

[2029] 繰り返し荷重を受ける定着鉄筋の抜け出しに関する 実験的研究

正会員 ○毛呂 眞（八戸工業大学工学部）

正会員 小川淳二（東北大学工学部）

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が地震時のような大変形繰り返し加力を受けると、動的耐震解析上重要な復元力特性が複雑に変化するが、その原因の一つは柱・はり接合部あるいはフーチングからの定着筋の付着劣化による抜け出しによって生じる回転変形によるものと考えられる。

本研究は、端部定着域を模擬した鉄筋引抜き型試験体について小変形から鉄筋降伏後の大変形にいたるまでの引張圧縮多数回繰り返し加力実験結果をもとに、大変形繰り返し加力を受ける定着鉄筋の抜け出し挙動を解明することを目的としている。

本報は実験結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

図1に試験体の諸元を示す。試験体は断面30cm x 44cmのコンクリート直方体の中心に、横筋の異形鉄筋D19を水平に配した鉄筋引抜き型試験体である。試験体は鉄筋定着長さが鉄筋径の20倍(20d)、30倍(30d)および50倍(50d)の三種類である。

定着鉄筋D19には鉄筋歪分布を測定するため歪ゲージを貼ってある。歪ゲージ間隔は30d、50dのものは約102mm（8節）、20dのものは約89mm（7節）である。図1(b)にその詳細を示す。

加力端部分の詳細を図1(c)に示す。アクチュエーターとの連結のための鉄板と定着開始部までの裸鉄筋（長さ17.4cm）には厚さ12mmの鉄板で補剛し、加力端の鉄筋抜け出し量測定への裸鉄筋の伸びの影響を無視出来る様にしてある。加力端の鉄筋抜け出し量測定は図1に示す抜け出し量測定用鉄板位置で測定する。

コンクリートはスランプ16cmの現場練り普通コンクリートで、骨材最大粒径は25mmである。コンクリートの打設は鉄筋横置きである。異径鉄筋D19の機械的性質を表1に示す。コンクリートの圧縮強度、割裂強度及びヤング係数(E_{1/4})を試験体ごとに表2、3に示す。

2.2 加力方法と測定方法

加力装置の概略を図2に示す。試験体固定用治具の中におさめた試験体の加力端頂部をアクチュエーターに連結し、アクチュエーターを作動させ鉄筋に繰り返し軸方向力を与える。

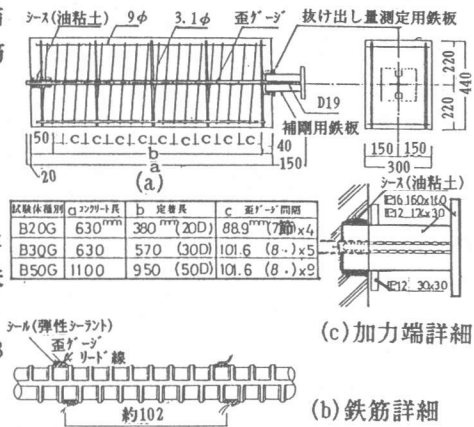


図1 試験体概要

表1 鉄筋の力学的性質

降伏荷重 (ton)	降伏強度 (kg/cm ²)	引張耐力 (ton)	引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)	弾性係数 (kg/cm ²)
10.6	3693	15.8	5505	26	2.255 × 10 ⁸

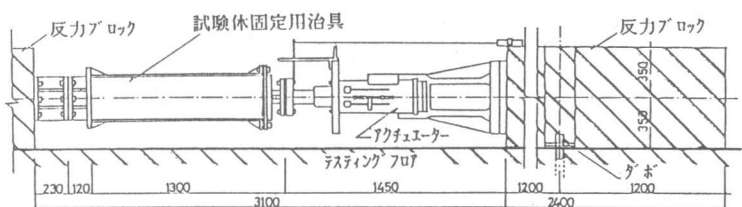


図2 加力装置

測定量は定着筋軸方向荷重、加力端および自由端鉄筋抜け出し量それに鉄筋歪である。抜け出し量はバネ用リン青銅板にストレインゲージを貼ったカンティレバー型変位計で測定した。

実験は、終局状態に至るまでの一方向引き抜き実験と、図3に示すごとく加力端抜け出し量0から所定の一定最大引張荷重を振幅とする繰り返し加力実験である。繰り返し加力のパターンは図3に示すごとくA、B、C、Dの4パターンとした。加力段階は鉄筋の引張降伏荷重($P_y=10.6\text{ton}$)をもとに降伏前では8tonと10tonの二段階、降伏後は11ton、12tonそれに14tonの三段階で200回あるいは100回の繰り返し実験を行った

鉄筋応力度は、加力端 S_0 では作用荷重を鉄筋の公称断面積(2.87cm^2)で割って算出した。 S_1 、 S_2 、 \dots では、測定された鉄筋歪から求めた。ただし、鉄筋のヤング係数は異形鉄筋D19の引張試験の値($2.255 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$)をとった。付着応力度は図4に示す方法で算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 一方向引張実験

表2に各試験体の鉄筋引張降伏時と破壊時の荷重値と抜け出し量、破壊形式、鉄筋破断位置及び塑性進展域等を示す。図5(a)、(b)に引抜き力-加力端鉄筋抜け

表2 実験結果一覧表(一方向引抜き加力)

定着長	試験体番号	コンクリート 4周強度			降伏時		最大耐力 ton	破壊時			破壊形式	破断位置 cm	塑性進展 # cm
		F_c kg/cm ²	σ_t kg/cm ²	$EI/4$ kg/cm ²	P_y ton	S_y μ		P ton	S mm	S_f μ			
50D	B50G-SM-1	188	24.4	2.710	10.5	356	17.0	15.6	40.4	—	破断	約4	20
	B50G-SM-2	158	19.4	2.3	10.7	326	16.6	13.4	64.0	—	破断	4	30
	B50G-SM-3	174	19.4	2.0	10.6	275	16.8	13.0	66.6	—	破断	10	40
30D	B30G-SM-1	211	23.2	2.6	10.4	304	17.2	14.0	48.4	103	破断	10	30
	B30G-SM-2	195	20.7	2.3	10.8	258	16.4	15.9	54.5	—	破断	10	30
	B30G-SM-3	221	24.3	2.5	10.8	330	16.6	16.3	32.4	—	破断	2.6	20
20D	B20G-SM-1	214	24.2	2.9	10.7	243	16.2	(3.8)			剥離		40
	B20G-SM-2	222	24.7	2.2	10.8	259	17.1	12.6	48.9	720	破断	9	30
	B20G-SM-3	236	25.6	2.4	10.6	250	16.5	13.9	46.5	150	破断	9	30

表3 実験結果一覧表(繰り返し加力)

定着長	試験体番号 (加力パターン)	加力ステージ	コンクリート			繰り返し回数	一方向加力耐力	SLoop 1 (mm)	SLoop n (mm)	SLoop n / SLoop 1	降伏荷重 (cm)	自由端変位 (μm)
			F_c kg/cm ²	σ_t kg/cm ²	$EI/4$ kg/cm ²							
20D	B20G-SR1-A01	8	223	28.8	2.45	200		0.110	0.130	1.18		
		10				100		0.200	0.248	1.24		
		12				100		0.561	1.36	2.43	10	微小
		14				83	鉄筋破断	1.99	5.37	2.70	20	32,-26
	B20G-SR1-B01	10	227	27.5	2.38	200		0.234	0.320	1.29		
		11				100		0.336	0.643	1.91	—	5
		12				100		1.150	1.87	1.63	—	11,-17
		M				鉄筋破断	16.0					
	B20G-SR1-B02	10	200	20.3	2.43	200		0.291	0.370	1.27		
		12				100		0.894	1.36	1.52	9	微小
		M				鉄筋破断	16.4					
B20G-SR1-C02	12	223	20.8	1.95	200		0.664	1.194	1.80	9	8,-6	
	14				100		2.22	4.81	2.18	18	20,-15	
	M				鉄筋破断	15.3						
B20G-SR1-C03	12	200	24.1	2.76	200		0.764	1.730	2.23	14	54,-26	
	14				34		3.11	3.20	1.03	18	157,-15	
	M				鉄筋破断	15.5						
30D	B30G-SR1-A01	8	250	26.9	2.68	200		0.173	0.224	1.29		
		10				100		0.282	0.313	1.11		
		12				100		0.428	1.018	2.38		
		14				100		1.741	3.65	2.09	10	
	M	鉄筋破断	15.5									
	B30G-SR1-B01	10	242	22.4	—	200		0.255	0.363	1.42		
		11				100		0.470	0.864	1.84		
		12				100		1.01	1.27	1.27		
		14				50		3.12	4.12	1.32	10	
	M	鉄筋破断	17.0									
	B30G-SR1-B02	10	172	25.5	1.92	200		0.305	0.441	1.46		
		12				100		0.968	1.497	1.55	10	
14		75				鉄筋破断	2.36	4.60	1.96			
B30G-SR1-C01	12	225	22.4	2.76	200		0.69	1.37	1.98			
	16				10	鉄筋破断				20	-38	
B30G-SR1-C02	12	239	29.4	2.13	200		(0.396)	1.427	(4.82)	10		
	M				鉄筋破断	16.5				30		
B30G-SR1-D01	12	220	27.2	2.92	313	鉄筋破断	0.948	1.876	1.98	10	-17	
50D	B50G-SR1-A01	8	168	19.8	2.26	200		0.210	0.268	1.28		
		10				100		0.304	0.338	1.11		
		12				100		0.931	1.32	1.52		
		14				36	鉄筋破断					
	B50G-SR1-B01	10	180	21.2	2.48	200		0.321	0.460	1.43		
		11				100		0.788	1.838	2.33		
		12				100						
		M				鉄筋破断	16.4					
	B50G-SR1-B02	10	181	21.4	2.13	200		0.227	0.298	1.31		
		12				10	鉄筋破断					
	B50G-SR1-C01	12	174	19.6	2.26	200		0.888	1.561	1.76		
		14				40	鉄筋破断	2.64	4.21	1.60		
B50G-SR1-C02	12	160	21.4	2.05	200		(0.450)	1.95	(4.34)			
	14				79	鉄筋破断	2.89	4.86	1.68			

出し量曲線（P-Δ曲線）を示す。図(b)は(a)の抜け出し量2mm程度までの部分を拡大したものである。図6、7(a)(b)(c)は鉄筋応力度分布および付着応力度分布の各定着長ごとの代表例である。図8(a)(b)は各定着長ごとの付着応力度-すべり曲線（ τ -S曲線）の例である。(c)は各試験体の加力端での τ -S曲線のみを示した。図中model曲線は森田博士の τ -S曲線の近似式である¹⁾。

①各試験体の破壊形式はB20G-SM-1が鉄筋の抜け出しであった以外はすべて鉄筋の破断であった。鉄筋の塑性域は引抜き力約13.5tonで加力端から約10cm、約16tonで約20cm、最終的には約30cm程度内部まで進展したことが歪ゲージの破損の状況から推定される。

②P-Δ曲線は、鉄筋の抜け出したB20G-SM-1を除けば、鉄筋が破断に至るまで、定着長さの違いにかかわらずほぼ同様な曲線となっている。その曲線は鉄筋の降伏荷重まで徐々に剛性低下するソフトスプリング型の曲線をたどるが、鉄筋の降伏荷重後、急激に剛性が低下し、抜け出し量の増加にともない荷重が漸増し、抜け出し量約8mmでほぼ最大耐力に達する。以後ほぼ一定の耐力で抜け出しが進行し、抜け出し量約45mm程度で破断にいたっている。鉄筋の降伏後、鉄筋の降伏棚のような塑性フローは認められない。鉄筋の降伏時加力端抜け出し量は約0.3mmである。自由端抜け出し量は鉄筋降伏程度までは全試験体ともほぼ0であるが、B30D-SM-1と定着長20dのものは最大耐力に近づくとも鉄筋の移動が測定され始めた。

③図6、7を見ると鉄筋降伏直後までは同一荷重での各応力分布は定着長の違いにかか

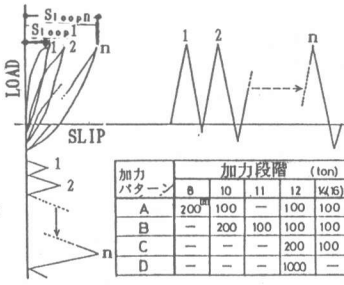


図3 繰り返し加力パターン

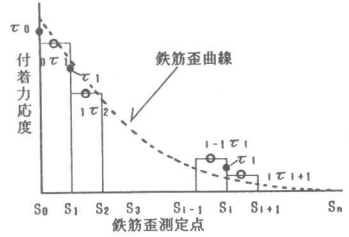


図4 付着応力度算出法

$$\tau_{i+1} = \Delta P / \Delta L \cdot \psi \quad (i=1 \sim n)$$

$$\tau_i = 1/2 \cdot (\tau_{i-1} + \tau_{i+1})$$

ただし

- $\tau_0 = 0$
- τ_{i+1} : $S_i \sim S_{i+1}$ 間の平均付着応力度
- ΔP : $S_i \sim S_{i+1}$ 間の鉄筋応力差
- ΔL : $S_i \sim S_{i+1}$ 間の距離
- ψ : 鉄筋周長
- τ_i : 歪測定点の付着応力度

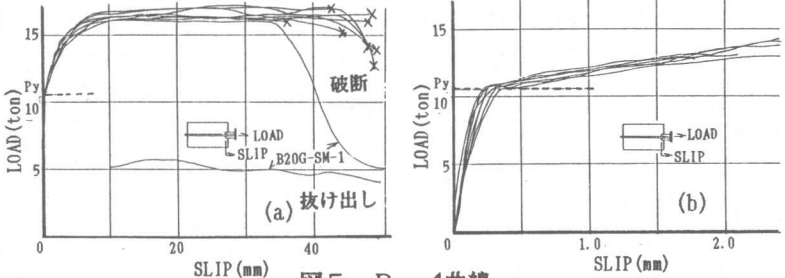


図5 P-Δ曲線

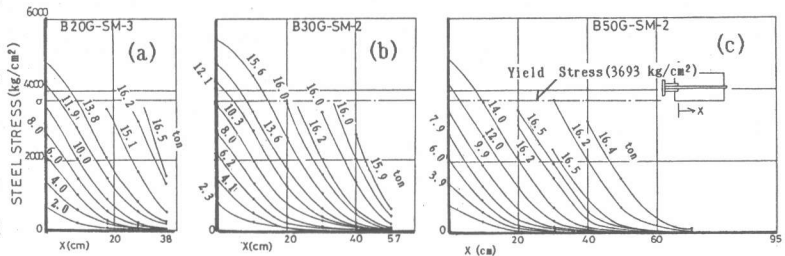


図6 鉄筋応力度分布図

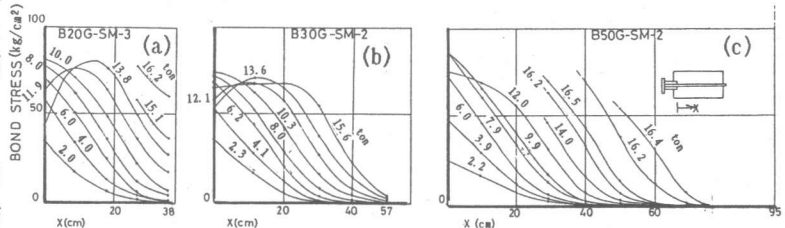


図7 付着応力度分布図

ならずよく一致して
おり、その埋め
込み長さ内で附着
応力は0に収束し
ているが、引抜き
力が最大耐力に近
づくにつれて20d、
30dでは附着応力

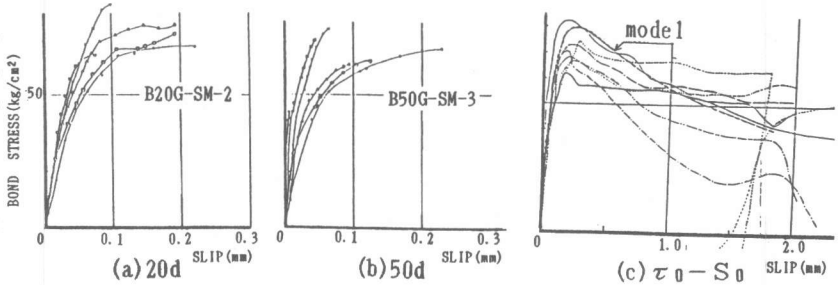


図8 τ-S曲線

は0に収束せず、自由端近傍でもかなりの値を示していることがわかる。特に20dのものは初期の応力状態の時からその傾向が現れている。このことは定着長20dが十分な定着完了長さでないことを示している。

④τ-S曲線の剛性は加力端から深いものほど大きくなる傾向にあるがそれほど顕著でない(図8(a)(b))。大すべり量にいたるまでのτ-S曲線は、ばらつきがあるがmodel1曲線と似た傾向にある。

3. 2 繰り返し加力実験

表3に実験結果一覧表を示す。図9は各繰り返し回数における所定最大引抜き力時での加力端抜け出し量の推移を示した図である。図中カッコの数値は各段階の最終回の抜け出し率(図3に示した S_{loop1} と S_{loopn} の比 S_{loop1}/S_{loopn})である。図10は加力パターンBの加力段階10ton200回の場合のP-Δ曲線の推移、図11は加力パターンCの加力段階12ton200回の場合、そして図12は加力パターンBの加力段階10ton200回と加力段階12ton100回の場合を示す。図13、14、は繰り返し回数200回までの所定の最大引張荷重時における鉄筋応力度分布と附着応力度分布の推移を求めた結果の一例を示したものであり、図13は加力パターンBの加力段階10ton、図14は加力パターンCの加力段階12tonのものである。

それぞれの図は定着長さ別に20dを(a)、30dを(b)、50dを(c)に示した。図15は30dのものについて処女載荷から200回目の各荷重レベルにおける鉄筋応力度分布と附着応力度分布の推移を求めた結果の一例を示したものである。図16は繰り返しτ-S曲線の例である。

①各試験体の繰り返しによる鉄筋の抜け出しの状況は、全繰り返し加力段階に対して鉄筋の抜け出し破壊は生じなかった。14ton(あるいは16ton段階)の繰り返しを行ったものは、B30G-SR1-B01、B20G-SR1-C02以外は予定繰り返し回数100回前に鉄筋が破断した。繰り返し後、鉄筋が破断に致らなかったものは一方向引張を行った。その結果、30dと50dのものは鉄筋が塑性疲労破断し、20dでは鉄筋が抜け出した(B20G-SR1-B01、B02)。なお、破断箇所はすべて加力端

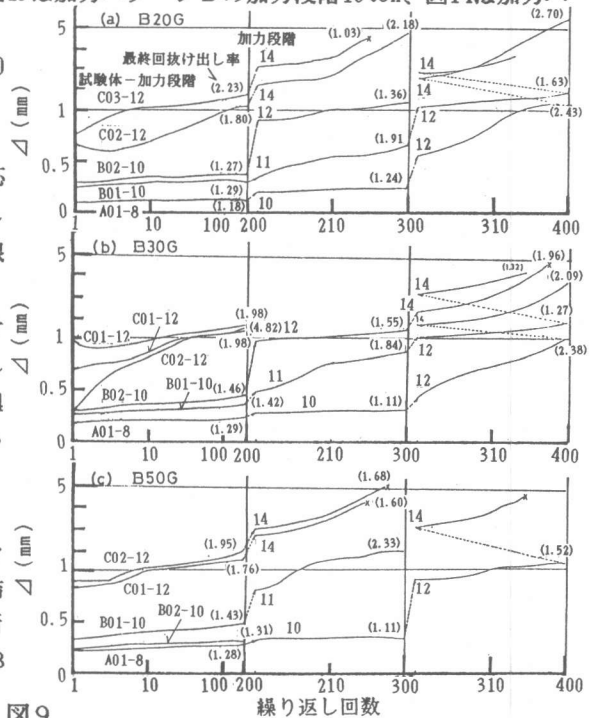


図9 所定最大引抜き力時加力端抜け出し量-繰り返し回数

受けていた。

②繰り返しによる鉄筋の塑性域の進展は歪ゲージの鉄筋降伏歪を越える進展状況から、加力段階12tonで約10cm、14tonで約20cmと推定される。

③自由端の変位は20dの12tonの段階で約0.03mm程度、14tonで約0.15mm程度計測されたが、それ以外はほぼ0であった。

④定着長さの違いにかかわらず、繰り返しに対する抜け出し量の推移の傾向は、三者ともよく類似している(図9~12)。抜け出し率で見ると、初載荷繰り返し各荷重段階200回では、鉄筋引張降伏前の8tonで1.18~1.29、10tonで1.29~1.46、鉄筋引張降伏後の12tonで1.76~2.23(B30-SR1-C02-12は除いてある)となっている。初載荷繰り返し後の各段階100回では、10tonで1.11~1.24、11tonで1.84~1.91、12tonで1.27~2.43、14tonで2.18~2.70となっている。

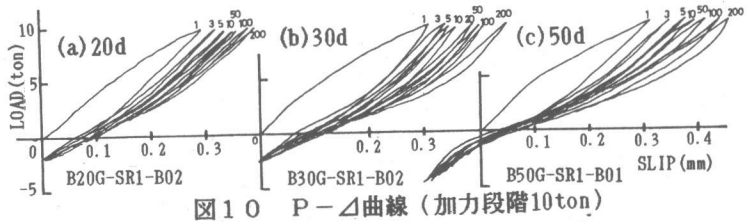


図10 P-Δ曲線(加力段階10ton)

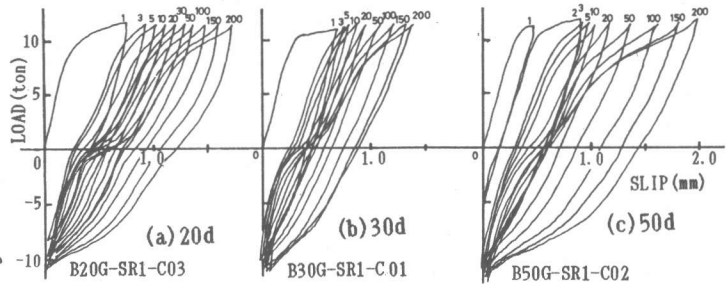


図11 P-Δ曲線(加力段階12ton)

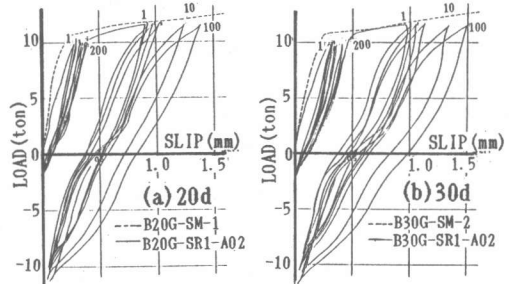


図12 P-Δ曲線(加力段階10~12ton)

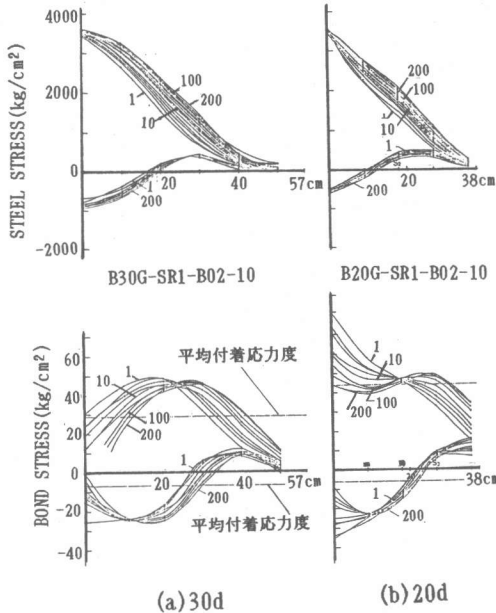


図13 鉄筋応力度および付着応力度分布図(加力段階10ton)

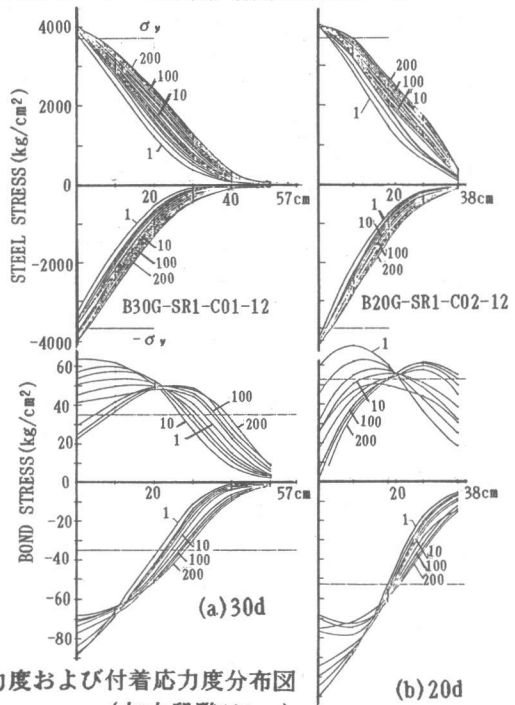


図14 鉄筋応力度および付着応力度分布図(加力段階12ton)

また、繰り返し回数10回で抜け出し量の増加は最終回数での増加分の40~50%となっている。

⑤ P- Δ 曲線の繰り返しループは、鉄筋引張降伏前の繰り返しでは一回目のループは大きいですが、2回目以後は急激に細り、図10のようなループ面積の少ないそして極ゆるい逆S字型のループを描く。鉄筋引張降伏後の加力段階では2回目以後もかなり大きな面積を保ちその形状はほぼ紡すい型に近く、鉄筋のパウジンガー効果の影響が大きい。どの段階においても顕著なスリップの傾向は見られない。

⑥ 引張側の鉄筋応力度分布は繰り返し10回目で最終回の増加量の約50%に達し、20dの場合は自由端側にかなりの鉄筋歪が生じるようになるのがわかる。付着応力度分布は繰り返しとともに加力側の応力が減少し自由端側の応力が増加していき、分布の最大値の位置が自由端側に移動していく、この傾向は20dのものが顕著であり、最終回では最大値はほぼ自由端側に移動している。圧縮側の鉄筋応力度分布は繰り返しにより内部鉄筋の歪が増加するが、その割合は引張の場合ほど大きくなく、20dの場合でも自由端側の鉄筋歪があまり生じない。従って、圧縮側の付着応力度分布の最大値は、繰り返し加力を受けても加力端側に位置し繰り返しによる付着劣化の傾向が少ない。

⑦ 繰り返し履歴全体にわたる各分布を精度よく連続的に捉えられた。

⑧ 図16を見ると繰り返し τ -S曲線は面積を描かない極端なスリップ型ループであることがわかる。

4. 結論

本実験で長い定着鉄筋の抜け出し挙動を精度よく捉えることができ、(1)鉄筋降伏後の200回程度の繰り返しに対して十分な定着長は鉄筋径の30倍以上を必要とする。(2)繰り返し200回程度での加力端鉄筋の抜け出し率は鉄筋降伏前での荷重ではただか1.3程度であるが、降伏後は2.5を越す。(3)鉄筋の塑性域の進展に与える繰り返しによる付着劣化の影響は無視できない。(4)繰り返しP- Δ 曲線は鉄筋降伏前はほとんどループを描かないが、降伏後は大きな紡すい形のループを描く。そして、ともに顕著なスリップ性状は示さない。；等の知見が得られた。

本報告には紙面の都合で解析結果を述べる事が出来なかった。次回にゆずりたい。

参考文献 1) 六車、森田、富田；鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究（I 付着応力分布について）-（II）、日本建築学会論文報告集、第132号、昭和42年2月

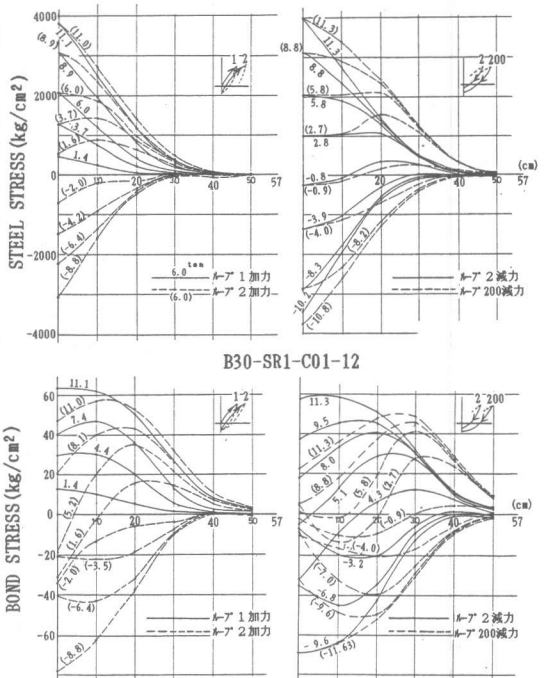


図15 鉄筋応力度および付着応力度分布図 (分布の履歴の例)

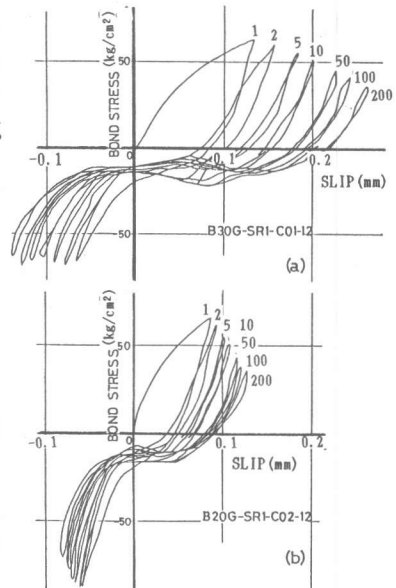


図16 繰り返し τ -S曲線の例