

[138] RC短柱における付着割裂破壊時の局所付着応力—すべり曲線

正会員 ○森本 久雄 (京都大学大学院)

栗林 博之 (京都大学大学院)

正会員 藤井 栄 (京都大学工学部)

正会員 森田 司郎 (京都大学工学部)

1 研究目的

正負交番水平力をうける鉄筋コンクリート短柱の典型的な破壊モードの一つである付着せん断破壊に対する設計上の対策と機構解析の両面からの検討が最近の目立った研究テーマとなっている。本研究はこのテーマの解決に資するために実施している一連の実験のうち、柱の付着割裂破壊時の付着応力-滑り ($\tau-s$) 関係の実測結果に焦点を当てて論じたもので、既に得られている付着割裂破壊に関する基礎実験結果と対照し、その特性を示す。

2 実験結果

○載荷装置………載荷装置を図-1に示す。せん断力載荷方法は渡辺による改良型建研式⁽¹⁾で、軸力載荷用アクチュエータで一定軸力(20ton)を加えた後、水平力を油圧ジャッキと、上下梁の平行度を保持する様自動制御された水平加力用アクチュエータにより与えて載荷した。

○供試体………用いた供試体は6体で表-1に供試体名称、及び鉄筋・コンクリートの力学的性質を示す。柱断面は20×20cm、シアスパン比(M/QD)は2である。図-2に供試体詳細を示す。片側主筋は2D16、4D13の2種類でD16、D13各供試体のかぶりは付着割裂破壊が生じるよう鉄筋中心から2.15, 3.15cmとした。横補強筋比は共通に0.57%とし、4体は溶接普通鋼フープ、1体は135°フック付高強度フープ、1体は135°フック付普通鋼フープとした。

なお、供試体はすべて横打ちである。

○計測事項………せん断力-層間変位関係の他、梁からの主筋の抜け出しと柱中央部での鉄筋とコンクリート間の相対滑りの計測を図-2に示す方法で行なった。主筋と横補強筋にはW.S.G.を設置し、各位置での歪を計測した。歪測定区間は単調、繰り返し供試体で異なり、図-2に示すように、各W.S.G.間の区間を正載荷時引張側から①, ②…として、単調載荷供試体で8区間、繰り返し載荷供試体で11区間の局所付着応力を評価した。

○載荷履歴………2体を単調載荷、4体を繰り返し正負交番載荷とした。繰り返しの履歴は表-2

表-1 供試体一覧

SPECIMEN DESIGNATION	TENSION REINF		HOOP		CONCRETE STRENGTH
	Pt (%)	f _y (kgf/cm ²)	t _y (kgf/cm ²)	f _c (kgf/cm ²)	
2016-M	1.00	3720	3140	301	28.6
2016-R	1.00	3720	3140	314	29.9
2016-R*	1.00	3720	3140	244	24.8
2016-R-H	1.00	3720	12090	246	23.9
4D13-M	1.27	3700	3140	278	26.0
4D13-R	1.27	3700	3140	281	29.1

Number of Bars
Bar Diameter (mm)
*Hook Hoop
High Strength Hoop
Loading History
R:Reversed Cyclic Loading
M:Monotonic Loading

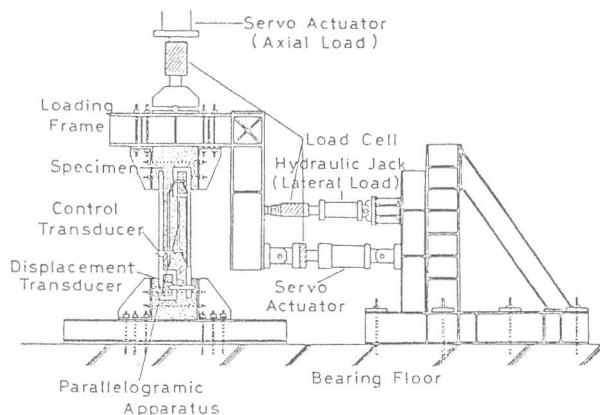


図-1 載荷装置

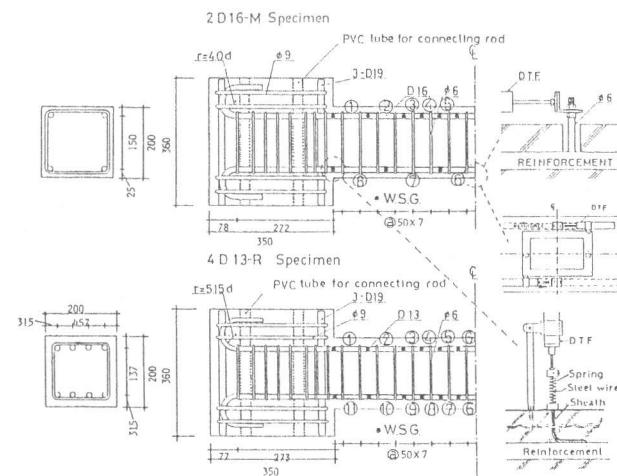


図-2 供試体詳細及び計測事項

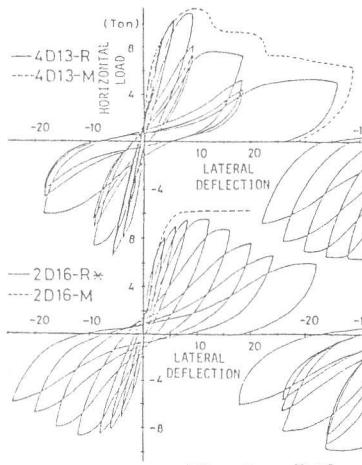


図-3 荷重-変形曲線

に示すが、2体を変位振幅漸増載荷、2体を降伏時変形をもとに以後3回ずつ繰り返す定変位振幅載荷とした。

3 実験結果と考察

○実験結果概要 図-3に荷重変形曲線、表-2に実験結果一覧を示す。破壊モードは2D16-Mが曲げ降伏破壊、4D13-M・4D13-Rが鉄筋降伏直後の付着破壊、他が鉄筋降伏後の繰り返しによる付着破壊である。4D13供試体は鉄筋列に沿ってかぶりコンクリートが割り裂け脆性的な破壊を生じたが、2D16供試体は隅角部が割り裂ける破壊モードで比較的韌性に富んだ破壊を示した。4D13-Mの荷重変形曲線で荷重が下がっている所は付着割裂が急激に進展したことに対応する。正負交番載荷時の包絡線は単調載荷曲線より低下しピンチ効果の著しいループとなっている。また135°フック付フープと溶接フープによる性状には顕著な差異は見られず、普通鋼フープより高強度フープを用いた供試体の方がピーク以後の劣化が少し小さい以外に差は見られなかった。図-4には付着割裂ひび割れの進展を示す。

○単調載荷供試体の局所 $\tau-s$ 曲線の挙動
図-5に単調載荷供試体のすべりを実測した鉄筋の各区間での局所 $\tau-s$ 曲線を示す。ここに示す「すべり」は反曲点位置で実測されたすべり量に鉄筋の歪の積分値を加えたものでコンクリートの歪は無視している。

また図中、区間の和（例えば③+④）で表示されたものは、両区間を分けるW.S.G.が不良のために2区間をあわせて1区間としたものである。“○”印で表した点は危険断面において主筋が降伏した荷重階に対応する。各区間での“○”の位置に注目すると荷重増加に伴い付着ひび割れの進展と共に付着応力のピークが引張側から圧縮側へ徐々に移行してゆ

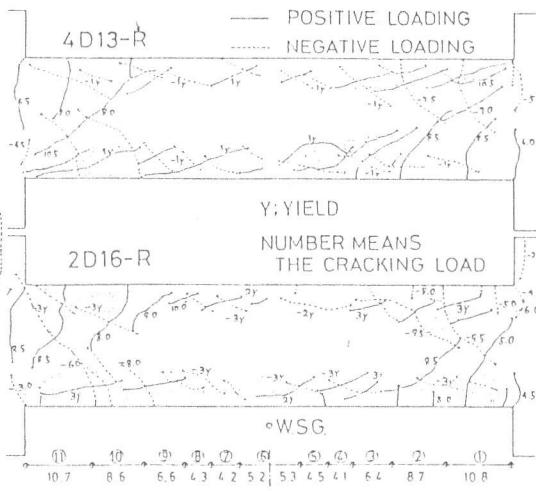


図-4 ひび割れパターン

表-2 実験結果一覧

SPECIMEN DESIGNATION	LOADING HISTORY	TEST RESULTS				Qu cal. (ton)*4
		Qy *1 (ton)*2	Ry (rad)*2	Qmax (ton)*3 (rad) *3	Rmax (rad)	
2D16-M	M	10.2	8.0×10^{-3}	10.4	1.5×10^{-2}	9.98
2D16-R	$\pm 5\text{mm}X3 \sim \pm 6\text{y}X3 \sim \pm 2\delta yX3$ $\pm 3\delta yX3 \sim \pm 4\delta y$	10.0	9.9×10^{-3}	10.0	9.9×10^{-3} $-0.8 \sim -1.0 \times 10^{-2}$	10.03
2D16-R*	$\pm 2\text{mm} \sim \pm 4\text{mm} \sim \pm 6\text{mm} \sim \pm 8\text{mm}$ $\pm 12\text{mm} \sim \pm 16\text{mm} \sim \pm 20\text{mm} \sim \dots$	9.7	1.0×10^{-2}	9.7	1.5×10^{-2} $-8.7 \sim -1.5 \times 10^{-2}$	9.75
2D16-R-H	$\pm 2\text{mm} \sim \pm 4\text{mm} \sim \pm 6\text{mm} \sim \pm 8\text{mm}$ $\pm 12\text{mm} \sim \pm 16\text{mm} \sim \pm 20\text{mm} \sim \dots$	9.9	1.0×10^{-2}	9.9	1.0×10^{-2} $-9.7 \sim -1.1 \times 10^{-2}$	9.78
4D13-M	M	11.3	1.1×10^{-2}	11.3	1.4×10^{-2}	11.45
4D13-R	$\pm 3.5\text{mm}X3 \sim \pm 5.65\text{mm}X3$ $\pm 3\delta yX3 \sim \pm 20\delta yX3$	11.0	1.2×10^{-2}	11.0	1.2×10^{-2} $-9.5 \sim -7.1 \times 10^{-3}$	11.45

*1; M:Monotonic Loading

*2; Load and Deformation at Yield

*3; Load and Deformation at Maximum Load

*4; Calculated Value

$M_u = 0.8A_{sd}f_y D + 0.5N_d(1 - N_d/b) f_c c$

Qu cal. = $2M_u/h$

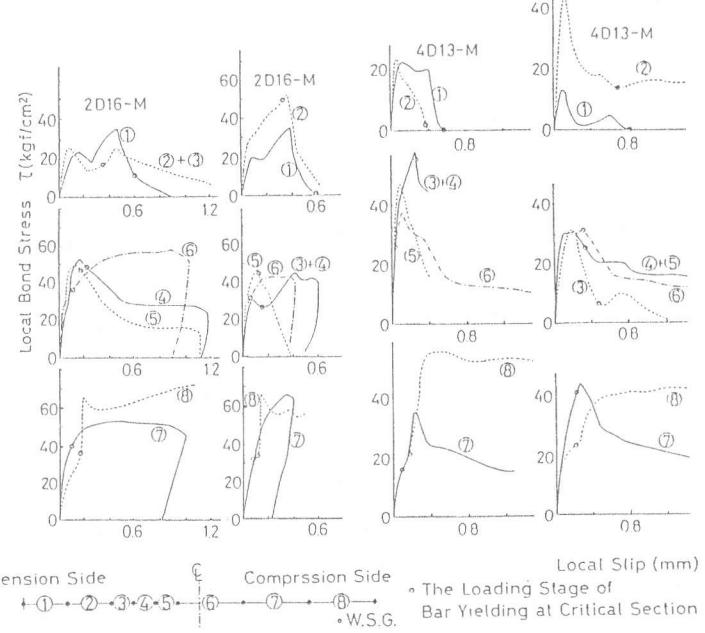


図-5 単調載荷供試体の局所 $\tau-s$ 曲線

くことがわかる。4 D 13-M では付着ひび割れが急に進

(a) 展し荷重が低下したことを反映して、柱中央領域の付着応力は上限に達すると同時に急激に減少している。一方曲げ破壊した 2 D 16-M では中央領域の $\tau - s$ 曲線は鉄筋により差があるが、すべりが進展せず付着応力の劣化も圧縮領域まで及ばず破壊モードと対応している。圧縮側においては D 13・D 16 供試体とも他領域より τ の上限は大きく、また $\tau - s$ 曲線の剛性が急に大きくなる点が存在するが、これは付着弛緩が圧縮域まで及び圧縮歪が減少した事により、その分縮み量として中央すべりに加算する滑り量が減少した為である。

圧縮域での滑り量の算定には問題を残している。

○繰り返し載荷時の $\tau - s$ 曲線の挙動………図-6 は

2 D 16-R-H 供試体の

(a) 主筋の歪分布の推移、

(b) 材端近傍、中央部近傍の荷重-鉄筋歪履歴、(c)せん断ひび割れ部 (区間②・⑩)、スパン中央部 (区間⑥) の $\tau - s$ 曲線を示したものである。(b)で特徴的なのは主筋が材端・中央部とも相当大きな圧縮歪を履歴する点である。この現象が顕著になるのは材端で主筋が降伏を経験した後であり、材端で残留した塑性伸びの分だけ鉄筋の軸力負担分が増える事による。 $\tau - s$ 挙動については材端近くにおいて繰り返し回数が少ない間は、鉄筋応力が引張のとき滑りは残留するが圧縮時には滑りは残留しない現象がみられる。これは、繰り返し振幅が小さい時に計算された滑り量が鉄筋応力圧縮時には、主筋の縮み量を表わしていることを意味しており、この段階では、その位置における相対的な鉄筋の滑動はほとんど生じていないことがわかる。しかし、割裂ひび割れが部材全域に及ぶと主筋全体としての滑動がおこり、 $\tau - s$ 関係は中央部と似かよった形となる。なお、 $\tau - s$ 曲線が上下にシフトしているのは W.S.G. を片面に設置した為、鉄筋のもとたわみ等のあった場合に、滑動が進んだ段階で影響をうけたものと思われる。また図-7 に、繰り返し載荷供試体のコンクリートと鉄筋間の相対滑りを直接計測した柱中央部 (区間⑥) での $\tau - s$ 曲線を示す。図中に点線で藤井・森田が提案した付着割裂耐力算定値⁽²⁾を表わすが実験値とほぼ一致しており、(d)に示すように繰り返し時 $\tau - s$ 曲線の形状についても森田・角モデル⁽³⁾ではほぼ表現できることがわかる。図-8 は (a) 2 D 16-R、(b) 4 D 13-R についての局所

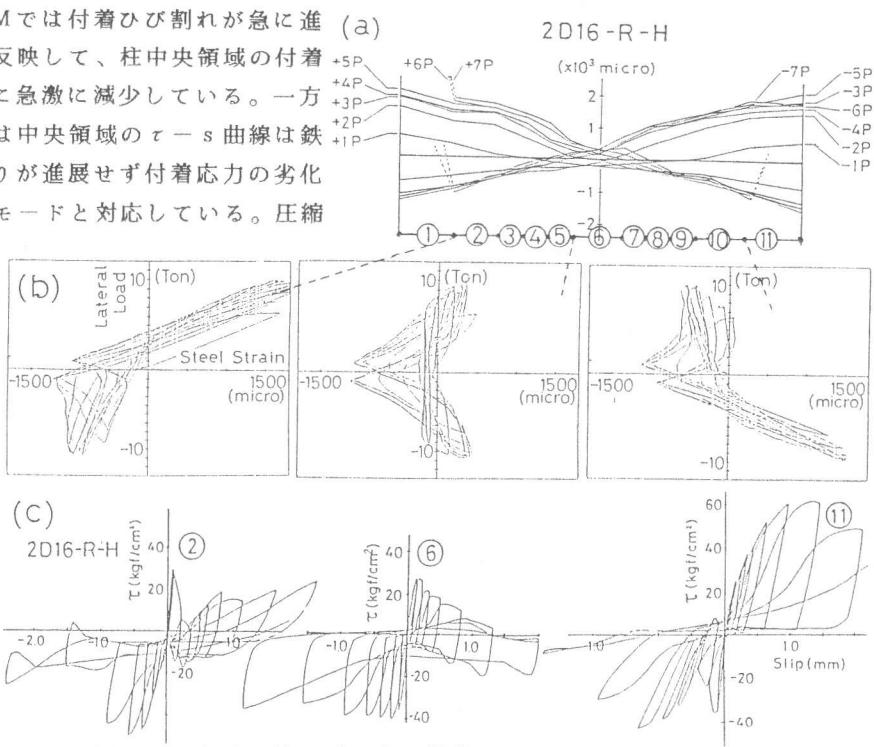


図-6 (a) 主筋の歪分布の推移

(b) 材端近傍、中央部近傍の荷重-鉄筋歪履歴

(c) せん断ひび割れ部・スパン中央部の $\tau - s$ 曲線

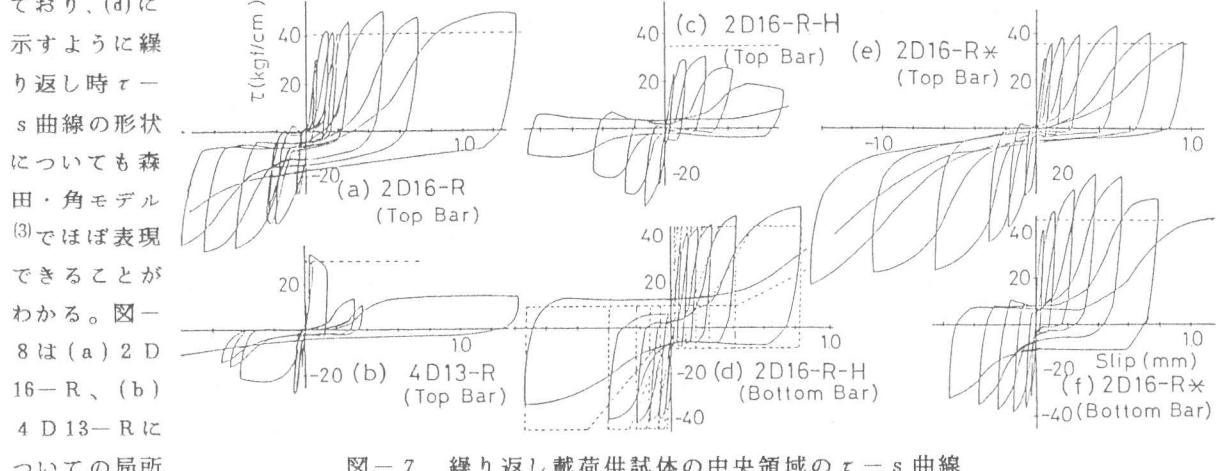


図-7 繰り返し載荷供試体の中央領域の $\tau - s$ 曲線

τ - s 曲線の定変位振幅の各々 1 回目のピークを結んだ包絡線を示す。上側にはせん断ひび割れ領域、下側は中央領域の τ - s 挙動を示している。せん断ひび割れ領域では正負載荷で τ - s 曲線が異なり、鉄筋応力引張時にはせん断ひび割れ発生でピークを迎えた後一度減退してから再び上昇してゆく。圧縮応力時には引張応力時より付着強度は大きい。これに対し中央領域では鉄筋の正負の応力振幅が小さいことから、ほぼ正負対称の τ - s 曲線となっている。4 D 13 と 2 D 16 を比較すると単調の τ - s でみられる如く、繰り返し載荷の τ - s 包絡線においても 4 D 13 の方が付着強度が低く、ピーク以後の減退が急である。

4 多田モデル⁽⁴⁾を用いた解析例

この解析は両材端をクリヤースパンの $\frac{1}{4}$ の大きさのヒンジ域とし、スパン中央部コンクリートを剛として有限個の付着バネで鉄筋と結合し、鉄筋の滑動を材端ヒンジ域で吸収する解析で付着バネ特性を非線形の τ - s 関係で与えることで付着劣化を説明しようとするものである。この方法によると τ - s 関係の特性値が解に与える影響は大きい。図-9に材料特性を示す。S - S 関係はコンクリートは全断面で Kent & Park の拘束コンクリートのモデル⁽⁵⁾を、鉄筋では Ramberg-Osgood モデル⁽⁶⁾を用いた。 τ - s 関係は全てのバネの特性値を同じとし、実験結果に基づき τ_{peak} は 30 ~ 50 kgf/cm² に変化させ、包絡線は bilinear、繰り返しのルールは森田・角モデルで与えた。図-10に (a) 4 D 13 - M、(b) 2 D 16 - M、(c) 2 D 16 - R * の荷重変形関係の解析結果を示す。 τ - s 関係の包絡線に軟化域を与えたなかった事や、コンクリートの S - S 関係で下り勾配がかなり小さい為、単調載荷時の荷重減退は説明できていないが、解析結果が τ のピーク値に敏感に依存することがわかる。(c) の繰り返し載荷の場合 τ_{peak} を 40 kgf/cm²とした解析結果が実験結果を概ね良好に説明している。除荷剛性の違いは τ - s 曲線、コンクリートの S - S 曲線の除荷剛性の違いを受けていると思われる。

5 結論

R C 短柱の付着割裂破壊実験において局所付着応力 - すべり関係を詳細に測定し、①既往の基礎的実験で得られた付着強度、 τ - s 履歴特性が R C 柱中でも発現していることを実証した。②局所付着強度は柱スパン中の位置によって変動するが、特に曲げ圧縮域での巨視的滑りの定義には更に検討を要する。③ τ - s 特性は R C 短柱の挙動に著しい影響を与えることを解析例で示した。

[付記] 本研究は昭和 57・58 年度文部省科学研究費によるもので 4

回生大上実君、本学技官小松勇二郎氏との共同で遂行された。

[参考文献] (1) 六車・渡辺他; セメント技術年報 33、昭和 54 年

(2) 藤井・森田; 学会論報第 324 号、昭和 58 年 2 月 (5) Kent & Park 他: ASCE Vol 98 ST 7, July 1972

(3) 森田・角; 学会論報第 229 号、昭和 50 年 3 月

(4) 多田・武田; 学会関東支部報告集、昭和 55 年

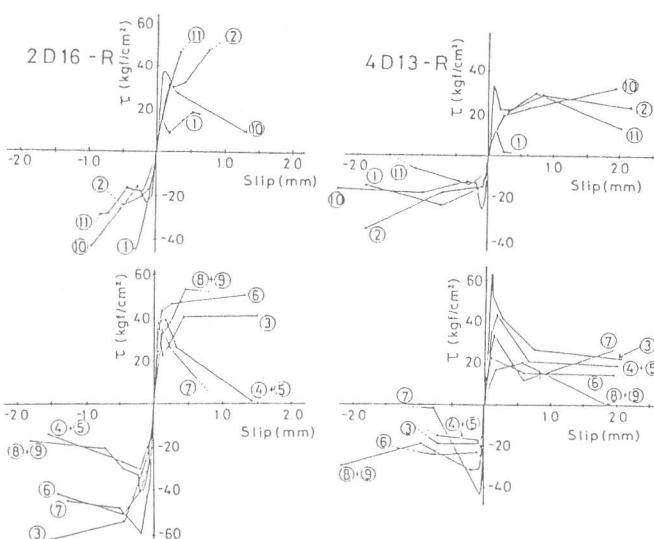
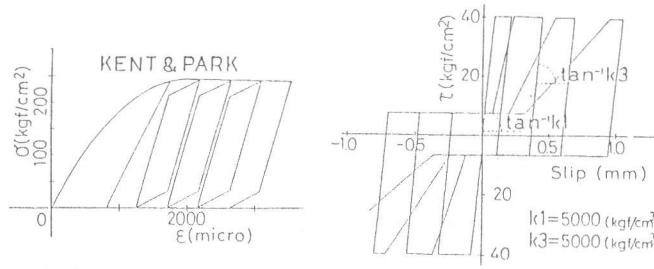


図-8 繰り返し載荷供試体の各位置での τ - s 包絡線



(a) コンクリート

(b) τ - s 曲線

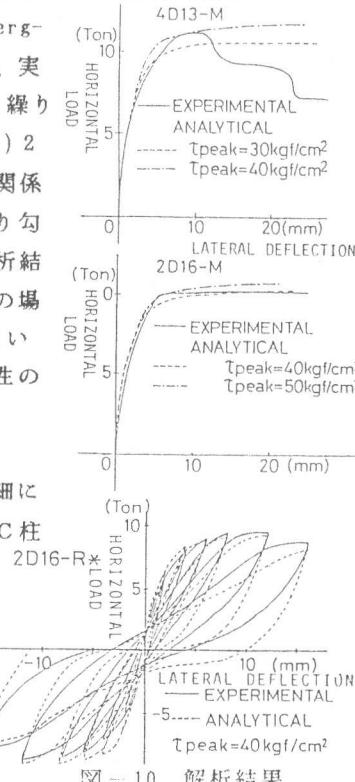


図-10 解析結果