

V-12

FRPロッドを用いたPCポールの長期材令における変形、耐力挙動

北海道大学工学部	正員	佐伯 昇
北海道大学工学部	学生員	柴田哲也
北海道立工業試験場	正員	後町光夫
北海道電力(株)	正員	安達賢二
北海道コンクリート工業(株)	正員	高木邦彦

1. まえがき

コンクリート構造物において従来の鉄筋の代わりにFRPロッドを用いる研究が最近なされている。本研究では鉄筋の腐食が問題となっているポールについてFRPロッドを用いて実験をおこなった。FRPロッドをプレテンション方式で緊張し、プレストレスを導入したポールを製作した。FRPロッド種が異なるポールについて静的曲げ実験をおこなって破壊挙動を検討した。また、乾燥収縮、クリープ、リラクセーション等による長期的な変形挙動を測定し、その解析をおこなった。上記の実験をFRPロッド種を変えておこない、従来のPC鋼材の場合の解析方法が適用可能かどうか検討することを目的とした。

2. 実験

(1) 概要

テンションバー、ノンテンションバー(以下、TB、NTBとする)およびスパイラル筋にFRPを用いて、プレストレスを導入したポールを計8本製作する。表1に各ポールのロッド種、用途を示す。BT、NTBの違いによる4種類のポールについて、それぞれ曲げ実験および長期的な変形の測定をおこなった。曲げ実験ではひずみゲージを用いて各荷重段階でのポールの挙動を測定する。また、たわみ変形についても同様に測定した。ひび割れ発生荷重、破壊荷重を求めた。筋種の異なるポールについて、長期的な変形挙動をコンタクトゲージを用いて測定した。

(2) ポール形状

ポールの形状を図1、図2に示す。全長は9mである。末口で $R_o = 9.5\text{ cm}$ 、 $R_s = 7.75\text{ cm}$ 、 $R_i = 5\text{ cm}$ である。ポールのテーパは $1/75$ であり、元口方向に向かって R_o 、 R_s 、 R_i は大きくなる。かぶりは 1.75 cm 、肉厚は 4 cm で一定である。配筋はTB6本、NTB6本の12等配筋であり、

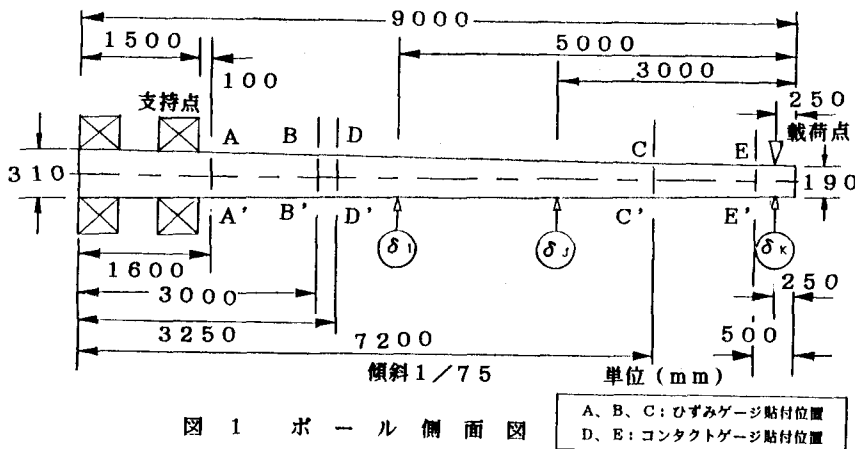


図1 ポール側面図

ULTIMATE STRENGTH AND DEFORMATION OF LONG AGE-PC-POLE USING FRP ROD

by Noboru SAEKI, Tetsuya SHIBATA, Mitsuo GOCHOH, Kengi ADACHI, Kunihiro TAKAGI

TBとNTBが共にCFRPの場合のみTB6本、NTB12本の18等配筋とする。スパイラル筋は10cmピッチで配筋する。

(3) FRPロッド

使用したFRPロッドは東レ社製CFRP異形筋、NEFCOM社製GFRP筋およびスパイラル筋である。これらのFRPロッドについて予備実験をおこない断面積、最大荷重、ヤング率を測定した。FRPロッドの諸性質を表2に示す。解析にはこれらの値を使用する。FRPロッドの形状は図3、図4である。スパイラル筋の断面形状は10mm×2mmであり、組立後の筋配置に合わせて予め成型されたものである。材質はGFRPロッドと同一である。

(4) コンクリート

実験で使用したコンクリートの配合は次のとおりである。水セメント比35%、細骨材率は45%。スランプ12±2cm、混和剤は流動化剤を使用した。設計基準強度は500kgf/cm²とする。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は粗粒率6.61単位容積重量1560kg/m³、吸水率125%の白老産を用いた。細骨材は粗粒率277、単位容積重量1820kg/m³、吸水率1.28%の登別産を用いた。解析に使用するヤング率、圧縮強度は圧縮強度試験によって求め、表1に示した通りである。試験は、日本工業規格 遠心力締め固めコンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A1136) に基づいておこなった。

(5) 製作方法

TB、NTB、スパイラル筋を編組した後、実験目的に応じて筋にひずみゲージ、コンタクトゲージを貼付する。TBの定着材はレジンコンクリートまたは日鉄セメントNEM(A)を用いておこなった。定着金具はドラム状のもので、TB6本同時に定着可能なものである。写真1にドラムの形状を示す。緊張はセンターボールジャッキを用いてドラム全体を引っ張ることでおこない、スペーサーを使用してドラムを固定し緊張を確保する。コンクリートを注入管で注入して遠心締め固めの後、最高温度60℃で1日、蒸気養生をする。脱型後、コンクリート表面にひずみゲージまたはコンタクトゲージを貼付する。

(6) 曲げ実験〔ボールNo1、No2、No3、No4〕

末口側から750cmの位置でボールを固定し片持ち梁とする。曲げ荷重は末口から25cmの位置に作用させる。一次載荷として、TBがGFRPの場合360kgfまで、CFRP

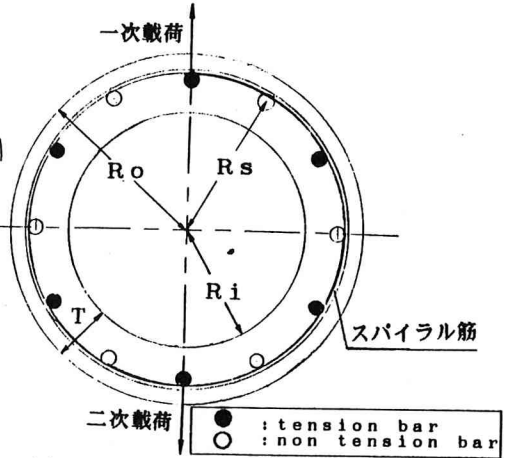


図 2 ボール断面図

表 1 ボール一覧およびコンクリートヤング率、圧縮強度

ボール番号	TB	NTB	ヤング率(kgf/cm ²)	圧縮強度(kgf/cm ²)	用途
No. 1	GFRP	GFRP	354000(σ14)	668(σ14)	曲 げ 実 験
No. 2	CFRP	CFRP	303000(σ14)	705(σ14)	
No. 3	GFRP	CFRP	284000(σ14)	496(σ14)	
No. 4	CFRP	GFRP	287000(σ14)	551(σ14)	
No. 5	GFRP	GFRP	281000(σ28)	650(σ28)	長 期 挙 動
No. 6	CFRP	CFRP	252000(σ28)	623(σ28)	
No. 7	GFRP	CFRP	251000(σ28)	634(σ28)	
No. 8	CFRP	GFRP	382000(σ28)	706(σ28)	

表 2 FRP 筋 諸 量

	GFRP	CFRP
断面積 (cm ²)	1.0307	0.2724
最大引張荷重 (kgf)	10050	2925
最大引張応力(kgf/cm ²)	9751	10738
ヤング率(kgf/cm ²)	443000	830000
線膨張係数 (1/°C)	5.8×10 ⁻⁶	0.3×10 ⁻⁶
最大ひずみ (%)	2.30	1.45

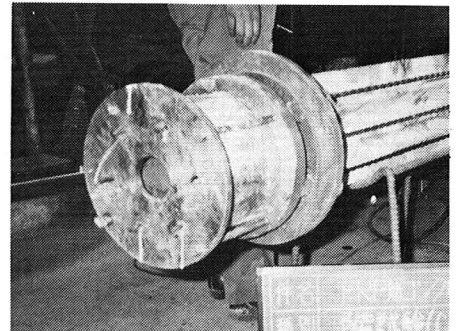


写真 1 定着金具形状

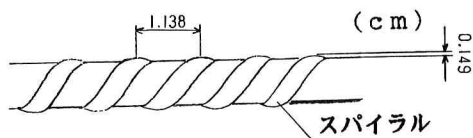


図 3 G F R P

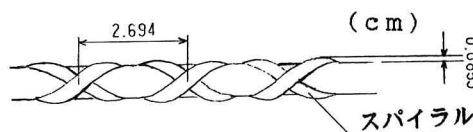


図 4 C F R P



写真 2 曲 げ 実 験



写真 3 曲げ実験 (No. 1 圧縮破壊)

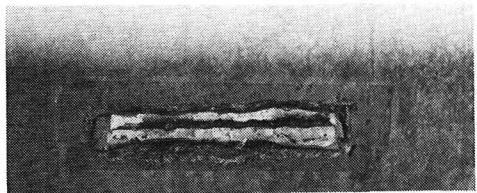


写真 4 コ ン タ ク ト 貼 付 状 況

の場合 240 kgf (No. 2 は 200 kgf) まで載荷し、ひずみ、たわみの変形量の測定およびひび割れ発生の有無の確認をおこなう。除荷後二次載荷として、一次の場合と反対方向に載荷する。ひずみ、たわみの変形量を各荷重段階で測定する。ひび割れ発生荷重、破壊荷重を求める。実験の様子を写真 2、写真 3 に示す。たわみ変形は末口から 500 cm、300 cm、25 cm の 3 点で測定する。

(7) 長期的変形挙動の測定 (ポール No 5、No 6、No 7、No 8)

TB、NTB、コンクリート表面に貼付したコンタクトゲージを測定して、ポールの長期的な変形を調べる。コンタクトゲージは図 1 の D、E の 2 断面に計 11 ケ所貼付した。貼付状態を写真 4 に示す。

3. 解析および実験結果

(1) 耐力

ある断面でのひび割れ発生曲げモーメントの計算は式 (1) で計算する。初期緊張力は TB が GFRP の場合で 18090 kgf、CFRP の場合で 7020 kgf である。有効プレストレス P_e はセットの損失、弾性変形による損失、乾燥収縮・クリープによる損失、リラクセーションによる損失を考慮して計算する。この結果、No. 1 で $P_e = 13404$ kgf、No. 2 で $P_e = 5282$ kgf、No. 3 で $P_e = 13102$ kgf、No. 4 で $P_e = 5204$ kgf となる。破壊荷重は破壊断面において、圧縮側コンクリート破壊と引張側 FRP 筋破壊の 2 つについての計算から求めた。実験で得たひび割れ発生荷重、破壊荷重、および計算値を表 3 に示す。ポールの破壊は No. 1、3 でコンクリート圧縮部、No. 2 で FRP ロッドで生じた。No. 4 では引張側 TB が 513 kgf で破断後、NTB による 2 次的な破壊が、582 kgf でコンクリート圧縮部に生じた。

(2) たわみ変形

ポール全体を 75 の断面で分割する。各断面で曲げ荷重 P によって生じる弾性分布荷重 M/EI を計算し、これを用いて末口から 500 cm、300 cm、25 cm の各位置でのたわみ量 δ_i 、 δ_j 、 δ_k を計算する。I には、ひび割れ発生前は I_g を使用し、発生後は式 (2) で計算した I_e を使用する。実験値と計算値を図 5、図 6、図 7、図 8 に示す。

(3) 長期的挙動

ポールの長期的な変形について、乾燥収縮、クリープ、

$$M_{cr} = \frac{I_g}{R_s} + \left(\frac{P_e}{A_i} + \sigma_{ct} \right) \quad \text{--- (1)}$$

R_s : 断面中心から主筋までの距離
 P_e : 有効圧縮力
 A_i : 換算断面積
 I_g : 全断面の断面二次モーメント
 σ_{ct} : コンクリート設計曲げ耐力

$$I_e = \left(\frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^4 \times I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_{dmax}} \right)^4 \right\} \times I_{cr} \quad \text{--- (2)}$$

M_{dmax} : 変位、変形量計算時のモーメント
 I_{cr} : 引張力を生ずるコンクリートを除いた断面二次モーメント
 * I_{cr} の算定にあたっては、PC鋼材は鉄筋とみなした。

リラクセーション、線膨張の4つの要因について計算

をおこなった。測定値および計算値は図9、図10、図11、図12である。解析では、リラクセーションのクリープ変形に与える影響、線膨張係数の違いによる影響等の2次的な挙動は考慮していない。実際の変形量はNo. 5で 4.81×10^{-6} (材令132日)、No. 6で 2.67×10^{-6} (材令154日)、No. 7で 4.15×10^{-6} (材令128日)、No. 8で 6.3×10^{-6} (材令164日)であった。

4. 考察

< 曲げ実験 >

全ての曲げ実験で、ひび割れ発生荷重と破壊荷重の計算値は実験値よりも小さく安全側である。実験値と計算値はほぼ一致していると思われる。たわみは弾性時はいずれもほぼ一致している。TBがCFRPの場合、計算値は実験値よりも小さくなる。ひび割れ発生後で、No. 2では実験値と計算値の差がほぼ一定であり、実験値と計算値のたわみの形状は対応している。No. 4では一定の割合で、差が増加する傾向を示している。TBがGFRPの場合No. 3は比較的良好に実験値と計算値が対応している。No. 1は計算値の方が大きな値となる。No. 1の様に計算値が実験値より大きくなる場合と、No. 2、4の様に小さく

表 3 耐 力

	ひび割れ発生荷重 (kgf)		破壊荷重 (kgf)	
	実験値(一次、二次)	計算値	実験値	計算値
No. 1	300, 320	272	945	928
No. 2	—, 207	202	650	598
No. 3	320, 280	270	*830	*749
No. 4	220, 220	202	513	468

*破壊断面は予測された位置でなく、スパイラル筋の欠如の為に固定端から95cmの位置で生じた。

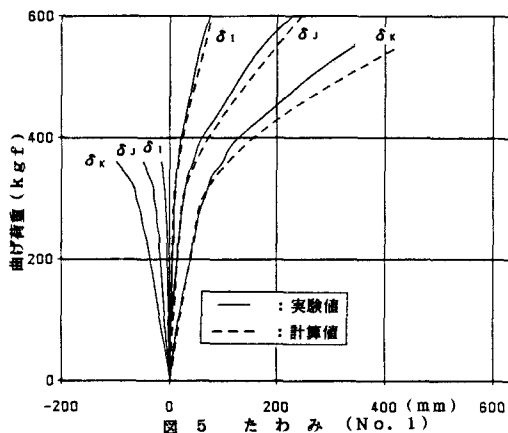


図 5 たわみ (No. 1)

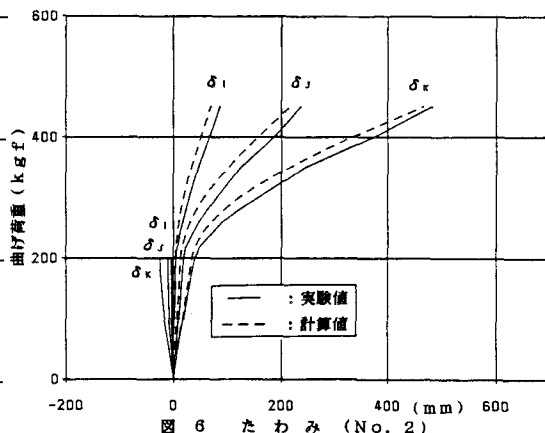


図 6 たわみ (No. 2)

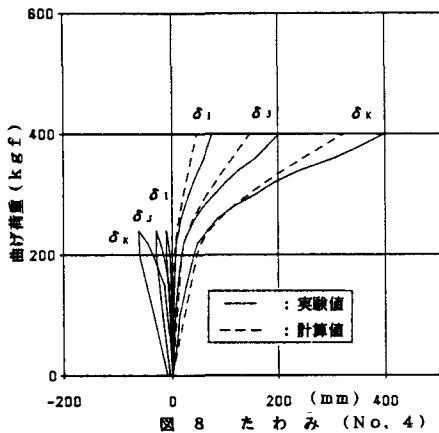


図 8 たわみ (No. 4)

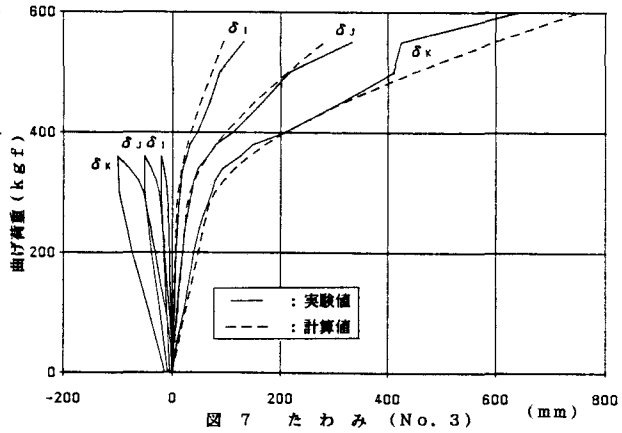


図 7 たわみ (No. 3)

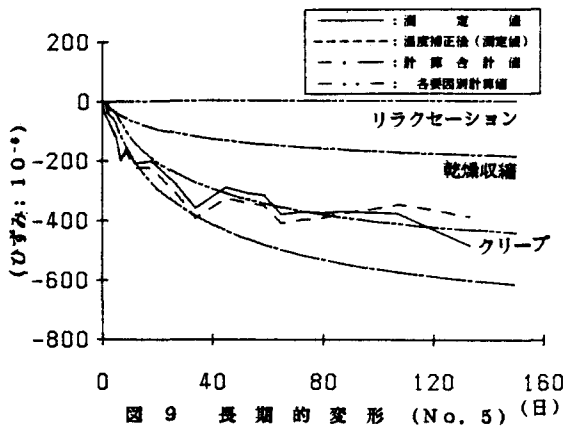


図 9 長期的変形 (No. 5) (日)

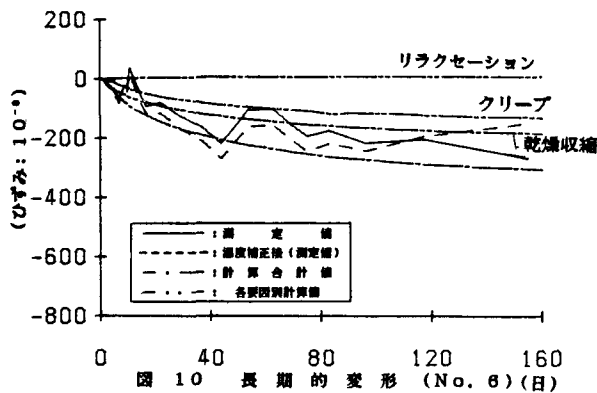


図 10 長期的変形 (No. 6) (日)

なる場合があり、この程度のプレストレス量ではRCと同様にIcrを計算してよいと思われる。末口から450cmのコンクリート断面に作用する圧縮応力はボールにより異なるが、コンクリート圧縮強度の約3%から11%である。破壊はNo. 1、No. 3でコンクリート圧壊、No. 2、No. 4でFRPロッドが破断した。前述のNo. 4では、テンションバーが破壊後もボールはNTBによって耐力を維持し、最終的にコンクリート圧縮部が破壊し、中間的な破壊の形態を示した。テンションバーとノンテンションバーの終局ひずみや断面積の違いがその要因となっていると思われる。破壊状態の比較より、ノンテンションバーの筋量を調整することで、ボールの脆性的な破壊を防ぐことが可能であると思われる。

<長期的挙動>

変形挙動は図9と図11(TBがGFRP)、図10と図12(TBがCFRP)の2つの傾向がみられた。前者では、計算値は測定値よりも大きな値を示す。後者は計算値と測定値の差が前者よりも小さい。プレストレス量の違いにより、両者の変形量に差が生じている。収縮による材令10000日(約27年)の有効プレストレス P_e の損失量を計算すると、No. 1で19.7%、No. 2で17.3%、No. 3で21.2%、No.

4で18.3%である。材令27年でのボールのひび割れ発生荷重と破壊荷重の計算値は、No. 1でそれぞれ249kgf、924kgf、No. 2で194kgf、624kgf、No. 3で246kgf、742kgf、No. 4で193kgf、484kgfであった。材令14日を基準にすると、材令27年のひび割れ発生荷重、破壊荷重の割合は、No. 1でそれぞれ91%、100%、No. 2で96%、104%、No. 3で91%、99%、No. 4で96%、103%と推定される。

5. まとめ

- (1) FRPロッドを用いたPCボールの、断面の耐力計算は従来の鋼材によるプレストレストコンクリート部材の計算方法が準用できる。
- (2) 曲げ荷重によるたわみ変形について、BRANSONの近似式が実験値とある程度よい対応を示し、有効であることがわかった。
- (3) クリープ等による長期材令の変形は、プレストレス量の小さいCFRPの場合は、計算値と実験値が近い値となるが、これよりプレストレスの大きいGFRPの場合、実験値に比べては計算値の方が大きめに算出される傾向を示していた。

- (4) ボールは、テンションバーがGFRP (No. 1、3) でコンクリート圧縮破壊、テンションバーがCFRP (No. 2) でFRPテンションバー破断した。テンションバーがCFRP、ノンテンションバーがGFRP (No. 4) では引張部FRPテンションバーで破壊後も耐力を維持し、最終的にコンクリート圧縮部で破壊した。ボールの場合、ノンテンションバーの性能、形状等を考慮することで、脆性的な破壊を防ぐことが可能であると思われる。

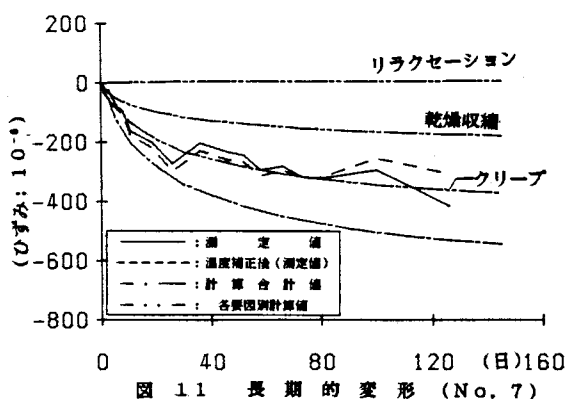


図 11 長期的変形 (No. 7)

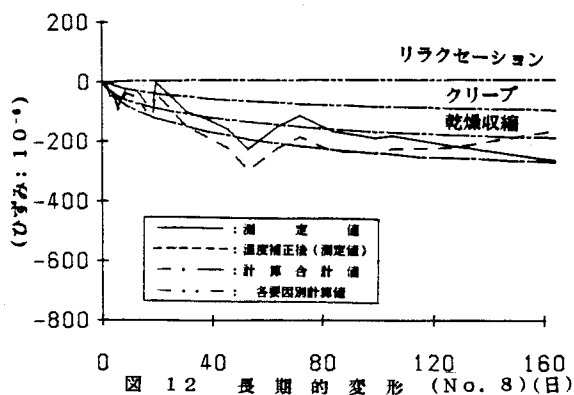


図 12 長期的変形 (No. 8)

参考文献

コンクリート標準試方書 [設計編]

連続繊維を利用したコンクリート系複合材料の土木構造分野への適用に関する技術の現状

土木学会コンクリート委員会連続繊維研究小委員会, 1990

地上気象観測日原簿 [札幌管区気象台]