

論文 太径鉄筋D32を用いた全数重ね継手の付着割裂強度に関する研究

田畑 卓*1・師橋憲貴*2・桜田智之*3・田中礼治*4

要旨：本研究は、太径鉄筋 D32を用い、継手を同一断面に集中配置した全数重ね継手の付着割裂強度について検討したものである。実験は、サイドスプリット型の付着割裂破壊を指向した梁型試験体を用い、梁の純曲げ区間下端に重ね継手を設けた2点集中荷重の一方向繰り返し载荷により行った。変動因子は横補強筋比と横補強筋の配置（中子筋の有無）である。結果として、付着割裂強度は横補強筋比にほぼ比例して増加し、中子筋の効果が認められた。また、本実験の付着割裂強度は、既報の主筋に D19を用いた付着割裂実験で提案した付着割裂強度算定式で十分評価できた。

キーワード：太径鉄筋、全数重ね継手、付着割裂強度、横補強筋、中子筋

1.はじめに

現行の日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1991年版)」(以下RC規準)では「重ね継手に D29以上の鉄筋径を用いない、および継手を相互にずらす」と規定されており、太径鉄筋、並びに継手相互のずらしなど重ね継手の使用に一定の制限を与えている。一方、近年、建築物の大型化高層化に伴い、使用鉄筋が太径化しつつある。また、施工面では鉄筋先組工法が利用される傾向にあり、この場合の継手としては全数継手の利用が望まれている。

重ね継手に関する研究はこれまで多数行われているが、付着割裂強度を対象としたものは少なく、特に太径鉄筋については不明な点が多い。[1][2]

そこで本研究では、主筋に太径鉄筋 D32を用いた全数重ね継手について横補強筋と付着割裂強度の関係を検討し、さらに既報の主筋に D19を用いた付着割裂実験 [3]との比較検討を行った。

2.実験概要

2.1 試験体および使用材料

図-1に試験体形状および配筋例を、表-1に試験体の一覧を示す。試験体は、主筋を 4-D32とした $b \times D=50 \times 50$ (cm)の矩形断面の梁であり、下端にのみ重ね継手を設けている。なお、重ね継手は、梁幅方向に重ねた全数重ね継手であり、重ね継手長さは全試験体共通で $30d_b$ (d_b :主筋径)とした。また、主筋のかぶり厚さは、鉄筋表面から側面まで50mm、底面まで70mmとし、試験体の付着割裂破壊はすべてサイドスプリット型を指向している。

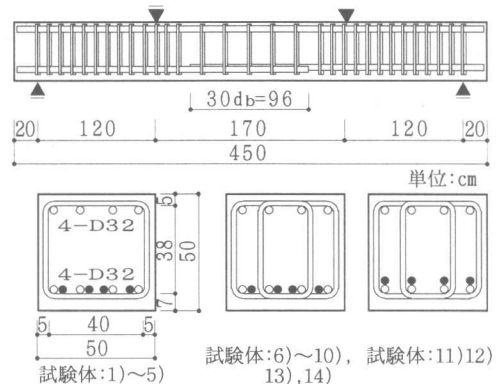


図-1 試験体形状および配筋例

- *1 安藤建設(株)技術研究所(正会員)
- *2 日本大学助手 生産工学部建築工学科、工修(正会員)
- *3 日本大学助教授 生産工学部建築工学科、工修(正会員)
- *4 東北工業大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

試験体は、重ね継手が曲げ降伏に先行して付着割裂破壊するよう、主筋に SD685を用いた継手破壊型12体、曲げ降伏するよう SD345を用いた曲げ型 2体の計14体を計画した。変動因子は、主に横補強筋比($p_w=0\sim 2.0\%$)としたが、既往の研究で指摘されている中子筋の有効性について検証するため、中子筋の有無についても変動因子とした。さらに、継手破壊型では重ね方向の影響をみるため、下端主筋を梁せい方向に重ねた試験体（以降、縦重ね）も計画した。

表-2に使用材料の力学的性質を示す。横補強筋は D16の溶接閉鎖型、コンクリートは呼び強度 $F_c=270\text{kgf/cm}^2$ 、最大骨材寸法20mmの早強コンクリートとし、打設は梁断面上方向からの一体打ちとした。

2.2 加力および測定方法

加力は、2点集中荷重による一方向繰り返し载荷とした。加力の制御は、重ね継手端の主筋応力 σ_s が 1000kgf/cm^2 、 2000kgf/cm^2 となる荷重で各1回繰り返した後、継手破壊型では、明らかな耐力低下が生ずるまで荷重制御による単調载荷、曲げ型では、支点と純曲げ区間中央の相対変位が δ_y (δ_y :降伏変位) の整数倍となる変位で各1回繰り返し、 $6\delta_y$ になるまで加力した。ひび割れ幅の測定は、純曲げ区間について、マイクロスコープ（最小目盛り0.02mm）により、主筋の重心線上にて行った。また、主筋および横補強筋のひずみをストレインゲージで測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊経過および履歴性状

図-2に代表的な試験体の最終ひび割れ状況を、図-3にモーメント-相対変位 ($M-\delta$) 関係の包絡線を示す。また、表-3に実験結果の一覧を示す。継手破壊型は、曲げひび割れ発生後、主筋が梁幅方向の外側となっている方の重ね継手端から、また、縦重ねにおいては、主筋が上側となっている方の重ね継手端から29.3tm \sim 36.0tmの間に

表-1 試験体一覧

試験体名	主筋	横補強筋		備考		
		配筋形式	間隔 s (cm)		横補強筋比 p_w (%)	
1) MBI-00	4-D32 (SD685)	2-D16 (SD295)	-	0.0		
2) MBI-02			40.0	0.2		
3) MBI-04			20.0	0.4		
4) MBI-08			10.0	0.8		
5) MBI-12			6.7	1.2		
6) MBI-04			40.0	0.4		
7) MBI-08		20.0	0.8			
8) MBI-12		13.4	1.2			
9) MBI-16		10.0	1.6			
10) MBI-20		8.0	2.0			
11) MBI-04V		4-D16 (SD295)	40.0	0.4	縦重ね継手	
12) MBI-12V			13.4	1.2	縦重ね継手	
13) MFI-12			4-D32 (SD345)	13.4	1.2	
14) MFI-20			8.0	2.0		

固定因子: $b \times D=50 \times 50$ (cm)、重ね継手長さ $L=96$ (cm) [30db]

表-2 使用材料の力学的性質

a) 鉄筋

使用鉄筋	使用箇所	降伏応力 (kgf/cm^2)	降伏ひずみ (%)	最大応力 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)
D32 (SD685)	主筋(継手破壊型)	7130	0.39	9300	1.82×10^5
D32 (SD345)	主筋(曲げ型)	3930	0.20	6130	2.02×10^5
D16 (SD295)	横補強筋	3650	0.18	5730	1.98×10^5

b) コンクリート

試験体No.	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				圧縮強度 (kgf/cm^2)	割裂強度 (kgf/cm^2)
		水	セメント	砂	砂利		
1)~5)	67.4	178	264	867	992	344	33.6
6)~10)						311	25.5
11)~14)						333	29.6

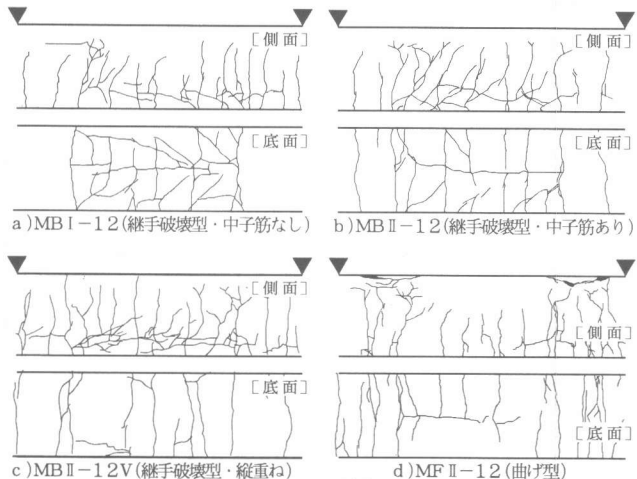


図-2 最終ひび割れ状況

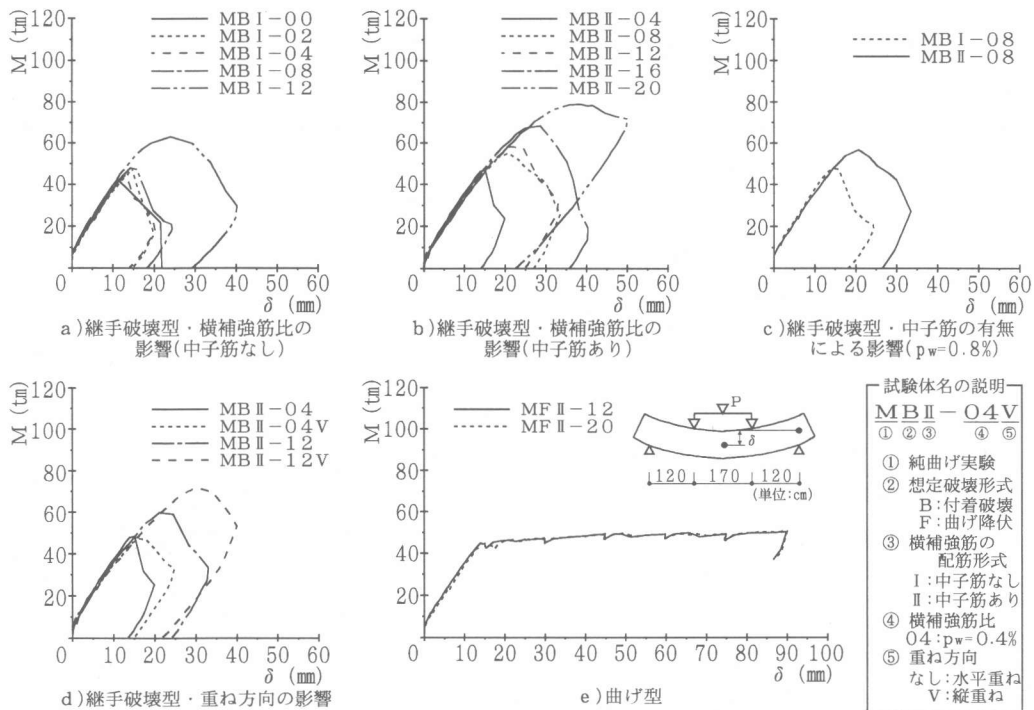


図-3 モーメント-相対変位関係

表-3 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ幅 ($\sigma_t=2000\text{kgf/cm}^2$)			最大 モーメント M_{\max} (tm)	付着割裂強度			破壊 形式
	W_0 (mm)	W_{\max} (mm)	n (本)		τ_{uexp} (kgf/cm ²)	τ_{ucal} (kgf/cm ²)	τ_{uexp} / τ_{ucal}	
1)MBI-00	0.135	0.30	8	42.0	30.20	23.44	1.29	S
2)MBI-02	0.100	0.20	7	47.9	34.47	26.18	1.32	S
3)MBI-04	0.116	0.22	9	45.0	32.36	28.92	1.12	S
4)MBI-08	0.129	0.20	7	48.1	34.60	34.40	1.01	S
5)MBI-12	0.095	0.20	8	63.0	45.30	39.80	1.14	S
6)MBII-04	0.110	0.24	8	48.6	34.94	27.50	1.27	S
7)MBII-08	0.095	0.16	8	56.7	40.77	32.71	1.25	S
8)MBII-12	0.071	0.18	9	60.0	43.14	37.84	1.14	S
9)MBII-16	0.094	0.18	7	70.1	50.39	43.13	1.17	S
10)MBII-20	0.104	0.20	9	80.4	57.81	48.34	1.20	S
11)MBII-04V	0.104	0.20	11	47.3	33.99	28.46	1.19	S
12)MBII-12V	0.143	0.24	8	71.7	51.54	39.16	1.32	S
13)MFII-12	0.103	0.20	8	50.2	-	-	-	F
14)MFII-20	0.093	0.20	8	50.6	-	-	-	F

W_0 :平均ひび割れ幅 W_{\max} :最大ひび割れ幅 n:ひび割れ本数
 τ_{uexp} :実験値、式(1)による τ_{ucal} :計算値、式(3)~(6)による
 S:付着割裂破壊(サイドスプリット) F:曲げ降伏

初期付着割裂ひび割れが発生した。付着割裂ひび割れは荷重の増加とともに順次重ね継手の軸方向内部へ伸展し、最大荷重時に急激な付着割裂破壊を生じている。なお、底面には材軸方向のひび割れもみられたが、軽微なものであった。全試験体とも継手鉄筋降伏以前の継手破壊であり、ひび割れ状況から判断してサイドスプリット型の破壊であった。また、ひび割れ状況では、中子筋の有無による顕著な差異は認められなかったが、最大耐力は同一 p_w で比較すると、中子筋のあるものがないものを上回る傾向であった。 p_w が比較的小さい0.4%では8%の耐力増加であるが、 $p_w=0.8\%$ では18%の耐力増加を示しており、高補強域での中子筋の効果が認められた。曲げ型は引張主筋の降伏に伴って、重ね継手端に発生した曲げひび割れが拡大し、大変形時には、梁上端の加力点付近に圧壊がみられたが、 $6\delta_y$ まで耐力低下は認められず、重ね継手区間内の付着ひび割れも軽微であった。これより、両試験体とも曲げ降伏破壊であると判断した。

3.2 曲げひび割れ幅の検討

図-4に重ね継手端位置での主筋応力が $\sigma_t=2000\text{kgf/cm}^2$ 時の最大ひび割れ幅 W_{\max} を示す。ひび割れ幅が最大となったのは、いずれの試験体においても重ね継手端であった。最大ひび割れ幅は、横補強筋比との相関性が認められず、 $p_w=0\%$ のMBI-00を除けば0.16~0.24mmの範囲であり、RC標準における長期荷重時のひび割れ幅の制限をほぼ満たしていた。また、主筋にD19を用いた既報[3]の最大ひび割れ幅(0.10~0.22mm)との相違も僅かであり、主筋を太径鉄筋としても若干ひび割れ幅が大きくなる程度であった。

3.3 継手主筋の付着応力度

図-5に重ね継手部の主筋のひずみ分布例を示す。継手破壊型において、主筋応力が 3000kgf/cm^2 以前では、重ね継手区間の中央に比べ端部でのひずみ勾配が大きいが、最大耐力(付着割裂破壊)時では重ね継手区間内のひずみ勾配はほぼ一様となり、付着応力がほぼ平均的であることが分かる。曲げ型のMFI-12では図-5のc)の主筋ひずみ分布より、 $6\delta_y$ 時(最終加力時)において重ね継手の両端部からそれぞれ1/4の位置(24cm)まで降伏域の伸展がみられた。これは梁せいDに対して0.48D程度である。また、 $p_w=1.2\%$ と 2.0% では主筋の降伏域に違いが認められなかった。

図-6に最大耐力時における重ね継手端のひずみより求めた各主筋の平均付着応力度 $\tau_{u(c)}$ を示す。なお、図中の点線は式(1)より求めた付着応力度 τ_{uexp} であり、ここでは、 $p_w=1.2\%$ の試験体で中子筋のないもの(MBI-12)とあるもの(MBI-12)について例示した。

$$\tau_{uexp} = M_u / (j \cdot \phi L) \quad \dots(1)$$

M_u : 重ね継手部の最大曲げモーメント(kg・cm)

j : $7/8d$ (d : 梁有効せい)(cm) ϕ : 鉄筋の周長(cm)

L : 重ね継手長さ(cm)

中子筋のない場合では、中間主筋の付着応力度が隅主筋の付着応力度より小さかったが、中子筋を配した場合には、中間主筋の付着力が向上し、中間主筋と隅主筋の付着応力度がほぼ同程度となっており、中子筋

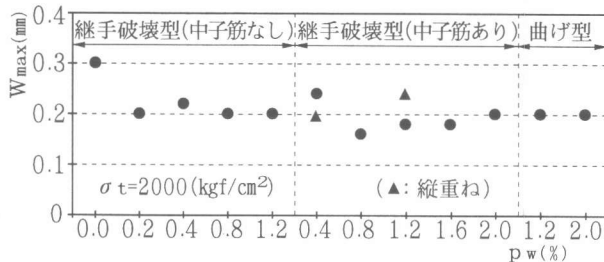
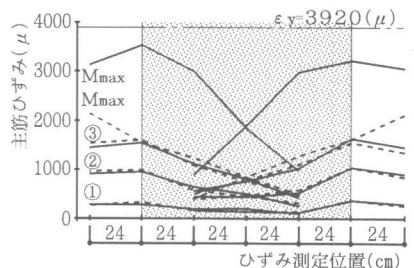
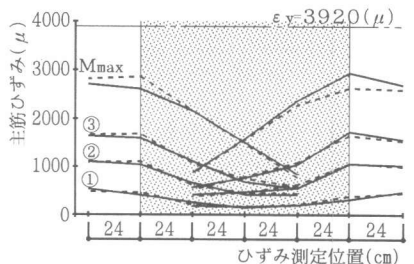


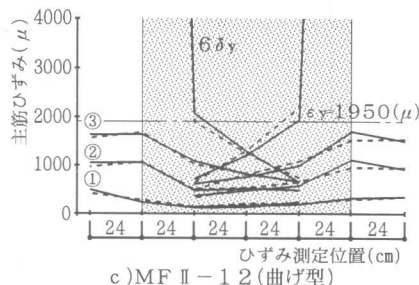
図-4 最大ひび割れ幅



a) MBI-12 (継手破壊型・中子筋なし)



b) MBI-12 (継手破壊型・中子筋あり)



c) MFI-12 (曲げ型)

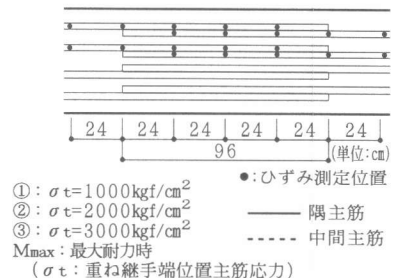


図-5 主筋ひずみ分布例 ($p_w=1.2\%$)

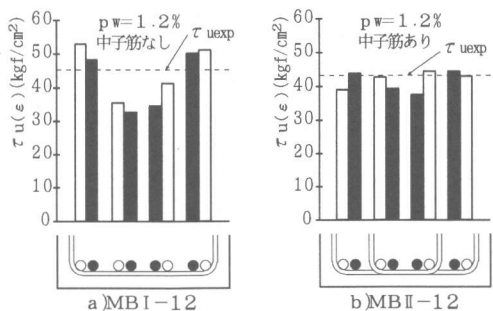


図-6 各主筋の平均付着応力度 $\tau_{u(\epsilon)}$

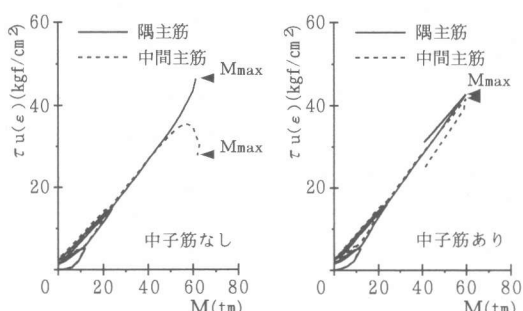


図-7 $\tau_{u(\epsilon)}$ - モーメント関係

による効果が認められた。

図-7に $\tau_{u(\epsilon)}$ とモーメントの関係を示す。ここで、偶主筋と中間主筋の $\tau_{u(\epsilon)}$ は各々の平均値で示した。中子筋のある場合では、付着割裂破壊時に偶主筋および中間主筋の付着応力度がほぼ同時に低下するが、中子筋のない場合では、中間主筋の付着応力度が低下しても、偶主筋の付着応力度は上昇する傾向が認められた。これらの傾向は、横補強筋比が大きいほど顕著であった。

図-8は、最大耐力時での各鉄筋のひずみより求めた付着応力度 $\tau_{u(\epsilon)}$ と式(1)による τ_{uexp} との関係を示したものである。なお、 $\tau_{u(\epsilon)}$ は、全主筋の付着応力度の平均値である。 τ_{uexp} と $\tau_{u(\epsilon)}$ の比は平均で1.05と良い対応を示している。これより、重ね継手部の付着割裂耐力は、式(1)で算定して差し支えないものと思われるので、次章では τ_{uexp} を用いて重ね継手の付着割裂強度の検討を行う。

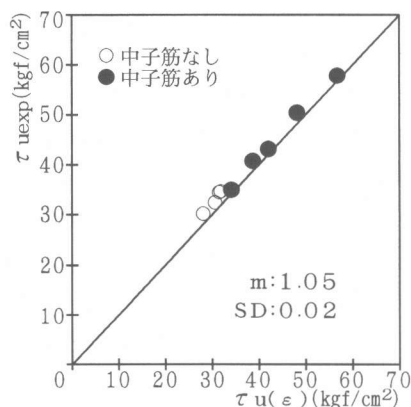


図-8 τ_{uexp} - $\tau_{u(\epsilon)}$ 関係

4. 重ね継手の付着割裂強度

図-9に $\tau_{uexp}/\sqrt{\sigma_B}$ と q_{st} の関係を示す。図中には、主筋にD19を用いた既報[3]の結果についても併せて示した。なお、 q_{st} は式(2)による。

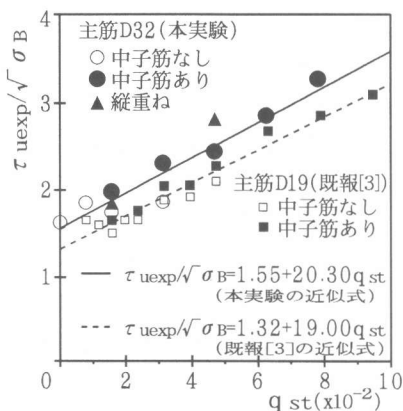


図-9 $\tau_{uexp}/\sqrt{\sigma_B}$ - q_{st} 関係

$$q_{st} = b \cdot p_w / (N \cdot d_b) \quad \dots(2)$$

b : 梁幅 (cm) N : 重ね継手組数 (組) d_b : 主筋径 (cm)

付着割裂強度は、ほぼ q_{st} に比例して増加している。これらを最小2乗法により近似したものを実線 (本実験、主筋:D32) と点線 (既報、主筋:D19) で示す。なお、近似は縦重ねを除いておこなっている。両者は切片に幾分の相違があるものの、傾きはほぼ同様であり、横補強筋の効果は、主筋を太径鉄筋としても同様であることが認められる。

図-10 に τ_{uexp} と計算値 τ_{ucal} の関係を示す。ここで、 τ_{ucal} は主筋にD19を用いた既報[3]の

付着割裂強度提案式による計算値である。ただし、縦重ねにおける b_i の算定は梁幅方向に重ね継手した試験体と同様とした。実験値の計算値に対する比は平均が1.19であり、全体的に D19を用いた場合よりも幾分安全側にシフトした結果となっている。また、付着割裂強度に対する横補強筋の効果は比較的良く評価されており、太径鉄筋による全数重ね継手の付着割裂強度は、既往の提案式で十分に評価できることが確認できた。安全側にシフトしたのは、図-9における切片、即ちコンクリート負担分が、計算値より高かったことによるものであるが、この要因としては、既報[3]における加力が正負繰り返しであるのに対して、本実験の加力は一方向の繰り返し载荷であること、また、試験体の断面寸法が既報[3]の30×30cmに対し、本実験では、50×50cmと比較的大きく、コンクリートの打ち込み高さの効果により、コンクリートの付着条件が整っていたことが考えられる。

縦重ねは同一横補強筋比の水平重ねに比べ、同等以上の耐力を示したが、本実験で扱ったのが2体であるので今後、データの蓄積をおこなう必要があると思われる。

5. 結論

本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- (1) 長期荷重時の最大曲げひび割れ幅は、横補強筋比が0.2～2.0%の範囲において、0.16～0.24mmであり、RC規準の規定をほぼ満たしていた。
- (2) 付着割裂強度に対する横補強筋の効果は、中子筋の有無によって異なり、同一横補強筋比においては、中子筋を配することが有効である。
- (3) 主筋に太径鉄筋を用いた場合の付着割裂強度に対する横補強筋の効果は、D19を主筋とした場合とほぼ同等であり、付着割裂強度提案式[式(3)～(6)]で十分評価できた。
- (4) 曲げ降伏が先行する場合でも、横補強筋を適切に配することによって、十分な靱性能が得られた。また、重ね継手主筋の $6\delta_y$ 時における降伏伸展域は、0.48D(D:梁せい)程度であった。

[参考文献]

- [1] 角陸純一、田中礼治: 異形鉄筋重ね継手に関する既往実験データの分析、日本建築学会構造系論文報告集、第435号、pp.131～139、1992.5
- [2] 角陸純一: 高強度太径壁筋重ね継手の付着割裂強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第456号、pp.51～58、1994.2
- [3] 桜田智之、師橋憲貴、田中礼治: 重ね継手部の付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第2号、pp.223～228、1993

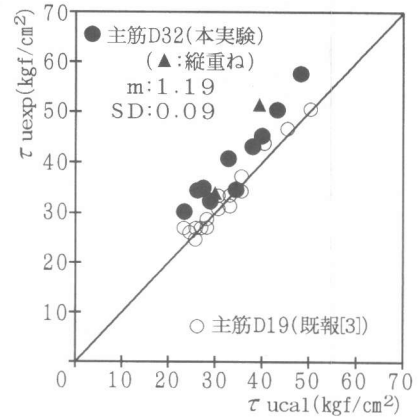


図-10 $\tau_{uexp} - \tau_{ucal}$ 関係

付着割裂強度提案式
(主筋D19、純曲げ実験[3])

$$\tau_{ucal} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad \dots(3)$$

$$\tau_{co} = (0.4b_i + 0.5)\sqrt{\sigma_B} \quad \dots(4)$$

$$\tau_{st} = (19.0A_{st}/sNd_b)\sqrt{\sigma_B} \quad \dots(5)$$

$$b_{si} = (b - \Sigma d_b) / \Sigma d_b' \quad \dots(6)$$

d_b : 主筋径(cm) s : 横補強筋間隔(cm)

b : 梁幅(cm) N : 重ね継手組数(組)

A_{st} : 1組の横補強筋断面積(cm^2)

σ_B : コンクリート強度(kgf/cm^2)

Σd_b : 1列に並んだ主筋の直径の総和(cm)
(重ね継手の主筋1組は2本と数える)

$\Sigma d_b'$: 1列に並んだ主筋の直径の総和(cm)
(重ね継手の主筋1組は1本と数える)