

## [138] 動的水平荷重下でのRC短柱の付着せん断破壊挙動

正会員 ○大上 実 (京都大学大学院)

森本 久雄 (大林組設計部)

正会員 藤井 榮 (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

本研究は、鉄筋コンクリート短柱の地震時の挙動を明らかにするため、地震時程度の載荷速度を対象にアクチュエータによる強制変位動的載荷実験を行ない、載荷速度、載荷方法（単調と繰り返し）が付着破壊耐力／曲げ破壊耐力、復元力特性、破壊モードに与える影響を調べる。特に、載荷速度による付着破壊から曲げ破壊への破壊モードの変化に着目して供試体を選択した。

### 2 実験計画

○載荷装置………載荷装置を図-1に示す。軸力載荷用アクチュエータで一定軸力18.7ton(約F<sub>c</sub>/6)を加えた後に、フィードバックシステムによる変位制御で水平力を与えて載荷した。制御信号はファンクションジェネレータでプログラムされている。上下スタブの平行度は、Jirsaらの方法1)を採用し、これを図-2に示す。

○供試体………供試体名称を表-1に、詳細を図-3に示す。用いた供試体は11体で、既往の研究2)により、単調載荷で鉄筋降伏と殆んど同時に付着割裂破壊を起こすと予想される4D13供試体と、鉄筋降伏後の繰り返し載荷により付着割裂破壊を起こす

と予想される2D16供試体の2種類の供試体である。柱断面は20×20cm、かぶりは鉄筋を中心から2.5cm、シアスパン比M/QD=2とし、横補強筋には135°フック付普通鋼フープを使用し横補強筋比は0.57%とした。打設は4シリーズに分けて行ない、コンクリート強度は表-3中に示す。主筋はSD35で降伏点応力度はD13が3770、D16が3760kgf/cm<sup>2</sup>である。また、横補強筋はΦ6丸鋼で降伏点応力度(0.2% off set)は3220kgf/cm<sup>2</sup>である。

○計測事項………計測システムを図-4に示す。軸力及び水平せん断力をロードセルにより測定し、層間変位を供試体に取り付けた変位計と光学式の非接触型変位測定器(OPTFOLL 0W)により測定した。主筋及び横補強筋には図-3に示す位置にW.S.G.を設置し、各位置での歪を測定した。また、慣性力補正のためにL型フレームに取り付けた加速度計により柱頭の加速度を測定し、ジャッキA、B下部のH型鋼に設置したW.S.G.により平行保持装置の軸力負担量を測定した。

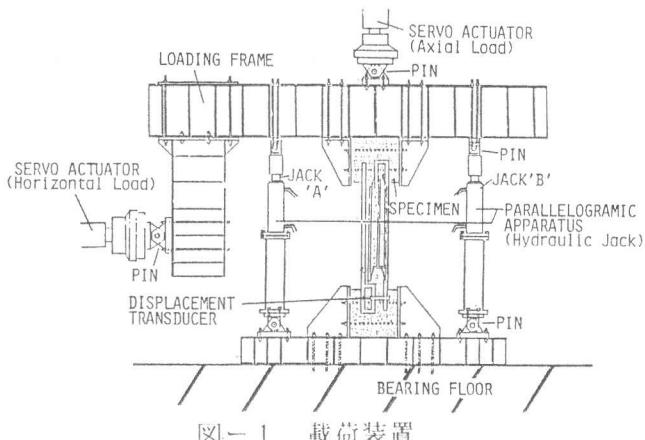


図-1 載荷装置

表-1 供試体名称

2D16-M-S	S: Static Loading D: Dynamic Loading M: Monotonic Loading R: Reversed Cyclic Loading Diameter of Longitudinal Bar Number of Longitudinal Bar
4D13	200 25 50 25 100 150 100 35 280 35 350 400
2D16	200 25 150 25 150 200
	● W.S.G.

図-3 供試体詳細図

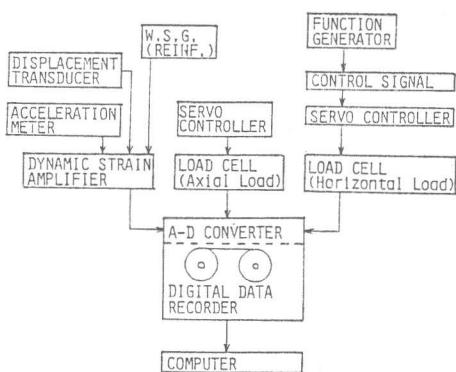


図-4 計測システム

○載荷履歴……各供試体の載荷速度及び載荷法の特性を表-2に示す。変形は水平層間変位で制御し、単調載荷供試体(M)は一定速度とし、動的(D)で柱頭速度200mm/s、静的(S)で0.32m/s(2D16-M-S)、0.11mm/s(4D13-M-S)とした。繰り返し載荷供試体(R)では変位の時刻歴が正弦波形となる柱頭の平均変位速度一定の変位振幅漸増形の載荷履歴を与えた。柱頭の平均載荷速度は、D1(20mm/s)、D2(200mm/s)の2レベルであり、さらに全履歴に要する時間がD2と等しくなる周期一定(0.44s/cycle)のD3を設定した。各変位振幅での繰り返しは2回である。

### 3 実験結果と考察

○実験結果一覧……表-3に実験結果一覧、図-5に(a)単調載荷供試体の荷重-変形曲線、(b)繰り返し載荷供試体の荷重-変形曲線及び(c)その包絡線を示す。動的載荷供試体の荷重-変形曲線は慣性力の補正を行ない、デジタルフィルタによりノイズを除去してある。破壊モードは、2D16-M-S、2D16-M-D供試体が曲げ破壊、4D13-R-S供試体が降伏前の付着割裂破壊であるほかは、降伏後の付着割裂破壊である。動的載荷により降伏荷重は9~17%上昇し、荷重-変形曲線の剛性も15~25%

表-2 載荷法特性値

試験 サイクル (mm) (回)	柱頭平均速度 (mm/s) (s)	S		D1		D2		D3	
		周期 計算値(g)	最大加速度 計算値(g)	周期 最大加速度 計算値(g)	周期 最大加速度 計算値(g)	柱頭平均速度 200mm/s (mm/s) (s)	柱頭平均速度 200mm/s (mm/s) (s)	周期 最大加速度 計算値(g)	柱頭平均速度 200mm/s (mm/s) (s)
4	2	80	2.52x10 <sup>-5</sup>	0.8	2.52x10 <sup>-2</sup>	0.08	2.52	36.4	0.083
8	"	160	1.26x "	1.6	1.26x "	0.16	1.26	72.7	0.166
12	"	240	0.81x "	2.4	0.81x "	0.24	0.84	109.1	0.279
16	"	320	0.63x "	3.2	0.63x "	0.32	0.63	145.4	0.332
20	"	400	0.50x "	4.0	0.50x "	0.40	0.50	181.8	0.415
24	"	480	0.42x "	4.8	0.42x "	0.48	0.42	209.1	0.498
28	"	560	0.36x "	5.6	0.36x "	0.56	0.36	254.5	0.501
32	"	640	0.31x "	6.4	0.31x "	0.64	0.31	290.9	0.664
36	"	720	0.28x "	7.2	0.28x "	0.72	0.28	327.3	0.747
40	"	800	0.25x "	8.0	0.25x "	0.80	0.25	363.6	0.830
TOTAL TIME		8800(s)		88(s)		8.8(s)		8.8(s)	

表-3 実験結果一覧

SPECIMEN DESIGNATION	COMPRESSIVE STRENGTH** (kNf/cm <sup>2</sup> )	TEST RESULTS					Qu cal. ton*) <sup>3</sup>	FAILURE MODE*) <sup>4</sup>
		Gy *1 (ton)	Ry *1 (ton)	Qmax *2 (ton)	Rmax *2 (ton)	Qu cal. ton*) <sup>3</sup>		
2D16-M-S	286	28.3	9.6	8.4X10 <sup>-3</sup>	9.9	1.2X10 <sup>-2</sup>	9.9	F
2D16-M-D	328	29.3	11.2	1.2X10 <sup>-2</sup>	11.2	1.3X10 <sup>-2</sup>	10.0	F B
2D16-R-S	328	29.3	10.3	9.8X10 <sup>-3</sup>	10.4	1.1X10 <sup>-2</sup>	10.0	F B
2D16-R-D1	286	28.3	-9.2	-8.4X10 <sup>-3</sup>	-9.4	-9.5X10 <sup>-3</sup>		
2D16-R-D2	286	28.3	9.9	1.1X10 <sup>-2</sup>	10.3	1.5X10 <sup>-2</sup>	9.9	(F)B
2D16-R-D3	328	28.3	-9.5	-1.3X10 <sup>-2</sup>	-9.5	-1.3X10 <sup>-2</sup>		
4D13-M-S	283	26.5	12.0	1.0X10 <sup>-2</sup>	12.1	1.1X10 <sup>-2</sup>	11.6	F B
4D13-M-D	283	26.5	13.1	1.3X10 <sup>-2</sup>	13.1	1.5X10 <sup>-2</sup>	11.6	F B
4D13-R-S	305	27.6	—	—	—	11.4	8.4X10 <sup>-3</sup>	11.6
4D13-R-D2	305	27.6	not specified	—	—	-10.4	-8.9X10 <sup>-3</sup>	
4D13-R-D3	305	27.6	12.1	1.6X10 <sup>-2</sup>	12.4	1.4X10 <sup>-2</sup>	11.6	(F)B
			-10.8	-1.5X10 <sup>-2</sup>	-11.1	-1.4X10 <sup>-2</sup>		
					-10.8	-1.5X10 <sup>-2</sup>	11.6	F B

\*\*: Static Test Results  
\*1: Load and Deflection at Yield  
\*2: Load and Deflection at Maximum Load  
\*3: Calculated Value  
 $M_u = 0.8A_f \cdot c_y \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D \cdot (1 - N/(b \cdot D \cdot F_c))$   
 $Qu_{cal} = 2Mu/h$   
\*4: F: Flexural Failure  
B: Splitting Bond Failure prior to Yield  
FB: Splitting Bond Failure after Yield  
(F)B: Yielding was not strictly confirmed

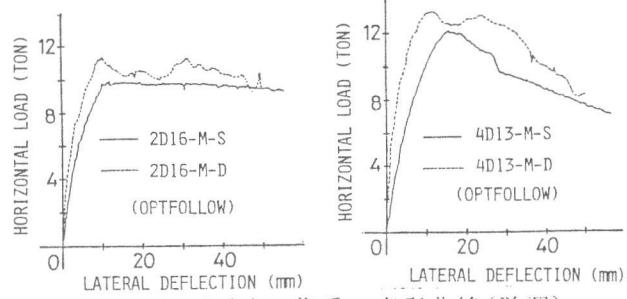


図-5(a) 荷重-変形曲線(単調)

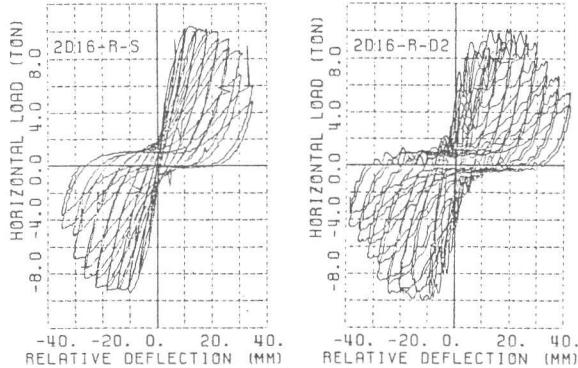
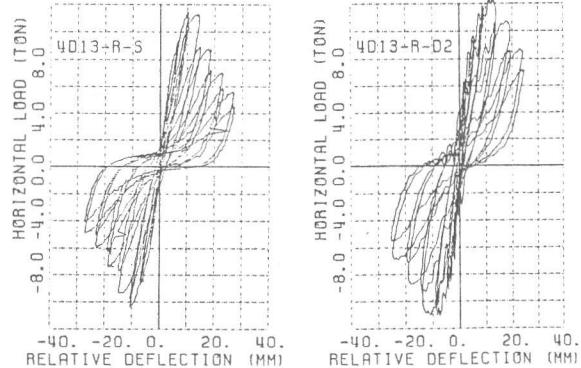


図-5(b) 荷重-変形曲線(繰り返し)



大きくなっている。最終的なモードは同じであるが、4D13-M-Sは主筋降伏後に付着割裂破壊を生じ耐力が急激に低下したのに対し、4D13-M-Dでは主筋降伏後もしばらく耐力を維持し、変形25mmあたりで耐力が低下している。4D13繰り返し載荷供試体では、静的載荷(R-S)で主筋降伏以前に付着割裂破壊したのに対し、4D13-R-D3では主筋降伏以後の付着割裂破壊が確認されており、動的載荷による付着破壊耐力の上昇率が、曲げ破壊耐力の上昇率に比べいくぶん大きいことが考えられる。2D16繰り返し載荷供試体では破壊モードの変化は見られなかった。なお、平行保持装置の軸力負担量は2D16-R-D2で最大6.6tonを示した以外は最大2ton程度であり、平行度のずれの実測値は4D13-R-D2で $-2.0 \times 10^{-3}$ ～ $3.6 \times 10^{-3}$ (rad)であった。

○単調載荷供試体の主筋歪・横補強筋歪……表-4に、単調載荷供試体の柱頭変形速度と、図-6に示したクリティカルセクションにおける主筋歪一時刻歴から求めた主筋の応力速度・歪速度を示す。ここで、動的載荷供試体の歪速度は0.05/sであり、地震時の歪速度のほぼ上限と対応していると思われる。この程度の歪速度で10～15%の降伏点上昇が考えられ、曲げ降伏荷重の上昇を説明している。静的載荷では主筋の降伏歪の進行が明確に見られるのに対して、動的載荷でははっきりした降伏歪があらわれていない。図-7に各W.S.G.設置位置での(a)荷重-主筋歪履歴、(b)荷重-横補強筋歪履歴を示す。図中に示した番号は引張側から①, ②, ……⑤である。静的載荷供試体で主筋歪が最初から直線的に増大するのに対し、動的載荷供試体では曲げひび割れが発生したと思われる高い荷重階まで歪はほとんど増大していない。横補強筋については、動的載荷供試体ではせん断ひび割れの発生に伴い歪が急激に増大し始めると思われる荷重階が静的載荷供試体に比べ大きく上昇しており、動的載荷によりせん断ひび割れ荷重も上昇していることがよくわかる。

○曲げモーメント-曲率関係……図-8に単調載荷供試体のクリティカルセクションにおける曲げモーメント-曲率関係を示す。曲げモーメントは供試体に与えられた

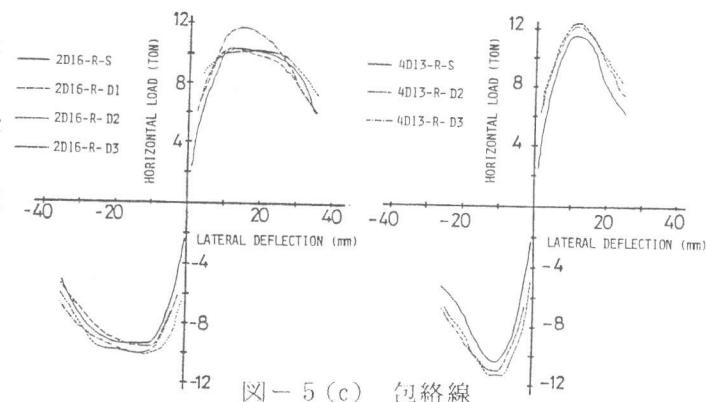


図-5(c) 包絡線

表-4 変形速度、応力速度、歪速度

SPECIMEN	DEFLECTION RATE $\dot{\delta}$ (mm/sec)	STRESS or STRAIN RATE $\dot{\sigma}$ (kgf/cm <sup>2</sup> /sec) $\dot{\epsilon}$ (/sec)
2D16-M-S	0.32	$1.4 \times 10^2$ $7.0 \times 10^{-3}$
4D13-M-S	0.11	$4.1 \times 10^2$ $2.2 \times 10^{-5}$
2D16-M-D	200	$1.0 \times 10^5$ $5.1 \times 10^{-2}$
4D13-M-D	200	$9.4 \times 10^4$ $5.0 \times 10^{-2}$

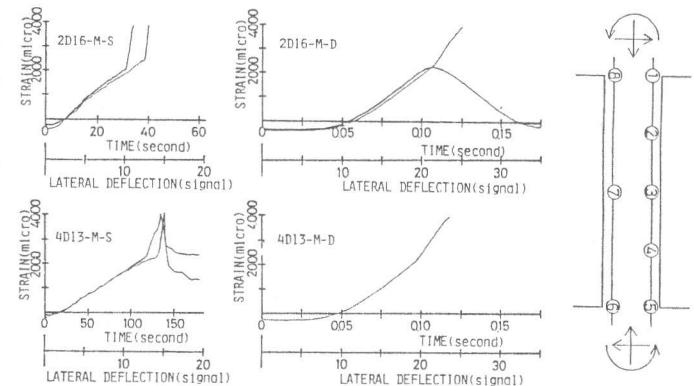


図-6 主筋歪一時刻歴 W.S.G.

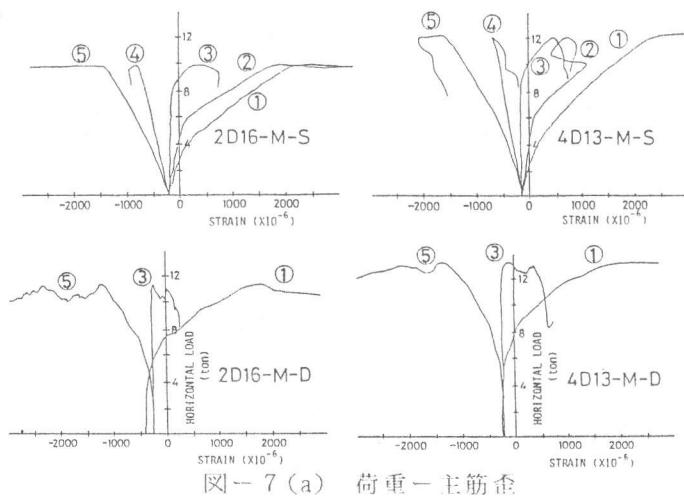


図-7 (a)

荷重-主筋歪

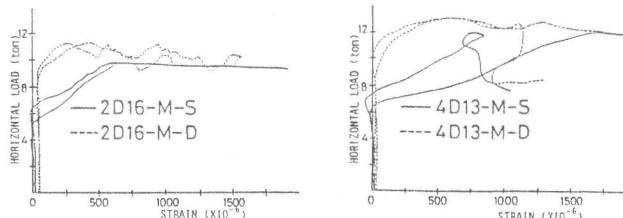


図-7 (b) 荷重-横補強筋歪

水平力から、曲率は引張及び圧縮鉄筋の歪から求めたものである。動的載荷供試体では曲げ剛性が大きく増大し、また、曲げひび割れが発生したと判断される曲げモーメントが大きく増大しており動的載荷によるコンクリート引張強度の上昇が推定される。図-9に4D13-R-Sと4D13-R-D3供試体の曲げモーメント-曲率関係を示す。

4D13-R-Sではモーメントと曲率がほぼ線形関係であるのに対し、4D13-R-D3では履歴のあるループとなっており、動的載荷によって曲げひび割れ性状及び材長にわたる曲率分布に変化が起こることが予想される。

○単調載荷供試体の平均付着応力 図-10に単調載荷供試体の平均付着応力と柱頭変位の関係を示す。上段は引張側から反曲点まで、下段は反曲点から圧縮側までの平均付着応力を示している4D13供試体の引張側では平均付着強度が動的載荷によって上昇しているのに対し、圧縮側では上昇は見られない。動的載荷による付着割裂強度の上昇は20%程度であり、昨年実施した載荷速度をパラメータとした付着引き抜き試験の結果③)と対応したものとなっている。

○変形性能 韧性等級にかわる変形性能の評価方法として提案された $\rho$ 及び $\rho'$ ④)による $\rho-\rho'$ 関係を図-11に示す。ここで2D16は柱頭変位36mm、4D13は柱頭変位28mmにおける $\rho$ 、 $\rho'$ を示している。 $\rho$ は主としてループ面積に基づくエネルギー吸収能力に着目したものであり、 $\rho'$ は主として繰り返しによる荷重低下に重点を置いたものである。 $\rho$ 、 $\rho'$ とも動的載荷によって大きくなり、変形性能に有利に働くことがわかる。

#### 4 結論

地震時に生じると思われる載荷速度下では、①曲げ降伏荷重の上昇と同様に、付着割裂破壊耐力も上昇し、静的載荷により得られる破壊モードが変化する可能性がある。②曲げひび割れ荷重、せん断ひび割れ荷重が顕著に上昇し、初期剛性も大きくなり、変形性能に有利に働く。

#### [参考文献]

- 1) Jirsa他; CESRL REPORT No. 78-2 (SEPTEMBER -1978)
- 2) 森本他; コンクリート工学年次講演会論文集1984 p549~p552
- 3) 藤井他; 学会近畿支部研究報告集 昭和59年6月 p45~p48
- 4) 青山; 建研昭和51年度総プロ報告書……建築構造部材の耐震強度の解析—RC柱の韌性向上について(その3)

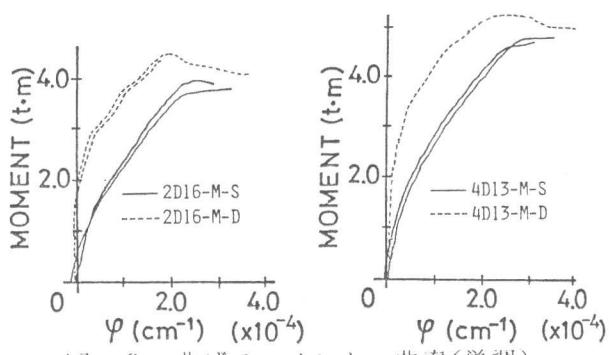


図-8 曲げモーメント-曲率(単調)

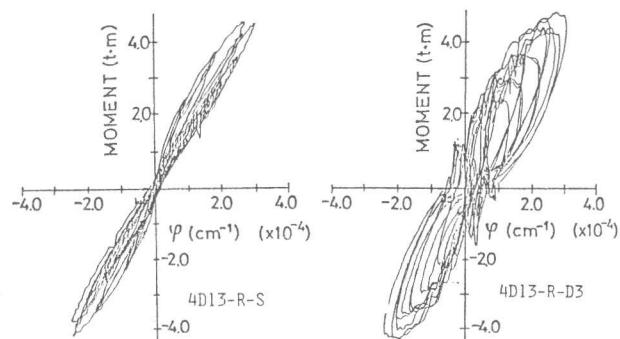


図-9 曲げモーメント-曲率(繰り返し)

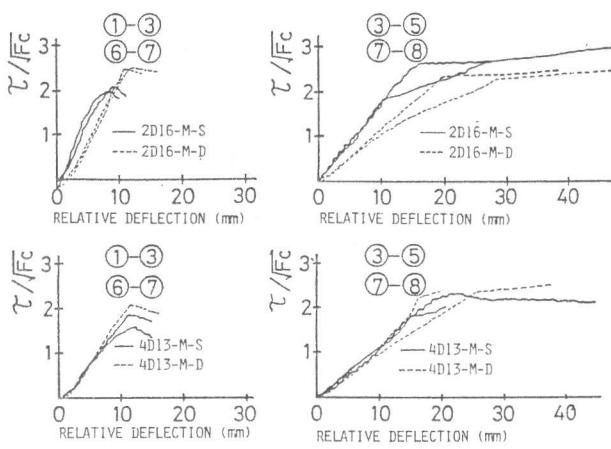


図-10 平均付着応力

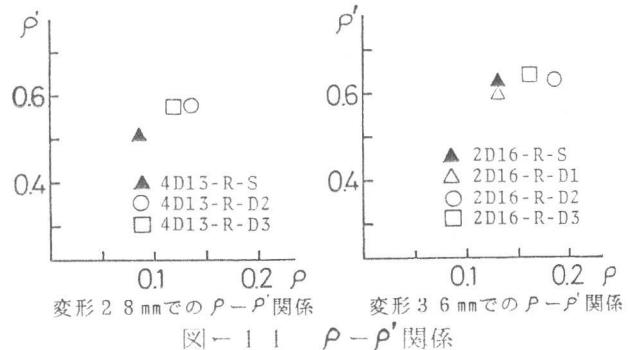


図-11  $\rho-\rho'$  関係

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{\sum (S_i/P_y \delta_i)^2 \cdot \sqrt{\delta_i/P_i}}{\sum \delta_i/P_i}}$$

$$\rho' = \sqrt{\frac{1/2 \cdot \sum ((P_i/\rho_y)^2 + (S_i/\pi \delta_i P_i)^2)}{N}}$$