

V-10

FRPロッドを用いたPC部材の変形と破壊特性

北海道大学工学部	学生員	大島 寿哉
北海道大学工学部	正 員	佐伯 昇
北海道工業試験所	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. はじめに

環境条件の厳しい北海道の日本海沿岸において、PCボールの鋼材の腐食が問題となっている。近年構造物材料として、腐食に強く、非磁性体を要求される構造物にも適用が可能であるFRPが、注目されている。FRPとはFIBER-REINFORCED-PLASTICSの略であり、連続繊維にマトリックスを含浸させ整形したものである。その種類としては、カーボン繊維を使用したもの(CFRP)、ガラス繊維を使用したもの(GFRP)、アラミド繊維を使用したもの(AFRP)等がある。本研究では鉄筋の代わりにGFRPと、CFRPの二種類のFRPロッドを用いてPCボールを製作し、1年間曝露した後、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た。また、1年後に静的曲げ試験を行い、その耐力、たわみ性状の変化を調べ、さらに各諸条件の変化による影響を考慮した上での計算が、どの程度適用できるかを検討することを目的とした。

2. 実験概要

(1) ボール形状

ボールの形状を図1、2に示す。全長は9m。末口で $R_o = 9.5\text{cm}$ 、 $R_s = 7.75\text{cm}$ 、 $R_i = 5.0\text{cm}$ 。テーパは一定で1/75。元口方向に向かい R_o 、 R_s 、 R_i は大きくなる。かぶり厚は1.75cm。肉厚は一定で4.0cm。テンションバー(以下TB)6本、ノンテンションバー(以下NTB)6本を円環断面に12等分に配筋した。ただし、TBとNTBが共にCFRPである場合にのみ、TB6本、NTB12本を18等分に配筋した。スパイラル筋は10.0cmピッチで配筋した。プレストレスはプレテンション方式でかけた。なお、TBとNTBの組み合わせは表1に載せる。

(2) FRPロッド

使用したFRPロッドは、CFRP異形筋、GFRP異形筋である。これらのロッドについて予備実験を

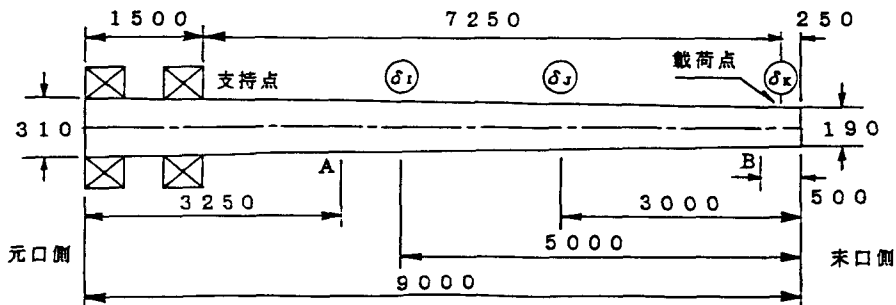


図1 ボール側面図

単位 (mm)

ULTIMATE STRENGTH AND DEFORMATION OF PC-POLE USING FRP ROD

by Hisaya OHSIMA, Noboru SAEKI, Mitsuo GOCHOU, Kenji ADACHI & Kunihiko TAKAGI

行い、測定した各数値を表2に示す。解析にはこれらの数値を使用した。各ロッドの形状は図3に示す。また使用したスパイラル筋は断面が10mm×2mmで、GFRPロッドと同一の材質である。なおボールにかかるプレストレスは1本につき、GFRPがTBのときは破断強度の3割、CFRPがTBのときは4割とした。

(3) コンクリート

実験で使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比35%、細骨材率45%、スランプ12±2cm、混和材は流動化剤を使用し、設計基準強度は500kgf/cm²とした。打設後、遠心力締め固めを行ない、15時間の高温蒸気（最高温度65℃の1時間維持を基本とする）による促進養生の後に気中養生とした。解析に使用するヤング率、圧縮強度は圧縮強度試験により求めた。

(4) 長期的変形挙動の測定

TB、NTB、及びコンクリート表面に貼付したコンタクトゲージの測定により、ボールの長期的な変形を1年にわたり行なった。コンタクトゲージは図1のA、Bの2断面に計11ヶ所貼付した。

(5) 曲げ試験

図1のように、末口側から750cmの位置でボールを固定、片持ち梁として曲げ荷重は末口から25cmの位置に作用させた。一次载荷としてひび割れが生じるまで载荷し、ひずみとたわみの測定を行ない、除荷後に二次载荷として、一次の場合と応力の方向が反対になるように载荷した。二次ではひび割れ、ひずみ、たわみをそれぞれ各荷重段階で測定しながら破壊させ、破壊荷重を測定した。たわみ量は末口から500cm、300cm、25cm（载荷点）の3点で測定した。

3. 解析方法

(1) 長期的変形

ボールの長期的な変形については、乾燥収縮、クリープ、リラクセーションの各要因について計算を行ない、変形総量はそれらの和によって求めた。計算は乾燥収縮とクリープについては示方書の式を用い、リラクセーションは材令の対数に対して線形と仮定し計算した推定値を用いた。この変形量の解析においては、二次的な影響やリラクセーションのクリープ変形に与える影響は考慮していない。

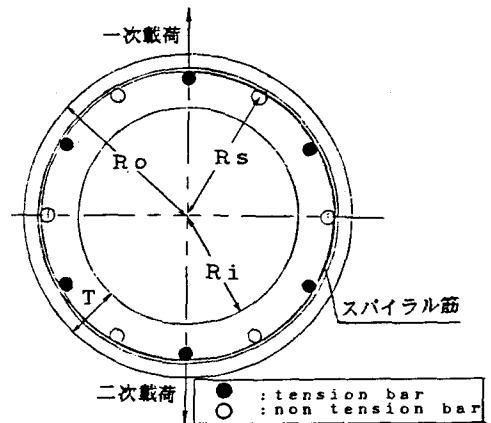


図2 ボール断面図

表1 ボール一覧

ボール番号	TB	NTB
№1	GFRP	GFRP
№2	CFRP	CFRP
№3	GFRP	CFRP
№4	CFRP	GFRP

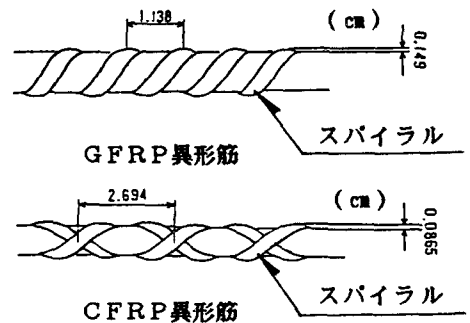


図3 FRPロッド形状

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
最大ひずみ (%)	2.30	1.45

(2) 耐力

ある断面でのひび割れ発生曲げモーメントは、式(1)により求めた。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筋破壊の二つについての計算より求めた。

(3) たわみ

たわみ量は、まずボール全体を75の断面で分割する。各断面で曲げ荷重により生じる弾性分布荷重M/EIを計算し、これを用いて測定した位置のたわみ量を求めた。断面二次モーメントとして、ひび割れ発生前には全断面有効とし、 I_g を使った。発生後は、式(2)で求めた I_e を使用した。各荷重及びたわみ量の算出にあたり、各要因によるプレストレスの減少量を求めるために必要な数値を、材令などの条件を考慮した計算値と、示方書に於ける簡易値の両方を使用して求めたので、解析値としては二つの値をだした。この使用した示方書に於ける簡易値は、クリープ係数が2.8、乾燥収縮ひずみが 250×10^{-6} である。

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

- R_s : 断面中心から主筋までの位置
- P_e : 有効プレストレス
- A_i : 換算断面積
- I_g : 全断面有効の断面二次モーメント
- σ_{ci} : コンクリート設計曲げ耐力

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

- M_{dmax} : 変位、変形量計算時のモーメント
- I_{cr} : 引張応力をうけるコンクリートを除いた断面二次モーメント
- * I_{cr} 算定にあたり、PC鋼材は鉄筋と見なした。

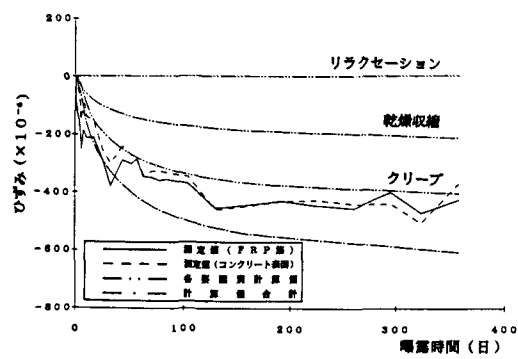


図4 長期的変形 (No.1)

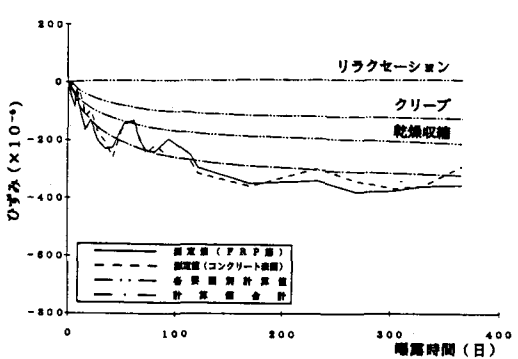


図5 長期的変形 (No.2)

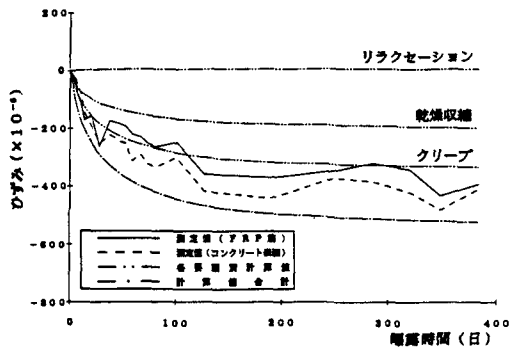


図6 長期的変形 (No.3)

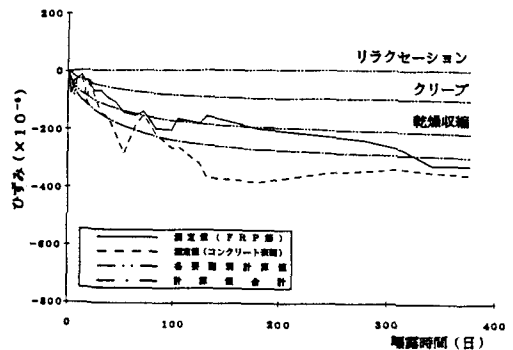


図7 長期的変形 (No.4)

4. 結果および考察

クリープ、乾燥収縮などの計算値と実験値との比較検討を行った。またボールの1年後の耐力、たわみ性状の変化を検討するために同じ規格で製作したボールについて、材令14日および1年において曲げ試験を行ない、実験結果と計算値との比較検討を行なった。

(1) 長期的変形

計算値と測定値の時間的变化を図4～7に示す。実線はFRPに直接貼付したコンタクトゲージの値であり、破線はコンクリート表面のものである。GFRPおよびCFRPを用いたボールの乾燥収縮の値は同じ程度ではあるが、両ボールのプレストレス量の違いによりクリープの大きさは異なる。TBがGFRPであるNo.1、3では、乾燥収縮よりもクリープひずみの方が大きく算出され、TBがCFRPであるNo.2、4ではその逆である。ここでは二つの傾向が現れ、TBがGFRPであるものは、実際の測定値がクリープだけの計算値よりも多少大きなものとなっている。またTBがCFRPであるものは、測定値が計算した全ての要因によるひずみの和よりも、少し大きめにでている。両者共にロッドのリラクセーションによるボールの変形の値は、無視できるほどに小さい。いずれも実測値と計算値は、ほぼよい対応を示した。

(2) 耐力

ひび割れ荷重と破壊荷重の計算値と実験値は表3に示す。

表3 耐力の計算値および実験値

	ひび割れ発生荷重 (kgf)			破壊荷重 (kgf)		
	実験値(14日)	実験値(1年)	計算値	実験値(14日)	実験値(1年)	計算値
No.1	300, 320	350, 300	260	945	943	854
No.2	207	230, 190	201	650	635	597
No.3	320, 280	340, 300	260	830	880	761
No.4	220, 220	240, 250	201	468	610	476

* ひび割れ荷重の実験値は一次側と二次側の二つを示す

ひび割れ荷重に於いては材令14日に実験を行なった同規格のボールのものとあまり変わりがなく、各種損失の計算で示方書の簡易値を用いて推定したものと、材令、断面などを考慮したクリープ係数、乾燥収縮ひずみを用いて計算したものとでもほとんど変わらない。計算値自体はいずれも実験値より小さく、安全側である。

破壊荷重は、材令14日のボールに比べ材令1年のものは、ほぼ同等の実験値が得られた。破壊荷重の低下はほとんど見られない。計算値の間では、TBがGFRPのものは、示方書の簡易値を用いて推定した方が、諸条件を考慮して計算したものより、小さくなっていた。TBがCFRPのものは、材令14日と1年とでは、それほどの変わりがない破壊荷重を示した。実験値との比較では計算値は小さくなっている。材令1年のボールの破壊パターンは、No.1、3がコンクリートで圧壊し、No.2ではFRP筋が破断した。No.4では引張側でFRP筋が破断したが、その後も耐力を維持し最終的にはコンクリートで破壊した。この破壊パターンは材令14日のものと全く同一であった。

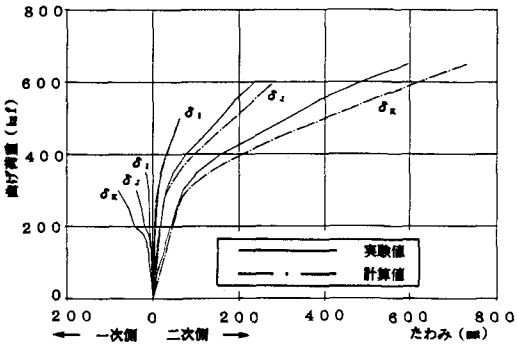


図8 荷重-たわみ曲線 (No.1)

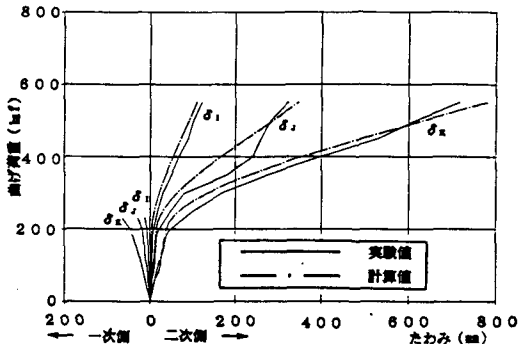


図9 荷重-たわみ曲線 (No.2)

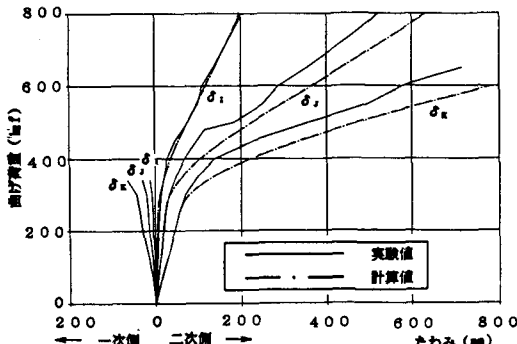


図10 荷重-たわみ曲線 (No.3)

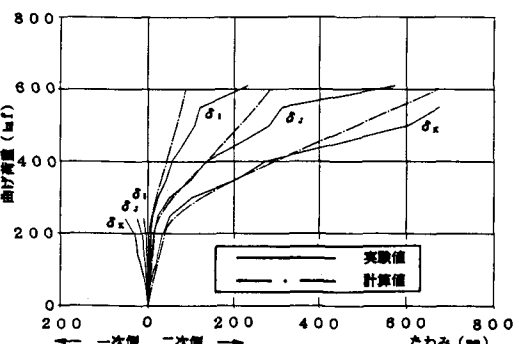


図11 荷重-たわみ曲線 (No.4)

(3) たわみ変形

たわみ量の実験値と計算値は図8～11に示す。いずれのポールもひび割れ発生前の弾性状態では、よく一致している。TBがGFRPのNo.1、3は計算値よりも測定値が大きくなり、その差はほぼ一定であり、たわみ形状はよく対応している。TBがCFRPのNo.2は、計算値が実測値よりも大きめに算出されるが、その差はほぼ一定であり、たわみ形状は計算値と対応している。TBがCFRPであるNo.4も、計算値のほうが大きい、一定の割合でその差は増加している。計算値の比較では、クリープ係数、乾燥収縮ひずみを示方書の簡易値を使ったものと、材令などの条件を考慮して求めた数値を用いて計算したたわみ形状は、ほとんど同じ値となった。

また材令14日と、1年の荷重-たわみ曲線の比較を図12に示す。たわみはそれぞれ、載荷点位置の値を用いた。1年後のものは少し小さめになっているが、たわみの性状、曲線の形状はTBがGFRP、CFRPの両者共に同じ傾向を示している

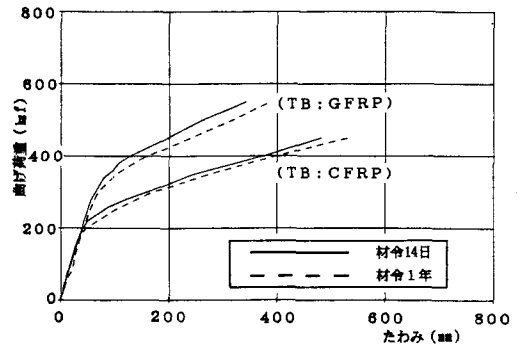


図12 たわみ性状変化

5. 結論

(1) 長期的なクリープ、乾燥収縮などの変形挙動を、コンクリートおよびFRPロッドのひずみ変化によって観察した結果、計算値と実測値の傾向は比較的良好な対応を示していた。TBがGFRPのものは計算値が実測値より大きく、TBがCFRPのものは逆に小さく算出された。更に算定精度を上げるためには、本研究では考慮していない二次的な変化や、推定値であったFRPのリラクセーションについての調査、測定が今後必要であろう。

(2) ポールの耐力は1年後でも変化がなく、ほぼ一定の耐力が保持されていることがわかった。本研究で用いたPC部材の計算方法では、耐力が少し小さめに計算される傾向がある。

(3) 材令14日と1年のたわみの性状を比較すると、ほとんど変わらないことが解った。荷重-たわみ曲線は計算値とほぼ良好な対応を示していた。

[謝辞]

この研究にあたり、北海道コンクリート(株)の長沢、馬場両氏に多大なる御協力をいただきましたことに、心から感謝いたします。また東レ、NEFCOM両社よりFRP筋を提供していただき誠にありがとうございました。

参考文献

コンクリート標準示方書[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]