

論文

[2164] プレテンション用緊張材として用いた異形鉄筋の定着長さ

金 普漢*1・大野義照*2・鈴木計夫*3・若松達史*4

1. 序

高強度異形鉄筋は常時荷重に対してはひび割れ幅制御のため強度に見合う高応力度は許容されず、その高強度特性を利用できない。そこで利用できない応力分を予め緊張し、プレテンション方式のプレストレストコンクリート（以下PCと略記）

あるいはプレストレスト鉄筋コンクリートの緊張材として用いることによって高強度鉄筋を有効に利用することが考えられる[1],[2]。その場合、異形鉄筋はいわゆる緊張材と普通異形鉄筋の二つの役割を持っている。

本研究では、異形鉄筋を緊張材としてプレテンションPCコンクリートプリズムを作成し、異形鉄筋の定着長さを調べた。実験要因は、コンクリート断面の大きさ、コンクリート強度、鉄筋ふし形状、鉄筋径、鉄筋緊張応力である。また異形鉄筋とコンクリート間のすべりと付着応力関係に基づく付着解析によって鉄筋のひずみ分布や定着長さについて考察した。

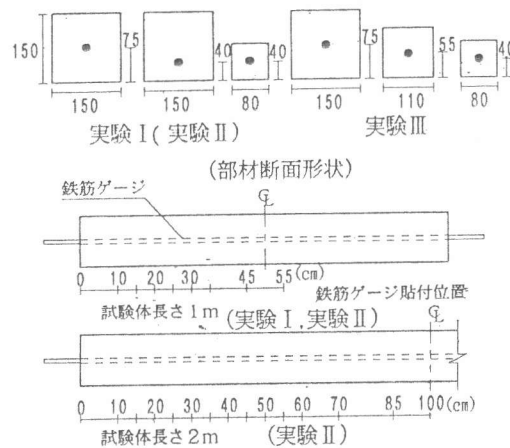


図-1 試験体の形状

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と種類

試験体の形状は図-1に示すようなプリズムで、表-1に試験体の種類を示す。試験体の断面形状は実験Iでは8×8cm、15×15cm、実験IIでは15×15cmで、材長は定着長さが長いと予測される引張力の大きい試験体（II-6, II-8, II-9）は2mとして、その他は1mとした。実験IIIでは断面形状は8×8cm、11×11cm、15×15cmの3種類で、材長はいずれも1.3mである。またコンクリートの目標強度は実験I、IIでは240kgf/cm²で、実験IIIでは300、400、500kgf/cm²の

表-1 試験体の種類

実験区分	試験体 No.	断面寸法	緊張材	目標鉄筋引張応力 (kgf/cm ²)	初引張力 (t)	表面形状	コンクリート調合強度 (kgf/cm ²)
I	I-1	150×150	D13	2000 (偏心)	2.67	横ふし	240
	I-2	150×150	D13	2000	2.67		
	I-3	80×80	D13	2000	2.67		
II	II-1	150×150	D10	1000	0.73	横ふし	240
	II-2			2000	1.41		
	II-3			3000	2.13		
	II-4	150×150	D13	1000	1.28		
	II-5			2000	2.53		
	II-6			3000	3.78		
	II-7	150×150	D16	1000	1.94		
	II-8			2000	4.29		
	II-9			3000	5.56		
	II-10	150×150	D13 (SD 495)	2000	2.53		
III	III-1	150×150	D13	2000	2.67	Xふし	300
	III-2			2000	2.67		400
	III-3			2000	2.67		500
	III-4	110×110	D13	2000	2.67		400
	III-5	80×80	D13	2000	2.67		400
	III-6	150×150	ストラット	2000	1.03		400
	III-7			10000	5.16		300
	III-8			D13	2000		2.67
	III-9	D16	2000	4.02	Xふし		400

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学助教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)
 *3 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)
 *4 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻

3種類とした。

2.2 使用材料

(1) コンクリート

用いたコンクリートは早強ポルトランドセメント、川砂および最大粒径20mmの砕石を使用したもので、表-2に試験時のコンクリートの力学的性状を示す。

(2) 鋼材

鋼材は実験 I、II では異形鉄筋 (SD295-横ふし) D10、D13およびD16を、実験IIIでは異形鉄筋 (SD495-Xふし) のD13、D16を用いて、比較のためにストランド (SWPR7A) および横ふしのD13を用いた。鋼材の力学的性質を表-3および表-4に示す。

2.3 試験体の製作

鉄筋の緊張はH型鋼の緊張用フレームで行い、鉄筋の定着はストランド用定着グリップを用い、鉄筋を緊張した後型枠を組みコンクリートを打設した。脱型は材令2~4日に行い、プレストレス導入時まで湿布養生を行った。鉄筋のひずみは鉄筋の左右両面に貼附したワイヤーストレインゲージ (検長2mm: 以下W.S.Gと略記) によって測定した。W.S.Gは付着欠損面積を少なくするためにふし間に貼り付けし、コーティングもふしを覆わないようにした。

2.4 プレストレスの導入方法

プレストレスの導入は、コンクリート材令1週間後にジャッキで定着用ボルトがゆるむまで再緊張した後、ジャッキの油圧を徐々に抜くことによって行った。

2.5 測定項目

測定項目は鉄筋ひずみ分布および鉄筋のめり込み量で、後者は図-2に示すようにダイヤルゲージにて測定した。なお、実験IIIの試験体III-1~III-3の3体においてはプレストレス導入後5週間継続測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋応力分布

図-3に実験Iにおけるコンクリート打設前、導入前および導入後の鉄筋引張力分布を示す。導入前の引張力は、コンクリートの乾燥収縮によって試験体は収縮し、その分裸鉄筋部分は伸びているため、材端では打設前の初引張応力より大きく中央では小さくなっている。コンクリート断面形状が

表-2 コンクリートの力学的性状

実験区分	調合強度 (kgf/cm ²)	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)
I	240	5	246	25.4	2.34
II	240	6	258	27.2	2.47
III	300	6	275	17.2	2.31
	400	5	389	36.9	2.66
	500	9	495	30.8	2.73

表-3 鋼材の力学的性質

実験区分	鋼材種	断面積 (cm ²)	降伏荷重 (kgf)	最大引張荷重 (kgf)	弾性係数 (kgf/cm ²)
I	D13	1.20	4830	7030	2.1×10 ⁶
	D10	0.71	2870	4100	2.1×10 ⁶
II	D13	1.27	5230	7610	2.1×10 ⁶
	D16	1.99	7710	11140	2.1×10 ⁶
	D13 (SD495)	1.27	7450	9280	2.1×10 ⁶
III	D13 (SD495)	1.27	6800	9080	2.1×10 ⁶
	D13 (SD295)	1.27	4400	6410	2.1×10 ⁶
	D16 (SD495)	1.99	11000	14900	2.1×10 ⁶

表-4 使用ストランドの力学的性質

公称径 (mm)	断面積 (cm ²)	引張強度 (ton)	降伏点強度 (ton)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
9.3	0.516	9.8	9.384	1.95×10 ⁶	7.3

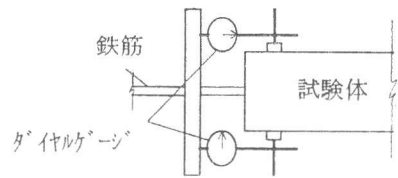


図-2 めり込み量測定装置

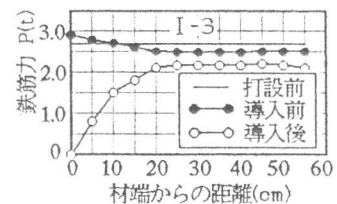
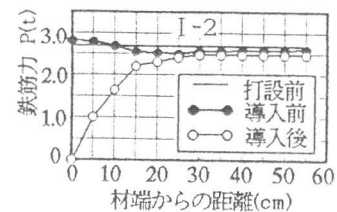
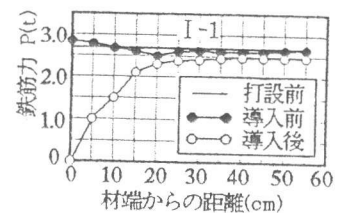


図-3 鉄筋引張力の分布 (実験I)

8×8cmと小さいI-3はコンクリートの弾性変形が大きく、I-1、I-2に比べ導入後の引張応力は小さくなっていることがわかる。

図-4に導入後の実験IIの鉄筋応力分布を初引張応力毎に分けて3つの図に示す。これらの図から鉄筋径による応力分布の差異は少ないことが分かる。図-5に実験IIの鉄筋応力分布を鉄筋径毎に3つの図に示す。これらの図から引張鉄筋応力によって定着長さが大きく異なることが分かる。図-6に実験IIのふし形状の異なる試験体の応力分布を比較して示す。

図-7には鉄筋応力分布を初引張応力に対する比率で示す。この図からも断面の小さい試験体では導入後引張応力の減少が大きくなることがわかる。図-8に実験IIIの導入後5週まで測定した試験体の鉄筋応力分布の経時変化を、初引張応力に対する比率で表示している。鉄筋応力分布形状は時間経過とともに変化しているがその変化量は小さい。140日間プレテンション用緊張材として用いた高強度鉄筋の歪分布を調べた大野ら[3]の研究でも鉄筋の初期緊張応力が2000、5000kgf/cm²でも鉄筋定着部の歪み分布形状は長時間経過後も変わらないことが指摘されている。

3.2 定着長さ

プレテンション方式でプレストレスを導入する場合、定着部では鉄筋応力は漸増し、ある距離に至れば一定の応力になる。この応力の95%に達した

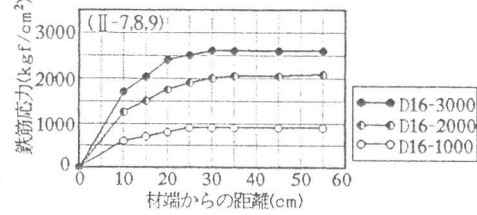
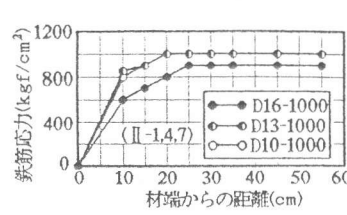
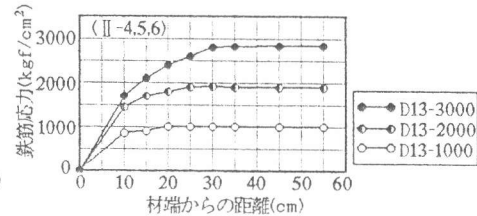
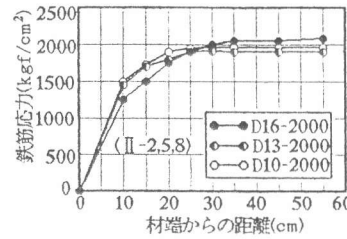
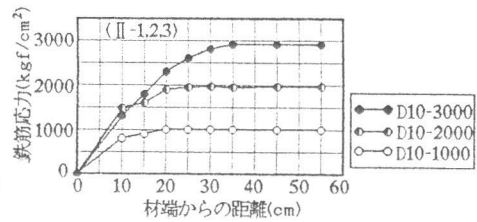
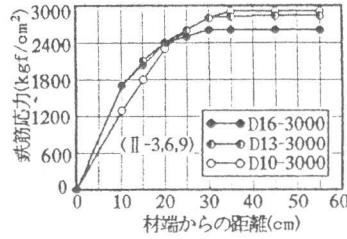


図-4 鉄筋応力分布 (実験II)

図-5 鉄筋応力分布 (実験II)

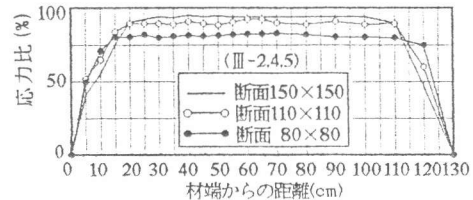
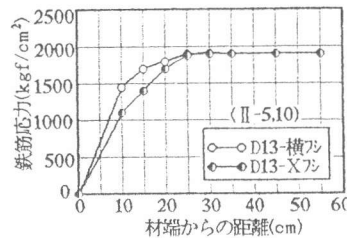


図-6 鉄筋応力分布 (実験II)

図-7 鉄筋応力分布 (実験III)

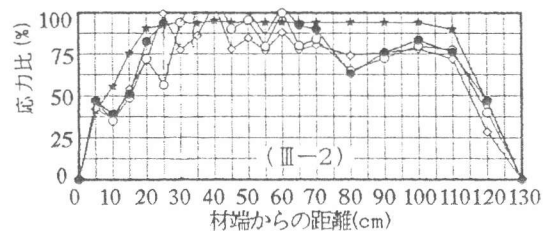
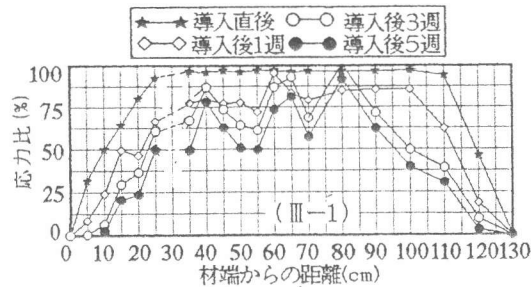


図-8 鉄筋応力分布 (実験III)

点までの材端からの距離を定着長さ[4]とし、定着長ささと諸要因との関係を図一9に示す。なお、図一9には引張力の90%に達した点を定着長さとした場合の値も示している。

(1) コンクリート断面形状による影響 (図一9 (1) 参照)

定着長さは、断面形状が8cm×8cmの場合は平均値で16cm(12.3φ, φ:鉄筋径)、11cm×11cmの場合は21cm(16.2φ)、15cm×15cmの場合は23cm(17.7φ)になり、断面形状が大きくなるにつれて定着長さは増加する。このことはコンクリートの断面積が小さい程、コンクリートに導入される応力が大きくなり、それによってコンクリートの弾性縮みも大きくなり引張力の減少が大きくなること、また鉄筋とコンクリートとの間の機械的なかみ合い力も大きくなることによるものと考えられる。

(2) コンクリート強度の影響 (図一9 (2) 参照)

コンクリート強度 275kgf/cm²では24cm(18.5φ)、389kgf/cm²では24cm(18.5φ)、495kgf/cm²では14cm(10.8φ)となり、コンクリート強度の増加にともない定着長さは短くなる。また、藤井らの実験[5]でもコンクリート強度が329、426、485kgf/cm²の場合、PC鋼材(異形鋼棒)の定着長さは34、28、29φとなり、コンクリート強度の増加によって定着長さが短くなる傾向が示されている。

(3) 鉄筋ふし形状の影響 (図一9 (3) 参照)

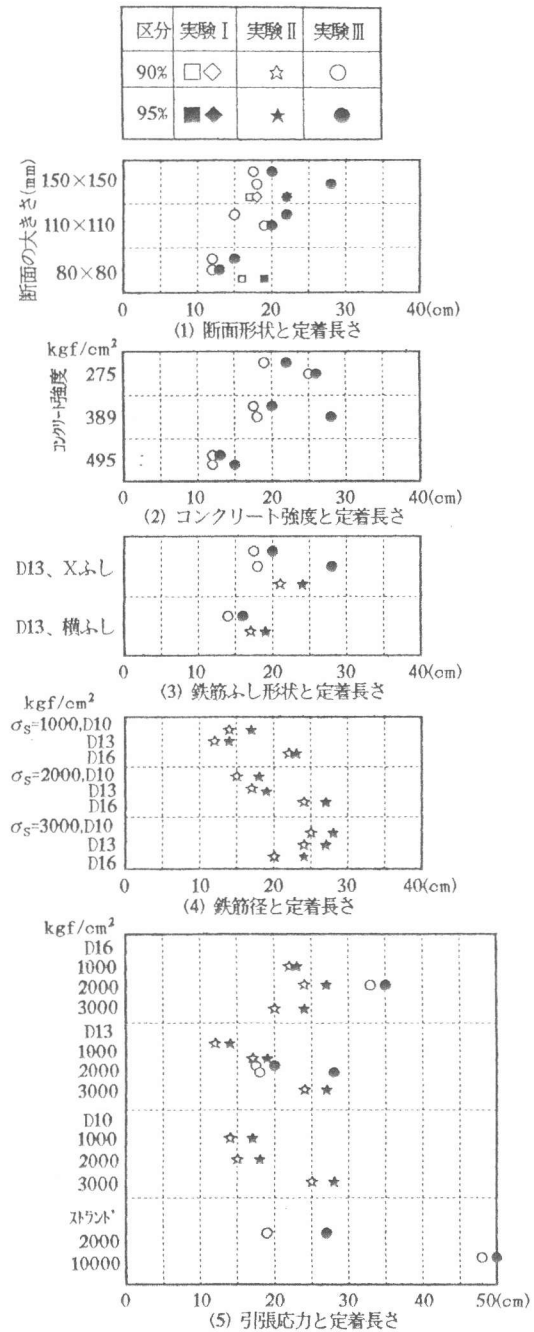
実験Ⅱ(Ⅲ)におけるXふしの定着長さは24cm(24cm)(18.4φ)、横ふしは19cm(16cm)(14.6(12.3φ))であり、定着長さは若干Xふしの方が長くなった。

(4) 鉄筋径による影響 (図一9 (4) 参照)

鉄筋径が大きくなるほど定着長さは長くなっている。これは鉄筋引張応力が一定の場合、鉄筋径が大きくなるほど平均付着強度が減少するからと考えられる。なお、図中のσ_s=3000kgf/cm²の場合、鉄筋径が大きい程定着長さが短くなっているが、後述の解析より求めたD10、D13およびD16の定着長さはそれぞれ24、28、31cmで、D10とD16の実験値にばらつきが生じたものと考えられる。

(5) 鋼材引張応力の影響 (図一9 (5) 参照)

鉄筋の引張応力が大きくなれば、定着長さが長くなる。沼田[6]は異形鉄筋(SD490/D13)において緊張応力レベルが降伏強度 f_{pyk} の45%の場合、定着長さが25φ程度となったことを報告しているが、コンクリート強度が同じ実験Ⅲの異形鉄筋では、緊張応力レベルが39% f_{pyk} (σ_s=2000kgf/cm²)で定着長さは18.4φ(24cm)となった。



図一9 定着長さ

ストランドの場合も緊張応力が2000kgf/cm²の場合は27cm(29φ)、10000kgf/cm²の場合は50cm(53.7φ)となり、緊張応力が大きい方が定着長さが長くなる。緊張応力が10000kgf/cm²の場合の値は坂ら[7]の報告の43φよりやや長くなっている。

4. 鉄筋とコンクリートの間の付着解析

コンクリートと鉄筋間の付着応力(τ)～相対すべり(s)関係を用いた付着解析によって鉄筋とコンクリート間の相対すべり量(めり込み量)および鉄筋ひずみ分布を解析的に検討した。

4.1 付着解析式

プレテンション材の定着長さに関する付着解析は、緊張材の引張応力を解放した状態は、緊張材は引張したままの状態+緊張材に引張力と絶対値の等しい圧縮力を加えた状態と考えられるので、RCプリズム両引材の付着解析と同じ基本式(1)が誘導される。ただし符号は逆になり、抜け出しはめり込みになる。

$$\frac{d^2 S_x(t)}{dx^2} = \frac{1+np}{EsAs} \cdot U \cdot \tau_x(t) \quad (1)$$

ここに、 $n=Es/Ec$ 、 $p=As/Ac$

Es, As, U : 鉄筋のヤング係数、断面積、周長

Ec, Ac : コンクリートのヤング係数、断面積

緊張材とコンクリートのひずみ分布は図-10

のようになり、コンクリートひずみ ϵ_{cx} と緊張材のひずみ変化量($\epsilon_{po}-\epsilon_{px}$)が等しくなった位置が定着長さ l (100%定着)である。抜け出し量は $\int (\epsilon_{po}-\epsilon_{cx}-\epsilon_{px}) dx$ で計算される。

上式において、 $\tau_x(t)=f(S_x(t))$ という $\tau \sim S$ 関係を与えれば、境界条件を与えて上式を解くことによってすべり(めり込み)分布が求まり、それにより鉄筋ひずみ分布が求まる。

4.2 $\tau \sim S$ 関係

プレテンション用PC鋼材においては、一般に緊張応力の解放によって材端では緊張材直径が膨張し、膨張により生じた側圧によって摩擦力が増え、そのことがコンクリートと緊張材の間の付着応力を支配しているとされている[8]。一方異形鉄筋の付着機構は機械的作用、摩擦作用および粘着作用からなり、そのうちで機械的作用が支配的である。異形鉄筋をプレテンション用緊張材として用いた場合、上述のように直径が膨張し、摩擦により付着力は増えることも考えられるが、ストランド等の緊張材に比べ緊張応力は小さく、したがって膨張量は少なく、しかもふしによる機械的作用が支配的であるので、RCプリズムの両引試験結果から得られた $\tau \sim S$ 関係[9]を用いて付着解析を行った。なお、両引試験の場合と本実験の場合は材端における鉄筋とコンクリート間のずれはそれぞれ抜け出しとめり込みとなって表れ、すべりの方向が逆になるが、両者に対して $\tau \sim S$ 関係は同じと仮定した。解析に用いた $\tau \sim S$ 関係は本実験に用いた鉄筋と同じ鉄筋の両引試験[9],[10]から得られた $\tau \sim S$ 関係を完全弾塑性のbi-linearに近似した曲線である。

$$\begin{aligned} \text{弾性域} & \tau = K \cdot s \quad (s < s_y) \\ \text{塑性域} & \tau = \tau_y \quad (s \geq s_y) \end{aligned} \quad (2)$$

K, τ_y は表-5に示す。

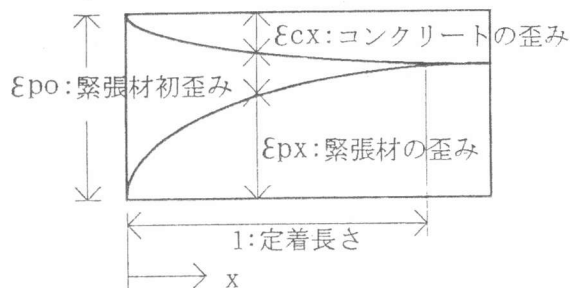


図-10 プレストレス導入後のひずみ分布

表-5 $\tau \sim S$ 関係モデルの特性値

コンクリート強度 (kgf/cm ²)	K' (kgf/cm ² /cm)	τ_y (kgf/cm ²)
300	9800	36.3
400	10400	43.2
500	10600	45

4.3 付着解析結果

(a) 鉄筋歪み分布

図-1 1に実験Ⅲの一部の試験体の鉄筋歪み分布とめり込み量の分布の解析結果を示す。図(a)には鉄筋歪み分布の実験値もあわせて示す。同図によれば実験値にはばらつきはあるものの計算値は実験値をよく捉えている。図(b)には断面の大きさが異なる場合の鉄筋歪み分布の計算値を、図(c)には緊張鉄筋のめり込み量の分布の計算値を示す。

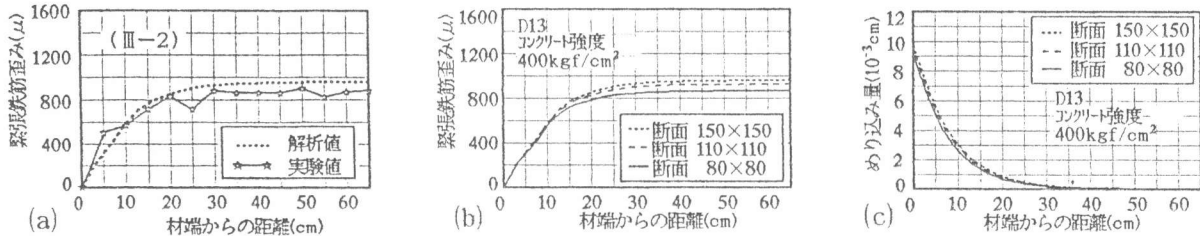


図-1 1 鉄筋歪み及びめり込み量の解析結果

(b) 定着長さ

試験体の定着長さ(95%定着)の実験値と計算値の比較を図-1 2示す。計算値は実験値をよく捉えている。

(c) めり込み量

図-1 3にめり込み量の実験値と計算値を示す。めり込み量に関しても計算値はほぼ実験値を捉えている。

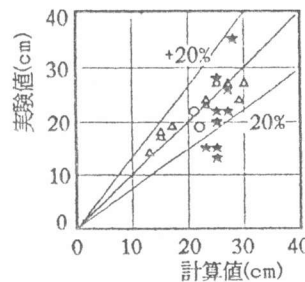


図-1 2 定着長さの実験値と計算値の比較

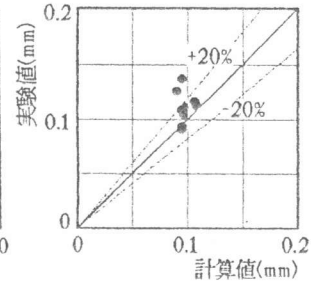


図-1 3 めり込み量の実験値と計算値の比較

5. まとめ

実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) コンクリート断面が11×11cm以上の場合、高強度鉄筋の定着長さは $17.7\phi \sim 12.3\phi$ (ϕ : 鋼材直径) となり、PCストランドの 29ϕ よりかなり小さい値になった(図-9 (1))。
- 2) コンクリート強度が300~500kgf/cm²の範囲ではコンクリート強度の増加に従って緊張鉄筋の定着長さは $18.5\phi \sim 10.8\phi$ と短くなった(図-9 (2))。
- 3) 鉄筋径D13の場合、緊張応力1000, 2000, 3000kgf/cm²に対する定着長さは 10.7ϕ 、 14.6ϕ 、 20.8ϕ で、引張応力の大きさが定着長さに及ぼす影響は大きい(図-9 (5))。
- 4) $\tau \sim S$ 関係モデルを用いた付着解析によって、緊張鉄筋のひずみ分布、定着長さおよびめり込み量を算定することができた(図-1 1、1 2、1 3)。

参考文献

- 1) 鈴木計夫、大野義照、白井徹彦：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻2号、pp.489-494, 1987
- 2) 鈴木計夫、大野義照、鍋沢ほか：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した型枠兼用プレキャスト板に関する実験的研究(その2、合成スラブの持続荷重実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.1047-1048, 1991
- 3) 大野 鑑、清水秀夫、小林洋一、鈴木計夫、大野義照：高強度鉄筋を緊張使用したPRCはりの力学特性、第27回プレレストコンクリート技術協会研究発表会講演梗概集、pp.31-34, 1987
- 4) 渡辺 明：ボンド定着プレテンション部材の鋼線定着に関する実験的研究、土木学会論文集第125号、pp.21-35, 1966.1
- 5) 藤井 学、荒木 毅：プレテンション用PC鋼材の付着性能の評価法について、pp.509-512、セメント技術年報XXVI、1972
- 6) 沼田晋一：プレテンションプレストレス力の付着伝達算式について、セメント・コンクリート論文集 No.46、pp.762-767, 1992
- 7) 坂、六車、森田：ストランドの定着時の付着効果に関する実験的研究、材料試験、第8巻、第69号、昭和34年6月(1959年6月)
- 8) 日本建築学会：プレレストコンクリート設計施工規準・同解説、pp.222
- 9) 鈴木計夫、大野義照、李 振宝、太田崇士：持続荷重下における異形鉄筋の付着応力～すべり関係、コンクリート工学年次講演論文集、pp.51-56, 1992
- 10) 鈴木計夫、大野義照、李 振宝：常時荷重域において鉄筋コンクリート部材の付着解析、日本建築学会近畿支部研究報告集第32号、pp.45-48, 1992.6