

鋼纖維補強された鉄筋コンクリートセグメントの構造性能評価

三桶 達夫^{*1}・堀口 賢一^{*1}・丸屋 剛^{*1}・福浦 尚之^{*1}・西田 与志雄^{*2}・服部 佳文^{*3}・加藤 隆^{*3}

Keywords : reinforced steel fiber concrete(RSF), segment using RSF, common duct, tunnel with small diameter, 鋼纖維補強コンクリート, RSF セグメント, 共同溝, 小口径トンネル

1. はじめに

セグメントの耐久性向上と施工時のひび割れ、角欠け防止、供用後の剥落防止を目的として、コンクリートに鋼纖維を混入させたセグメント（以下 RSF セグメントと称す）を開発した。

ここで、道路トンネルに適用する RSF セグメントは既に開発済みである¹⁾。これら既往の知見を踏まえて、今回新たに、RSF セグメント技術を、共同溝などの小口径（3000mm～6000mm）でかつ幅厚比 B/t 9 の形状をした小口径幅広セグメントに対して適用するための研究開発を行った。

開発にあたり、鋼纖維混入に伴う応力伝達性など構造特性への影響の確認を目的とし、構造実験を行った。

今回は全ての試験において、鋼纖維の引張寄与分を考慮して主鉄筋比を最小鉄筋比の 80%とした。

まず、鋼纖維の曲げ強度への寄与の程度を定量的に把握するために、RC と RSF の梁について単純曲げ載

荷試験を行った。

次に、平板供試体（幅厚比 B/t 9）を作成し、RC 及び RSF 試験体について、4 点集中載荷を行い配力効果の確認実験を実施した。

最後に実物大の RSF セグメントを製作し、線荷重載荷試験と局所荷重載荷試験を行い、薄肉幅広化した場合のセグメントの構造性能を確認するとともに性能上問題ないことの確認を行った。

本論文では、これらの実験を通して小口径幅広 RSF セグメントの構造性能評価について報告する。

2. 梁部材試験

2.1 試験概要

試験体を図-1 に示す。試験体は梁状試験体とし各ケース 3 体試験を行った。RC 試験体の断面は 433mm × 150mm、主鉄筋は SD295-D13 を 2 本、引張鉄筋比は最小鉄筋比で 0.54%，配力鉄筋は SD295-D10 を 200mm

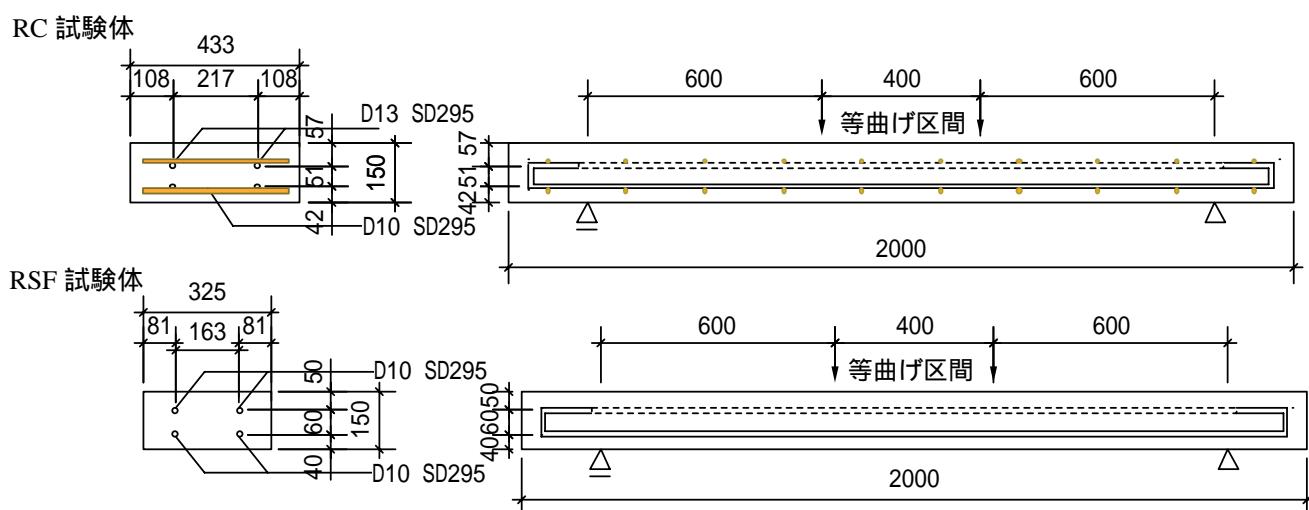


図-1 梁試験体概要 単位 mm

Fig.1 Test specimens of beam

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

* 2 土木本部土木技術部

* 3 土木本部土木設計部

表-1 梁試験結果まとめ

Table.1 Results of beam specimen tests

ケース	種類	ひび割れ発生荷重 kN/m	初降伏荷重 kN/m	初降伏荷重平均値 kN/m	最大荷重 kN/m
1-1	RC-1	46.2	89.1	89.3	129.8
1-2	RC-2	48.7	85.7		123.1
1-3	RC-3	37.0	93.1		122.9
2-1	0.4-1	43.7	89.5	92.2	108.3
2-2	0.4-2	37.8	90.2		111.1
2-3	0.4-3	39.1	96.9		116.6
3-1	0.5-1	44.6	101.8	101.6	116.3
3-2	0.5-2	48.3	104.6		110.8
3-3	0.5-3	47.4	98.5		112.6

間隔で配置した。また、RSF 試験体の断面は 325mm × 150mm、主鉄筋は SD295-D10 を 2 本、引張鉄筋比は最小鉄筋比の 80% で 0.4% とした。

今回 RSF セグメント試験体（以下 RSF 試験体と称す）については主鉄筋に対する応力伝達を鋼纖維に期待し、配力鉄筋及びフープ鉄筋は省略した。

梁部材試験において RSF 試験体の鋼纖維は L=30mm, 0.5mm のものを使用し、鋼纖維混入量は 0.4vol% を基本とし、比較用として鋼纖維混入量を 0.5vol% とした試験体も製作した。また、コンクリートの設計基準強度は 54N/mm² とした。

2.2 実験結果

実験結果まとめを表-1 に、梁試験体の材料試験結果を表-2, 3 に示す。また、荷重-変位関係の実験結果を図-2 に示す。なお試験結果の荷重については単位幅あたりに換算して示している。

試験の結果、RC 試験体と鋼纖維混入量 0.4% の試験体は降伏荷重がほぼ等しい結果となった。また、鋼纖

表-2 コンクリートの材料物性値

Table.2 Results of compressive strength test of concrete

試験ケース	1 : RC	2 : RSF0.4%	3 : RSF0.5%
圧縮強度(N/mm ²)	66.3	51.1	68.0
引張強度(N/mm ²)	2.43	2.39	4.11
ヤング係数(kN/mm ²)	28.1	15.8	29.2

表-3 鉄筋の材料物性値

Table.3 Results of tensile strength test of reinforcing bars

鋼種	呼び名	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
SD295	D13	364	521	190
SD295	D10	364	504	186

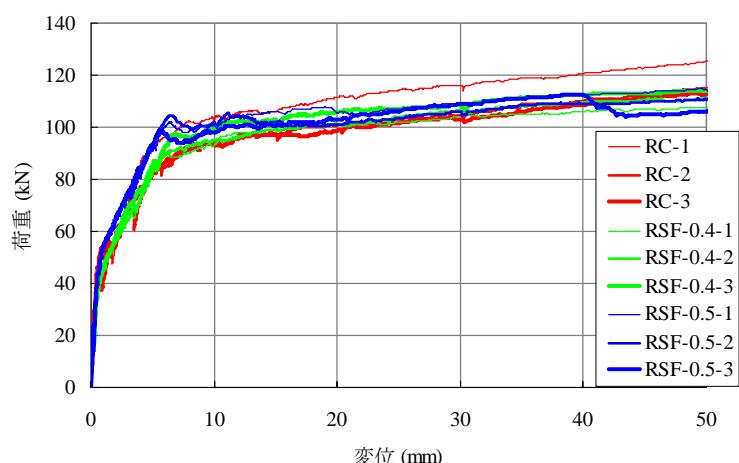


図-2 荷重 - スパン中央たわみ関係

Fig.2 Load-displacement curves

維混入量 0.4% と 0.5% の試験体については初降伏荷重について 0.5% 試験体のほうが若干の向上が確認されたが、降伏以降の最大荷重荷重及び変形性能については有意な差異は確認されなかった。また、等曲げ区間のひび割れ性状も RC 試験体より分散する傾向にあった。

よって、必要最小限の鋼纖維混入量を 0.4% として以後の実験を行うこととした。

3. 平板載荷試験

3.1 試験概要

今回対象としているセグメントは幅厚比 B/t = 9 と非常に薄く、幅の広いセグメントである。よって配力効果を確認するために、RC 及び RSF 平板試験体を作成し、リング間継手部に対して 4 点集中曲げ載荷試験を行った。試験ケースを表-4 に示す。また図-3, 4 に試験体を図-5 に載荷試験状況を示す。

表-4 平板試験ケース
Table.4 Cases of plate specimens

ケース	種類	鋼纖維 混入量	試験体仕様	主鉄筋	配力鉄筋
1	RC	-	H150 x W3000 x B1300	D13 x 6本	D10 x 15本
2	RSF	0.40%	H150 x W3000 x B1300	D10 x 8本	なし(組立筋D10 x 6本)

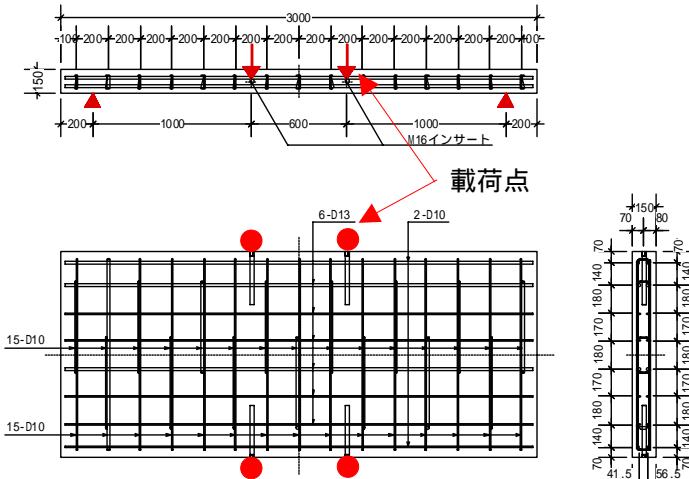


図-3 RC 試験体配筋図 単位 mm

Fig.3 Test specimens plan of RC

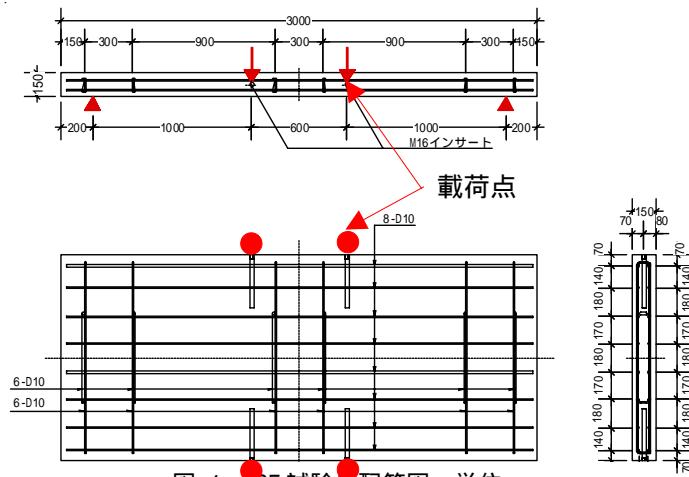


図-4 RSF 試験体配筋図 単位 mm

Fig.4 Test specimens plan of RSF



図-5 平板試験体載荷状況

Fig.5 Loading tests plate specimens

表-5 コンクリートの材料物性値

Table.5 Results of strength test of concrete

試験ケース	1:RC	2:RSF0.4%
圧縮強度(N/mm ²)	57.1	62.7
引張強度(N/mm ²)	3.49	3.13
ヤング係数(kN/mm ²)	26.0	27.5

表-6 鉄筋の材料物性値

Table.6 Results of tensile strength test of reinforcing bars

鋼種	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SD295	D13	351	499	190
SD295	D10	366	518	186

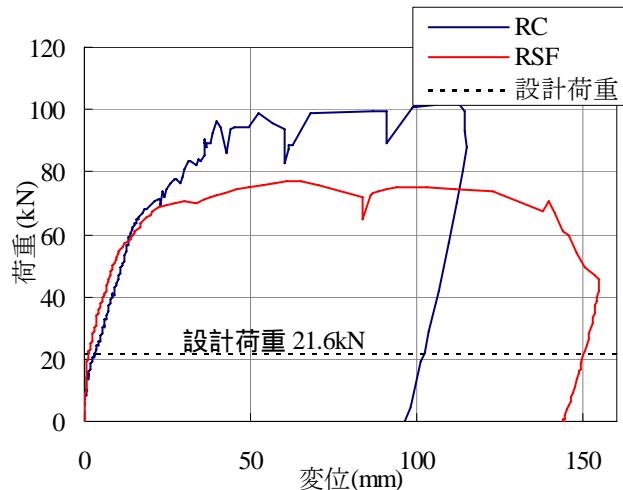


図-6 荷重 - スパン中央たわみ関係

Fig.6 Load-displacement curves

3.2 実験結果

平板試験体の材料試験結果を表-5～6に示す。両試験ケースの荷重-変位関係の試験結果を図-6に示す。また、各荷重レベルにおける主鉄筋のひずみ分布について、RC試験体とRSF試験体の比較を図-6に示す。

RC試験体は17.6kNでひび割れが発生し、21.6kNの設計荷重を迎えると、67.0kNで主鉄筋が初降伏した。その後、変位114.7mmで除荷した。最大荷重は102.6kNであった。破壊形態は曲げ破壊であった。

RSF試験体は21.6kNの設計荷重を迎えると、25.0kNでひび割れが発生し、60.0kNで主鉄筋が初降伏した。その後、変位154.6mmで除荷した。最大荷重は

77.3kN であった。破壊形態は曲げ破壊であった。

荷重-変位関係において RC 試験体と RSF 試験体の最大荷重に差異が生じているのは、RC 試験体が RSF 試験体と比較して、本来は構造材として考慮していない D10×2 本を考慮すると、引張鉄筋比が 0.13% 大きいことが要因と考えられた。

RC 試験体と RSF 試験体の各荷重レベルにおける主鉄筋のひずみ分布を比較することにより（図-7）、リング間継手の添接効果によるせん断力が作用しても、鋼纖維を適切な量（今回は 0.4% vol）混入した RSF 試験体と

することで、幅厚比 B/t=9 のセグメントにおいて配力鉄筋を省略しても RC 試験体と同等の配力効果が得られることが確認できた。

4. 実大アーチ試験

4.1 試験概要

最後に実物大の小口径幅広 RSF セグメントを製作し、線荷重載荷試験と局所荷重載荷試験を行い、薄肉幅広化した場合のセグメントの構造性能を確認するために線載荷、局所載荷試験をそれぞれ 1 体ずつ行った。

試験体の配筋は平板試験体と同じとした。配筋図を図-8 に示す。

また、載荷図及び載荷状況を図-9～図-12 に示す。

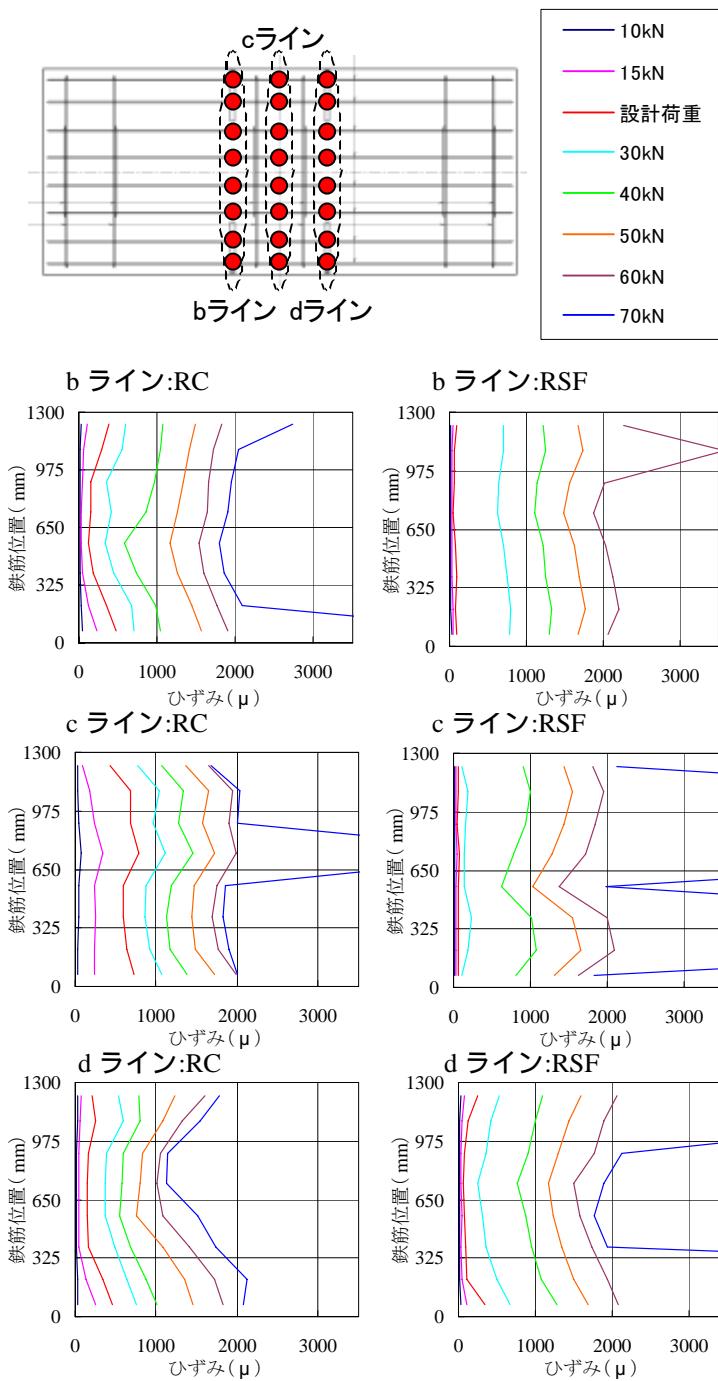


図-7 RC 試験体と RSF 試験体のひずみ分布比較

Fig.7 Comparison of distributions of strain

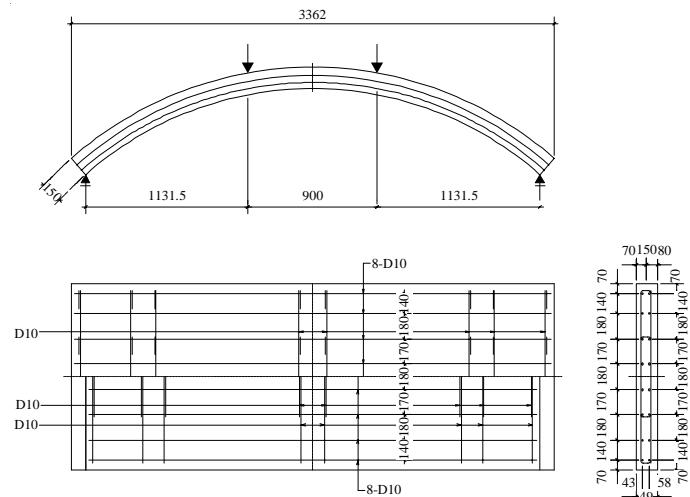


図-8 RSF 試験体配筋図 単位 mm

Fig.8 Test specimens plan of RSF

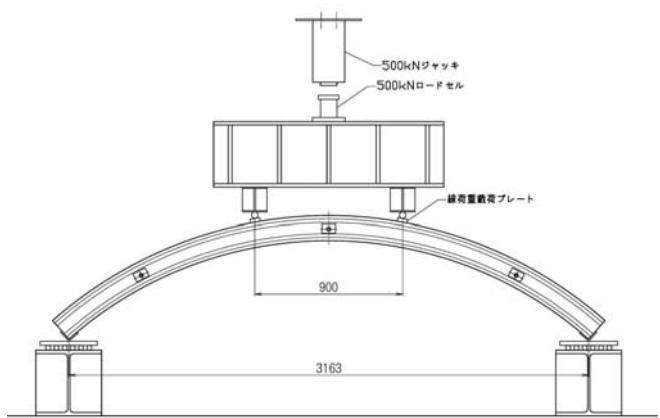


図-9 線載荷曲げ試験概要図 単位 mm

Fig.9 Overview of bending test



図-10 線載荷曲げ試験状況

Fig.10 Overview of bending test

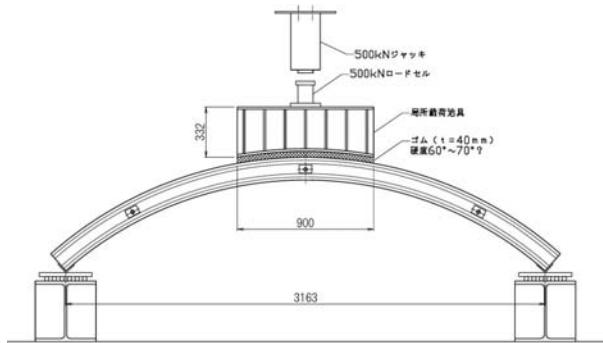


図-11 局所載荷曲げ試験概要図 単位 mm

Fig.11 Overview of bending test



図-12 局所載荷曲げ試験状況

Fig.12 Overview of bending test

表-7 コンクリートの材料物性値

Table.7 Results of strength test of concrete

試験ケース	1:線載荷	2:面載荷
圧縮強度(N/mm ²)	78.5	73.3
引張強度(N/mm ²)	4.15	3.88
ヤング係数(kN/mm ²)	42.2	38.7

表-8 鉄筋の材料物性値

Table.8 Results of tensile strength test of reinforcing bars

鋼種	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SD295	D10	372	517	187

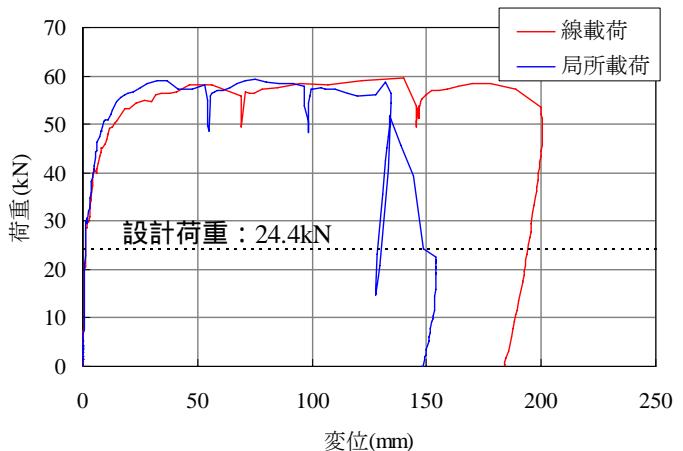


図-13 荷重 - スパン中央たわみ関係

Fig.13 Load-displacement curves

4.2 実験結果

実大試験における材料試験結果を表-7～8に示す。また、両試験ケースの荷重-変位関係の試験結果を図-13に示す。

局所載荷試験体は23.0kNの設計荷重を迎えたときひび割れが発生し、45.0kNで主鉄筋が初降伏していた。その後、変位155.1mmで除荷した。最大荷重は59.3kNであった。破壊形態は曲げ破壊であった。RSF試験体は24.4kNの設計荷重を迎えたときひび割れが発生し、55.0kNで主鉄筋が初降伏していた。その後、変位202.0mmで除荷した。最大荷重は59.5kNであった。破壊形態は曲げ破壊であった。

実験結果より、線載荷、局所載荷ともに最大耐力は設計荷重の2.5倍程度の余裕があることが確認された。

また、変形が100mmを超えても降伏荷重を安定して保持していた。

線載荷試験時の曲げ区間のひび割れ状況を図-14、15に示す。また、局所載荷試験時の曲げ区間のひび割れ状況を図-16、17に示す。ひび割れ間隔は線載荷試験体、局所載荷試験体とともに150mm程度であった。



図-14 等曲げ区間ひび割れ発生状況（線載荷終了時）

Fig.14 Crack patterns of section of uniform bending moment



図-15 ひび割れ発生状況（線載荷終了時）

Fig.15 Crack patterns of test specimen



図-16 等曲げ区間ひび割れ発生状況（局所載荷終了時）

Fig.16 Crack patterns of section of uniform bending moment

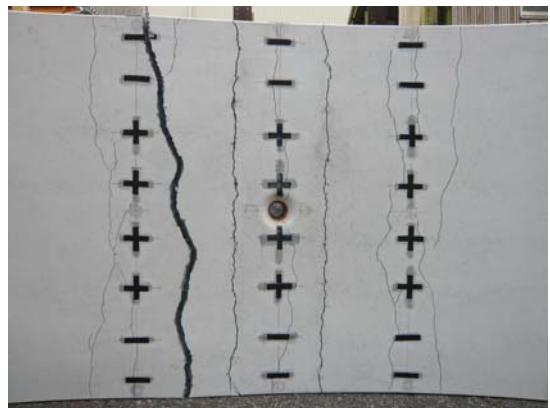


図-17 ひび割れ発生状況（線載荷終了時）

Fig.17 Crack patterns of test specimen

5. 結論

薄肉幅広セグメントを対象として、コンクリートに鋼纖維を混入させた RSF セグメントと RC セグメントの載荷試験を行った結果、得られた結論は以下の通りである。

梁部材試験の結果、主鉄筋量を従来の 80% とし鋼纖維を 0.4vol% 混入させた RSF セグメントは、最小鉄筋量の RC セグメントと比較して鋼纖維が引張材として寄与することにより、同等の降伏荷重が確保されることが確認された。

平板載荷試験の結果、幅厚比 $B/t = 9$ と偏平な RSF 平板においても RC 平板と同等な配力効果を有することが確認された。

実大アーチ載荷試験の結果、RSF セグメントの最大耐力、変形性能とともに良好な性能を保有していることが確認出来た。

参考文献

- 1) 三桶達夫、堀口賢一、西田与志雄、丸屋剛：鋼纖維補強コンクリートを用いた実大セグメントの構造実験、第63回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-532、pp.1063-1064、2008.9