

[104] 太径ねじ鉄筋 D51 (SD40) の機械的定着法に関する実験的研究

山崎 章 (住友金属工業 第三製品技術部)
 正会員 白川 潔 (住友金属工業 中央技術研究所)
 正会員 ○ 小山 清一 (住友金属工業 中央技術研究所)

1. まえがき

近年、原子力発電所、LNG地下タンクなど構造物の大型化に伴ない、高強度の太径鉄筋が使用される傾向にあるが、配筋が過密となる場合が多く、在来の折曲げ定着法では施工が非常に煩雑となるため、簡易な定着法の開発が望まれている。この一つに、ねじ鉄筋の特徴を生かした、定着板とナットによる機械的定着法があるが、高強度太径鉄筋 D51 (SD40) の定着に必要な埋込み長さ、定着部耐力及び定着機構などの点については不明な点が多い。

そこで、定着板を用いた機械的定着法の定着性能を、外柱における柱・梁接合部を対象に、太径ねじ鉄筋 D51 を用いて実験的に検討したので、その結果につき報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類

供試体の形状寸法、種類及び鉄筋の機械的性質を、図1、表1、2にそれぞれ示す。機械的定着における定着長さは $10d$ (d : 梁主筋の直径)、 $15d$ の2種類とし、比較用の折曲げ定着における定着長さは $40d$ とした。定着板は柱部の中心線を越えて埋込まれている。また、それぞれの供試体につき、接合部補強筋比を 0.64 、 1.27% の2種類とした。

定着板の寸法は $150 \times 15 \text{ mm}$ で、これをナットにより固定した。折曲げ定着における曲げ内法半径は $5d$ で、上端筋(折曲げ起点までの定着長さ $l' = 9.2d$) 下端筋 ($l' = 6.5d$) とともに同一方向に折曲げた。なお、柱・梁部にはせん断補強筋として、D16を 100 mm ピッチに配筋している。

2.2 実験方法

載荷方法及び載荷パターンを図2に示す。加力には押引兼用の油圧ジャッキを用い、計算上の梁降伏荷重

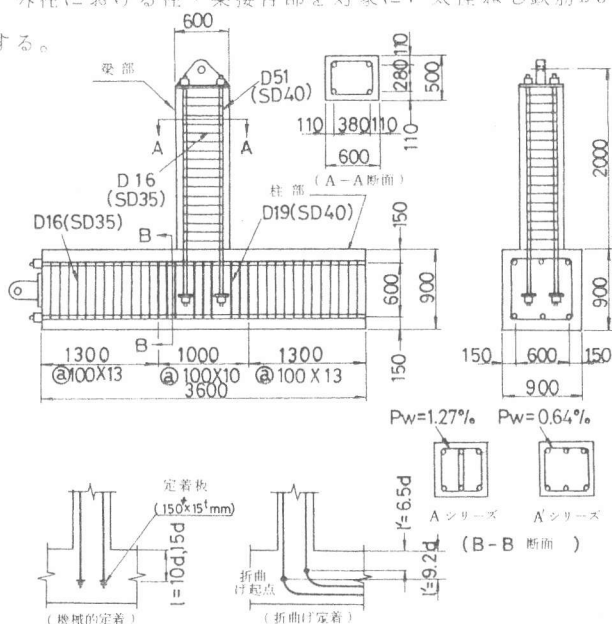


図1. 供試体の形状寸法

表1. 供試体の種類

記号	定着方法		梁主筋比 P _t (%)	柱主筋比 P _g (%)	定着部 補強筋比 P _w (%)	コンクリートの 圧縮強度 ⁽³⁾ σ _c (kg/cm ²)
	種類	長さ				
AP10	機械	10d ⁽¹⁾	0.8	0.44	1.27	278
AP15	"	15d				301
AS40	折曲	40d ⁽²⁾				299
AP10	機械	10d			0.64	334
AP15	"	15d				315
AS40	折曲	40d				341

(1) d: 梁主筋の直径 (2) 折曲げ起点までの定着長さ (9.2d (上端筋)
 (3) 柱部コンクリートの試験時圧縮強度 (設計基準強度 $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, スランプ 18 cm)

表2. 供試鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類 呼び名	材質	公称 断面積 (mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	備 考
D16	SD35	198.6	39.6	63.3	2.24	梁、柱せん断補強筋
D19	SD40	286.5	41.3	62.5	2.25	定着部補強筋
D51	SD40	202.7	42.2	59.2	2.77	梁及び柱主筋

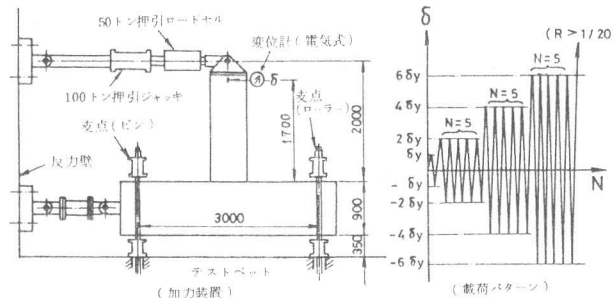


図2. 載荷方法

Pycまでは荷重制御で、以後はPyc時の梁端変位 δy を基準に、 $1.2\delta y$ 、 $4\delta y$ 、 $6\delta y$ で各5回繰返したのち、梁回転角 $R > \frac{1}{20}$ まで載荷した。

また、各荷重段階で梁端変位を電気式変位計を用いて、柱・梁主筋、補強筋のひずみをワイヤストレンゲージ（表裏2枚貼付）を用いて計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変位関係

荷重-変位曲線の一例を図3(1)~(3)に、実験結果の一覧を表3に示す。機械的定着は折曲げ定着同様安定した復元力特性を示し、また、ラーメン構造で大変形とされている梁回転角 $R = \frac{1}{20}$ ($\delta = 85\text{mm}$)時点でも十分な耐力を有している。

梁降伏時の変位 δy には、定着長さの影響が若干現われ、定着長さ $10d$ の場合、 $15d$ に比べ5~14%大きくなっている。しかし、定着長さ $10d$ の機械的定着と折曲げ定着の変位量を比べると等しくなっており、定着方式による差はほとんどないといえる。なお、折曲げ定着では、負方向載荷のときの変位 δy が正方向のそれより9~18%増大しており、折曲げ起点までの定着長さ l の影響が認められた。

3.2 梁及び接合部耐力

正方向載荷時の接合部せん断ひび割れ荷重は、定着長さ $15d$ の機械的定着と折曲げ定着がほとんど等しく、せん断ひび割れ応力度 $\frac{P}{A_c}$ で $21 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ とA0工委員会提案式で求めた $p^{\text{fcc}} = 21 \sim 23 \text{ kg/cm}^2$ にほぼ等しい値となった。他方、 $10d$ の機械的定着及び負方向載荷時の折曲げ定着におけるせん断ひび割れ応力度は、計算値より10~30%低い。これは、梁筋の付着割裂応力がせん断応力に付加されるためと推定される。

最大耐力はいずれの供試体も、梁端変位 $2\delta y$ または $4\delta y$ 載荷時に達した。このときの接合部せん断応力 p^{fm} は、 $p^{\text{fm}} = 33 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ と、SRCの構造計算規準に従って求めたせん断終局強度 p^{fmc} の約 $\frac{1}{3}$ と小さく、したがって、定着長さ、

定着方式、補強筋比による差は認められなかった。なお、破壊形式は、梁付け根のコンクリートが $R > \frac{1}{20}$ で一部剥落したことから、梁の圧縮破壊と考えられる。

3.3 ひび割れ状況

実験後の接合部ひび割れ状況を図4に示す。いずれの供試体

表3. 実験結果

供試体の種類	荷重の正負	Pyc(1)時の梁端変位 δy (mm)	接合部せん断ひび割れ			最大荷重 Pmax (t)	接合部終局せん断応力 p^{fmc} (kg/cm ²)	
			荷重 pPc(t)	実測値(2) p ^{fc} (kg/cm ²)	計算値(3) p ^{fc} (kg/cm ²)		実測値(2) p ^{fm}	計算値(3) p ^{fm}
AP10	正	13.8	28.0	19.6	21.0	40.7	34.1	117
	負	-14.5	-30.0	-21.6	-21.0	-38.1	-31.9	
AP15	正	13.1	30.0	21.0	21.9	41.5	34.8	91
	負	-12.7	-36.3	-25.4	-21.0	-38.9	-32.7	
AP40	正	14.4	30.0	21.0	21.8	39.4	33.0	91
	負	-15.8	-26.0	-18.2	-21.0	-38.1	-31.9	
AS10	正	15.5	26.0	18.2	23.0	41.4	34.7	91
	負	-13.9	-26.0	-18.2	-23.0	-40.2	-33.7	
AP15	正	13.7	35.0	24.5	22.4	40.9	34.3	91
	負	-13.3	-36.4	-25.5	-22.4	-39.9	-33.5	
AS40	正	13.8	32.0	22.4	23.3	39.6	33.2	91
	負	-16.7	-22.0	-15.4	-23.3	-37.1	-31.1	

- (1) 規格降伏点 (4000 kg/cm^2) における計算上の梁降伏荷重 $Pyc = 33.4 \text{ ton}$
- (2) $p^{\text{fc}} = pPc / A_c$ ここに $A_c = \frac{2 \cdot u \cdot v \cdot H \cdot tb}{1 - u \cdot v}$
 $u = Jc/L$ (Jc : 柱の応力対心距離)
 $v = Jb/H$ (Jb : 梁の " $"$)
 tb : 柱幅 (ひび割れ発生), (柱幅+梁幅) / 2 (終局)
- (3) $p^{\text{fcc}} = 0.9 \cdot \beta \cdot \sqrt{Fc}$
 $(\beta = 1.0, \gamma = 1.4, Fc = \text{コンクリートの圧縮強度})$
- (4) $p^{\text{fmc}} = 2 \cdot F_s \cdot \psi \cdot P_w \cdot \sigma_{sw}$
 ここに、 $F_s = 1.5 F_c / 30$
 $\psi = 2$ (接合部拘束係数)
 $P_w \cdot \sigma_{sw}$ = 接合部補強筋比、降伏点

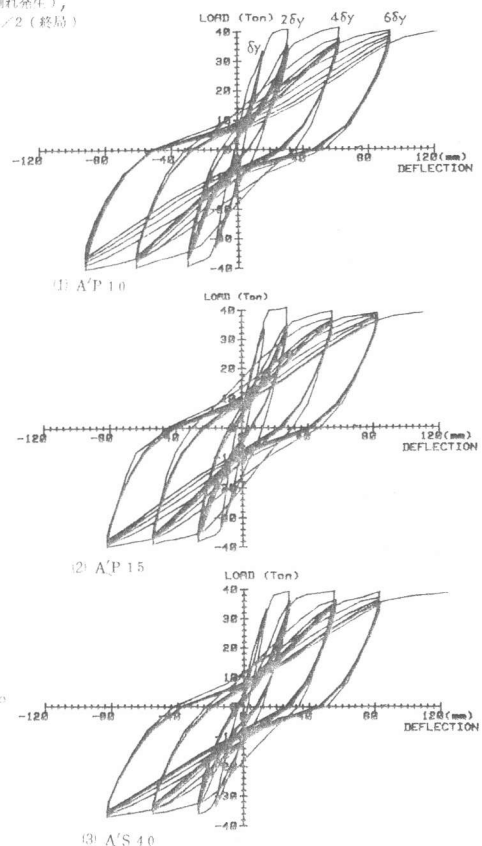


図3. 荷重-変位曲線

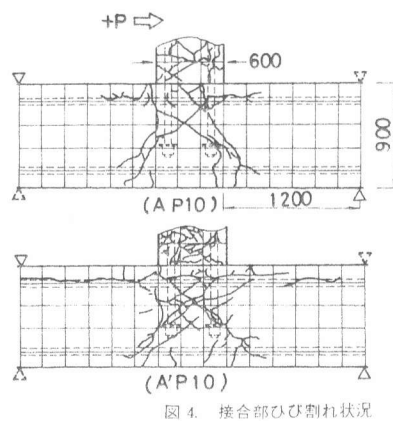


図4. 接合部ひび割れ状況

のせん断ひび割れも第1サイクル時に接合部で発生し、繰返し数とともに進展し、柱主筋に沿う縦ひび割れにつながる傾向にある。

ひび割れパターンは定着方式によって若干異なり、定着長さが10dと短い機械的定着の場合は、定着板近傍からのせん断ひび割れが卓越する。他方、折曲げ定着では、鉄筋の折曲げ方向にひび割れが集中する。なお、定着長さ、定着方式にかかわらず、補強筋比の少ない方が接合部のひび割れ本数は多くなっており、ひび割れに対する補強筋比の影響が認められる。

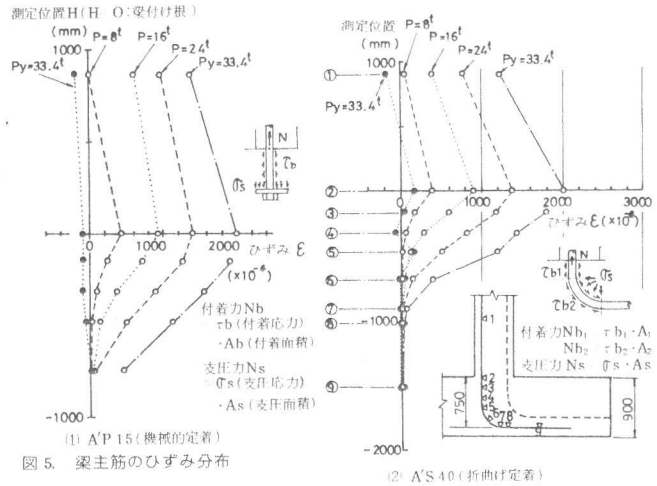


図5. 梁主筋のひずみ分布

4. 定着部の挙動

4.1. 梁主筋のひずみ分布

梁降伏までの梁主筋ひずみ分布の一例を図5に示す。機械的定着では、梁の降伏荷重 ($P_y=33.4\text{ t}$) 近くになると定着板付け根の鉄筋にひずみが生じ、梁主筋軸力の一部が定着板の支圧力によって分担されるようになる。鉄筋が圧縮力を受ける場合は、梁付け根コンクリートが力を分担するため、降伏荷重に達しても定着板に支圧力はほとんど生じていない。他方、折曲げ定着では、梁降伏荷重近くになると、折曲げ起点⑤から起点⑦までの曲げ部でひずみは急激に減少し、折曲げ部での軸力分担が増大する。

以上より、荷重がある程度大きくなったときの鉄筋軸力のコンクリートへの伝達要因は、機械的定着の場合鉄筋の付着力Nbと定着板の支圧力Nsであり、折曲げ定着の場合は直線部の付着力Nb1と折曲げ部の付着力Nb2と支圧力Nsであることがわかる。

4.2. 梁主筋の付着力

図6は、接合部に垂直に埋込まれた梁主筋直線部の平均付着応力度を鉄筋ひずみより求めた結果で、機械的定着では、荷重の増大とともに付着応力度は上昇し、定着長さ10d、15dの場合、降伏荷重時点でそれぞれ5.3、4.8 kg/cm^2 の値を示す。他方、折曲げ定着の場合付着応力度は $P=20\text{ t}$ で最大4.5 kg/cm^2 となるが、それ以後荷重の増大と共に徐々に低下する。

4.3. 定着板による支圧力

機械的定着では、鉄筋軸力Nは鉄筋の付着力Nbと定着板の支圧力Nsによってつり合っている。そこで、梁主筋のひずみ分布より、定着板によって生じるコンクリートの支圧応力度を求めた。結果は図7に示すとおりで、定着長さが10dの場合、梁主筋の付着応力度が約3.0 kg/cm^2 ($P=12\text{ t}$ に対応)に達する頃より徐々に支圧応力度は増大し、支圧力によって梁主筋の軸力が分担されていくことがわかる。しかし、降伏荷重時の支圧応力度は最大で210 kg/cm^2 とコンクリートの圧縮強度以下で、支圧破壊を生じる恐れはない。定着長さが15dとなると、付着分担率 (N_b/N) が大きくなるため、支圧応力度はさらに減少する。

一方、両定着方式とも、梁降伏後の繰返し载荷により、定着板及び折曲げ部における梁主筋の軸力分担が増大する。図8は、機械的定着における各繰返し载荷時の軸力分担率 ρ ($=N_s/N$) を求めた結果で、6回载荷後の軸力分担率 ρ は、定着長さ15dで $\rho=0.61\sim 0.66$ 、10dで $\rho=0.82\sim 1.0$ と梁降伏時の2倍以上の値とな

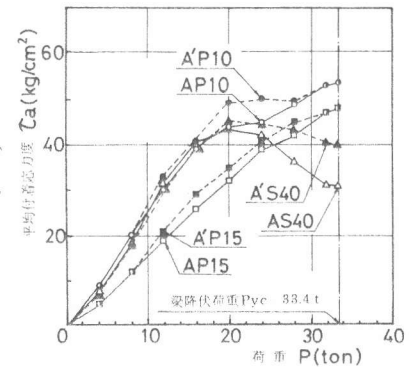


図6. 梁主筋の平均付着応力度

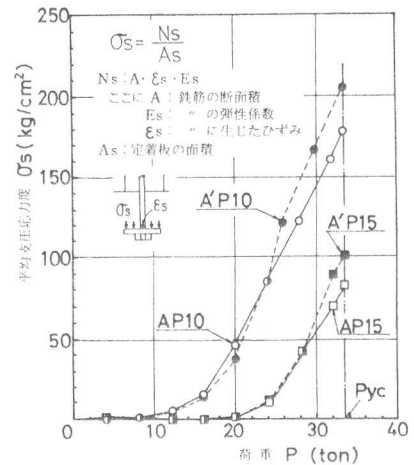


図7. 定着板による平均支圧応力度

る。このとき、定着長さ10dの支圧応力度は最大570 kg/cm^2 と圧縮強度の1.7倍となるが、定着板の抜け出しや支圧破壊はなく、定着性能の劣化は認められなかった。

図9は、折曲げ定着における折曲げ起点以降と終点以降の軸力分担率 (N_1/N , N_2/N) を求めたもので、折曲げ定着では、梁端変位が $2\delta y$ 以上になると、軸力の50~80%が折曲げ部で分担されている。このように、梁降伏後付着力と支圧力の分担率が作用する外力の大きさ、条件により変化するのは、定着部のコンクリートが局部的に付着破壊していくためである。なお、補強筋比が大きいくほど定着板または、折曲げ部の軸力分担は減少する。

5. 定着部補強筋の効果
定着部補強筋D19 (S D40) のひずみ変化の一例を図10に、各補強筋(a)~(i)のひずみを図11に示す。補強筋のひずみは、接合部にせん断ひび割れが発生した時点から急激に増大し、繰返し载荷に伴ってさらに大きくなる。機械的定着では、梁主筋両側に配された補強筋(c, dまたはf, g)が正負の载荷にほぼ対称に作用するのに対し、折曲げ定着では、折曲げ側の補強筋(b, h, i)に力が集中している。このことから、機械的定着では、接合部にせん断ひび割れが発生すると、定着板から作用する逆円錐コーン上の割り裂き力を補強筋とコンクリートのせん断で負担し、柱部に力が伝達されるものと考えられる。図12は、機械的定着における補強筋比の影響を示した結果で、補強筋a~fの平均値で見ると、補強筋に生じるひずみは、補強筋比にほぼ比例して減少しており、補強筋に均等に力が分散されることが判かる。

5. 定着部補強筋の効果

定着部補強筋D19 (S D40) のひずみ変化の一例を図10に、各補強筋(a)~(i)のひずみを図11に示す。補強筋のひずみは、接合部にせん断ひび割れが発生した時点から急激に増大し、繰返し载荷に伴ってさらに大きくなる。

機械的定着では、梁主筋両側に配された補強筋(c, dまたはf, g)が正負の载荷にほぼ対称に作用するのに対し、折曲げ定着では、折曲げ側の補強筋(b, h, i)に力が集中している。このことから、機械的定着では、接合部にせん断ひび割れが発生すると、定着板から作用する逆円錐コーン上の割り裂き力を補強筋とコンクリートのせん断で負担し、柱部に力が伝達されるものと考えられる。図12は、機械的定着における補強筋比の影響を示した結果で、補強筋a~fの平均値で見ると、補強筋に生じるひずみは、補強筋比にほぼ比例して減少しており、補強筋に均等に力が分散されることが判かる。

6. まとめ

本実験のように、梁断面に比べ比較的柱断面が大きく、接合部終局せん断応力度が33~35 kg/cm^2 と小さい場合には、定着板によって梁筋を機械的に定着(定着長さ10d)しても、従来の折曲げ定着(定着長さ40d)とほぼ同等の定着性能が得られる。ただし、定着耐力を維持するために、定着部補強筋としては、0.64%程度必要である。

○ 参考文献

- 1) 小倉弘一郎, 関根正孝, 鉄筋コンクリート柱・はり接合部に関する研究の動向: コンクリート工学, vol.19, No.9, Sept 1981, PP 3-15

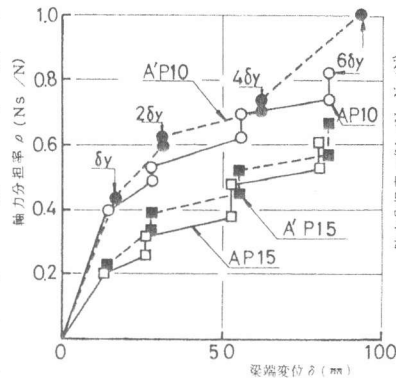


図8. 定着板による軸力分担率(梁降伏後)

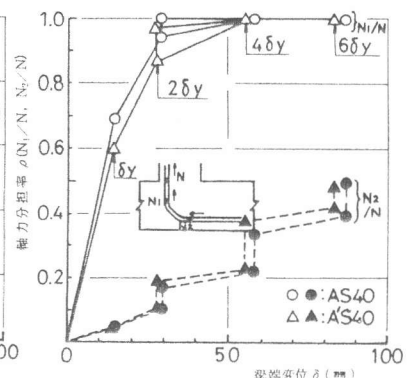


図9. 折曲げ起点及び終点以降の軸力分担率(梁降伏後) (N_1/N , N_2/N)

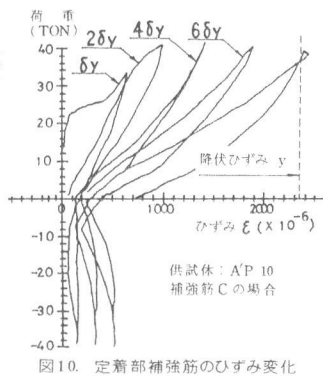
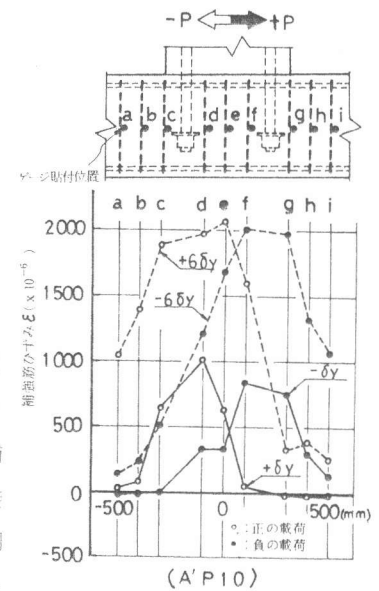
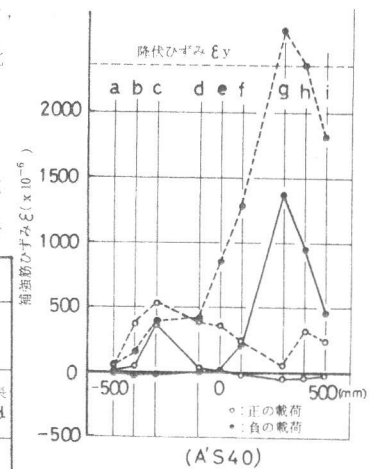


図10. 定着部補強筋のひずみ変化



(A'P10)



(A'S40)

図11. 定着部補強筋のひずみ分布

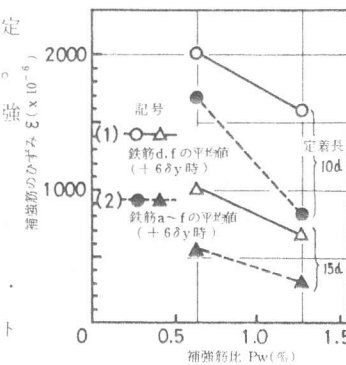


図12. 補強筋比の影響