

論文

[2037] 重ね継手部の付着割裂強度に及ぼす横補強筋の効果

桜田智之^{*1}・師橋憲貴^{*2}・田中礼治^{*3}

1. まえがき

重ね継手に関する既往の研究は多数あるが、重ね継手の力学的性状に及ぼす横補強筋、特に中子筋の効果について実験的に調べたものは少ない[1]。そこで、本研究では重ね継手の付着割裂強度に及ぼす中子筋を含めた横補強筋の効果について実験的に究明した。

本研究では全数重ね継手について、サイドスプリット型の割裂パターンを対象にした実験を行い、付着割裂強度式を提案している。主な実験因子は横補強筋(外周補強筋及び中子筋)の配置と横補強筋量で、付着割裂強度式の誘導には、藤井・森田の強度式[2]を基礎とした。

2. 実験の概要

2.1 試験体の計画および形状

図-1 に試験体の形状および断面を示す。試験体は単純ばり形式で、純曲げ区間の下端に重ね継手部を設け、継手長さは30d (dは公称径)とした。主筋は上端、下端とも4-D19とし($p_t = p_c = 1.47\%$)、低面および側面に対する主筋表面からのかぶり厚さは3cm(1.6d)でサイドスプリット型の付着割裂破壊を指向している。重ね継手長さ(付着長さ)を一定にしたのは、付着割裂強度に与える影響因子を横補強筋に限定し、基本的性状の把握を目的としたためであり、重ね長さを30dと比較的長くしたのは、継手破壊時の継手の平均付着応力度は継手長さの短いもの程大きくなる傾向にあるが、30d程度以上では比較的年平均付着応力度の変動が少なくなる[1],[3]ためである。また、曲げ降伏に対して継手部の破壊が先行するよう、主筋には高強度鉄筋(SD685)を使用した。

試験体は横補強筋にD10(SD295)を使用

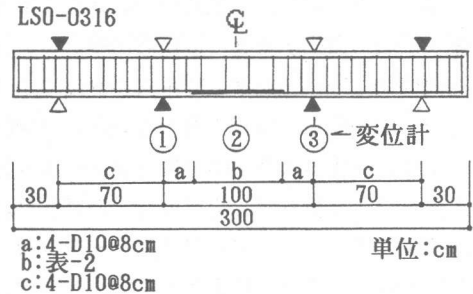


図-1 試験体形状および断面形状

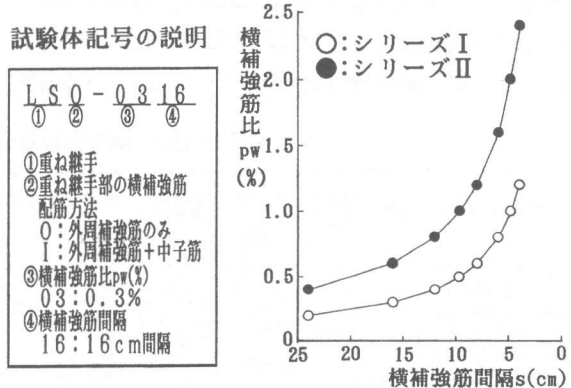


図-2 横補強筋比と横補強筋間隔

*1 日本大学助教授 生産工学部建築工学科、工修(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 東北工業大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

し、継手部に対して外周補強筋のみを配筋したシリーズIと、外周補強筋と中子筋を組み合わせて配筋したシリーズIIの計16体を計画した。シリーズIでは、付着割裂強度と横補強筋量との関係を検討し、シリーズIIでは外周補強筋に中子筋(副補強筋)を加え、付着割裂強度に対する中子筋の効果を検討した。図-2に横補強筋比(pw)と横補強筋間隔(s)の関係を示す。また横補強筋の形状は重ね溶接の閉鎖型とした。

2.2 使用材料の特性

表-1に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。降伏強度および弾性剛性は、材料試験により、公称断面積を用いて算定した。実験時のコンクリート強度は263~272kgf/cm²で、付着強度算定用には全体の平均をとり267kgf/cm²を使用した。

2.3 加力および測定方法

加力は正負繰り返し載荷を行い、継手部の付着割裂破壊が発生するまでは荷重制御とし、付着割裂破壊発生後は純曲げ区間中央の変位により制御した。加力荷重ははり主筋の応力度が1000kgf/cm²ずつ増加するよう曲げ強度略算式により算定し、正負各1回の繰り返しを行った。ひび割れ幅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、継手部の主筋重心線にて測定した。また、主筋および横補強筋のひずみをストレインゲージ(ゲージ長5mm)により測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

3.1.1 ひび割れ性状

ひび割れの本数および幅は、純曲げ区間を対象に測定した。平均ひび割れ幅w₀は同一応力時におけるひび割れ幅の合計をひび割れ本数で除したものである。図-3にσ_t=2000kgf/cm²(P=16tf)時の各試

表-1 材料特性

(a)鉄筋

使用鉄筋	使用箇所	σ _y (kgf/cm ²)	ε _y (%)	σ _{max} (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)
D10(SD295A)	横補強筋	3580	0.18	5280	1.99×10 ⁶
D19(SD685)	主筋	7120	0.35	9310	2.03×10 ⁶

(b)コンクリート

粗骨材 最大寸法 (mm)	スラン (cm)	W/C (%)	単位量(kgf/m ³)				圧縮強度 σ _B (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
			水	セメント	砂	砂利		
10.0	19.5	64.0	179	280	914	898	267	24.7

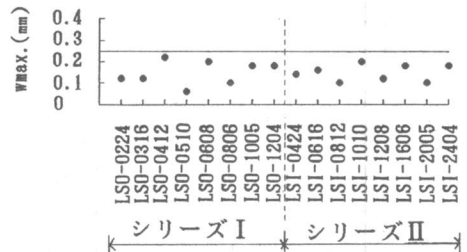


図-3 最大ひび割れ幅 (σ_t=2000kgf/cm²時)

表-2 試験体詳細及び実験結果一覧

試験体名	シ リ ー ズ	継 手 部 長 さ s ₀ (cm)	横 補 強 筋 比 pw (%)	横 補 強 筋 間 隔 s (cm)	横補強筋本数 ns(本)		最大 荷重 P _{max} (tf)	ひび割れ (σ _t =2000kgf/cm ²)			付 着 割 裂 強 度 τ _{u,exp} (kgf/cm ²)	破 壊 種 別
					外周補 強筋	中子筋		w ₀ (mm)	w _{max} (mm)	n (本)		
1) LSO-0224	I	57	0.2	24.0	3	—	24.0	0.048	0.12	8	26.93	S
2) LSO-0316								0.070	0.12	6	26.03	S
3) LSO-0412								0.066	0.22	9	24.57	S
4) LSO-0510								0.040	0.06	9	26.93	S
5) LSO-0608								0.089	0.20	7	27.04	S
6) LSO-0806								0.060	0.10	7	30.74	S
7) LSO-1005								0.073	0.18	8	31.30	S
8) LSO-1204								0.064	0.18	8	34.22	S
9) LSI-0424	II	57	0.4	24.0	3	3	24.0	0.070	0.14	9	26.93	S
10) LSI-0616								0.080	0.16	6	28.72	S
11) LSI-0812								0.044	0.10	12	33.32	S
12) LSI-1010								0.062	0.20	11	33.44	S
13) LSI-1208								0.048	0.12	13	37.14	S
14) LSI-1606								0.081	0.18	7	43.65	S
15) LSI-2005								0.063	0.10	7	46.56	S
16) LSI-2404								0.086	0.18	7	50.49	S

w₀:平均ひび割れ幅

w_{max}:最大ひび割れ幅

n:ひび割れ本数

S:付着割裂破壊(サイドスプリット)

験体の最大ひび割れ幅 w_{max} を示す。 w_{max} は各試験体とも0.22mm以内に納まっている。中子筋の有無とひび割れの関係について、シリーズI,IIのpwが同じ試験体(pw=0.4,0.6,0.8,1.0,1.2%)を表-2より5体の平均値と比較してみる。中子筋のないシリーズIでは w_{max} =0.18mm、 w_o =0.07mmで、中子筋を用いたシリーズIIでは w_{max} =0.14mm、 w_o =0.06mmであった。また、ひび割れ本数はシリーズIが7.8本、シリーズIIが10.2本で純曲げ区間に発生した平均曲げひび割れ間隔はそれぞれ@11.4cm および@8.9cmとなる。これより中子筋を用いることにより、ひび割れが分散し、最大ひび割れ幅も減少する傾向がみられる。

図-4は純曲げ区間を5箇所に分け(①~⑤)し、それぞれの箇所が発生した代表的なひび割れについて、ひび割れ幅の推移を示したものである。なお②及び④部の継手端部を中心とする100mmの範囲(左右にそれぞれ50mm)に発生したひび割れを継手端部のひび割れと定義した。LSO-1204は継手端部(②)ではなく、①の箇所に最大ひび割れが発生した例であり、LSI-1208は継手端部(②)が最大ひび割れとなった例である。ともに同一の補強量の場合であるが、中子筋を配したシリーズIIのLSI-1208の方が、ひび割れ幅が小さいことが分かる。また、最大ひび割れは、図-4②部の継手端部に発生する割合が56%(16体中9体)と最も多く、④部の1体を加えると、継手端部での最大ひび割れの発生率は全試験体の約60%であるが、40%近くの試験体で継手端部以外の箇所(①,⑤部)に最大ひび割れが発生している。以上、本実験の範囲内では長期応力時に継手の端部に生ずるひび割れ幅は0.22mm以内であることが認められた。

3.1.2 最終破壊状況

図-5に最終破壊状況の例を示す。側面の点線によるひび割れは負加力時の曲げひび割れである。各試験体とも、曲げひび割れが進展した後、継手端部に発生した付着割裂ひび割れが順次継手内部へ進展し、急激な付着割裂破壊へと至っている。底面のひび割れは、曲げひび割れの他、付着破壊発生後の複雑なひび割れを示しているが、各試験体の破壊性状

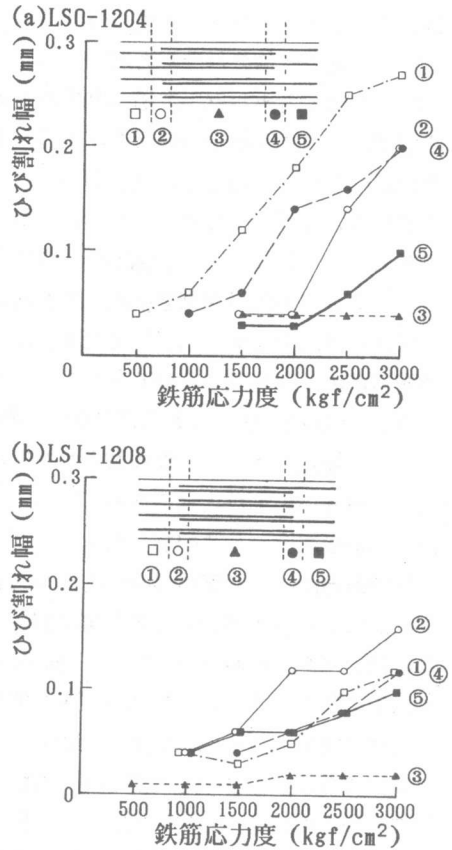


図-4 ひび割れ幅と鉄筋応力度の関係

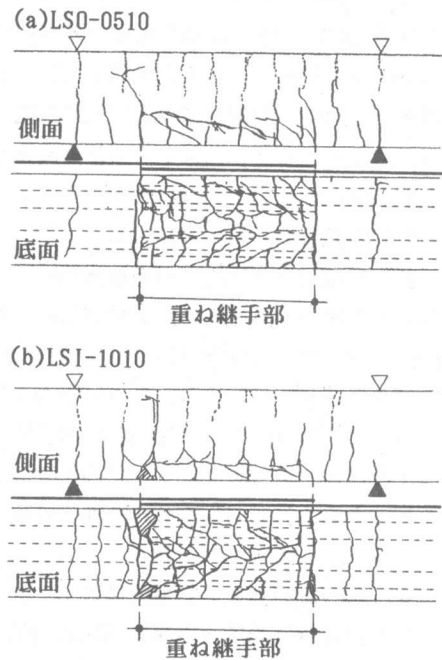


図-5 最終破壊性状

は、全てサイドスプリット型の破壊であった。

3.2 各継手主筋の付着応力度

図-6 は、各重ね継手主筋の継手始点でのひずみ測定値より求めた各重ね継手主筋の最大荷重時の平均付着応力度の 1例を示した。棒グラフは個々の継手主筋について示してあり、ひずみは 4組の継手の内 2組について測定した。点線は4.1節に示す算定式

(1) より求めた付着割裂強度（全鉄筋の最大荷重時平均付着応力度 $\tau_{u, exp.}$ ）である。図-6(a)は外周補強筋のみを配筋したシリーズ I の 1例であるが、横補強筋による拘束のない中間主筋（中主筋）に比べ、直接補強されている隅主筋の付着応力度が大きくなっている。(b) は中子筋を組合わせて配筋したシリーズ II の 1例であるが、中主筋の付着応力が増大し、中子筋による付着応力向上の効果が認められる。例えば図-6(a) (b)では中主筋の付着応力は中子筋のある LSI-0812(b) が中子筋のない LS0-0806(a) より22% 増加しており、他の試験体でもばらつきはあるが、8~31% の範囲で同様の結果を示していた。また、隅主筋の付着応力は中子筋のある中主筋の付着応力とほぼ同程度であったことから、個々の鉄筋の付着力の負担性状は横補強筋（外周補強筋あるいは中子筋）により直接的に拘束される場合と、補強が間接的な場合に大別可能であると考えられる。これは定着鉄筋に関する市之瀬ら[4] の研究と同様の性状である。

3.3 横補強筋のひずみ分布

図-7 は同一断面内での横補強筋のひずみ分布の推移の 1例を示したものである。各試験体の最大ひずみは終局時においても 800×10^{-6} 以内にとどまっており横補強筋の降伏ひずみをかなり下回り、降伏点の大きさは耐力に影響しないことを示している。シリーズ II の外周補強筋と中子筋を組み合わせ配筋した試験体 LSI-1010は、終局時において外周補強筋に比べ中子筋のひずみが大きくなっている。このことは、中間主筋に対する中子筋の拘束効果によるものと考えられ、主筋の付着応力度分布の性状を裏付けている。

4. 付着割裂強度の定量的評価

4.1 付着割裂強度と横補強筋比の関係

図-8 に横補強筋比 p_w と付着割裂強度 $\tau_{u, exp.}$ の関係を示す。 $\tau_{u, exp.}$ は(1) 式により求めた。

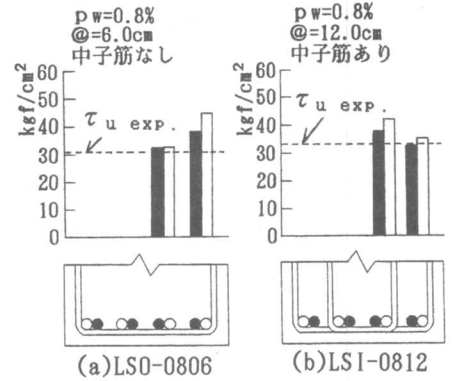


図-6 主筋の付着応力度分布の 1例

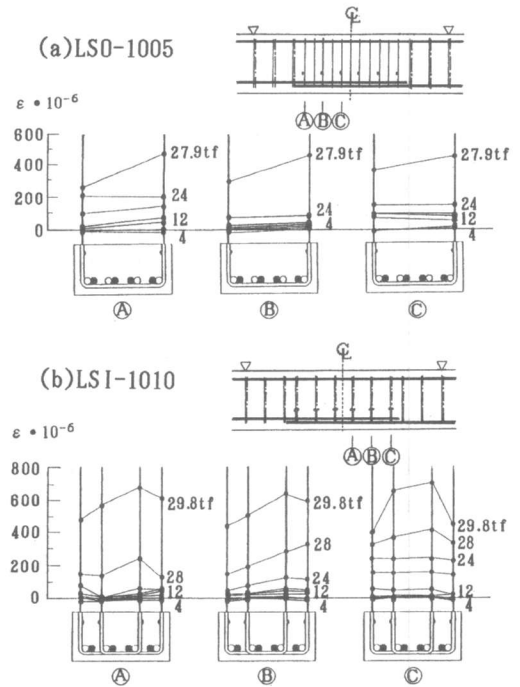


図-7 断面内での横補強筋ひずみ分布の 1例

4. 付着割裂強度の定量的評価

4.1 付着割裂強度と横補強筋比の関係

図-8 に横補強筋比 p_w と付着割裂強度 $\tau_{u, exp.}$ の関係を示す。 $\tau_{u, exp.}$ は(1) 式により求めた。

$$\tau_{u \text{ exp.}} = \frac{M_u}{j \cdot \phi \ell} \quad \text{----- (1)}$$

M_u : 最大曲げモーメント

j : $7/8d$ (d : はり有効せい)

ϕ, ℓ : 鉄筋の周長, 継手長さ

シリーズ I の p_w が低い試験体で若干のばらつきが認められるが、 p_w の増加とともに、付着割裂強度はほぼ比例して増加することが判る。図-8 の実験値から最小 2乗法により $\tau_{u \text{ exp.}}$ と p_w の関係を式化すると(2) 式ようになる。(2) 式において $p_w=0$ とした場合の y 切片は 21.5 kgf/cm^2 となる。この値は以下に述べるコンクリートによる付着割裂強度負担分 $\tau_{\infty 1}$ [(7) 式] の計算値と良い対応を示している。

4.2 付着割裂強度式の誘導

図-9 は藤井・森田[2] の付着割裂強度算定式による計算値 ($\tau_{u \text{ cal.}}$) と本実験値とを比較したものである。藤井・森田式では重ね継手強度に対しては、鉄筋本数を重ね継手組数に置き換え、応用可能であるとしているが、図-9 では計算値に対し実験値が下回ることで、 p_w の増加につれて適合性が低下する傾向が認められる。そこでここでは藤井・森田式をもとに実験値に適合するような重ね継手の付着割裂強度式の誘導を以下のように試みた。まず、(4) 式のコンクリート負担分 τ_{∞} を文献[5] を参考に (7) 式のように簡略化する。

$$\tau_{\infty 1} = (0.4b_i + 0.5)\sqrt{\sigma_B} \quad \text{----- (7)}$$

次に、重ね継手主筋の鉄筋配置によるコンクリートの断面欠損を考慮してサイドスプリット型の破壊モードを判別する b_{s1} の式を (8) 式で求める。

$$b_{s1} = \frac{b - \sum d_b}{\sum d'_b} \quad \text{----- (8)}$$

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

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

(7) 式によるコンクリート負担分 $\tau_{\infty 1}$ の計算値は 20.9 kgf/cm^2 となり、図-8 の $\tau_{\infty \text{ exp.}}$ ($p_w=0$) に相当する 21.5 kgf/cm^2 とほぼ一致するので、 τ_{∞} には (7) 式を用いる。次いで横補強

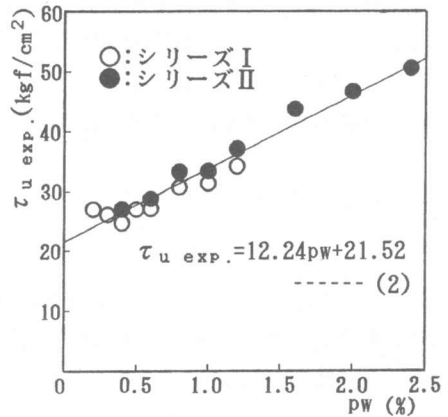
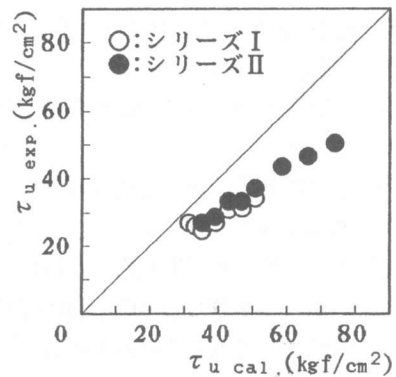


図-8 $\tau_{u \text{ exp.}}$ - p_w の関係



藤井・森田式

$$\tau_u = \tau_{\infty} + \tau_{st} \quad (3)$$

$$\tau_{\infty} = (0.375b_i + 0.521)\sqrt{\sigma_B} \quad (4)$$

$$b_i = b_{s1} = b / Nd_b - 1 \quad (5)$$

$$\tau_{st} = (30.4A_{st} / sNd_b)\sqrt{\sigma_B} \quad (6)$$

ここで

d_b : 主筋径 s : 横補強筋間隔

b : はり幅 N : 重ね継手組数

A_{st} : 1組の横補強筋断面積

σ_B : コンクリート強度

図-9 藤井・森田式と実験値の比較

筋負担分 τ_{st1} を $\tau_{st1} = \tau_{u,exp} - \tau_{col}$ として実験値よりコンクリート負担分を差し引いて求めた。

図-10はこのようにして求めた、 τ_{st1} と横補強筋量の関係を示すものである。結果として、

$$\tau_{st1} = 19.0 \frac{A_{st}}{sNd_b} \sqrt{\sigma_B} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで N:重ね継手組数

を得た。改めて $\tau_{u,cal.1} = \tau_{col} + \tau_{st1}$ を計算し実験値と比較したものが図-11である。実験値と計算値は良い対応を示している。

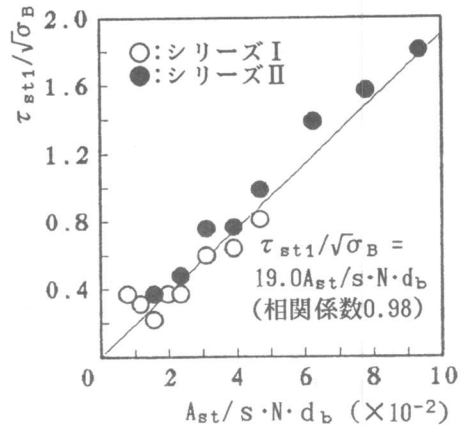


図-10 横補強筋負担分 τ_{st1}

5. 結論

重ね継手の付着割裂強度に及ぼす中子筋を含めた横補強筋の効果に関する実験を行った結果、本実験の範囲内で次のことが認められた。

- 1) 長期荷重時における最大ひび割れ幅は0.22mm以内であった。
- 2) 中子筋を用いることにより、ひび割れ幅が減少する傾向が認められた。
- 3) 中間主筋に中子筋を組み合わせた場合、中子筋のない場合に比較し、中間主筋の付着応力は向上し、隅主筋と同等以上の付着力を示した。
- 4) 藤井・森田式を修正することで、サイドスプリット型を対象とする重ね継手の付着割裂強度式を誘導することができた。

以上、重ね継手の付着割裂強度と中子筋を含めた横補強筋の効果を定量的に示すことができたが、本報は影響因子を基礎的要因に限ったものであり、高強度コンクリートへの対応、太径鉄筋への適応性、横補強筋による拘束効果の限界など残された問題は多く存在し、それらについては今後の検討課題である。

謝辞

名古屋工業大学助教授・市之瀬敏勝博士には多くの助言を戴いた。また、(株)神戸製鋼所からは高強度鉄筋の供与を受けた。ここに厚くお礼申し上げます。

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
- [2] 藤井 栄、森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究、第2報 付着割裂強度算定式の提案、日本建築学会論文報告集、第324号、pp.45-53、1983
- [3] 角 徹三、張 建東、飯塚信一、山田 守：高強度コンクリートレベルをも包含するRC部材の付着割裂強度算定式の提案、コンクリート工学論文集、Vol.3-1、pp.97-108、1992
- [4] 市之瀬敏勝、横尾慎一：高強度コンクリートを用いたRC部材の付着割裂実験、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻2号、pp.75-80、1992
- [5] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、pp.137、1990

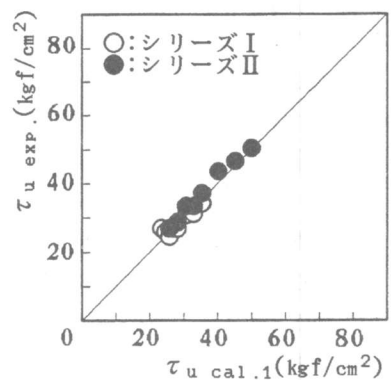


図-11 実験値と計算値の比較