

[71] 鋼繊維補強コンクリート床版の押し抜きせん断強度

正会員 ○平沢征夫（中部工業大学土木工学科）
 正会員 伊藤和幸（中部工業大学土木工学科）
 正会員 愛知五男（中部工業大学土木工学科）
 正会員 高木克則（水資源開発公団）

1. まえがき

近年、交通荷重の増大により道路橋床版の破損がしばしば見られるが、これは荷重直下のコンクリートが押し抜かれるような形で生ずる押し抜きせん断破壊によるものが多い。その対策として床版厚を増すことは自重の増加につながるので安易に増すことができない。とくに従来の鉄筋コンクリート床版を改修する際に性能向上を目指す場合に自重が問題となる。このような場合、主鉄筋を増加させるばかりでなく、コンクリートを鋼繊維混入コンクリートとすれば、その終局耐力および押し抜きせん断強度を改善することが可能であり、その上、耐摩耗性、耐久性も向上させ得るといふ利点があると考えられる。

本研究は上述の場合に鋼繊維の補強効果を定量化する必要があると考え、その一部である押し抜きせん断強度に着目した実験を行ない、その定量化を試みたものである。昨年度の報告¹⁾において、筆者らは、鋼繊維補強効果を床版厚の減少に向けることは、有効高さを減少させることであり、道路床版のように疲労が考えられる場合には変形（たわみ）を増加させやすいので有利でないことを示した。そこで本報告では、床版厚を一定にした場合、従来の鉄筋コンクリート床版（RC床版）と、鉄筋量と鋼繊維混入率を変化させた鋼繊維補強コンクリート床版（SFRC床版）の押し抜きせん断強度などを実験により求め比較することにより、①鋼繊維混入率を増すことにより主鉄筋をどの程度減少できるか、②押し抜け時の靱性はどの程度優れているか、③従来の実験式に対する適合性はどうか等に関して検討を行なった結果について述べたものである。

2. 実験の概要

a. 計画 表1に供試体の種類を示す。寸法はすべて90×90×10 cmの正方形床版とし、主鉄筋の有効高さは8.0 cm、配力筋の有効高さは7.0 cmとした。配筋は図1に示す4種類とし、異形鉄筋D10 mmを1.0 cmピッチで配筋したA床版（鉄筋比 $\rho = 0.95\%$ ）を基準床版とし、これと比較するために単位幅当りの鉄筋比を、その90%（ $\rho = 0.86\%$ 、ピッチ11.1 cm）、80%（ $\rho = 0.76\%$ 、ピッチ12.5 cm）および70%（ $\rho = 0.67\%$ 、ピッチ14.3 cm）に減少させた配筋を有するものをB、C、Dの床版とした。鋼繊維はこれらのA～D筋筋のそれぞれに、1.0、1.5、2.0%混入した。全部で13体作成した。

床版の終局強度の計算に必要な単位幅当りのモーメントを求める算定式を検定するために、床版の配筋A～Dをもとにした供試体を作成した。寸法は幅のみをそれぞれa（20.0 cm）、b（22.2 cm）、c（25.0 cm）、d（28.6 cm）の4種類とした。これらにそれぞれ鋼繊維混入率を1.0、1.5、2.0%の3種類をとり、無混入のもの1種を加えて合計13種類とし、同一種類の供試体を2体の合計26体とした。鉄筋は床版と同じものを使用し、有効高さは床版の主筋、配力筋の平均値の7.5 cmとした。

表-1 供試体種類

鉄筋比	A (a)	B (b)	C (c)	D (d)
0	A-0 (a-0)			
1.0	A-1.0 (a-1.0)	B-1.0 (b-1.0)	C-1.0 (c-1.0)	D-1.0 (d-1.0)
1.5	A-1.5 (a-1.5)	B-1.5 (b-1.5)	C-1.5 (c-1.5)	D-1.5 (d-1.5)
2.0	A-2.0 (a-2.0)	B-2.0 (b-2.0)	C-2.0 (c-2.0)	D-2.0 (d-2.0)

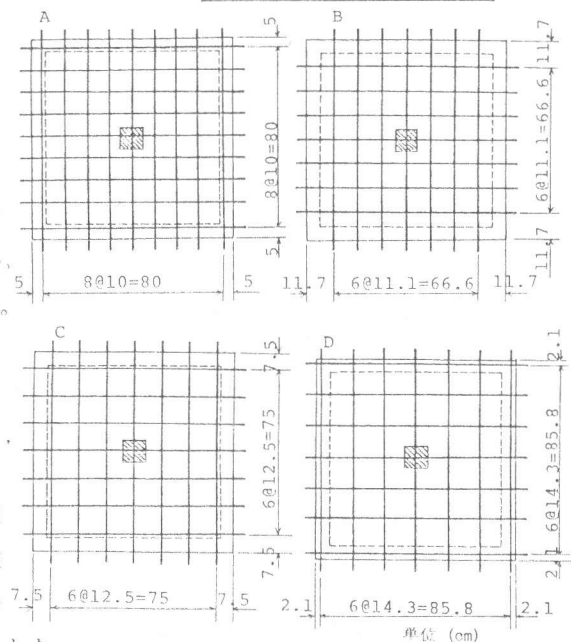


図-1 配筋の種類

b. 使用材料

セメントは普通セメント，骨材は粗骨材として長良川産の玉砕石（最大寸法 = 15 mm，比重 = 2.60，FM = 6.81）を用い，砂は長良川産の川砂（比重 = 2.61，FM = 2.75）を用いた。混和剤は高強度コンクリート用高性能減水剤 N をセメント量の 1% 用いた。鋼繊維は K 社製標準型（インデント付，φ 0.5 × 3.0 mm，アスペクト比 60，ρ = 7.85，E_s = 2.1 × 10⁶ kg/cm²，σ_{su} = 110 kg/mm）を使用した。鉄筋は D10 mm（SD35，σ_{sy} = 39.05 kg/cm²）を使用した。

c. 载荷および測定

床版载荷試験は図 2 に示すように床版中央部のコンクリートブロック（12 × 12 × 10 cm）への集中载荷とした。支持条件は四辺単純支持とした。スパンは 80 cm とした。測定は床版中央部下側において最小目盛 5 / 1000 mm のダイヤルゲージおよび電気抵抗式変位計を用いて床版が押し抜けるまでのたわみを測定した。鉄筋ひずみは，ゲージ長 2 mm の電気抵抗線ひずみゲージを用い，床版中央部分における主筋および配力筋のひずみを測定した。コンクリートの表面ひずみは，上面に 4 枚，下面に 2 枚のゲージ長 60 mm のひずみゲージにより測定した。これらのひずみは自動記録式ひずみ測定器により測定した。また，ロードセルと変位計より，荷重～たわみ曲線を X-Y レコーダーに記録した。試験は材令 28 日 ± 3 日で行なった。

はりの载荷は等モーメントスパンを 12 cm とした。測定は床版供試体とほぼ同様な方法で行なった。

なお，载荷試験に際して，図 3 に示したように，床版供試体側面，はり供試体側面の鉄筋のナットによる固定を行なったが，本実験では，鉄筋の両端にねじ切り加工を行ない，供試体の据え付けの際に，鉄板を介し，ワッシャ，ナットにより固定した。

床版およびはり供試体と同時に作成したテストピースにより，圧縮，曲げ，せん断，引張（割裂），純引張強度およびヤング係数を求めた。純引張強度試験は，10 × 10 × 40 cm の角柱供試体の中央部分を 6 × 10 cm になめらかに減少させた供試体を用いた。

3. 実験結果および考察

a. 従来の算定式の適合性

SFRC はりの終局曲げモーメントの計算は単純化した応力分布の仮定にもとづく，Henger²⁾ の次式によって行なった。ただし，σ_t には鋼繊維補強コンクリートの実測値を用いた。

$$M_u = A_s \sigma_{sy} \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - x) \left(\frac{h}{2} + \frac{x}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad \text{----- ①}$$

また RC はりの終局曲げモーメントは，ACI 式によって求めた。

つぎに床版の押し抜きせん断強度を求める式として，つぎの 3 式をとりあげた。

表 2 コンクリートの配合

	鋼繊維混入率 (%)	粗骨材の最大寸法 (cm)	スランディング (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (%)
							W	C	S	G	
R+C	0	15mm	8±1	2.5	50	49	190	380	830	692	1
F	1.0	15mm	8±1	2.9	50	58	210	420	942	694	1
R	1.5	15mm	8±1	2.8	50	68	220	440	1073	515	1
C	2.0	15mm	8±1	2.8	50	78	230	460	1200	345	1

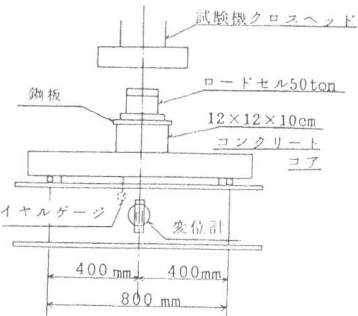


図 2 床版载荷方法

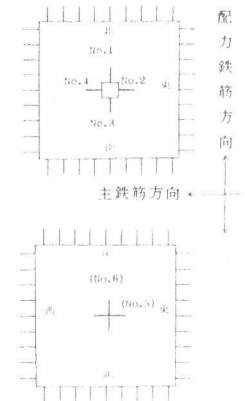


図 3 ひずみ測定位置

表 3 はりの終局強度の実験値と計算値の比較

供試体番号	b (cm)	d (cm)	h (cm)	f _c (kg/cm ²)	f _t (kg/cm ²)	計算値 P _{ur} (t)	実測値 P _u (t)	P _u /P _{ur}
1	20.0	10.2	7.7	516	32.13	7.60	2.93	1.221
2	20.1	10.3	7.7	516	32.13	2.36	2.89	1.225
3	20.1	10.1	7.4	520	30.67	3.70	3.23	0.873
4	19.5	10.2	7.7	520	30.67	3.72	3.40	0.914
5	22.3	10.2	7.5	520	30.67	3.91	3.32	0.849
6	22.2	10.2	7.6	520	30.67	3.96	3.43	0.866
7	24.9	10.3	7.7	520	30.67	4.26	3.45	0.810
8	25.1	10.2	7.5	520	30.67	4.18	3.50	0.837
9	28.5	10.1	7.5	520	30.67	4.42	3.51	0.794
10	28.7	10.1	7.4	520	30.67	4.40	3.60	0.818
11	20.1	10.1	7.7	473	33.00	3.82	3.66	0.953
12	20.1	10.1	7.6	473	33.00	3.76	3.73	0.992
13	22.4	10.1	7.5	473	33.00	3.94	3.59	0.911
14	22.4	10.2	7.5	473	33.00	4.00	4.13	1.033
15	24.8	10.2	7.7	473	33.00	4.28	3.62	0.846
16	24.8	10.2	7.5	473	33.00	4.22	3.80	0.924
17	29.0	10.0	7.6	473	33.00	4.57	3.68	0.805
18	28.3	10.1	7.5	473	33.00	4.48	4.65	1.038
19	20.0	10.0	7.6	502	32.38	3.74	4.26	1.139
20	20.1	10.2	7.7	502	32.38	3.83	3.82	0.997
21	22.3	10.2	7.6	502	32.38	4.02	3.64	0.905
22	22.4	10.2	7.7	502	32.38	4.07	4.13	0.990
23	26.7	10.2	7.7	502	32.38	4.25	3.85	0.906
24	25.0	10.3	7.8	502	32.38	4.34	4.01	1.106
25	28.5	10.2	7.7	502	32.38	4.43	4.90	1.061
26	28.8	10.2	7.6	502	32.38	4.43	4.95	1.071

b: はり幅 d: 有効高さ h: はり高さ σ_c: コンクリートの圧縮強度 σ_t: コンクリートの純引張強度

$$Moe^{3)}: V_u = \frac{3.97(1-0.075r/d)}{1+1.39bd\sqrt{\sigma_c}/V_f} bd\sqrt{\sigma_c} \quad \text{----- ②}$$

$$Hognestad^{4)}: V_u = \frac{2.24(1-0.075r/d)}{1+0.78bd\sigma_t/V_f} bd\sigma_t \quad \text{----- ③}$$

$$Mowrer^{5)}: V_u = \frac{2.57(1+d/r)}{1+1.39bd\sqrt{\sigma_c}/V_f} bd\sqrt{\sigma_c} \quad \text{----- ④}$$

②, ③, ④式中の V_f は降伏線理論による床版の曲げ破壊荷重であり, 次式で求めた。

$$V_f = \frac{8Lm_b}{\ell-r} \quad \text{----- ⑤}$$

L : 床版全幅
ℓ : スパン

b. SFRC はりに対する結果と考案

表 3 に 26 本のはりに対して, 式①あるいは ACI 式を用いて, 終局荷重を求めた結果を実験値と比較して示す。供試体 No. 1, 2 の RC はりに対する ACI 式の適合性はややよくないが, No. 3 ~ No. 10 の鋼繊維 1.0 % のはりから, No. 11 ~ No. 18 の鋼繊維 1.5 %, No. 19 ~ No. 26 の鋼繊維 2.0 % と鋼繊維の混入量が増すにつれて適合性がよくなるのがみられる。

図 4 は, はりの荷重～たわみ曲線より, 最大荷重時の 80 % における荷重上昇時のたわみに対する, 荷重下降時のたわみの比で靱性を表示して較べたものである。この図より, 荷重レベル 80 % での靱性率は, 鋼繊維混入量が少ないほど大きくなることを示している。

c. 床版に対する計算結果

表 4 に Moe, Hognestad, Mowrer らの式によるせん断破壊強度をそれぞれ, P_α , P_β , P_γ として示し, 同時に実験結果と比較して示した。これより 3 者の式のうちでは Moe による計算値が本実験の結果に最も近いことが明らかとなった。

d. 鋼繊維の混入率と押し抜きせん断強度

図 5 ~ 8 および表 5 ~ 6 に床版に関する試験結果を示した。図 5 に示す終局強度結果より, 配筋 A の床版では鋼繊維による補強効果が明確に現われ, RC 床版のせん断強度に対して, 鋼繊維混入率 1 % で 22 %, 1.5 % 混入で 35 %, 2 % 混入すると 43 % もせん断強度が増加したことがわかる。一方, 鉄筋を減じた B, C, D の床版では, 混入率による強度増加は明確には現われなかった。これは鋼繊維の寸法と鉄筋の間隔にも関係があると思われる。また, 配筋 A の RC 床版と, 鉄筋を減じた B, C, D の SFRC 床版の強度とを比較すれば, 鋼繊維混入率 1 % の D 床版以外は, いずれも RC 床版の強度を上まわっている。このことから, 強度面だけから見れば, 鋼繊維を 1 % 混入すれば, 鉄筋を 2 割減じることができ, 1.5 % 混入すれば, 3 割減じても, もとの RC 床版の強度を確保できることがわかる。しかし, 2 % 以上混入して, 4 割減じようとする事は, 施工性, 経済性からみて, 問題があり, 実際には避けた方がよいと思われる。

e. 変形に関する結果と考察

図 6 ~ 8 は RC 床版との比較の一例として, 終局強度のはぼ等しい (D-1.0)

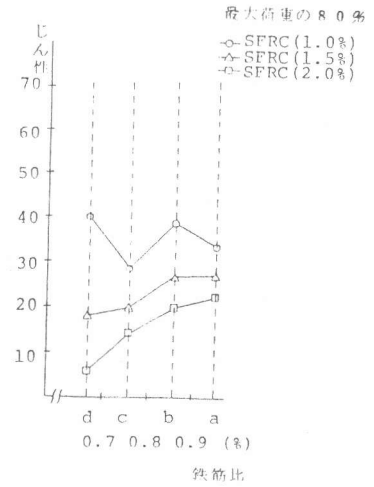


図 4 はりの靱性の比較

表 4 3式による計算値と実験値の比較

供試体番号	P	P_α	P_β	P_γ	P/P_α	P/P_β	P/P_γ	
0	18.9	18.0	16.2	21.5	1.050	1.164	0.887	
1.0	A	23.1	21.2	18.8	25.4	1.090	1.229	0.912
	B	20.8	20.5	18.3	24.6	1.015	1.135	0.887
	C	21.7	20.5	18.3	24.6	1.056	1.184	0.884
	D	18.2	20.5	18.3	24.6	0.886	0.992	0.741
1.5	A	25.4	22.9	20.7	27.4	1.109	1.230	0.928
	B	20.7	22.2	20.1	26.6	0.931	1.029	0.779
	C	22.7	22.2	20.1	26.6	1.020	1.129	0.854
	D	20.8	22.2	20.1	26.6	0.935	1.034	0.783
2.0	A	26.9	21.1	19.5	25.2	1.275	1.378	1.071
	B	22.8	20.5	19.0	24.5	1.112	1.200	0.921
	C	20.7	20.5	19.0	24.5	1.010	1.089	0.945
	D	20.9	20.5	19.0	24.5	1.020	1.100	0.852
平均値					1.039	1.146	0.879	
標準偏差					0.095	0.099	0.080	
実験係数					0.14	0.66	0.23	

P_α : Moe
 P_β : Hognestad
 P_γ : Mowrer

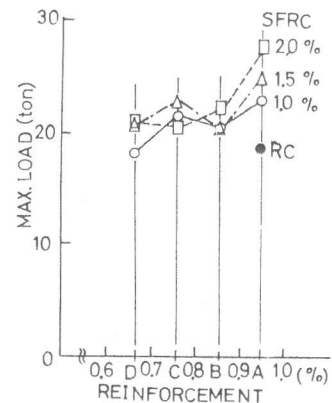


図 5 床版の終局強度の比較

をとりあげ、それぞれ、荷重～たわみ曲線、荷重～コンクリート圧縮ひずみ、荷重～鉄筋引張りひずみを比較したものである。

図6より、RC床版に較べてSFRC床版の靱性が優れていることが明らかであり、その程度は、表6に示した δ_u/δ_y から、鉄筋降伏荷重レベルでほぼ2倍優れていることがわかる。

また別に行なった、荷重レベル80%での靱性の比較からも2倍以上の靱性があり、しかも床版の場合は、鋼繊維混入率が増すほど靱性が大きい傾向が認められた。

図7のコンクリート圧縮ひずみの比較より、押し抜けが生じる前段階に達するコンクリートの最大圧縮ひずみの大きさは、RC床版に較べSFRC床版の方が大きくなることわかる。他床版との比較より、その大きさは鋼繊維混入率が増すほど大きくなること明らかとなった。このことから鋼繊維が床版の押し抜け破壊の発生時期を遅らせるのに貢献していることがわかる。

図8は鉄筋ひずみを比較したものであるが、RCに較べ鋼繊維が引張力を受けもつため、設計荷重レベル($\sigma_s = 1800 \text{ kg/cm}^2$)での同一荷重では、SFRC床版に生じる鉄筋ひずみは、RC床版の50%しか生じていないことがわかる。表6には $\sigma_s = 1800 \text{ kg/cm}^2$ の時の荷重を示したが、SFRC床版はRC床版よりも約40%以上も高い荷重で $\sigma_s = 1800 \text{ kg/cm}^2$ の応力に達していることがわかる。

4. まとめ

RC床版のかわりにSFRC床版とすることには、いくつかの利点が考えられるが、力学的には、押し抜きせん断強度および靱性を高める上で特に効果が認められる。鋼繊維を1、1.5、2.0%混入すれば押し抜きせん断強度もそれに応じて、ほぼ20、30、40%増加させることができる。また逆に、鉄筋量を2割減じようとするならば、鋼繊維を1%混入し、3割減じようとするれば、鋼繊維を1.5%混入する必要がある。しかし、鋼繊維を2%混入して鉄筋を4割減じようとするは施工性に問題があり、また経済性からみても実際的でないと思われる。

参考文献

- 1) コンクリート工学年次講演論文集 3巻 1981, pp.397-400
- 2) C.H.Henager and T.J.Doherty, "Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams", J of S.D., Proc. of ASCE, Vol.102, No. ST1, Jan. 1976, pp.177-188.

表5 コンクリートの諸強度

鋼繊維混入率 (%)	圧縮強度 (kg/cm^2)	曲げ強度 (kg/cm^2)	せん断強度 (kg/cm^2)	割裂強度 (kg/cm^2)	引張強度 (kg/cm^2)	弾性係数 ($\times 10^5$)
0	478	48.8	72.6	32.9	33.1	3.43
1.0	502	58.4	85.0	51.1	34.0	3.20
1.5	596	86.3	127.0	65.2	37.7	3.22
2.0	493	87.7	103.0	64.5	35.5	2.97

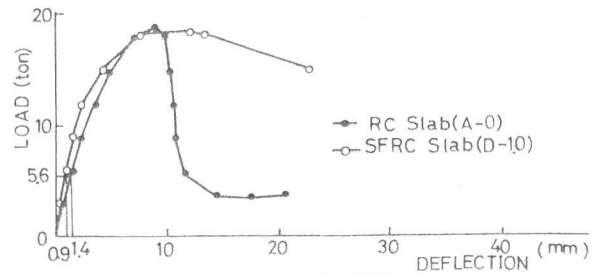


図6 荷重～たわみ曲線

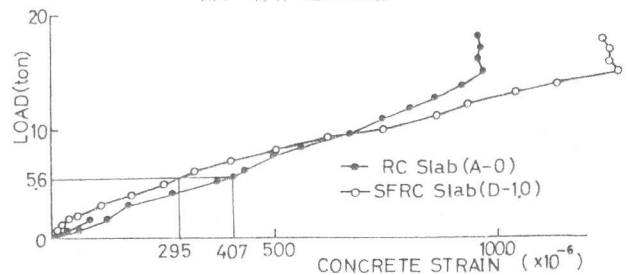


図7 荷重～コンクリート圧縮ひずみ

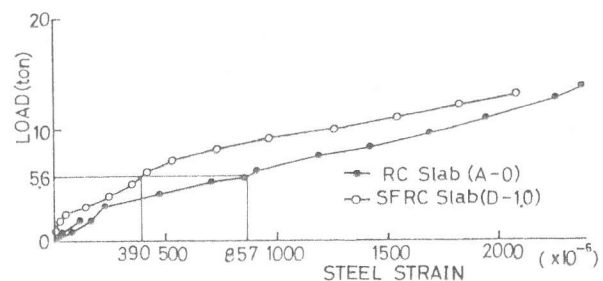


図8 荷重～鉄筋引張りひずみ

表6 床版試験結果

供試体記号	荷重 (ton)				たわみ (mm)				靱性率	
	ひびくれ発生時	$\sigma_s = 1800$ 伏時	鉄筋降伏時	最大時	ひびくれ発生時	$\sigma_s = 1800$ 伏時	鉄筋降伏時	最大時	終局時 δ_u	δ_u/δ_y
A-0	0.80	5.5	10.9	18.9	0.2	1.7	3.0	9.0	10.6	2.53
A-1.0	1.10	8.3	13.0	23.1	0.4	1.3	2.6	9.7	24.8	2.54
B-1.0	1.50	10.4	15.7	20.8	0.3	2.2	3.6	10.9	25.0	6.94
C-1.0	2.00	8.5	14.8	21.7	0.3	1.2	2.6	8.0	14.4	5.54
D-1.0	1.95	8.7	12.6	18.2	0.2	1.5	2.6	8.0	27.4	10.50
A-1.5	1.60	9.8	16.7	25.4	0.5	1.8	3.2	9.9	25.5	7.37
B-1.5	1.50	9.3	14.5	20.7	0.7	1.9	3.2	9.6	19.9	6.22
C-1.5	2.30	7.8	13.6	22.7	0.4	2.2	3.8	14.6	33.5	8.82
D-1.5	1.60	8.8	13.7	20.9	0.6	1.3	2.9	10.8	22.1	7.62
A-2.0	2.10	9.5	16.8	26.9	0.4	2.0	3.1	9.9	27.0	7.42
B-2.0	2.30	9.1	15.0	22.8	0.4	1.8	2.8	15.8	35.6	12.70
C-2.0	2.30	7.8	14.1	20.7	0.5	1.4	2.6	9.5	20.1	7.73
D-2.0	2.70	7.7	14.3	20.9	0.5	1.8	3.0	12.8	30.1	10.00

- 3) J.Moe, "Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads", P.C.A. Bulletin D-47.
- 4) D.Hognestad, R.C.Elstner and J.A.Hanson, "Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs", J of ACI, June 1964, pp.643-655.
- 5) R.D.Mowrer and M.D.Vanderbilt, "Shear Strength of Lightweight Aggregate Reinforced Concrete Flat Plates", J of ACI, Nov. 1967, No. 11, Proc. V. 64, pp.722-729.