

(2) ボール形状

ボールの形状は図1のようになっており、ボールの全長は620cmである。断面形状は図2である。末口において、 $R_o = 6\text{ cm}$ 、 $R_s = 4.6\text{ cm}$ 、 $R_i = 2.5\text{ cm}$ である。ボールの勾配は1/75であり、元口方向に向かうにつれて R_o 、 R_s 、 R_i は大きくなる。かぶり厚は1.4cm、肉厚は $T = 3.5\text{ cm}$ で一定である。主筋は6本とし、対称に配置する。

(3) FRP筋

使用したFRP筋、ラセン筋はNEFCOM社製のNEFMAC G10であり、ガラス繊維を樹脂によって層状に成型したものである。筋の形状は写真1に示すように、10cm間隔でリブを持った形となっている。応力 - 歪曲線は線形を示す。主筋の最大荷重は4700kg、剛性232ton、断面積は対応するSD35にほぼ等しい。予備実験によってFRP筋の最大荷重、断面積、ヤング率を測定すると表1の値を得た。解析にあたっては、これらの値を使用する。FRPラセン筋は主筋と同一の材質であり、断面形状は10mm×2mmである。ラセン筋は組み立て後の主筋配置に合わせて予め成型されたものである。

(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通りである。水セメント比35%、細骨材率は45%、スンプ14±2cm、混和材には流動化剤を使用した。設計基準強度は500kg/cm²である。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15~5mm、粗粒率6.29、単位体積重量1519kg/m³、吸水率2.43%の砕石を用いた。細骨材は粗粒率2.64、単位体積重量1890kg/m³、吸水率1.16%を使用した。解析に用いるヤング率、圧縮応力は、圧縮強度試験によって得た値を用いる。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)に基づいて求めた。

(5) 製作方法

主筋の定着はエポキシ樹脂系の接着剤とコーン状の定着金具を用いた。定着後、ラセン筋を10cmピッチで主筋回りに巻き付けた。図1のA、B、C各断面の各種筋、ラセン筋にゲージを貼付する。緊張は主筋6本を定着金具を用いてテンションプレート、アンカープレートに固定し、油圧ジャッキをもちいておこなう。初期緊張量を維持するため、スペーサーで固定する。打設はコンクリートを注入管で注入して行い打設後、遠心締め固めをおこなった。これは型枠ごとボール中心を軸として高速回転させ、遠心力を作用させて締め固めを行うものであり、表2に示す。養生は、No. 1は60℃で蒸気養生を行ったが、定着部接着剤が軟化して緩みによるプレストレスの損失が生じた。そこでNo. 2は温床線を用いた湿潤養生をおこなったのち、赤外線養生を行った。テンション側のFRP露出部を切断してプレストレ

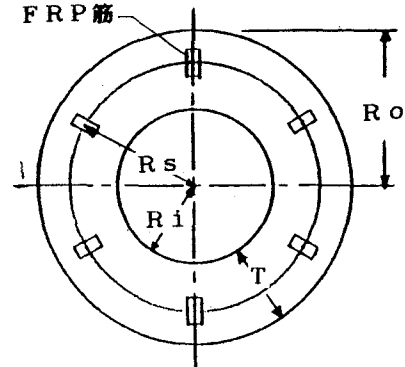


図2 ボール断面図

表 1

項 目	FRP	コンクリート	
		No. 1	No. 2
ヤング率	303600	262300	276000
弾性係数比	—	1.16	1.10
最大引張応力	6907	60	60
最大圧縮応力	—	446	497

※コンクリート最大引張応力のみ仮定値

単位：弾性係数比のみ無次元、他はkgf/cm²

スを導入し脱型する。脱型後、A、B、C断面のコンクリート表面にゲージを貼付した。

(6) 曲げ実験

末口から515cmの位置でボールを固定して片持ちばりとし、末口から25cmの位置に曲げ荷重を作用させる。曲げ荷重は、まず120kまで載荷してひび割れが発生するか確認する。この場合を一次載荷とよぶことにする。この際10kg毎に歪、たわみを測定し、ひび割れ発生の有無を確認した。その後除荷し、80kg、40kg、0kgで測定した。次に二次載荷として、一次の場合と反対方向に曲げ荷重を作用させて、ひび割れ発生荷重および破壊荷重を測定した。歪とたわみの測定は10kg毎におこない、ひび割れ発生後は20kg毎に240kgまで測定した。ひび割れ発生は末口から500cmの位置で最初に発生した。ひび割れ発生荷重及び破壊荷重は、No. 1でそれぞれ157kg、257kgであり、No. 2でそれぞれ178kg、353kgであった。実験の様子を写真2、3、4に示す。写真4でわかるように、ボールはコンクリート圧縮部であっかいした。たわみは末口から225cm、125cm、25cmの3点で測定した。

表2 遠心締め固め方法

項目	時間 (分)	回転数 (rpm)	遠心力 (G)
初速	1	135	2.5
中速1	1	331	12
中速2	1	448	22
高速	2	540	32

※遠心力はボールの中間位置の肉厚中央のコンクリートに作用する値をとっている。

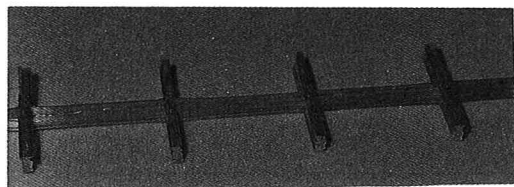


写真1

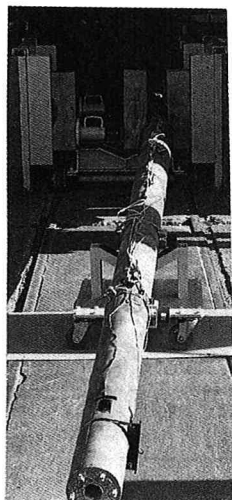


写真2

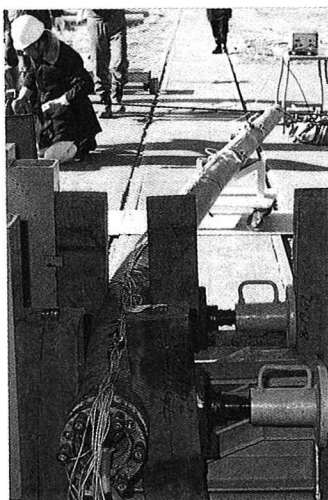


写真3

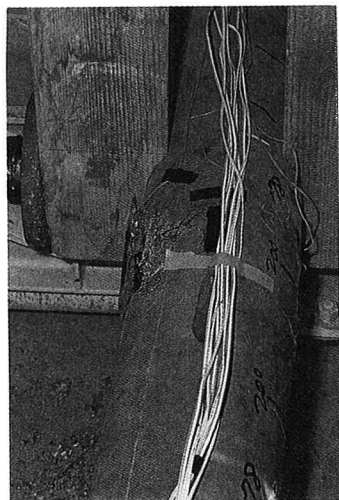


写真4

3. たわみ変形の解析

(1) ひび割れ発生荷重

PCボールのたわみ変形を表1の値を用いて曲げ解析した。解析方法はひび割れの有無によって使い分けた。ひび割れ発生前では、全段面有効であると考え弾性理論を用いた。実験結果より最初のひび割れ発生及び破壊の位置を末口から500cmとする。ひび割れ発生モーメント M_{cr} は次式で求める。

$$M_{cr} = \frac{I_g}{R_s} \times \left(\frac{P_e}{A_i} + \sigma_{ct} \right)$$

R_s : 断面中心から主筋までの距離

P_e : 有効プレストレス

A_i : 換算断面積

I_g : 全断面の断面二次モーメント

σ_{ct} : コンクリート引張り応力

初期緊張力は、全体で12000kgである。有効プレストレスは、弾性変形による損失、乾燥収縮・クリープによる損失、FRP筋のリラクセーションによる損失を損失を考慮して求めた。尚、No. 1では、定着部のゆるみによって損失が生じたため、ゆるみ量から損失量を計算した。この結果、有効プレストレスは P_e はNo. 1では6432kg, No. 2で9461kgとなる。クリープ係数は $\mu = 4.3$, コンクリートの乾燥収縮歪は、 $\epsilon_{cs} = 350 \times 10^{-6}$ を用いた。計算の結果、No. 1で $M_{cr} = 132 \text{ kg}$, No. 2で157kgを得た。

(2) ひび割れ発生前

ボール全長を20の断面で分割する。曲げ荷重 P によって生じる弾性分布荷重 M/EI_g を計算し、これを用いて末口から225cm, 125cm, 25cmの位置でのたわみ δ_i , δ_j , δ_k を求めた。No. 1については130kgまで、No. 2については150kgまでを計算した。

(3) ひび割れ発生後

〔方法1〕 コンクリートの応力分布を圧縮側にお三角形分布とし、引張側では無視する。

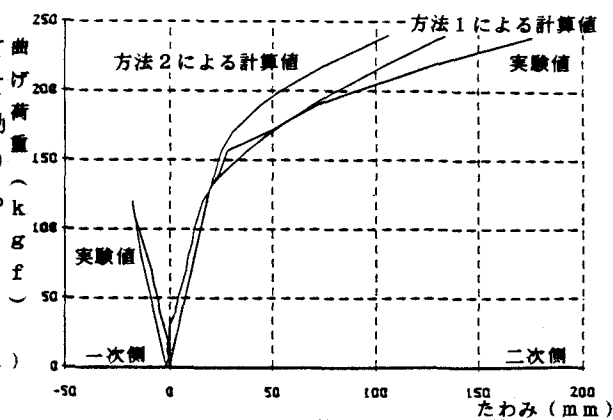


図3 荷重-たわみ曲線 No. 1 I点

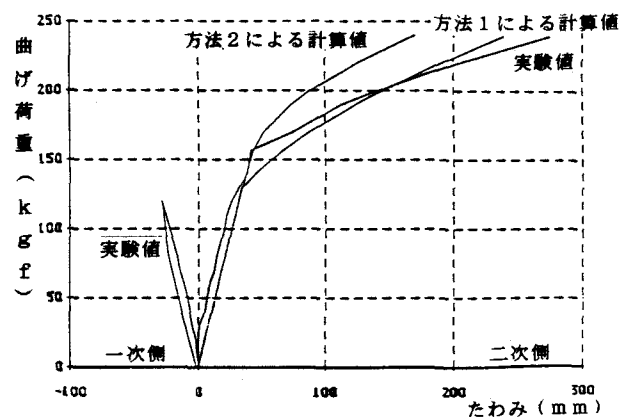


図4 荷重-たわみ曲線 No. 1 J点

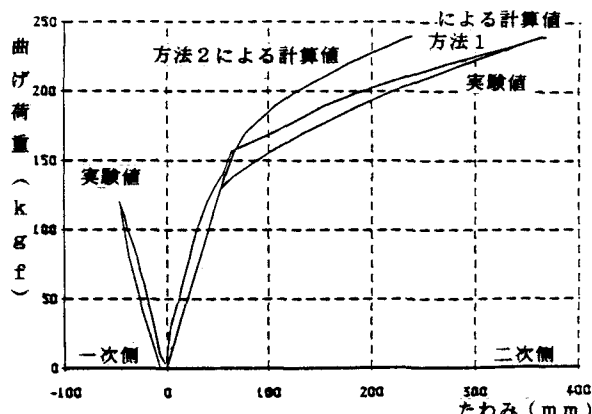


図5 荷重-たわみ曲線 No. 1 K点

中立軸の位置 k は断面形状によって決定するので、断面二次モーメントは次式で求まる。

$$I_e = \left(\frac{M_{cr} d}{M_{dmax}} \right)^3 \times I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr} d}{M_{dmax}} \right)^3 \right\} \times I_{cr}$$

たわみは、

$$\delta = \delta_1 \times \frac{P}{P_{cr}} \times \frac{I_g}{I_e}$$

M_{dmax} : 変位・変形量計算時のモーメント

I_{cr} : 引張応力を受けるコンクリートを除いた断面二次モーメント

P : 曲げ荷重 (kg)

P_{cr} : No. 1 で 150 kg

No. 2 で 130 kg

δ_1 : P_{cr} が作用するときの弾性理論で求めたたわみ量

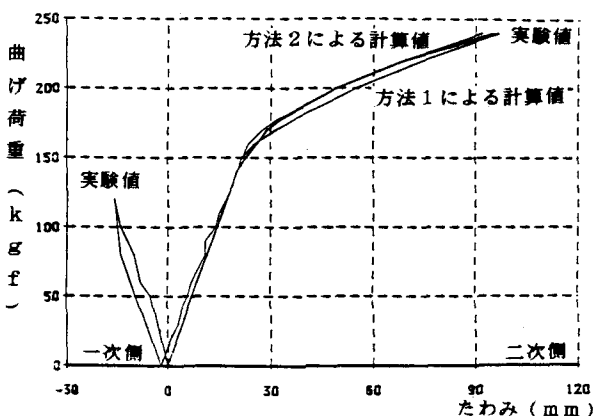


図6 荷重-たわみ曲線 No. 2 I点

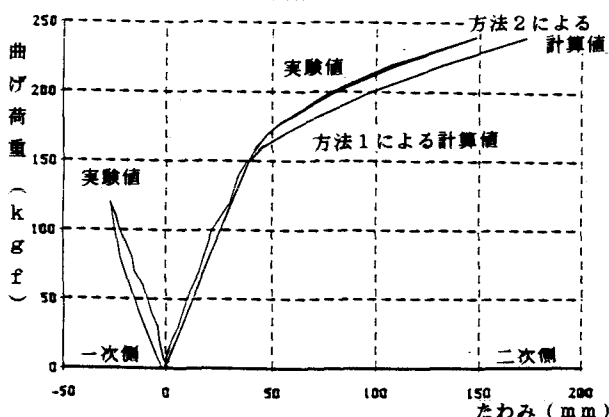


図7 荷重-たわみ曲線 No. 2 J点

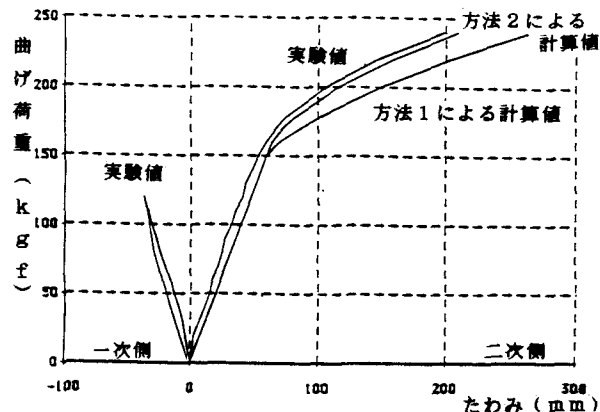


図8 荷重-たわみ曲線 No. 2 K点

このとき、PC材であるFRP筋は鉄筋とみなし、断面剛性は部材全長にわたって一定であると仮定する。

〈方法2〉 ポール全長を20の断面で分割し、方法1で無視した断面剛性の部材位置による違いを考慮した。すでにひび割れの生じた断面では I_{cr} を、まだ発生していない断面では I_g

$$I_e = \left(\frac{M_{cr} d}{M_{dmax}} \right)^4 \times I_g$$

$$+ \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr} d}{M_{dmax}} \right)^4 \right\} \times I_{cr}$$

を求めた。これから各断面での換算断面二次モーメントを次式より求める。ある曲げ荷重によって生じる弾性分布荷重から、たわみ量を計算する。

4. 考察

たわみ δ_1 , δ_J , δ_K を図示すると No. 1 は図3, 4, 5 となり, No. 2 については図6, 7, 8 で表せる。ひび割れ発生前では実験値は一次載荷の残留歪だけ原点からずれている。このときの計算値は直線となる。実験値はこれよりもやや小さな値を示すが、計算値とはほぼ対応しており、ひび割れ発生荷重付近では計算値との差が小さくなる。ひび割れ発生後は計算値は方法1と方法2の2つの計算結果を図に示した。実験値と計算値とはよく対応してお

り、特No. 2は、実験値と方法2の算値が非常によい一致を示す。No. 1では、曲げ荷重が160 kg付近で大きく変化しており、K点での測定値を除いて実験値は計算値よりも大きな値を示した。No. 1では方法1の近似計算の方が実験値とよい対応を示した。方法1と方法2を比較すると、方法1の方が大きな値を示す。

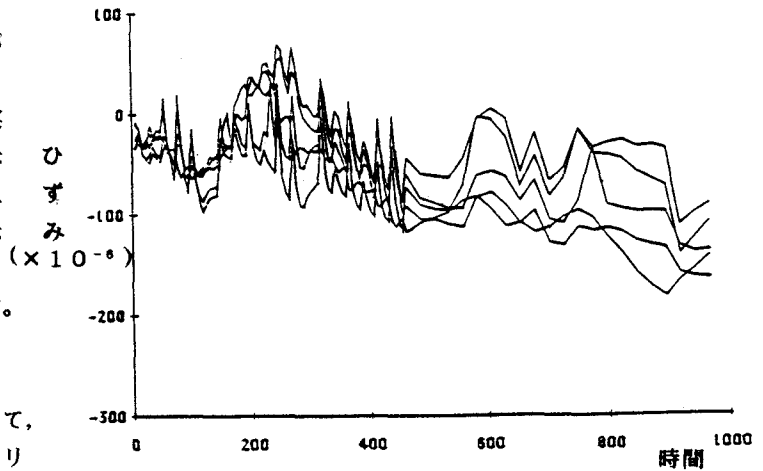


図9 FRP主筋の歪の時間的变化

5. 長期的変形

曲げ破壊後のPCボールについて、測定可能なゲージを用いてコンクリートのクリープや乾燥収縮等によって、長期間にわたって生じるプレストレスが導入されたFRPの変形量を測定した。これを図9、10に示す。図9、10はNo. 1のボールのB断面のゲージを用いて測定したものである。ダミー・ゲージとしてラセン筋を用いた。測定はプレストレス導入から、No. 1で108日後、No. 2で91日後に開始し、204日間おこなった。100日程度でひずみの減少が少なくなり、定常状態の傾向を示した。この間に平均して 145×10^{-6} だけひずみが減少している。これによるプレストレスの損失量は有効プレストレスの3.2%に相当する。

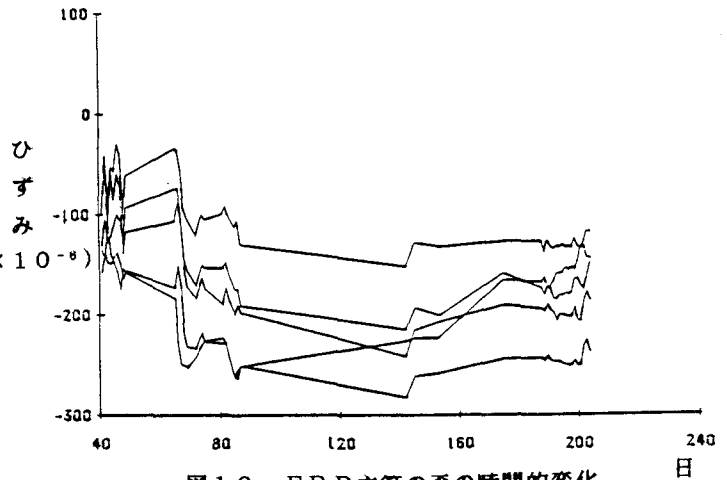


図10 FRP主筋の歪の時間的变化

6. まとめ

- (1) FRPロッドを用いたPCボールの曲げ荷重によるたわみ変形について、ひび割れ発生前は全断面を有効と考えて弾性理論でよくひび割れ発生後は、Bransonの近似式が実験値とよい対応を示していた。
- (2) 鋼材の場合のたわみ変形についての近似計算式をFRPロッドを用いた場合についてほぼ適用できることが分かった。

参考文献

コンクリート標準示方書〔設計編〕