

論文

[2053] アンボンド緊張材で補強した RC はりの疲労性状

正会員 ○ 黒川章二 (木更津工業高等専門学校)  
 正会員 植田紳治 (木更津工業高等専門学校)  
 大木正喜 (木更津工業高等専門学校)

1. まえがき

コンクリートと付着しないアンボンドPC鋼材を緊張材としてRC部材に配置すれば、容易な施工により、プレストレスの導入による補強がなされ、さらに使用中の部材に有害なひびわれが発生しても、緊張材を再緊張することによりひびわれを閉合させることができるものと考えられる。しかし、アンボンド緊張材はプレストレス力と荷重により生じる引張力とを定着端で受けるので、緊張材の定着端破壊が懸念される。PC鋼棒を用いたアンボンドPCはりの疲労試験において定着ナット前面での緊張材の破断が報告されている[1]。その破断の原因として、緊張材と支圧面の直交性の不整が考えられる。そこで、アンボンドPC鋼棒用に、緊張材の破断を防止するための自在座金を試作した。

ここでは、RCはり、自在座金を用いてアンボンド緊張材を配置したRCはり( PRCはりおよび )について、静的載荷試験および疲労試験を行ない、RCはりにおけるアンボンド緊張材の付加効果について検討した。そのうえで、繰返し荷重を履歴したPRCはりにおいて再緊張をしてから疲労試験を行ない、再緊張がPRCはりの疲労特性に及ぼす影響について考察した。

2. 自在座金

自在座金は図1に示すように2枚のクサビ状穴あき円板で構成される。これは、上下底が平行な円柱を斜めに切断したものであり、互いに回転させることにより、任意方向の任意角度の調整が可能である。

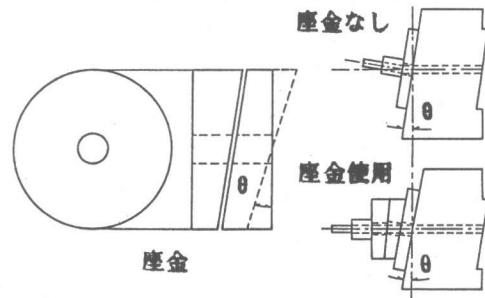


図1 自在座金

3. 供試体および実験方法

3.1 供試体

RCはりは、設計基準強度450kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートと異形棒鋼SD30-D19を用いた許容応力度設計法のつり合い鉄筋比である。

PRCはりは、φ13 SBPR 95/110 アンボンドPC鋼棒を緊張材として上述のRCはりに付加して、プレストレスを導入したものである。高緊張応力状態でのアンボンド緊張材の疲労性状を検討するために、導入引張力の目標値はPC鋼棒引張強さの80%とした。供試体の寸法は図2に示すとおりである。用いたコンクリートの材料は、早強ポルトランドセメント、細骨材が富津産山砂、粗骨材が身

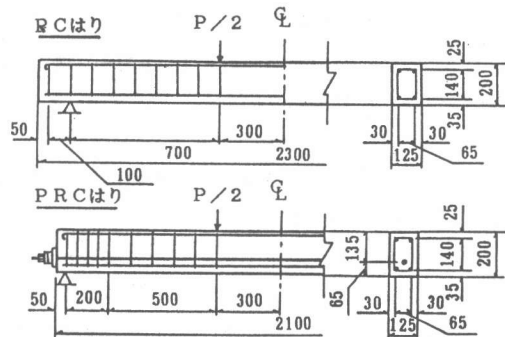


図2 供試体および載荷方法

延産砕石である。減水剤としてポゾリスNo5Lをもちいた。コンクートの示方配合は表1に示すとおりである。異形棒鋼とPC鋼棒の試験結果をそれぞれ表2と表3に示した。4本のはりを同時に製造して、そのうちの1本を静的載荷試験、3本を疲労試験に用いた。供試体の養生は、材令7日まで布で覆って散水し、その後実験室内における空中養生とした。

PRCはりについて、材令7日でプレストレスを導入した。導入引張力は、緊張材に貼ったストレインゲージを用いて計測し、目標値 12.11tfに対して定着の具合により多少ばらつきが見られた。それから試験の直前までのコンクリートの乾燥収縮とクリープひずみをコンタクト型ひずみ計を用いて測定した。PC鋼材の純レラクセーションは多項e関数式[2]を用いて計算し、見かけのレラクセーションはG. Dreuxの近似解[3]を用いて計算した。その結果と、緊張材の導入および有効引張力について表4に示した。なお記号PRCは静的載荷試験用はり、PRFは疲労試験用はりを表わす。

### 3.2 実験方法

載荷方法は、図2に示すようにスパン200cmで単純支持をして荷重点間隔60cmの対称2点載荷とした。静的載荷試験においては、ひびわれが発生するまで0.2tfごと、その後は0.4tfごとに荷重を増加させた。各荷重段階でひずみ、たわみ、ひびわれを測定した。ひびわれ測定に倍率20倍の光学的クラック計を用いた。疲労試験においては、静的試験の結果に基づいて、静的強さに対し下限荷重を10%として、上限荷重をパラメータとした。上限荷重までの静的載荷試験を行なった後、疲労試験を開始した。繰返し荷重は、バルセータによる250c.p.mの正弦波荷重である。疲労試験中に適時バルセータを止めて静的載荷試験を行なった。

繰返し荷重を履歴したPRCはり（PRF7、8、9、10、11、12）について再緊張を行なったのちに疲労試験を続行した。再緊張力は、用いたPC鋼棒の引張強さの80%、すなわち初回の導入引張力と等しくした。再緊張するまでにはりに履歴させた荷重サイクル数は、再緊張なしのPRCはり（PRF1、2、3、4、5、6）の実験式を求めて、それを基にした疲労寿命の10%とした。

表1 コンクリートの指示配合

スラン プ	粗骨 材の 最大 寸法	W/ C	細 骨 材 率	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメ ント	細 骨 材	粗 骨 材	ポゾ リス No. 5L
4 <sup>±</sup> 1	20	40	41	143	358	735	1096	0.895

表2 異形棒鋼の試験結果

公称 径 mm	降伏 強さ kgf/mm <sup>2</sup>	引張 強さ kgf/mm <sup>2</sup>	伸び %	絞り %	弾性 係数 kgf/mm <sup>2</sup>
19.1	37.2	56.3	22.1	46.0	21000

表3 PC鋼棒の試験結果

呼び 名 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	降伏 強さ kgf/mm <sup>2</sup>	引張 強さ kgf/mm <sup>2</sup>	伸び %	弾性 係数 kgf/mm <sup>2</sup>
13	132.7	107	114	12.0	20200

表4 緊張材の引張力と損失率

供試体	導入引 張力 tf	経過 時間 日	有効引 張力 tf	L <sub>c</sub> %	R %
PRC 1	11.96	84	10.90	5.89	2.99
PRF 1	11.39	85	10.41	5.60	2.97
PRF 2	12.06	86	10.95	6.20	2.98
PRF 3	12.01	87	10.91	6.20	2.99
PRC 2	11.75	56	10.80	5.29	2.76
PRF 4	11.75	71	10.76	5.57	2.89
PRF 5	11.70	62	10.73	5.50	2.81
PRF 6	11.75	57	10.79	5.40	2.76
PRC 3	12.11	112	10.74	8.50	2.83
PRF 7	12.11	114	10.75	8.40	2.85
PRF 8	12.11	125	10.62	9.50	2.81
PRF 9	12.00	127	10.67	8.20	2.92
PRC 4	12.23	83	10.98	7.40	2.79
PRF 10	12.35	90	10.80	9.90	2.68
PRF 11	12.04	104	10.79	7.40	2.97
PRF 12	11.85	112	10.66	7.00	3.02

L<sub>c</sub>: コンクリートの乾燥収縮とクリープによる損失率  
R: 緊張材の見かけのレラクセーション

4. 静的載荷試験結果および考察

表5に静的載荷試験結果の概要を示す。RCはりは曲げ区間の鉄筋の降伏により破壊した。PRCはりにおいてはすべてコンクリートの曲げ圧縮破壊が生じた。RCはりに対するPRCはりの耐力比は、ひびわれ耐力で2.06、極限耐力で1.38である。すなわち、アンボ

ンド緊張材による補強効果が顕著である。下縁に導入した有効プレストレスは60~66 kgf/cm<sup>2</sup>であり、これによりひびわれ耐力が約2倍に増大したことになる。

図3は、スパン中央断面における荷重と圧縮縁コンクリートひずみとの関係を示す。PRCはりのひずみは、RCはりのひずみと比べて小さい値をしめしており、荷重が大きくなるにつれて、その差がますます大きくなる傾向を示している。

図4に、スパン中央断面において測定された荷重と鉄筋のひずみとの関係、荷重と緊張材のひずみとの関係を示した。ひびわれ発生後の荷重段階において、PRCはりの鉄筋のひずみはRCはりのそれよりも小さく、荷重が増すにつれてその差が拡大している。すなわち、アンボンド緊張材を配置してプレストレスを導入したことにより、荷重が低いうちはプレストレスの効果、荷重が増大してひびわれの拡幅などが著しくなると、緊張材の伸びが増大し緊張材のバネ作用が活発化して断面変形の抑制効果が大きくなるようである。

PRCはりにおける緊張材のひずみは、荷重の増加にともなって増大するが、荷重が3.0tfをこえるとその増加率が大きくなっている。破壊近くなると急激なひずみの増加がみられる。図4に示したPRC1の場合、緊張材の荷重によるひずみ増加量は、最終的に890×10<sup>-6</sup>であって、緊張材の有効引張応力82.12kgf/mm<sup>2</sup>をあわせて考えると、はりの極限荷重時の応力は100kgf/mm<sup>2</sup>に達していた。この値はPC鋼棒の降伏強さの93.5%に相当する。このことから、アンボンド緊張材は、緊張応力を相当に大きくしても容易に降伏しないことがわかった。

表5 静的載荷試験結果の概要

供試体	コンクリートの性質			はりの静的試験結果				破壊形式
	圧縮強さ	引張強さ	弾性係数	ひびわれ荷重	極限荷重	ひびわれ本数		
	kgf/cm <sup>2</sup>			tf	tf	N面	S面	
RC 1	526	37.3	312000	1.00	9.11	21	21	TY
RC 2	508	35.2	319000	0.80	9.48	26	25	TY
PRC 1	586	39.9	310000	1.80	12.83	22	24	CM
PRC 2	582	42.8	315000	1.80	12.75	22	19	CM
PRC 3	512	34.5	342000	2.00	12.81	23	22	CM
PRC 4	482	33.5	315000	1.80	12.98	23	23	CM

CM:コンクリートの曲げ圧縮破壊      TY:鉄筋の降伏

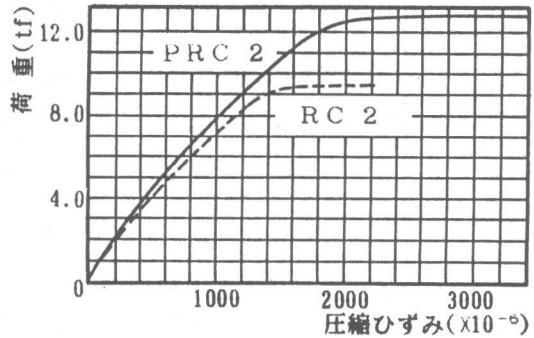


図3 荷重と圧縮縁コンクリートひずみとの関係

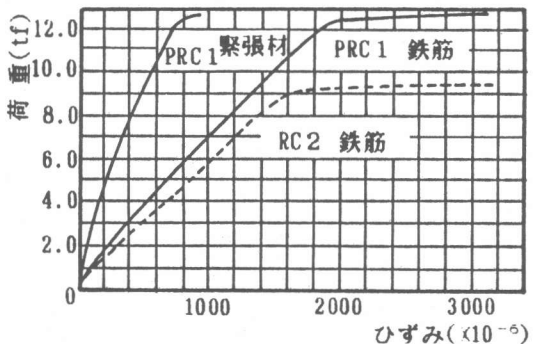


図4 荷重と鉄筋および緊張材のひずみとの関係

つぎにひびわれについて述べる。RCはりおよびPRCはりはいずれにおいても、表5に示したように数多くのひびわれが発生した。ひびわれの種類は、曲げ区間に生じた曲げひびわれ、せん断区間において曲げせん断ひびわれ、せん断ひびわれであった。RCはりの場合、支点の近傍までひびわれが分布したが、PRCはりの場合、支点よりかなり内側の範囲に分布していた。これは、有効プレストレスによりコンクリートの主引張応力が軽減され、さらに、荷重の増加にともなって曲げ区間の曲げひびわれが拡幅すればアンボンド緊張材の引張力が増大して緊張材の着端から2次的なプレストレスが導入されて、せん断変形に対して有効な抑制作用がなされることに起因するようである。

図5に、荷重とひびわれ本数との関係を示す。RCはりおよびPRCはりのいずれにおいても、初期ひびわれが発生してから、ひびわれ本数が約15本になるまでは著しい増加率でひびわれ本数が増えている。その後、ひびわれ発生率が鈍化している。最終的にPRCはりのひびわれ本数が、RCはりよりも少ないが、これはアンボンド緊張材による有効プレストレスおよび2次的プレストレスの導入により支点近傍のせん断ひびわれが防止されたことによると考えられる。図6は、曲げ区間において引張縁で測定した荷重とひびわれの最大幅との関係である。同一荷重に対して比較すると、RCはりのひびわれ幅はPRCはりのそれよりもはるかに大きい。PRCはりでは、ひびわれ発生荷重が高いのはプレストレスの影響であり、ひびわれ発生後の抑制はアンボンド緊張材のバネ作用によるといえる。

図7に、スパン中央における荷重とたわみとの関係を示す。RCはりとはりP RCはりのいずれにおいても、たわみは、ひびわれが発生するまでは荷重と比例しており、その後荷重に対するたわみの増加率が大きくなる。同一荷重レベルにおけるPRCはりのたわみは、RCはりのそれよりも小さく、荷重が大きくなるにつれてその傾向が著しい。このことから、アンボンド緊張材はひびわれが発生した後の剛性の保持に大いに寄与しているといえる。

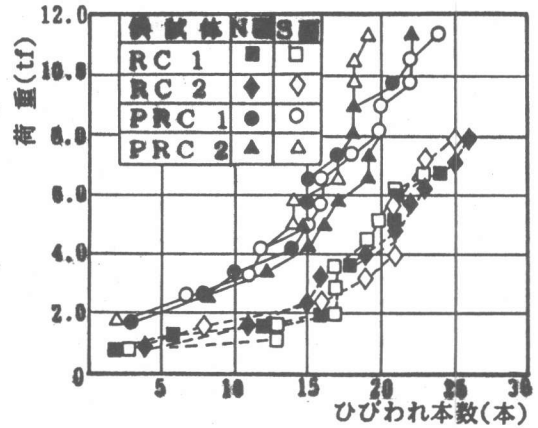


図5 荷重とひびわれ本数との関係

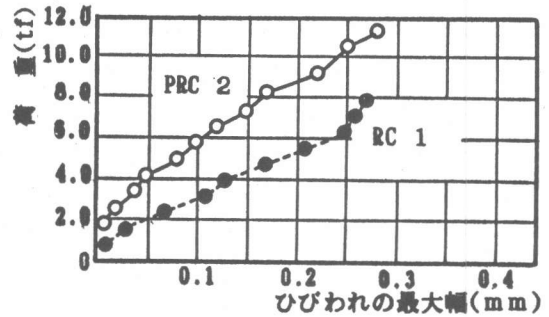


図6 荷重とひびわれの最大幅との関係

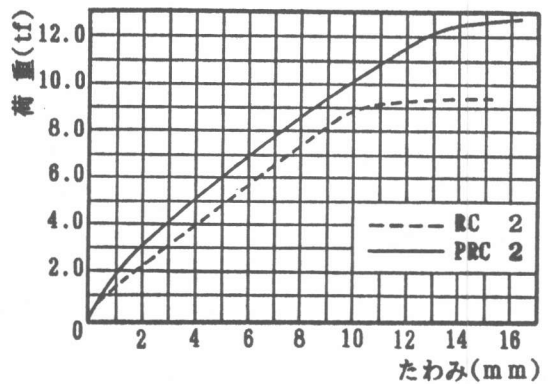


図7 荷重とたわみとの関係

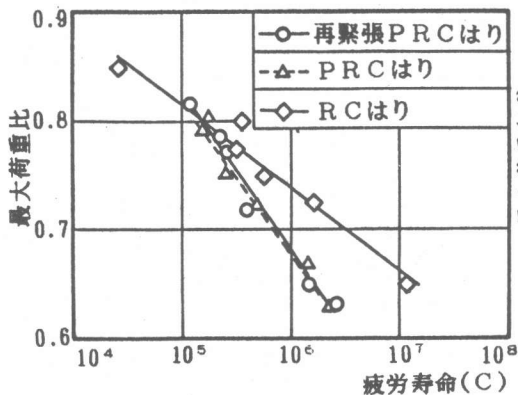


図8 最大荷重比と疲労寿命との関係

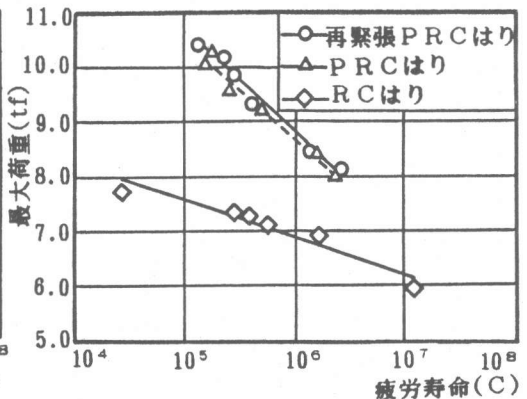


図9 最大荷重と疲労寿命との関係

5. 疲労試験結果および考察

表6に、疲労試験結果の概要を示した。表中で、疲労試験-AはRCはり、BはPRCはり、Cは繰返し荷重履歴後に再緊張をしたPRCはり、を供試体とした。

RCはりでは、コンクリートの曲げ圧縮、鉄筋の引張破断、コンクリートのせん断による疲労破壊が生じたが、PRCはりにおいてはいずれの場合にもせん断破壊は生じなかった。高緊張応力を導入したアンボンド緊張材の破壊は皆無であり、自在座金の効果があったと考えられる。

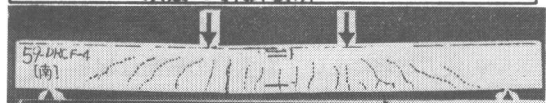
図8に、最大荷重比と疲労寿命との関係を示した。同一荷重比に対して、荷重比がほぼ80%以下の場合に、RCはり、再緊張PRCはり、PRCはりの順に多くの荷重サイクルに耐えることができるが、最大荷重と疲労寿命との関係を示すと図9のようになる。この図によれば、RCはりに比べて、PRCはりの疲労強度ははるかに大きいことがわかる。再緊張したPRCはりの疲労強度は、他方のPRCはりよりも幾分大きい。

図10に、ひびわれ状況を示した。RF4は曲げ区間内で鉄筋の曲げ引張疲労破壊したが、せん断ひびわれが広く分布している。RF6は、せん断破壊したRCはりである。PRF6は、鉄筋の曲げ引張疲労破壊したPRCはりである。ひびわれの分布がRCはりに比べてかなりせまくなっている。これは、前に

表6 疲労試験結果の概要

	供試体	上限荷重 tf	上限荷重比	はりの疲労寿命 10 <sup>4</sup> C	破壊形式
疲労試験 A	RF 1	7.74	0.850	2.63	CM
	RF 3	7.29	0.800	35.50	CM
	RF 4	7.35	0.775	29.79	TR
	RF 5	7.11	0.750	57.42	TR
	RF 6	6.87	0.725	162.05	CS
	RF 2	5.92	0.650	1193.63	TR
疲労試験 B	PRF 1	10.27	0.800	16.70	CM
	PRF 2	10.11	0.788	15.57	CM
	PRF 4	9.56	0.750	24.61	TR
	PRF 3	9.22	0.719	45.24	TR
	PRF 6	8.43	0.661	146.37	TR
疲労試験 C	PRF 5	7.97	0.625	236.06	TR
	PRF 9	10.45	0.816	13.53	CM
	PRF 10	10.20	0.786	21.87	CM
	PRF 8	9.89	0.772	27.02	CM
	PRF 12	9.33	0.719	41.61	TR
	PRF 11	8.45	0.651	140.25	TR
	PRF 7	8.10	0.632	261.19	TR

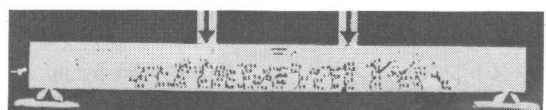
CM: コンクリートの曲げ圧縮破壊  
CS: コンクリートのせん断破壊  
TR: 鉄筋の引張破断



(a) RF 4



(b) RF 6



(c) PRF 6

図10 ひびわれ状況

述べたように、有効プレストレスの効果に加えて、アンボンド緊張材のバネ作用によりせん断部のコンクリートに2次的なプレストレスが導入されるためである。

PRCはりにおいて、疲労寿命の10%の繰返し荷重を受けた直後に行なった再緊張前後の静的荷重試験による荷重とひびわれとの関係を図11に示した。再緊張力は12.11 tfであり、この値と有効引張力との差が追加される力となる。その力は小さいけれどもひびわれの改善が認められる。

図12は、再緊張におけるジャッキの力と圧縮縁コンクリートおよび鉄筋のひずみとの関係である。この図から推定した有効引張力は表7に示すとおりである。表に示したように、再緊張により鉄筋に圧縮ひずみ、圧縮縁コンクリートに引張ひずみが導入されて、繰返し荷重に対する最大応力が緩和され疲労寿命が長引く効果が現われた。

6. まとめ

本研究はアンボンド緊張材で補強したRCはりの疲労性状について検討した。その内容は実験の範囲内で次のようにまとめられる。

- (1) アンボンド緊張材の利用により疲労強度が著しく増大した。
- (2) アンボンド緊張材による有効プレストレスとバネ作用によりひびわれの抑制と耐力の向上がなされた。
- (3) 自在座金を用いて定着したPRCはりの疲労試験において緊張材の破断は起らず、この自在座金はアンボンド緊張材の定着端の破断防止に有効に作用するものと考えられる。
- (4) アンボンド緊張材の利用により、繰返し荷重を履歴したPRCはりにプレストレスの再導入が可能であり、ひびわれのコントロール、疲労強度の回復も期待できる。

参考文献

[1] 黒川章二：アンボンドPCはりの疲労に関する実験的研究、土木学会36回年次学術講演概要集 5部 pp.418~419 1981

[2] PC鋼材委員会：純レラクセーション曲線の関数表現と長期レラクセーション値の推定、プレストレスコンクリート Vol.28 No.6 pp.22~32 1978

[3] PC鋼材委員会：PC鋼材レラクセーションとコンクリートのクリープ、乾燥収縮の相互作用を考慮したプレストレス減退量の解析、プレストレスコンクリート Vol.28 No.6 pp.32~41

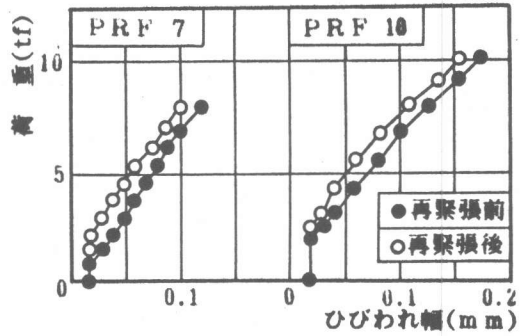


図11 再緊張前後の荷重とひびわれとの関係

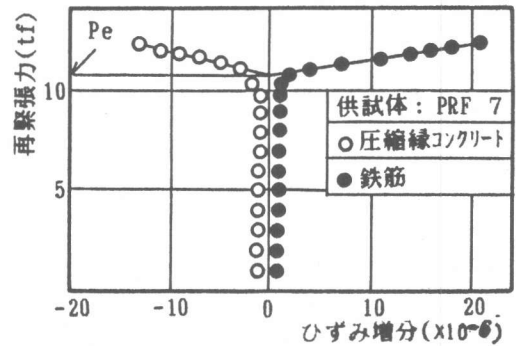


図12 再緊張によるプレストレスひずみの増分

表7 再緊張時の有効引張力とプレストレスひずみの増分

供試体	上限荷重比	履歴荷重回数(10 <sup>4</sup> )	有効引張力(tf)	ひずみ増分(10 <sup>-6</sup> )	
				鉄筋	引張縁
PRF 9	0.816	1.31	10.20	36	16
PRF 10	0.786	1.98	10.40	37	15
PRF 8	0.772	3.00	10.30	31	14
PRF 12	0.719	6.90	10.45	29	11
PRF 11	0.651	15.84	10.75	24	11
PRF 7	0.632	24.01	10.70	21	13