃	0.32
SP3219A-1	2段配筋	2-D19	2-D32	—	〃	2.64	〃
SP3219B-1	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃
SP2219A-1	3段配筋	2-D19	2-D22	2-D22	〃	〃	〃
SP2219B-1	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃

\*：鉄筋重心位置を有効高さとした引張鉄筋比

表2 示方配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kgf/m <sup>3</sup> )				
		C	W	S	G	AD*
53.5	40.3	289	155	746	1157	3.03

\*：A E減水剤

表3 鉄筋の機械的性質

種別	公称断面 面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
D6	0.32	4000	2.00×10 <sup>6</sup>
D19	2.87	4530	1.95×10 <sup>6</sup>
D22	3.87	4050	1.80×10 <sup>6</sup>
D32	7.94	4000	1.95×10 <sup>6</sup>

表4 実験結果

供試体	f'c kgf/cm <sup>2</sup>	Pcr(tf)*		Pmax(tf)			破壊形式
		算定値	実験値	曲げ	せん断	実験値	
SP32-0	340	7.6	10.3	45.2	23.6	27.1	せん断
SP32-1	370	8.2	8.1	46.0	44.0	45.9	せん断
SP22-0	385	8.0	6.6	44.7	24.0	23.4	せん断
SP22-1	374	8.1	7.6	44.7	43.5	50.8	曲げ
SP3219A-1	308	7.4	7.2	52.3	44.1	55.6	せん断
SP3219B-1	286	7.1	4.1	51.4	43.4	56.7	せん断
SP2219A-1	330	7.8	7.2	57.9	44.7	54.7	せん断
SP2219B-1	326	7.7	10.3	57.5	44.6	59.4	せん断

\*：Mcr=fb·I<sub>g</sub>/yt；fb=1.00f'c<sup>2/3</sup>によった。

### 3. 1 曲げひび割れ間隔

表 5 に各供試体の最大曲げひび割れ間隔  $L_{max}$  を示す。対象とする  $L_{max}$  は等モーメント区間で定常状態になったものとする。定常状態は既往の研究 [2] より、曲げひび割れ発生荷重の 1.5~2.5 倍とし、終局状態付近で発生したひび割れは除外した。算定値は角田の式 [2] を用い、最下段の鉄筋だけを対象とした場合（1 段のみ）、下から 2 段目の鉄筋だけに着目した場合（2 段のみ）、下から 3 段目の鉄筋だけ

表 5 最大曲げひび割れ間隔 (unit:cm)

供試体	実験値	算定値			重心位置
		1 段のみ	2 段のみ	3 段のみ	
SP32-0	28.4	29.2	/	/	29.2
SP32-1	22.0	〃	/	/	〃
SP22-0	23.0	18.4	45.4	/	31.9
SP22-1	17.9	〃	〃	/	〃
SP3219A-1	25.3	19.2	48.1	/	40.4
SP3219B-1	24.2	32.9	43.5	/	40.4
SP2219A-1	13.6	16.7	40.2	64.5	42.8
SP2219B-1	14.7	25.1	35.4	63.2	42.8

けに着目した場合（3 段のみ）及び全鉄筋量が重心位置に存在する場合について計算した。図 3 は  $L_{max}$  の実験値と 1 段目鉄筋のみを対象とした算定値との比較である。これより、 $L_{max}$  には 1 段目の鉄筋が支配的と言える。表 5 より、SP3219A-1 のように 2 段目鉄筋と 1 段目鉄筋との比  $A_{s2}/A_{s1}$  が大きい供試体においては実験値が算定値より大きくなっており、2 段目鉄筋の影響が見受けられる。しかし、SP3219B-1 のように鉄筋の鉛直間隔を小さくして束ねた場合には実験値の方が小さくなる傾向にある。3 段配筋の場合も実験値が算定値を下回っている結果となった。

### 3. 2 曲げひび割れ幅

図 4 の (a)~(e) に荷重とひび割れ幅との関係を示す。ひび割れ幅  $w_f$  は最大ひび割れ間隔  $L_{max}$  と鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s1}$  の積であるというひび割れ理論より、 $w_f$  は  $L_{max}$  と同様な傾向になると考えられる。(a) は 1 段配筋の場合で、実験値と算定値とはほぼ一致している。(b)、(c)、(d) は 2 段配筋の場合で、2 段目鉄筋のみを対象とした算定結果あるいは重心位置を用いた算定値と近い性状を示し、2 段目鉄筋の影響が見受けられる。その影響度は (c)、(d) に示すように 2 段目鉄筋と 1 段目鉄筋との比  $A_{s2}/A_{s1}$  が大きい供試体ほど大きく

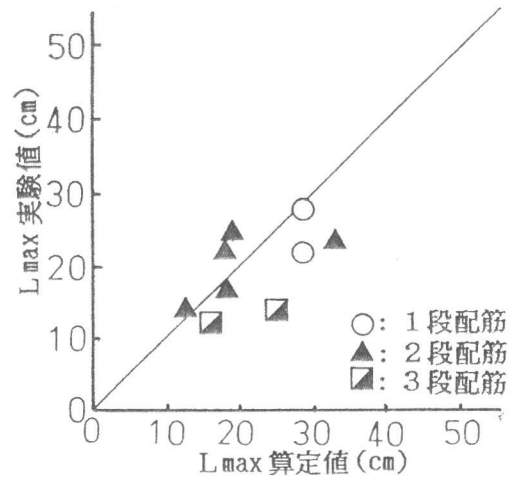


図 3  $L_{max}$  への配筋による影響

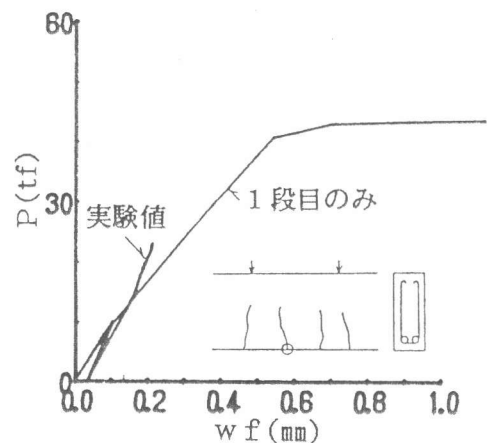


図 4(a)  $P \sim w_f$  曲線 SP32-0

なっている。また束ね鉄筋とした(d)では最大ひび割れ間隔 $L_{max}$ が算定値より小さいわりには、ひび割れ幅 $w_f$ が大きく、配筋間距離が小さくなるとさらに2段目鉄筋の影響が顕著になることがわかる。(e)の3段配筋についても同様な結果となっている。

これらの結果を考えると、コンクリート表面のひび割れ幅 $w_f$ は単に最大曲げひび割れ間隔 $L_{max}$ と鉄筋のひずみ $\epsilon_{s1}$ の積ではなく、図5に示すような、配筋の違いによる断面内のひずみ勾配の影響も受けると考えられる。

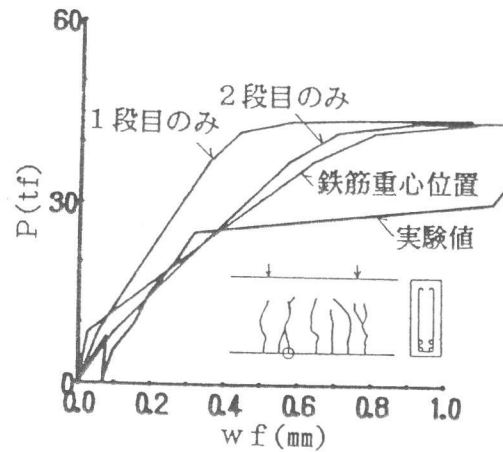


図4(b) P~wf曲線 SP22-1

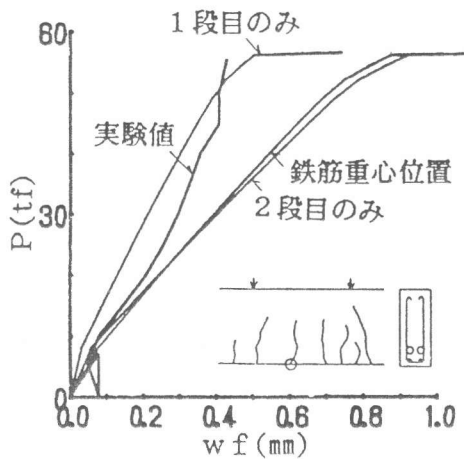


図4(c) P~wf曲線 SP3219A-1

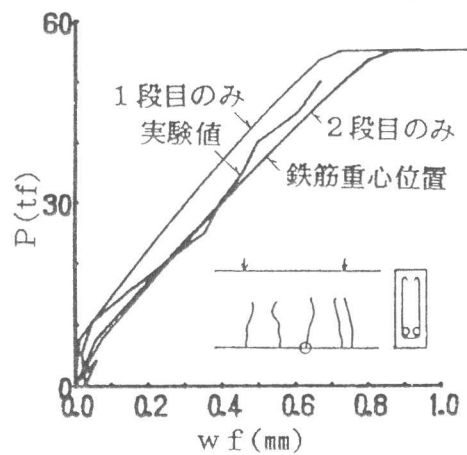


図4(d) P~wf曲線 SP3219B-1

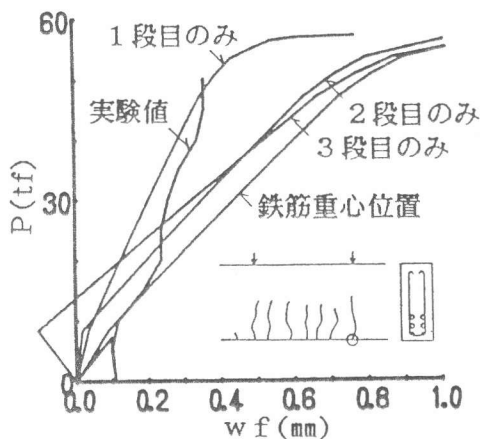


図4(e) P~wf曲線 SP2219A-1

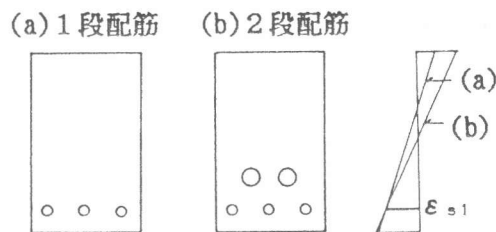


図5 2段目鉄筋の影響

これを検討したのが図6である。最下段の鉄筋応力が $2000\text{kgf/cm}^2$ となる(算定)荷重レベルにおいて、実測の最大ひび割れ間隔 $L_{\text{max}}$ と鉄筋ひずみ $\epsilon_{s1}$ ( $=0.001$ )から求めたひび割れ幅(算定値)、及び実測ひび割れ幅(実験値)を示した。実験値は配筋状態を反映してばらついた結果となっている。

### 3. 3スケール効果

$\epsilon_s$ を一定としても、供試体のスケールが異なると断面内のひずみ勾配も図7のように異なってくる。角田式[2]のモデルは断面内で勾配のないひずみ分布のものを扱っており、供試体寸法が異なると、この差が顕著になると考えられる。そこで既往の研究[3]より実物大の供試体を用いた結果を引用し、スケール効果についての検討を行うこととした。図8に供試体形状及び諸寸法を、表6にその諸元を示す。

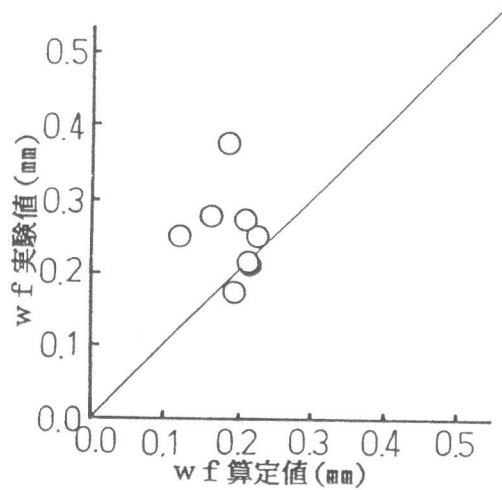


図6 wfへの配筋による影響

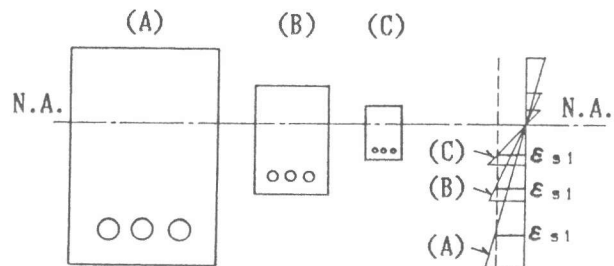


図7 スケールによるひずみ勾配の違い

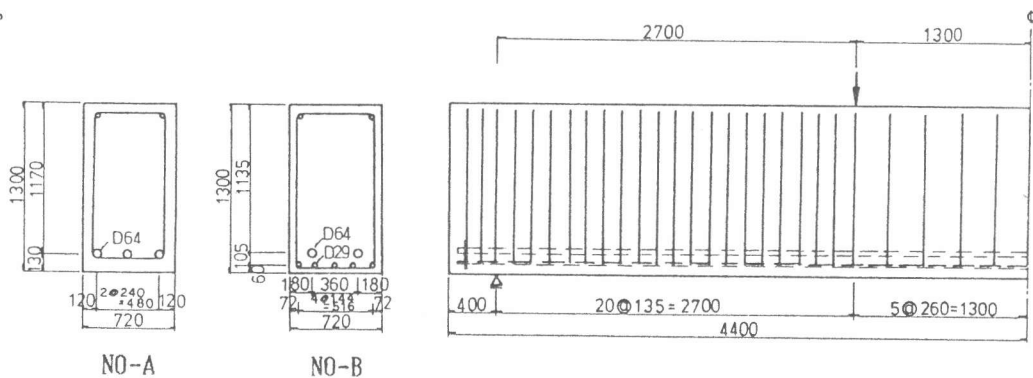


図8 供試体形状及び諸寸法

表6 供試体諸元

供試体名	配筋			はり高 h(cm)	引張鉄筋比* (%)	スターラップ比(%)	せん断スパン比a/d
	配筋状態	1段目	2段目				
NO-A	1段配筋	3-D64	—	130	1.13	0.59	2.31
NO-B	2段配筋	5-D29	2-D64	72	1.12	〃	2.29
NO-C	2段配筋	5-D29	3-D64	72	1.52	0.88	2.32

\* : 鉄筋重心位置を有効高さとした引張鉄筋比

図9にNO-Cの荷重曲げひび割れ幅曲線を示す。wfは1段目鉄筋に寄与していると言える。これは図7に示すようにスケールが大きくなると、断面内のひずみ勾配が小さくなり、一様なひずみ分布に近づいてくるためといえる。

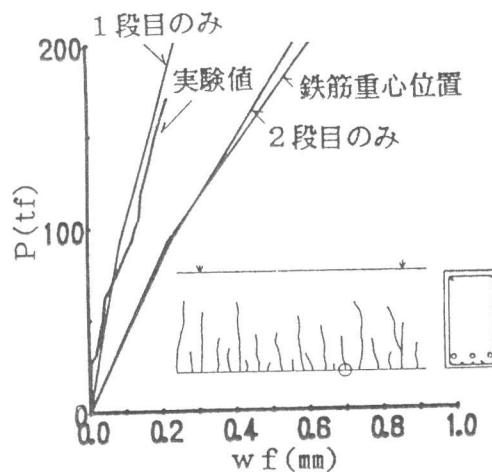


図9 P~wf曲線 NO-C

#### 4. 多段配筋の曲げひび割れ幅算定

以上より、多段配筋の曲げひび割れ幅を算定する場合、供試体のスケールに応じて2段目以上の鉄筋の大きさと鉛直あきの影響及びスケール効果の影響を考慮

する必要がある。その諸影響を考慮した多段配筋の曲げひび割れ幅算定式を以下に示す。この式はひび割れ理論に基づき、1段目鉄筋による算定に多段配筋及びスケール効果の影響を考慮した係数を乗じたものである。Lmaxには鉄筋間隔を考慮した土木学会式[4]を、 $\epsilon_s$ にはコンクリートの引張強度を考慮した角田式[2]を用いた。また $(pe_t/pe_1)^m$ は配筋状態を考慮した係数で2段目鉄筋の大きさと配筋間距離の影響を表している。 $(1/h)^n$ は、スケール効果の影響を示したもので、hは桁高(m)である。スケールと配筋状態の異なる供試体15体により、式中の係数のべき乗m、nを求めた(m=0.348、n=0.342)。供試体SP3219A-1を用いて式(1)で算定したものと角田式、学会式とで算定した結果を比較すると図10のようになる。尚、15体の供試体に適用した結果は実測値と算定値の比で平均値0.982、変動係数23.6%であった。

$$wf_{max} = L_{max} \times \epsilon_s \times \left(\frac{pe_t}{pe_1}\right)^m \times \left(\frac{1}{h}\right)^n$$

$$\text{ここに、 } pe_1 = \frac{As_1}{Ae_1}, \quad pe_t = \sum \left(\frac{As_i}{Ae_i}\right)$$

As<sub>i</sub>: i段目の鉄筋断面積

Ae<sub>i</sub>: i段目の鉄筋に対するコンクリートの有効断面積

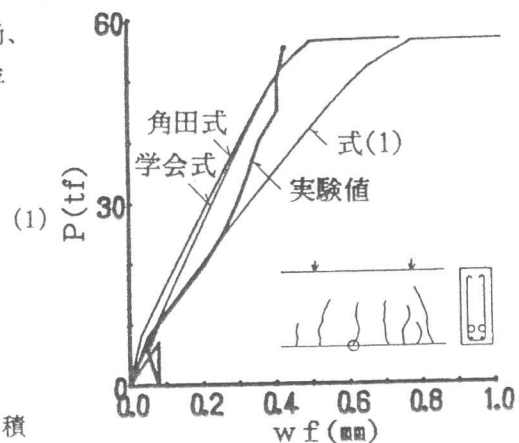


図10 既往の算定式との比較

#### 5. 結論

多段配筋の曲げひび割れ性状は、2段目以降の鉄筋の大きさと配筋間の距離により影響を受ける。また曲げひび割れ幅へ及ぼすスケール効果の影響は大きく、本研究はモデル実験による実験結果の実構造物への適用について検討を要することを示唆するものである。

[謝辞]本研究を進めるに際し、土木学会極太径ねじふし鉄筋設計施工研究小委員会(池田尚治委員長)のご援助及びご指導を賜りました。また、実験の遂行にあたっては大学院生の大友武臣、森山智明、小林俊彦、山本康之諸氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献 1)岡村甫:コンクリート構造の限界状態設計法, 共立出版, 2)角田与史雄:鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリートジャーナルVol.8, No.9, Sept.1970, 3)土木学会: D64極太径ねじふし鉄筋を用いたRC梁の曲げ試験, 極太径ねじふし鉄筋設計施工研究小委員会資料, 1990.11, 4)土木学会:コンクリート標準示方書設計編, 1986.10