

鋼繊維補強コンクリートを用いた

ECL覆工体の耐荷機構について

STUDY ON LOAD BEARING CAPACITY AND MECHANICS OF EXTRUDED STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE LINING

石田智朗*・二宮康治**・小泉 淳***

Tomoaki ISHIDA, Kouji NINOMIYA and Athushi KOIZUMI

When applying a steel fiber reinforced concrete (SFRC) to the Extruded Concrete lining (ECL) method, it is essential to understand the load bearing mechanisms of SFRC lining. Then, loading experiment of SFRC ring was carried out to prove the efficacy of SFRC and to obtain the fundamentals datum for design. Biaxial loading method were employed for loading on SFRC ring and load, reaction force, strain, displacement of SFRC ring were measured precisely.

In consideration of experiment result, the behavior of SFRC ring can be understand in detail. Further, bending moment of SFRC ring evaluated by means of curved beam theory and FEM using an effective rigidity is verified in this paper. Also, this paper make reference to the ultimate bending strength of SFRC in comparison with reinforced concrete.

Keywords : extruded concrete lining , steel fiber reinforced concrete.

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと称す）をECL工法の覆工体として適用した場合、ポンプ圧送されたコンクリートが覆工型枠内では型枠に沿って移動するため、コンクリート中の鋼繊維は円周方向に卓越した配向状況となり、作用土圧に対して十分な補強効果が期待できることが著者等の研究からすでに確認されている¹⁾。

本研究は、SFRCをECL工法に適用する場合の有効性を実証し、設計時の基礎データを把握する目的でSFRC覆工体のリング載荷実験を実施し、その結果を考察するとともに、解析を行いこれに検討を加えたものである。

2. 実験概要

2・1 供試体

供試体は、連続的に打設した全長1200mmの覆工体から、ウォルソーマシンによって、幅750mmのリング状に切出したものである。供試体寸法は、外径1660mm、内径1000mmで、覆工厚は実施工を考慮して330mmとしている。

コンクリートの配合は、覆工コンクリートとして水密性が要求されること、繊維の混入によりワーカビリティが大きく低下することなどを考慮して表-1に示すように決定した。また、圧送性を改善する目的で増粘剤を使用した。表-2に使用材料を示す。

使用した鋼繊維の仕様を表-3に示す。また、繊維の混入率は予備実験の結果を基に体積比で1.0%とした。

* 正会員 工修 日本国土開発(株)エンジニアリング本部技術開発部

** 正会員 日本国土開発(株)エンジニアリング本部技術開発部

*** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科

2・2 載荷方法

載荷は、図-1に示すように覆工リングを水平に設置し、P C 鋼棒を使用して2軸集中荷重を用いて行った。覆工体構築時のクラウンとインバートを結ぶ方向を主載荷方向とし、クラウンにセンターホールジャッキを設置して載荷した。主載荷方向と直交するP C 鋼棒は、覆工体の変形に伴って生じる地盤反力を想定したものである。なお、主載荷方向を鉛直方向、それと直交する方向を水平方向と呼ぶことにする。

載荷は、1.0tf ピッチで50tfまで荷重制御で行い、それ以降は変位制御とし、載荷荷重72tfに達した段階で一度30tfまで除荷し、再び載荷点における鉛直方向直径変化量が4.0mm になるまで載荷を続けた。

2・3 測定

各荷重段階毎に覆工体のひずみおよび変形量（図-2参照）を測定した。

表-1 コンクリート配合表

骨材 寸法 (mm)	スラック (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				W	C	S	G	AE減水剤	増粘剤	流動化剤
25	20	49	65	215	438	1065	562	1.098	0.5	3.5

表-2 使用材料仕様

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	相模川水系80%、市原産川砂20% (比重=2.60, FM=2.06)
粗骨材	相模川水系40%、津久井産砕石60% (比重=2.65, FM=6.80)
AE減水剤	リグニンスルホン酸系
流動化剤	メラミンスルホン酸系
増粘剤	セルロース系

表-3 鋼繊維仕様

形 状	寸 法	YAS'対比	材 質	製 造 方 法
ト・サ・キ・ン形状 	φ 0.45mm×30mm	67	ステンレス鋼 (SUS430)	メルトエクストリュージョン法

3. 解 析

3・1 解析方法

実験結果の解析には、次の2通りの方法を用いた。

- (a) 覆工体リングを梁部材にモデル化する方法。
- (b) FEMによる2次元平面ひずみ問題として取扱う方法。

(a) 覆工体リングを梁部材にモデル化する方法

リング断面に発生する曲げひずみ分布を考える場合に、リングの図心半径 r と覆工厚 h との関係が、一般に $r/h \geq 10$ ならば直線梁と見なして取扱うことができる。しかし今回実験に用いた覆工体リングの図心半径 r と覆工厚 h との関係は、

$$\frac{r}{h} = \frac{66.5\text{cm}}{33.0\text{cm}} = 2.015$$

であり、曲がり梁として取扱うことが必要となる。また、この方法では覆工体を梁部材に置換することから、覆工体に発生するひびわれを評価することは容易ではない。したがって、覆工体にひびわれが発生する前の状態についてのみこの方法を適用することとした。

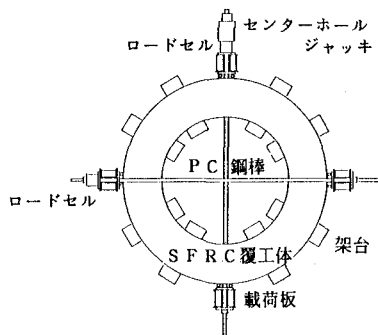


図-1 載荷装置概要

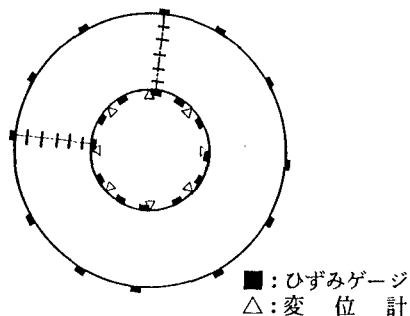


図-2 測定位置

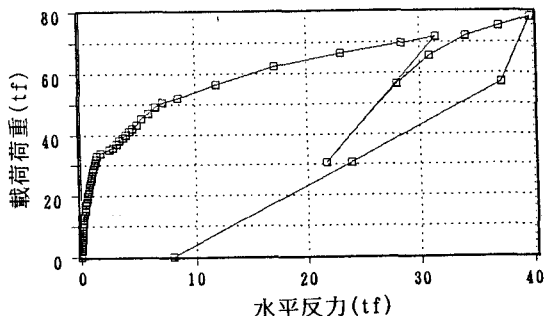


図-3 載荷荷重と水平反力の関係

(b) F E Mによる2次元平面ひずみ問題として取扱う方法

覆工体リング断面を幾つかの要素の集合体とし、二次元平面ひずみ問題として取扱うものである。この方法を用いて、実験結果の解析を行う場合には、”覆工体のひびわれ発生前後における構造系の変化をどのように評価するか”という問題がある。

図-3は、今回の実験における載荷荷重と水平反力の関係を示したものであるが、この図から両者の関係は、載荷荷重34tfおよび50tf近傍で変曲点を持つ3つの領域に区別されることがわかる。すなわち、載荷開始から34tfまでの区間、載荷荷重34tfから50tfまでの区間および載荷荷重50tfから載荷終了までの区間である。また、これら3つの領域における載荷荷重と水平反力の関係は、それぞれの区間内では直線性を保っていることがわかる。このことから、覆工体には載荷荷重34tf近傍で初期ひびわれが発生し、次に載荷荷重50tf近傍で新たなひびわれが発生したものと考えられる。

したがって、解析にあたっては、初期ひびわれ発生までは全断面有効とした曲げ剛性を考え、ひびわれ発生後においてはひびわれが伸長することにより起こる覆工体の剛性低下を曲げ剛性の有効率を用いて評価することとした。

3・2 解析モデル

(a) 曲がり梁モデル

図-4に曲がり梁モデルを示す。このモデルから算出される断面力および直径変化量は以下の通りである。

$$S = \frac{P_1}{2} \cdot \sin \theta + \frac{P_2}{2} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$N = \frac{P_1}{2} \cdot \cos \theta + \frac{P_2}{2} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$M = P_1 \cdot \rho_0 \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot (1 + \kappa)} - \frac{1}{2} \cdot \sin \theta \right] + P_2 \cdot \rho_0 \cdot \left[\frac{1}{\pi \cdot (1 + \kappa)} - \frac{1}{2} \cdot \cos \theta \right] \quad (5)$$

$$\delta_v = \frac{P_1 \cdot \rho_0}{\kappa \cdot E A} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) + \frac{2 \cdot P_1 \cdot \rho_0}{E A \cdot \pi (1 + \kappa)} - \frac{P_2 \cdot \rho_0}{\kappa \cdot E A} \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{2 \cdot P_2 \cdot \rho_0}{E A \cdot \pi (1 + \kappa)} \quad (6)$$

$$\delta_H = -\frac{P_1 \cdot \rho_0}{\kappa \cdot E A} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right) - \frac{2 \cdot P_1 \cdot \rho_0}{E A \cdot \pi (1 + \kappa)} + \frac{P_2 \cdot \rho_0}{\kappa \cdot E A} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{2 \cdot P_2 \cdot \rho_0}{E A \cdot \pi (1 + \kappa)} \quad (7)$$

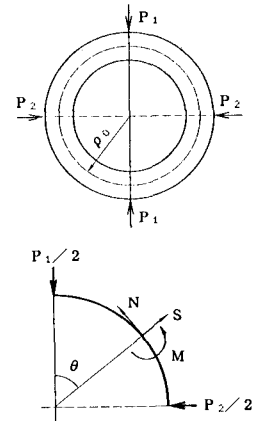


図-4 曲がり梁モデル図

ここに、 P_1 : 載荷荷重

P_2 : 水平反力

ρ_0 : 覆工体リング図心半径

κ : 曲がり梁の断面係数(矩形の場合)

h : 覆工の厚さ

S : せん断力

N : 軸力

M : 曲げモーメント

$E A$: 覆工体リング軸剛性

$$\kappa = \frac{\rho_0}{h} \cdot \log \frac{\rho_0 + (1/2) \cdot h}{\rho_0 - (1/2) \cdot h} - 1 \quad (8)$$

δ_v : 覆工体リング中心線の鉛直方向直径変化量

δ_H : 覆工体リング中心線の水平方向直径変化量

である。

(b) F E Mモデル

解析モデルは図-5に示すような要素分割を行った。また、解析モデルに作用させる荷重は、載荷荷重 P_1 とその時に発生した水平反力 P_2 と

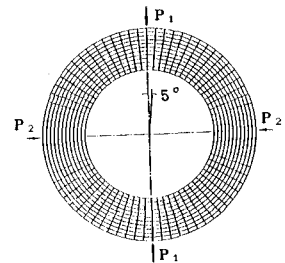


図-5 F E Mモデル図

であり、これらを同時に作用させている。

覆工体リングの曲げ剛性は、曲げ剛性の有効率 η を用いて評価する。すなわち、覆工体にひびわれが発生する前は $\eta=1.0$ （全断面有効）とし、ひびわれ発生後はひびわれの伸長に合わせて η を低減させて解析を行った。

4. 実験結果と解析結果との比較および考察

4・1 直径変化量

図-6に載荷荷重と鉛直方向直径変化量の関係を示す。図中の◇印は実験値を、実線はFEMによる解析結果を、点線は曲がり梁モデルによる解析結果を示している。

SFRRCの曲げ破壊過程は、ひびわれをブリッジしている繊維に引張力が伝達されて力の釣合いが保たれるため、ブレンコンクリートの曲げ破壊過程とは異なり、ひびわれ発生後も破壊近傍まで載荷荷重は増加する。この傾向は実験結果において、載荷荷重34tf以降の載荷荷重と直径変化量の関係を見ると明かである。また、初期ひびわれ発生後においてもひびわれ発生による急激な変形量の増加は認められず、載荷荷重と直径方向変化量の関係はほぼ直線的に変化している。

実験結果と解析結果を比較すると、曲がり梁モデルおよびFEMモデルによる解析結果は実験結果とよく一致している。

4・2 ひずみ分布

載荷荷重と覆工体リング断面内のひずみとの関係の一例を図-7および図-8に示す。

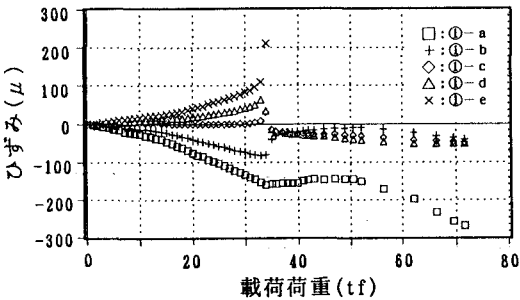


図-7 載荷荷重とひずみとの関係（載荷点近傍）

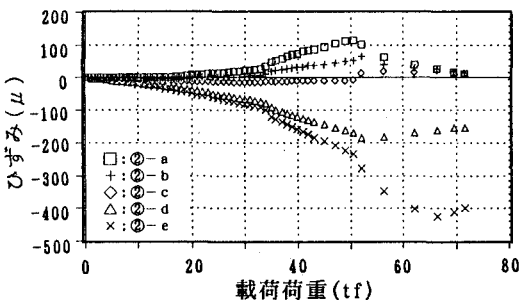
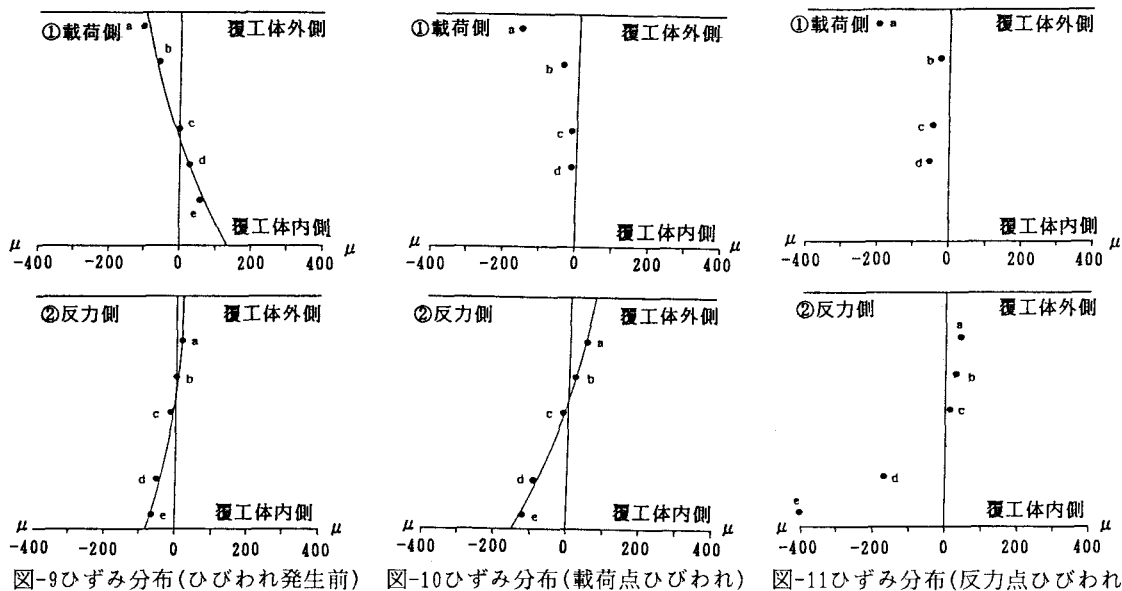


図-8 載荷荷重とひずみとの関係（水平反力点近傍）

これらの図から、載荷点近傍において、覆工体リング断面内のひずみはひびわれ発生までほぼ連続的に変化しているが、ひびわれ発生後のひずみは圧縮側に移行し全断面圧縮となっていることがわかる。これは、ゲージ設置位置近傍にひびわれが発生したためひびわれの進行に伴う応力集中の影響によるものと考えられる。また、水平反力点近傍のひずみは、ひびわれの発生により応力解放が行われ、圧縮側のひずみが増加する傾向を示している。

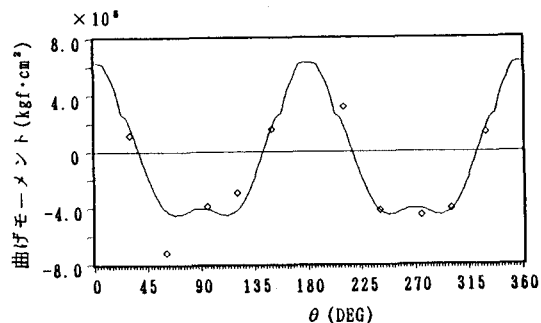
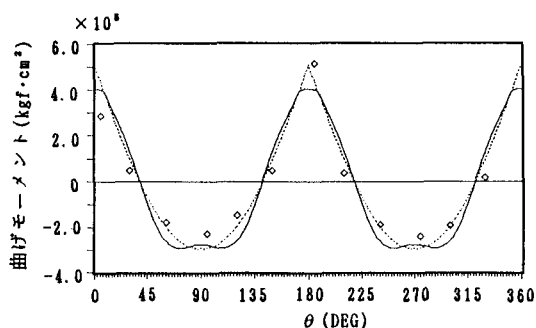
次に、覆工体リング断面内のひずみ分布を図-9～図-11に示す。図中の●は実験値を、実線はひずみ分布を双曲線分布と仮定した最小2乗法により近似した結果を示したものである。

これらの図から、ゲージ設置位置近傍にひびわれが発生する前は、リング断面内のひずみ分布は典型的な双曲線分布を示しているが、ひびわれの発生とともにひずみは圧縮側に移行する傾向が見られる。



4・3 曲げモーメント

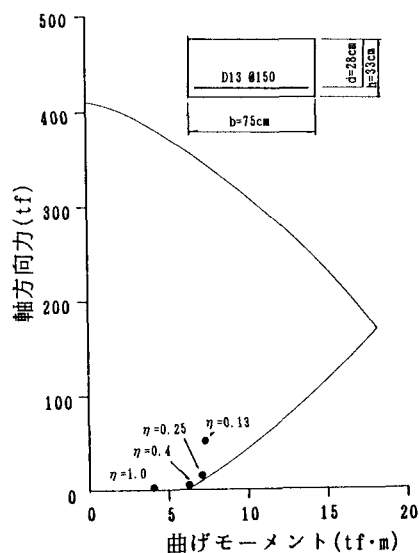
実験結果から算出した曲げモーメント分布と解析結果から得られた曲げモーメント分布との比較を図-12 および図-13 に示す。図中の◇印は実験値を、実線はFEMによる解析結果を、また、点線は曲がり梁モデルによる解析結果を示したものである。



これらの図から、曲げ剛性有効率 $\eta=1.0$ の場合、すなわちひびわれ発生前の全断面有効の場合には、曲がり梁モデルおよびFEMによる解析結果はいずれも実験結果をよく説明していることがわかる。また、ひびわれの伸長に合わせて覆工体全体の剛性を均等に低下させた、曲げ剛性有効率を用いたFEMの解析結果は、実験結果をほぼ説明していると考えられる。

4・4 RC理論による終局耐力の試算

RC理論をSFRCに適用し、実際の設計を行うことは、RCとSFRCの破壊過程が異なることから困難であると考えられる。しかし、現段階ではSFRCの性状を考慮した適切な設計手法が確立されていないことから、次にSFRC断面をRC断面と仮定し、鉄筋量をパラメータとして終局耐力の試算を行った^{2)・3)}。図-14 は、断面の鉄筋量をD13を150



ピッチ ($A_s=7.6\text{cm}^2$) に配置し、かぶりは 5.0cm とした場合に、この断面が終局耐力に達するときの曲げモーメントと軸力との関係を示したものである。図中の●印は曲げ剛性有効率 η を変化させた場合の試算結果である。

この図から実験で用いたSFR C断面をRC断面と仮定した場合、鉄筋量 $A_s=7.60\text{cm}^2$ の場合とほぼ同様の断面性能を有することがわかった。

5. まとめ

SFR Cを用いた覆工体のリング載荷実験を実施し、これに解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) SFR Cの曲げ破壊過程は、ひびわれをブリッジしている繊維に引張力が伝達されて力の釣合いが保たれるため、ひびわれ発生後も載荷荷重は増加する。したがって、プレーンコンクリートの曲げ破壊過程のようにひびわれ発生とともに急激に破壊に至るということがない。また、SFR Cの特徴であるタフネス効果により初期ひびわれ発生後においてもひびわれ発生による急激な変形量の増加は認められず、載荷荷重と直径変化量はほぼ直線的に変化 することが確認できた。
- (2) 今回実験に用いた覆工体リング断面内のひずみ分布は、ひびわれ発生前は典型的な双曲線分布を示した。紙面の都合上本報告では省いたが、ひびわれ発生後においても、ひびわれ発生位置以外では典型的な双曲線分布を示している。

また、ひびわれ発生位置ではひびわれ発生とともにひずみが圧縮側に移行する傾向が認められた。

- (3) 解析モデルとして、覆工体を曲がり梁に置換したモデルと曲げ剛性有効率を考慮したFEMモデルとを用いて解析を行ったが、結果として、ひびわれ発生前は曲げ剛性有効率 $\eta=1.0$ のFEMモデルおよび曲がり梁モデルのいずれを用いても実験値を説明できることが確認できた。また、ひびわれ発生後においては図-15 に示すように載荷荷重の増大にしたがって曲げ剛性有効率を低減させることにより、FEMを用いて実験値を説明することがわかった。

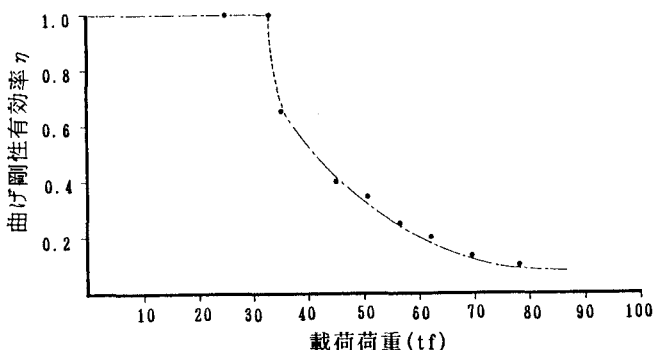


図-15 曲げ剛性有効率と載荷荷重の関係

- (4) 実験で用いたSFR Cの断面をRC断面と仮定した場合、鉄筋量 $A_s=7.60\text{cm}^2$ の場合とほぼ同様の断面性能を有することがわかった。

6. おわりに

今回の実験および解析から、SFR Cを覆工体とした場合の挙動をほぼ把握することができた。

今後、この結果を実際の設計に活かすために、SFR Cの効果を定量的に評価することが重要であり、現在さらに詳細な検討を進めている。

7. 参考文献

- 1) 横田, 石田: ECL工法における鋼繊維補強コンクリートを用いた場合の配向性について, 土木学会第45回年次学術講演会, PP66~67, 1990, 9
- 2) 岡村 甫: コンクリート構造の限界状態設計法〔第2版〕, 共立出版, 1986.
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー第48号, コンクリート構造の限界状態設計法試案, 1981.