

鋼繊維補強コンクリートを用いた セグメントの実大性能試験

Full Scale Performance Test of Steel Fiber Reinforced Concrete Segment

吉田公宏¹・藤井亜紀²・林成卓³

Masahiro Yoshida, Aki Fujii and Masataka Hayashi

¹正会員 株式会社大林組 土木技術本部設計第1部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:yoshida.masahiro@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 土木技術本部技術第2部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:fujii.aki@obayashi.co.jp

³正会員 工修 株式会社大林組 土木技術本部技術第2部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:hayashi.masataka@obayashi.co.jp

Steel fiber reinforced concrete segment is developed in order to improve the quality and to reduce the cost from usual reinforced concrete segment. This paper describes the result of improved bending capacity from the standard proof bending test, measurement result of decreased and even tensile stress distribution of main bar without distribution bar from the bending test with two point loading at outer edge, and the increased bursting capacity of main compression bar without enclosed tie bar from the ultimate compression test with eccentric loading. From these results possibility of reducing main bar quantity and elimination of distribution bar and tie bar is proved.

Key Words : segment lining, steel fiber, omission of secondary lining, improve quality, cost reduction

1. はじめに

近年、都市部では地上構造物の過密化により新たに構築されるライフラインや交通施設の多くは地下空間に建設され、なかでも地上部の占有が少ないシールド工法が多く採用されている。

シールド工事において、コスト縮減という観点から長距離や急速施工に関する取り組みが盛んに行われ、覆工構造については二次覆工省略にともない耐久性や安全性、経済性に優れたセグメントが求められている。

このような状況の中で、筆者らはRCセグメントの本体部について、従来のコンクリートセグメントに比べて品質向上とコスト縮減を目的に、鋼繊維補強コンクリートセグメントを開発した¹⁾。図-1に鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントの概念図を示す。

鋼繊維補強コンクリートは、鋼繊維の均等な分散によりコンクリートのはく落防止が期待できること

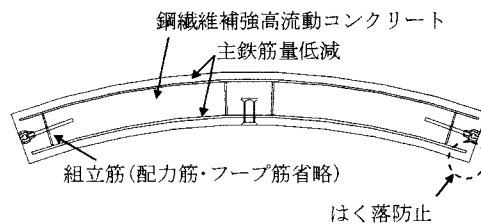


図-1 鋼繊維補強コンクリートセグメント概念図

から、近年のコンクリートはく落事故以来山岳トンネルの覆工コンクリートへの適用が増加している²⁾。

一方、シールドセグメントは従来のスランブタイプコンクリートを用いて製作されるもの(以下、「従来型」と記す)が一般的であり、最近では高流動コンクリートを用いたものも開発されている³⁾。鋼繊維補強コンクリートセグメント(以下、「鋼繊維補強」と記す)は、鋼製短繊維を混入し、自己充てん性を有する高流動コンクリートを用いてセグメ

ントを製作するものである。鋼繊維補強の特徴は以下に示すとおりである。

- ① 鋼繊維が均等かつランダムに混入することで、セグメント端部のはく離、はく落の防止、ひび割れの分散により覆工品質が向上する。
- ② 鋼繊維の補強効果による引張強度やせん断強度の増加を期待することで、主鉄筋量の低減と配力筋の省略が可能になり、鉄筋加工・組立や型枠への設置など製作工程の省力化が図れる。
- ③ 高流動コンクリートを併用することで、テーブルバイブレータによる締固め作業が不要になり、型枠剛性の低下が可能となる。
- ④ 製作時の環境負荷が低減できるためセグメントの現地製作が可能になり、運搬時の重量にとらわれることなくセグメント分割数や幅を決定できるとともに、積込、輸送にかかわるコスト縮減が期待できる。

筆者らは、鋼繊維の補強効果とセグメントの構造性能を確認するため、実大セグメントを用いて強度試験を行った⁴⁾。単体曲げ試験では、従来型と主鉄筋量を低減した鋼繊維補強について実施し、鋼繊維補強は従来型に比べ同等以上の曲げ耐力が確保できたことから、鋼繊維補強コンクリートを用いることで、主鉄筋量の低減が可能であることを明らかにした。また、主鉄筋応力分布確認試験では、従来型と配力筋を省略した鋼繊維補強について実施し、主鉄筋のセグメント幅方向の応力分布が従来型と鋼繊維

補強で同様であることから、配力筋の省略が可能であることを明らかにした。さらに、曲げ圧縮破壊試験では、配力筋、フープ筋を省略した鋼繊維補強について実施し、軸力卓越状態を想定した曲げ圧縮破壊時の破壊挙動を確認することで、配力筋、フープ筋の省略が可能であることを明らかにした。

2. コンクリートの配合

単体曲げ試験および主鉄筋応力分布確認試験に用いる供試体は、従来型と鋼繊維補強の2体製作し、曲げ圧縮破壊試験では鋼繊維補強の1体製作した。

供試体に用いたコンクリートの使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2示す。各配合は、水粉体比 (W/P) を同等とし、コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=48\text{N/mm}^2$ である⁵⁾。ここで、鋼繊維補強の配合は、高流動コンクリートを基本配合としており、粗骨材の一部を同じ表面積をもつ鋼繊維で置換し、減少した容積を細骨材で補う配合設計とした⁶⁾。

使用する鋼繊維は、分散性およびコンクリートの充てん性から、写真-1に示す両端フック付結束型で、径 $\phi 0.6\text{mm}$ 、繊維長さ $l=30\text{mm}$ のものとした。また、鋼繊維の混入率は、混入量を $0.6\text{ vol } \%$ 、 $0.8\text{ vol } \%$ 、 $1.0\text{ vol } \%$ と変化させた3種類の配合についてコンクリート強度特性試験を行い、その結果、鋼繊維の使用効果を効率的に発揮できる $0.8\text{ vol } \%$ とした⁷⁾。

表-1 使用材料

使用材料	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランド 密度: 3.16 g/cm^3
高炉スラグ微粉末	F	密度: 2.90 g/cm^3
細骨材	S	陸砂 表乾密度: 2.62 g/cm^3
粗骨材	G	碎石 表乾密度: 2.65 g/cm^3
AE 減水剤	AE	アミン系
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
鋼繊維	SF	両端フック付結束型 ($l=30\text{mm}$, $\phi=0.6\text{mm}$)

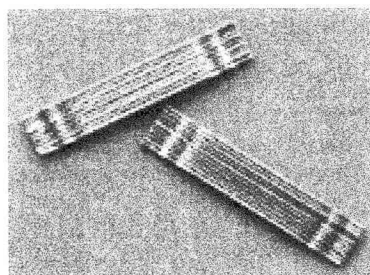


写真-1 鋼繊維(両端フック付結束型)

表-2 コンクリートの配合

コンクリート タイプ	粗骨材 最大径 (mm)	スランパ (フロー) (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤	鋼繊維混入量	
						W	C	F	S	G		容積比 (%)	単位量 (kg/m^3)
鋼繊維補強	20	67.5 ± 5.0	3.0 ± 1.5	29.0	67.7	180	310	310	1037	501	SP	0.8	63
従来型	20	3.0 ± 1.5	2.0 ± 1.0	29.0	41.0	125	215	215	765	1116	AE	—	—

3. 単体曲げ試験

(1) 試験目的

鋼製短繊維の混入によりコンクリートの引張強度が期待できることに着目し、従来型に比べ主鉄筋量を低減した鋼繊維補強の曲げ耐力の確認を行う。

(2) 供試体

試験に用いる供試体の形状は、セグメント外径φ5,300mm、桁高300mm、幅1,000mmで6分割のA型セグメントを使用した。試験は比較のため、従来型と鋼繊維補強の2体について行った。ここで、鋼繊維補強の供試体は主鉄筋量を従来型に比べ16.5%低減し、主鉄筋の組み立て用にフープ形状の組立筋を外面側、内面側の主鉄筋の内側に4本のみ配置している。従来型の配筋図を図-2に、鋼繊維補強の配筋図を図-3に示し、それぞれの供試体の鉄筋量を表-3に示す。

ここで、鋼繊維補強の場合の主鉄筋量は図-4に示す引張軟化曲線⁹⁾を用いて計算した曲げ耐力が従来型と同等となるような鉄筋量としている。

曲げ耐力の計算に用いたコンクリートに期待する引張応力は、引張軟化曲線において引張縁のひび割れ幅が限界ひび割れ幅に達した時の平均引張応力を仮定し、(1)式の値を用いた。

$$\sigma_t(w) = 1/2 \cdot \mu \cdot f_{tk} \quad (1)$$

$$= 0.84 (\text{N/mm}^2)$$

ここに、

$\sigma_t(w)$: 曲げ耐力計算時に用いる引張応力

μ : 残留強度率 (=0.55)

f_{tk} : コンクリートの引張強度の特性値
($=0.23f'_c k^{2/3} = 3.04 \text{N/mm}^2$)

また、曲げ耐力は、図-5に示すようにコンクリートの圧縮応力度の分布を長方形分布（等価応力ブロック）⁹⁾に、引張応力度の分布を長方形分布と仮定¹⁰⁾し、(2)式により算出している。

$$M_u = C \left(\frac{h}{2} - 0.4x \right) + T_s' \left(\frac{h}{2} - d' \right) - \frac{C_u(h/2 - x)}{2} + \frac{C_{t2}(h/2)}{2} + T_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 M_u : 曲げ耐力

C : コンクリートの圧縮応力度の合力

T_s' : 圧縮鉄筋の合力

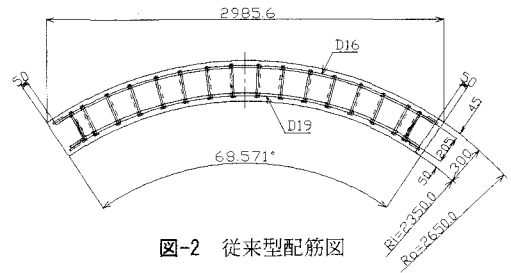


図-2 従来型配筋図

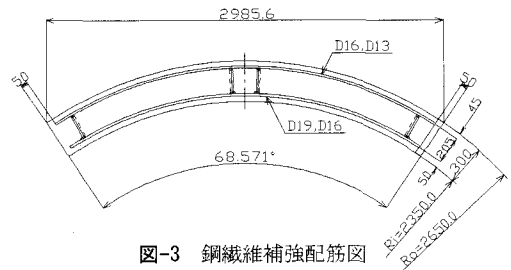


図-3 鋼繊維補強配筋図

表-3 供試体鉄筋量

項目	従来型	鋼繊維補強
鉄筋量		
外側主鉄筋	8-D16	4-D16+4-D13
内側主鉄筋	8-D19	4-D19+4-D16
主鉄筋断面積比率	100%	83.5%
鉄筋重量比率 (鋼繊維を考慮)	100%	53.7% (90.5%)

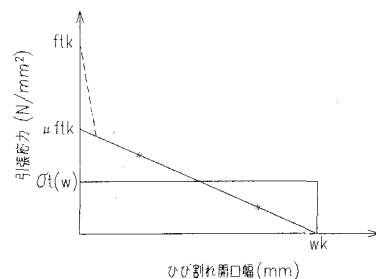


図-4 引張軟化曲線

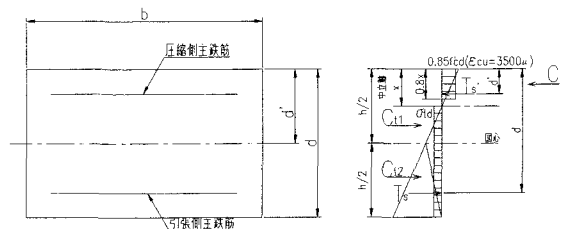


図-5 曲げ耐力算出モデル図

T_s : 引張鉄筋の合力

C_t : コンクリートの引張応力度の合力

h : 断面高さ

x : 中立軸の位置

d, d' : 有効高さ

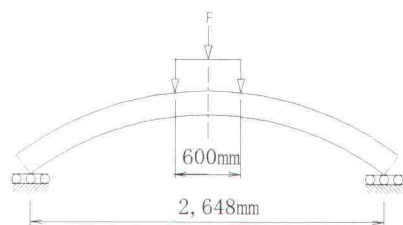


図-6 試験概要図

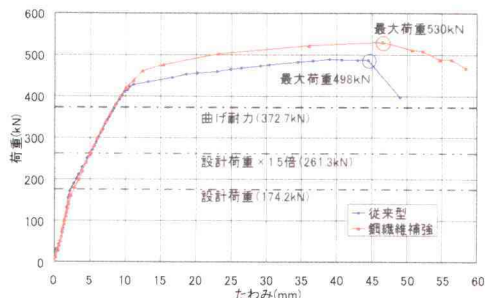


図-7 荷重－たわみ関係図

(3) 試験方法

試験概要図を図-6に示す。試験方法は、支持スパン 2,648mm、荷重スパン 600mm の 2 点集中荷重で両支点は可動とした単純曲げを与える方法である¹¹⁾。なお、荷重ピッチはひび割れ発生までは 10kN ピッチ、その後を 20kN ピッチを目安とし破壊まで荷重した。

(4) 試験結果および考察

a) 曲げ耐力

図-7 は、荷重荷重と供試体中央のたわみの関係図を示したものである。図中には目安のため従来型の設計荷重（許容荷重）と、その 5 割増の荷重（短期扱い）、および期待する曲げ耐力（計算値）を付記している。

荷重荷重 160kN で従来型、鋼繊維補強ともにひび割れ発生による剛性低下から勾配が変化しており、その後も荷重荷重 400kN まで従来型と鋼繊維補強は同様の挙動を示している。最大荷重は従来型で 498kN、鋼繊維補強で 530kN となった。破壊に対する安全率（最大荷重／設計荷重）は、従来型で 2.86、鋼繊維補強で 3.04 であった。本結果から、主鉄筋量を 16.5%低減した場合でも鋼繊維の補強効果により曲げ耐力を維持できることが確認された。従って、鋼繊維補強では、鋼繊維の引張強度が期待できることにより、従来に比べ主鉄筋量の低減が可能であるこ



写真-2 従来型ひび割れ発生状況

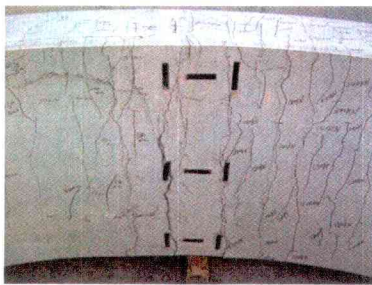


写真-3 鋼繊維補強ひび割れ発生状況

とがいえる。

b) ひび割れ発生状況

内面に貼り付けたひずみゲージの勾配変化点をひび割れ発生時とすると、その荷重荷重値は、従来型で 140kN、鋼繊維補強では 100kN であった。これは、鋼繊維補強の場合、粗骨材が少ないため従来に比べ弾性係数が小さく、また主鉄筋量も少ないことにより、剛性が低いことに起因するものと考えられる。初期ひび割れ幅はいずれの供試体も 0.04mm 以下であり、その後のひび割れ状況は、従来型は配筋筋の間隔にひび割れが発生しているのに対し、鋼繊維補強では分散して発生している。鋼繊維補強の方がひび割れ発生荷重が小さかったが、その後ひび割れが分散して発生することから、鋼繊維が均等かつランダムに混入されていることが確認でき、耐久性も確保できるものと考えられる。写真-2、写真-3 に従来型と鋼繊維補強の試験終了後のひび割れ発生状況の写真をそれぞれ示す。ここで、写真-2 で従来型に発生しているはく落は、試験後供試体運搬時に発生したものである。

4. 主鉄筋応力分布確認試験

(1) 試験目的

シールドセグメントは、添接効果を期待し通常千鳥組に組立てられ、セグメント継手の曲げモーメン

トの一部をリング継手のせん断抵抗により隣接するセグメント本体部に伝達される¹²⁾。この添接効果を模擬して、リング継手に作用するせん断力に対し、鋼繊維の補強効果を期待し従来のセグメントで配置されていた配力筋を省略した場合の、主鉄筋応力分布状況を確認する。

(2) 供試体

主鉄筋応力分布確認試験に使用した供試体の形状寸法および配筋は単体曲げ試験と同様で、本試験においても比較のため、従来型と鋼繊維補強の2体について行った。

(3) 試験方法

試験概要図を図-8に示す。試験方法は、リング継手面にあらかじめ埋込んだインサート4ヶ所に、M24(10.9)のボルトで接合した治具から載荷し、両

端可動支持の単純曲げを与える方法とした。この時の支持スパンは2,648mm、載荷スパンは745.2mmである。

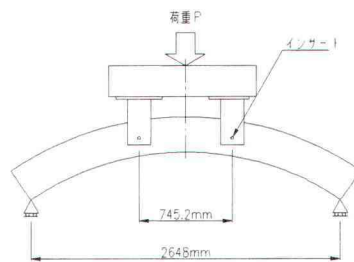


図-8 試験概要図

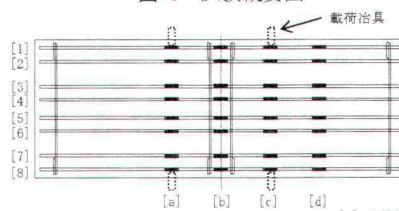


図-9 内面側鉄筋計位置図 []:鉄筋計番号

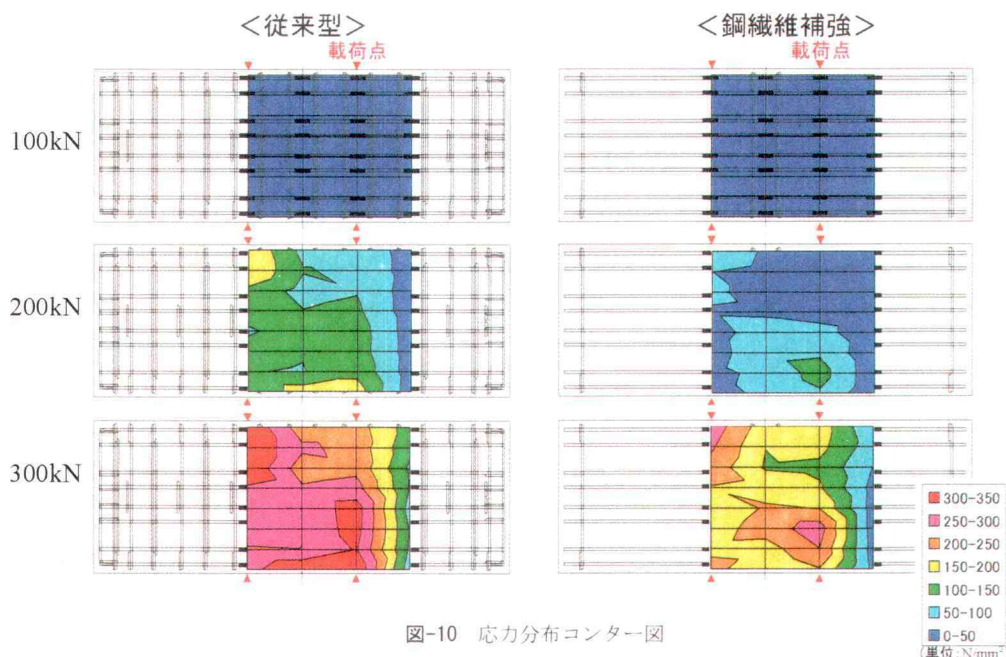


図-10 応力分布コンター図

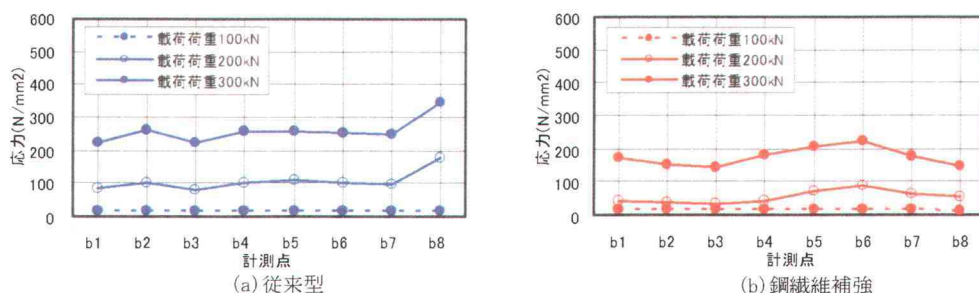


図-11 主鉄筋応力分布

なお、荷重ピッチはひび割れ発生までは 10kN ピッチ、その後を 20kN ピッチを目安とし破壊まで荷重した。

(4) 試験結果および考察

図-9 に示す鉄筋計で測定した主鉄筋応力について、各荷重段階のうち代表して 3 つの荷重レベルにおける主鉄筋の応力分布コンター図を図-10 に、スパン中央部の主鉄筋応力分布を図-11 に示す。

荷重レベルの低い 100kN 荷重時では、従来型と鋼繊維補強では差異が見られない。以降、荷重レベルが上がると、主鉄筋が負担する応力は鋼繊維補強の方が小さい。また、セグメント幅方向への応力伝達は、従来型も鋼繊維補強も荷重点付近に若干の応力集中があるものの、中央部への主鉄筋に応力が伝達されていることが分かる。試験結果より、鋼繊維が均等かつランダムに混入されることで、応力の配分効果が確認できるとともに、主鉄筋と配力筋の両機能を有していることがいえる。したがって、鋼繊維補強では、鋼繊維の補強効果により従来の配力筋の効果が期待でき、配力筋の省略が可能であるといえる。

5. 曲げ圧縮破壊試験

(1) 試験目的

従来型で配置されていたフープ筋（配力筋）は、主鉄筋の応力配分と拘束効果を期待していた。本試験では、鋼繊維補強コンクリートによる主鉄筋の拘束効果に期待し、フープ筋を省略した場合の曲げ圧縮破壊時の挙動を確認する。

(2) 供試体

供試体形状は、先の単体曲げ試験と同じ桁高 300mm とし、幅 500mm の 1/2 スケールで支点部を補強した平板型とした。また、試験は中央部にフープ筋を設置しない鋼繊維補強のみについて行った。なお、供試体幅が先の単体曲げ試験の 1/2 スケールとしたことから、配置した主鉄筋量も 1/2 としている。供試体の配筋図を図-12 に示す。

(3) 試験方法

試験概要図を図-13 に示す。試験方法は、平板型供試体の支点部に、偏心軸圧縮を作用させることで、曲げモーメントと軸圧縮力を与える方法とした¹⁰⁾。この時の偏心量は 100mm とした。荷重ピッチは、ひ

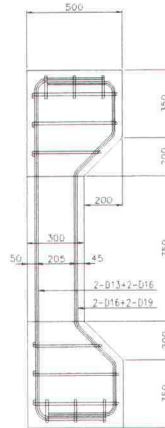


図-12 供試体配筋図

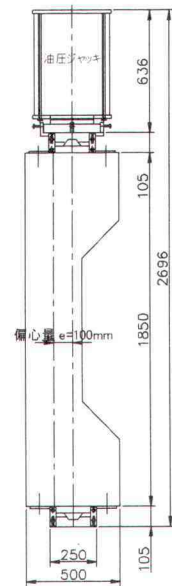


図-13 試験概要図

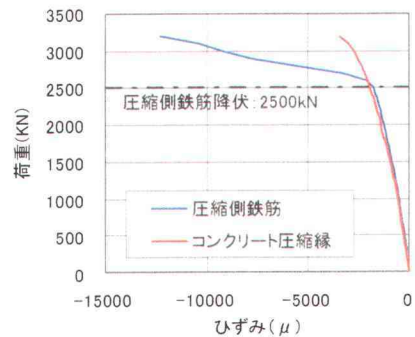


図-14 荷重－圧縮側ひずみ関係図

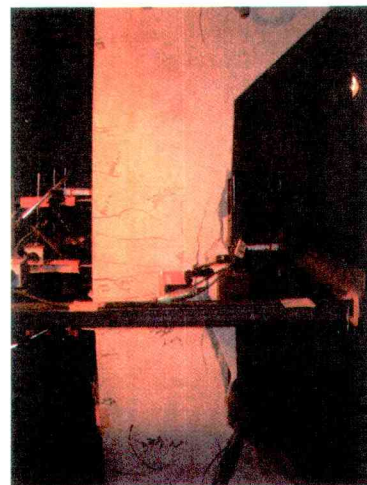


写真-4 コンクリート圧壊状況

び割れ発生までは 50kN ピッチ、その後を 100kN ピッチを目安とし、破壊まで載荷した。

(4) 試験結果および考察

載荷荷重と圧縮側鉄筋のひずみおよびコンクリート圧縮縁のひずみ関係図を図-14 に示す。載荷開始から破壊に至るまでの過程は、載荷荷重 $P=900\text{kN}$ で初期ひび割れが発生し、その後 $P=2,500\text{kN}$ で圧縮側鉄筋が降伏した。さらに、圧縮側鉄筋降伏後も荷重が増加し、最大荷重 $P=3,208\text{kN}$ でコンクリートが圧壊した。コンクリートの圧壊状況を写真-4 に示す。

本試験結果から、圧縮鉄筋は降伏後も座屈することが無く、耐力がコンクリート強度で決定されることが確認された。したがって、鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントでは、鋼繊維の補強効果により圧縮鉄筋の拘束効果が期待でき、フープ筋の省略が可能であるといえる。

6. 鋼繊維の分散状況

鋼繊維補強コンクリートの強度特性を活かすためには、鋼繊維を良好に分散させる必要がある。そこで、前述の選定配合を用いて実大セグメントを製作した際に、強度試験のほかに、その切断片のX線写真により、鋼繊維の分散状況の確認を行った。

実大セグメントは、図-15 に示すように、蓋型枠を設置した型枠の中央部より、コンクリートの打設を行った。図-15 に示す位置のセグメント切断片のX線写真を写真-5 に示す。X線写真により鋼繊維が鉄筋周りや隅角部を含めた全断面にわたり分布していることが確認できる。また、ファイバボールも発生していないことから鋼繊維は良好に分散していることが確認できた。他の部分の切断片についても同様に、鋼繊維の良好な分散性状が確認されている。

7. まとめ

鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントについて、実大試験結果から得られた知見を以下に示す。

- ①単体曲げ試験では、鋼繊維補強によるコンクリートの引張応力を期待し主鉄筋量を減少した場合でも、従来型と同等の耐力が確保できることから、主鉄筋量の低減が可能である。
- ②添接効果を模擬し、リング継手せん断力が作用し

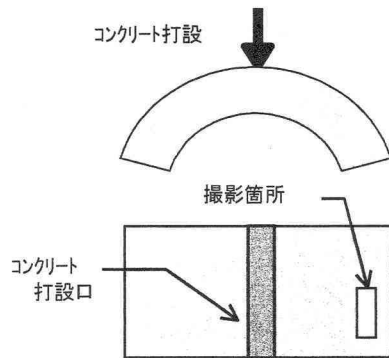


図-15 供試体概要図

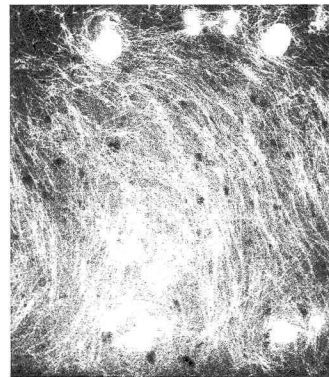


写真-5 切断片のX線写真

た場合の主鉄筋応力分布確認試験では、セグメント幅方向の中央部の主鉄筋まで応力の伝達を確認できたことから、配力筋の省略が可能である。

- ③曲げ圧縮破壊試験では、圧縮側鉄筋が降伏後も座屈することが無く、耐力がコンクリート強度で決まっていることから、フープ筋の省略が可能である。

8. おわりに

鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントは、従来の RC セグメントに比べ、品質の向上とコスト削減を可能にするものである。実大セグメントの強度試験では、鉄筋量の低減が可能であることを明らかにし、構造性能、耐久性の確保、およびセグメント製作の省力化を可能にする。また、高流動コンクリートを併用することでテーブルパイプレータが不要になり、型枠剛性の低下が可能であり、また、環境負荷が低減されることにより、セグメントの現地製作が可能となることで積込、輸送にかかわるコスト

ト縮減が期待できる。

本稿では、鋼繊維補強コンクリートを用いたセグメントの構造性能を実大強度試験により確認できた。今後は、本試験結果を設計に反映し、実施工への展開を図って行く予定である。

参考文献

- 1) 藤井 亜紀ほか：鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント開発の概要,土木学会第59回年次学術講演会概要集,6-001,2004.9
- 2) 酒井 松男ほか：2次覆工に適用する鋼繊維補強高流動コンクリートの特性に関する一考察,土木学会第58回年次学術講演会概要集6部門,PP7-8,2003.9
- 3) 花見 和則ほか：高流動コンクリートセグメントの開発(1)―製造システム―,土木学会第53回年次核術講演会,VI-25,PP50-51
- 4) 吉田 公宏ほか：鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの実大性能試験,土木学会第59回年次学術講演会概要集,6-003,2004.9
- 5) 例えば,土木学会：コンクリートライブラリー50 鋼繊維補強鉄筋コンクリート設計施工指針(案),1983.3
- 6) 上原 匠ほか：高流動鋼繊維補強コンクリートの配合設計に関する研究,土木学会第57回年次学術講演会概要集第5部門,PP991-992,2002.9
- 7) 浦野 知子ほか：鋼繊維補強高流動コンクリートの強度特性とRCセグメントへの適用性,土木学会第59回年次学術講演会概要集,6-002,2004.9
- 8) 土木学会：コンクリートライブラリー97 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案),1999.11
- 9) 例えば,土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕,2002.3
- 10) 例えば,鋼材倶楽部：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル・トンネル編,技報堂出版,1995.3
- 11) 日本下水道協会：シールド工事用標準セグメント,2001.7
- 12) 例えば,土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説,1996.7
- 13) 日本トンネル技術協会：平成2年度 東京湾横断道路実物大セグメント性能確認試験 報告書,1991.5