

短繊維補強コンクリートの部分施工による壁状構造物のひび割れ抑制効果

白根 勇二^{*1}・伊藤 始^{*2}・渡部 正^{*3}・笹倉 伸晃^{*4}・梶田 秀幸^{*1}・舟橋 政司^{*1}

A Study on the Crack Prevention Effect of Partial Application of Short Fiber Reinforced Concrete

Yuji SHIRANE, Hajime ITOU, Tadashi WATANABE, Nobuaki SASAKURA, Hideyuki KAJITA, Masashi FUNAHASHI

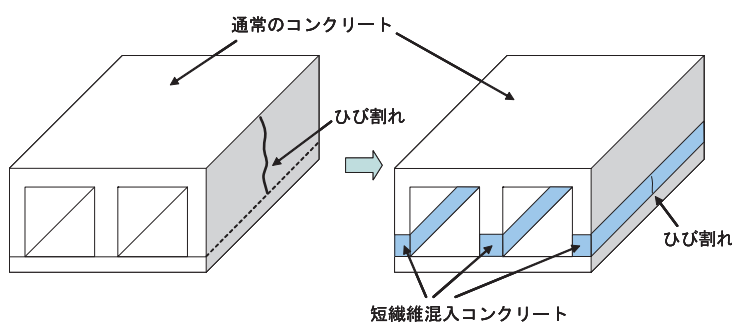


図-1 短繊維補強コンクリートの部分施工の概念図

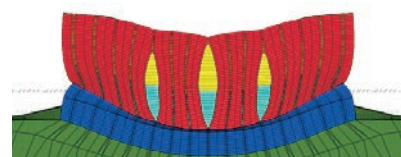


図-2 解析結果の一例（変形図）

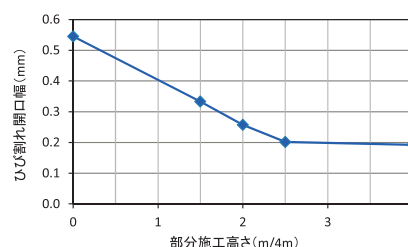


図-3 部分施工高さとひび割れ開口幅の関係（鋼繊維混入率 0.3%）

研究の目的

壁状構造物やトンネル覆工のコンクリートでは、温度変化や乾燥収縮による外部拘束型のひび割れ発生が懸念され、ひび割れの抑制を目的に短繊維補強コンクリートを適用する事例がある。しかし、短繊維補強コンクリートを部材全体に使用するとコスト増加量が大きくなるとともに、繊維種類や添加率によってひび割れ抑制効果は大きく異なる。外部拘束型のひび割れは拘束体に近い位置の引張応力が大きくなり、そこからひび割れが進展および開口するため、短繊維補強コンクリートの繊維種類、添加率、使用範囲を事前解析によって決定できれば、効果的かつ効率的な対策を施すことが可能となる。

技術の説明

短繊維補強コンクリートのひび割れ抑制を効果的に発揮させるために、短繊維補強コンクリートの部分施工を提案し、短繊維補強コンクリートの引張側構成則を考慮したひび割れ幅予測手法を検討した。そして、短繊維補強コンクリートの部分施工によるひび割れ抑制効果の評価を行うことを目的に、実物大モデル試験と解析的検討を実施した。実物大モデル試験では、繊維の種類によってひび割れ抑制効果に違いがあることを確認し、解析的検討では、短繊維補強コンクリートの適用範囲と混入率によってひび割れの開口幅に差が現れることを確認した。

主な結論

短繊維補強コンクリートの硬化物性試験および実物大の壁モデル試験を実施した結果、繊維の種類によってひび割れ抑制効果に違いがあることが確認された。また、提案した手法により短繊維補強コンクリートの解析的検討を実施した結果、適用範囲と混入率によってひび割れの開口幅に差が現れること、部分適用でも全高適用した場合と同等の効果が得られる可能性があることを確認した。

以上より、短繊維補強コンクリートを部分施工することで外部拘束型のひび割れを抑制することが可能なこと、考案した解析モデルを適用することで、部分施工範囲や使用する短繊維種類・添加率を事前に検討することが可能なことを示した。

*1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ
*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授

*3 日本大学 生産工学部 土木工学科 准教授
*4 本店 土木設計・技術部

短繊維補強コンクリートの部分施工による 壁状構造物のひび割れ抑制効果

白 根 勇 二^{*1} 伊 藤 始 ^{*2}渡 部 正 ^{*3} 笹 倉 伸 晃^{*4}梶 田 秀 幸^{*1} 舟 橋 政 司^{*1}

要 旨

壁状構造物やトンネル覆工のコンクリートは、温度変化や乾燥収縮による外部拘束型のひび割れ発生が懸念される。ひび割れの抑制を目的に短繊維補強コンクリートを適用する事例があるが、繊維種類や添加率によってひび割れ抑制効果は大きく異なるとともに、短繊維補強コンクリートを部材全体に使用するとコスト増加が大きくなる。

そこで、短繊維補強コンクリートのひび割れ抑制を効果的に発揮させるために、短繊維補強コンクリートの部分施工を提案し、短繊維補強コンクリートの引張側構成則を考慮したひび割れ幅予測手法を検討した。実物大モデル試験では、繊維の種類によってひび割れ抑制効果に違いがあることを確認し、解析では、短繊維補強コンクリートの適用範囲、混入率によってひび割れの開口幅に差が現れることを確認した。そして、短繊維補強コンクリートの部分施工によるひび割れ抑制効果の評価を行った。

キーワード 短繊維補強コンクリート／部分施工／ひび割れ幅／壁状構造物／覆工コンクリート

目 次

- | | |
|----------------|-----------------|
| 1. はじめに | 4. 短繊維補強コンクリートの |
| 2. 短繊維補強コンクリート | 引張側構成則 |
| の部分施工の概要 | 5. 部分施工の解析による評価 |
| 3. 壁モデル試験体によるひ | 6. まとめ |
| び割れ抑制効果確認 | |

A STUDY ON THE CRACK PREVENTION EFFECT OF PARTIAL APPLICATION OF SHORT FIBER REINFORCED CONCRETE

Yuji SHIRANE
Tadashi WATANABE
Hideyuki KAJITA

Hajime ITO
Nobuaki SASAKURA
Masashi FUNAHASHI

Synopsis:

Wall concrete structure and tunnel lining concrete have higher possibility of crack occurrence due to external restriction. Application of short fiber reinforced concrete has been known as a method of crack prevention. However, the effect of this method depends on the kind and dosage of fiber, and it will be very expensive when fiber reinforced concrete is applied into full structure.

Authors proposed a crack prevention method with partial application of short fiber reinforced concrete, and studied a method of crack width estimation for fiber reinforced concrete. The estimated effect was verified by the mockup trial, and this effect was evaluated by a FEM analysis.

* 1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

* 2 富山県立大学 工学部 環境工学科

* 3 日本大学 生産工学部 土木工学科

* 4 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ

1. はじめに

壁状構造物やトンネル覆工では、コンクリートの温度収縮や乾燥収縮の影響を受けやすく、外部拘束型のひび割れの発生が懸念される。ひび割れの抑制方法として、使用材料の変更（セメント、骨材、混和剤など）やコンクリートの発熱温度抑制（プレクーリング、ポスクーリングなど）、養生方法の工夫などが挙げられ、発生するひび割れ幅を抑制する方法としては短繊維補強コンクリートの適用などが考えられる¹⁾。

短繊維補強コンクリートを適用する場合の課題として、材料コストの増加が懸念される。また、短繊維の種類や添加量によってひび割れの抑制効果が大きく異なるにも関わらず、定量的な評価が実施されないまま使用される場合がほとんどである。

そこで筆者らは、効率的かつ効果的に短繊維補強コンクリートによるひび割れ抑制を実現するため、引張応力が卓越する断面に短繊維補強コンクリートを適用する「部分施工」を考案した。また、短繊維補強コンクリートの部分施工方法を事前解析によって比較的簡易に決定できるようにするため、短繊維補強コンクリートの引張軟化特性を考慮した解析手法を検討した。

本論文では、①短繊維補強コンクリートの部分施工の概要、②短繊維補強コンクリートを部分施工した実物大モデル試験の結果、③短繊維補強コンクリートの部分施工高さ、混入率をパラメータとして実施した解析結果について説明し、短繊維補強コンクリートの「部分施工」によるひび割れ抑制効果について述べる。

2. 短繊維補強コンクリートの部分施工の概要

壁部材のコンクリートに温度収縮や乾燥収縮などが作用すると、通常、底盤部から外部拘束を受けて部材下部に長手方向の引張応力が発生する。この引張応力がコンクリートの引張強度を超えると鉛直方向の貫通ひび割れが発生する。そして、コンクリートの収縮力が鉄筋に伝達し、両者が平衡状態になるまでひび割れ幅が開口するとともにひび割れが部材上部へ進展することになる。一般的に、構造物ごとに許容ひび割れ幅が定められており、ひび割れ幅が許容値を超えると補修などの対策が必要となる。ひび割れ幅の抑制可能な対策として、短繊維補強コンクリートの適用が有効であることが知られているが、外部拘束型のひび割れでは引張応力が卓越する箇所は限定的であり、全断面に短繊維補強コンクリートを適用することは効率的な対策とは言い難く、コストの増加も大きくなる。

図-1 に、筆者らが提案する短繊維補強コンクリートの「部分施工」の概念図を示す。図-1 はボックスカルバートをモデルとしたもので、底盤部からの拘束が大きくなる壁下部に短繊維補強コンクリートを適用し、上部は通常のコンクリートを適用する。壁部の短繊維補強コン

リートと通常のコンクリートを連続的に打ち込むことで、壁部材内に新たな拘束を形成させない。

図-2 は、通常のコンクリートと短繊維補強コンクリートの引張破壊イメージを示したものである。通常のコンクリートはひび割れ発生後に応力を負担できず脆性的な破壊が起こり、引張応力が一気にゼロになる。一方、短繊維補強コンクリートは、ひび割れ発生直後から短繊維が荷重を負担することで脆性的な破壊が抑制される。そのため、短繊維補強コンクリートではひび割れ幅の拡大と進展を抑制することが期待される。

短繊維補強コンクリートの「部分施工」によるひび割れ抑制効果は、短繊維の使用材料や繊維混入率、部分施工範囲によって異なるため、解析による検討方法の確立が重要となる。最近は、温度応力解析の実施によってひび割れ発生箇所やその発生確率の推定が容易となっており、既存解析プログラムに短繊維補強コンクリートの引張側構成則を付加することで、ひび割れの発生確率ばかりでなく、発生するひび割れ幅の検討も可能となる。これにより、短繊維補強コンクリートの諸元（繊維種類、混入量）や部分施工範囲を決定することができる。

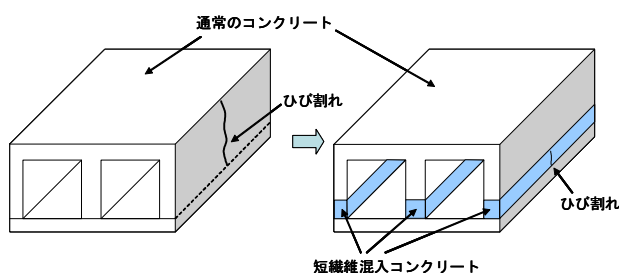


図-1 短繊維補強コンクリートの「部分施工」の概念図

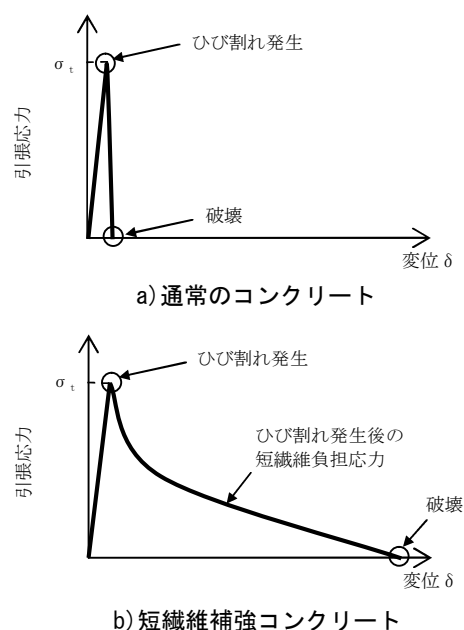


図-2 短繊維補強コンクリートの引張破壊イメージ

配合名	セメントの種類	繊維の種類 (混入率 vol. %)	スランプ [*] の範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	単 位 量 (kg/m ³)							
								水	セメント	細骨材			粗骨材	混和剤	繊維 (外割り)
								W	C	S1	S2	S3	G	Ad	Fi
N	普通 ポルトランド [*] セメント	—	21±2	4.5±1.5	50.7	50.8	20	175	345	313	134	446	878	3.795	—
PVA		PVA繊維 (0.5%)	—											3.795	6.50
ST		鋼繊維 (0.5%)	—											3.795	39.25

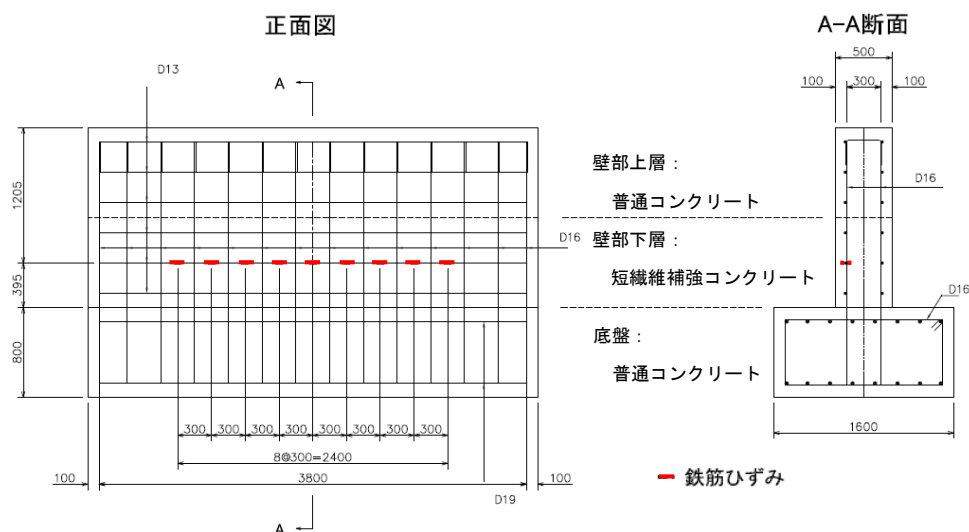


図-3 モデル試験体の形状寸法および鉄筋ゲージ位置

表-5 モデル試験の壁部の施工条件

試験体No.	壁部の施工条件
No. 1	1層目 (H/2) : PVA配合 2層目 (H/2) : N配合
No. 2	1層目 (H/2) : ST配合 2層目 (H/2) : N配合

試験体の製作は、まずフーチングの施工を行い、4週間経過後に壁部の施工を行った。壁部の上層と下層は同一部材として扱い、連続的にコンクリートを打ち込んだ。打込み後は、養生マットとシートで湿潤養生を行い、材齢7日で型枠を取り外した。

壁部材にひび割れが発生した際の短繊維の応力負担を確認するため、図-3に示すように壁部材内の配筋筋に300mm間隔で鉄筋ゲージを貼り付けた。計測は、データロガーを用いてひび割れ発生まで自動記録した。

3.2 硬化物性試験結果

(1) 圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度

表-6に各配合の圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度の試験結果を示す。各配合の単位量は同一であるものの、圧縮強度と静弾性係数は短繊維を混入した配合よりも混入しないN配合の値が若干大きくなった。割裂引張強度

表-6 圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数一覧

配合	N配合		PVA配合		ST配合	
材齢	7日	28日	7日	28日	7日	28日
平均圧縮強度 (N/mm^2)	28.8	35.9	27.4	33.3	26.6	33.5
平均静弾性係数 (kN/mm^2)	25.0	26.8	23.7	25.4	22.5	23.6
平均割裂引張強度 (N/mm^2)	2.66	3.22	2.48	2.80	3.22	3.84

はST配合が他の配合よりも大きくなった。

(2) 曲げ強度および曲げじん性

表-7に曲げ強度および曲げじん性係数の試験結果を示す。また、図-4～図-5に、PVA配合とST配合の荷重-たわみ曲線を示す。

材齢28日の曲げ強度は、ST配合が最も大きく、次いでPVA配合、N配合となり、短繊維混入によるひび割れ抵抗性の向上が認められた。特に、ST配合は荷重-たわみ曲線からもひび割れ発生後の荷重がさらに増大する傾向を示し、曲げじん性が大幅に向上していることが確認できる。PVA配合は、ST配合のようにひび割れ発生後の荷重増大はないものの、4kN程度の荷重を負担しており、ひび割れ進展を抑制する効果が期待できる結果となった。ST配合とPVA配合で曲げじん性に大きな差が現れた原因は、繊維の物性の違い、主に弾性係数の違いによる影響と考えられる。表-3に示すように鋼繊維の弾性係数は $210,000\text{N/mm}^2$ であるのに対し、PVA繊維は $28,000\text{N/mm}^2$ であり、短繊維に荷重が配分された際に、PVA繊維の伸びは鋼繊維よりも非常に大きくなっていったと思われる。

表-7 曲げ強度、曲げじん性係数一覧

配合	N配合		PVA配合		ST配合	
材齢	7日	28日	7日	28日	7日	28日
曲げ強度 (N/mm^2)	①	3.55	4.08	3.32	4.10	4.25
	②	3.61	4.18	3.08	4.09	4.28
	③	3.20	3.90	3.16	4.00	5.88
	④	3.55	3.26	3.27	4.19	5.12
	平均	3.48	3.86	3.21	4.10	4.88
曲げじん性 係数 (N/mm^2)	①	—	—	1.44	1.68	3.82
	②	—	—	1.10	1.53	3.67
	③	—	—	1.77	1.75	5.06
	④	—	—	1.14	1.58	4.47
	平均	—	—	1.36	1.64	4.26

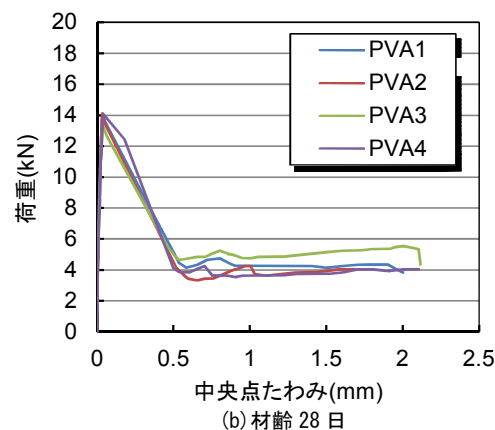
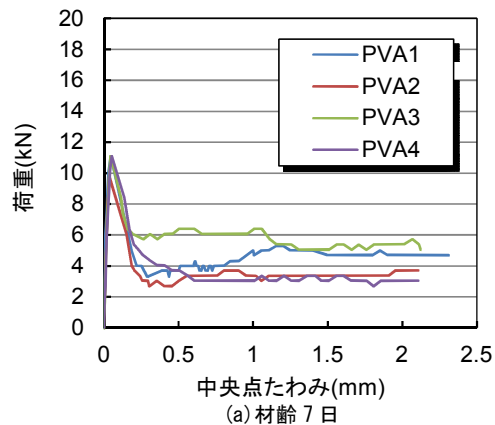


図-4 曲げ荷重－たわみ曲線（PVA 配合）

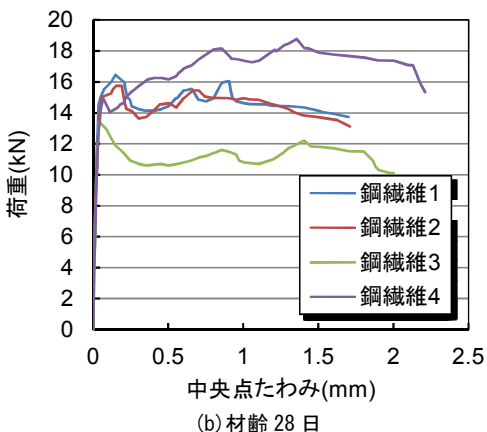
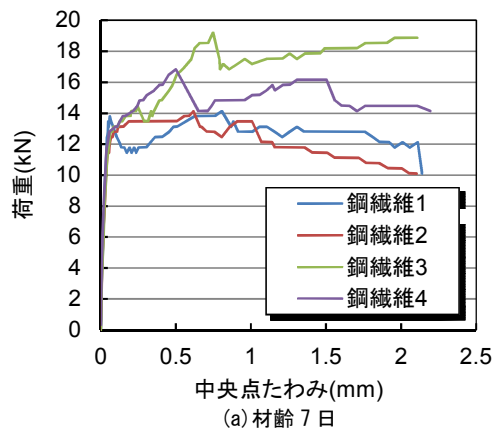


図-5 曲げ荷重－たわみ曲線（ST 配合）

(3) 破壊エネルギー

図-6 に、JCI-SFR1~3 に準拠した破壊エネルギー試験における荷重－ひび割れ開口変位（CMOD）曲線を示す。試験体数は各 3 本であるが、図中には平均的な挙動の結果を図示している。

短繊維を混入していない N 配合は、最大荷重到達後にひび割れが発生し、荷重ゼロまで急激に低下して完全に破断した。PVA 配合は、N 配合と同様にひび割れ発生後に荷重が急激に低下したが、材齢 7 日および 28 日とも、ひび割れ開口幅が 4mm に達するまで、1kN 程度の荷重を保持した。また、ST 配合は、最大荷重到達後に一時的に荷重低下が起きたものの、荷重低下は 1～2 割程度に留まり、3.5kN 程度の荷重を保持した。

以上の破壊エネルギー試験の結果より、短繊維がひび割れ発生後の荷重を負担して、ひび割れ開口の抑制に効果があることが推察できた。

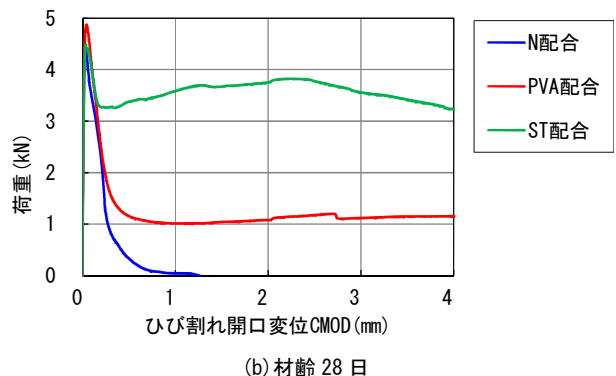
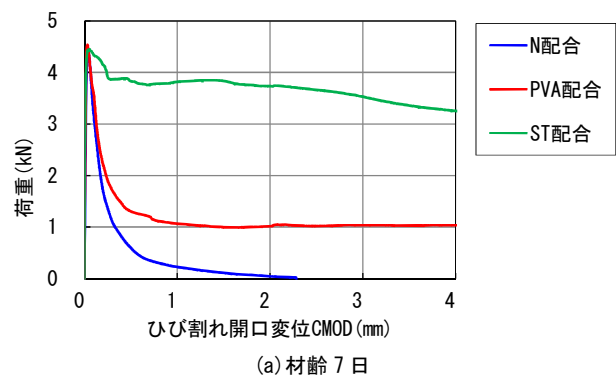


図-6 荷重－ひび割れ開口変位（CMOD）曲線

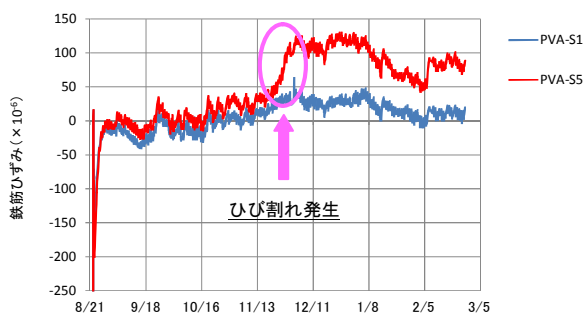
3.3 壁モデル試験体によるひび割れ抑制効果

写真-1 に壁モデル試験体の外観を示す。また、図-7 に No.1 試験体（PVA 配合の部分施工）および No.2 試験体（ST 配合の部分施工）の壁部配力筋に設置した鉄筋ゲージで計測したひずみ変化を示す。「PVA-S5」（No.1 試験体）および「ST-S5」（No.2 試験体）が壁部中央のひずみで、「PVA-S1」（No.1 試験体）および「ST-S1」（No.2 試験体）が壁部中央から 1,200mm の位置のひずみである。いずれの試験体も、壁部中央のひずみが 11 月末頃に急激に大きくなる傾向を示しており、ひずみゲージ設置位置

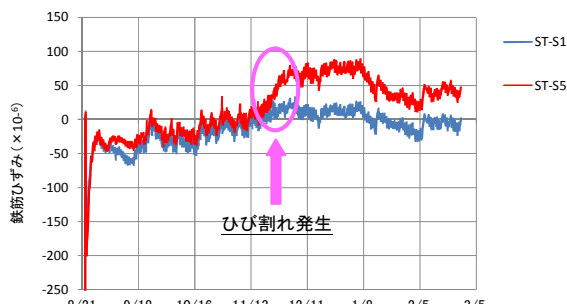
付近でひび割れが発生したことを確認できる。両ひずみの変動を比較すると、「PVA-S5」の方が「ST-S5」よりも変動が大きくなっており、No.1 試験体のひび割れの方が No.2 試験体のものよりも大きく開口したことが推察できる。これは、PVA 繊維よりも鋼繊維の方がひび割れ幅の拡大を抑制する効果が大きいことを示す結果である。



写真-1 壁モデル試験体の外観



a) 試験体 No. 1 (PVA 配合の部分施工)



b) 試験体 No. 2 (ST 配合の部分施工)

図-7 鉄筋ゲージのひずみ変化

4. 短繊維補強コンクリートの引張側構成則

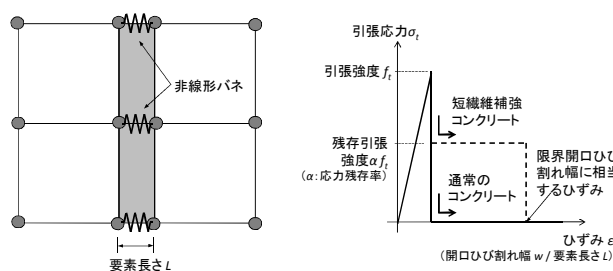
短繊維混入の効果は、図-2 で示したようにコンクリートのひび割れ発生後に短繊維による応力負担として発揮される。この引張応力の保持性能は、引張軟化曲線を用いて定量的に表現される。引張軟化曲線とは、コンクリートのひび割れ先端に存在するとされるフラクチャープ

ロセスゾーンで伝達される引張応力と開口ひび割れ幅の関係を表すものである²⁾。短繊維の効果は、この部分における架橋効果によるものである。

短繊維補強コンクリートのひび割れ予測解析の実施にあたり、コンクリートのひび割れは、離散ひび割れモデルを用いて表現した。離散ひび割れモデルは、ひび割れの進行方向があらかじめ分かっている場合に、ひび割れ進行方向に面を形成しておき、その間をボンドリンク要素で結び、破壊基準に応じて接合を切り離すものである³⁾。ボンドリンク要素の概要を図-8 に示す。ボンドリンク要素では、図-8 (a)のように節点間に非線形パネを形成し、節点間の直応力とせん断応力が伝達される。なお、図ではせん断方向のパネを省略している。

パネの直方向すなわちひび割れ開口方向の応力-ひずみモデルを図-8 (b)に示す。引張軟化曲線は横軸に開口ひび割れ幅を取るが、図では開口ひび割れ幅 w を要素寸法 L で除したひずみ ε を用いている。モデルでは、引張応力 σ_t の増加とともにひずみ ε が増加し、引張応力 σ_t が引張強度 f_t に達するとひび割れが発生し、引張応力 σ_t が急激に減少する。本解析の通常のコンクリートでは引張強度到達後にさらにひずみが増大すると、引張応力がゼロに達するモデルを用いた。これに対して、短繊維補強コンクリートではひずみが限界開口ひび割れ幅に相当するひずみに達するまでの範囲で、応力が残存引張強度で保持されるモデルとした。

残存引張強度は、切欠きを有するはりの曲げ試験から引張軟化曲線を求め、応力が保持されるとき値として得られ、引張強度の応力残存率で表現される。短繊維補強コンクリートの残存引張強度は、短繊維の種類や添加率で異なる値となる。



(a) 非線形パネの配置

(b) パネの応力-ひずみモデル

図-8 ボンドリンク要素の概要

5. 部分施工の解析による評価

短繊維補強コンクリートの部分施工によるひび割れ抑制効果を検証することを目的に、4 章で述べた短繊維補強コンクリートの引張側構成則を用いて、三次元有限要素法による解析を実施した。

5.1 解析条件

(1) 検討モデルと検討ケース

検討モデルを図-9 に示す。対象構造は底盤と壁部で構成される開口カルバートとし、壁部はスパン長 15m、壁厚 0.8m、壁高 4.0m とした。壁部材内には、ひび割れ拡大の挙動を模擬するためのボンドリンク要素を 1m 間隔で設置している。

検討ケースは表-8 に示すとおりで、短繊維補強コンクリートの部分施工高さや短繊維混入率の影響を検討した。本検討における短繊維の種類は鋼繊維とし、部分施工高さの検討では短繊維混入率を 0.3%（体積比）で一定とし、

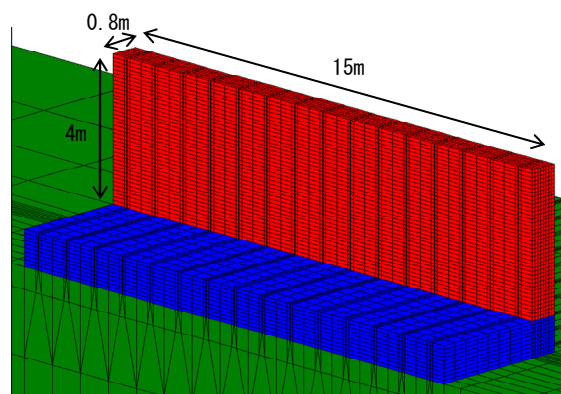
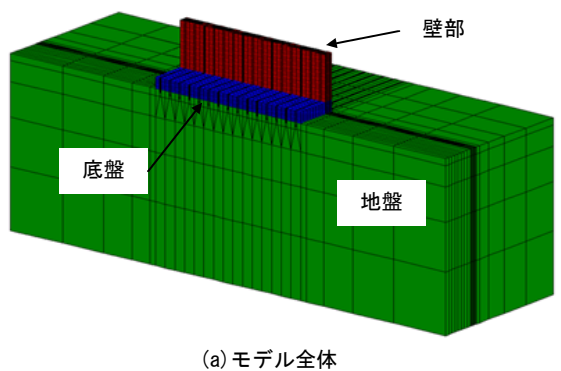


図-9 検討モデル

表-8 検討ケース

ケース	鋼繊維混入率	短繊維コンクリート適用高さ
ST0	無し	0m/4m
ST0.3-H1.5	0.30%	1.5m/4m
ST0.3-H2.0	0.30%	2.0m/4m
ST0.3-H2.5	0.30%	2.5m/4m
ST0.3-H4.0	0.30%	4.0m/4m
ST0.5-H1.5	0.50%	1.5m/4m
ST0.7-H1.5	0.70%	1.5m/4m

施工高さを 0m（繊維無し）、1.5m、2.0m、2.5m、4.0m とした。また、短繊維混入率の検討では部分施工高さを 1.5m とし、混入率（体積比）を 0%、0.3%、0.5%、0.7%とした。

(2) 物性条件

表-9 に、解析に用いた物性条件を示す。外部拘束型の温度ひび割れが発生することを想定し、施工時期を夏季としてコンクリート温度や外気温を設定した。コンクリートや地盤の物性値は、主に土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」（2007年制定）⁴⁾を参考に定めた。

壁部材に設置したボンドリンク要素の入力条件は、既往の研究^{5),6)}を参考に、短繊維混入率に応じて表-10 のように設定した。短繊維混入率が高いほど、ひび割れ後の短繊維応力負担が大きくなるため、応力残存率が大きくなるようにした。

表-9 解析の物性条件

		底盤	壁部	地盤
施工条件	打込み日	8月2日	9月1日	—
	初期温度 (°C)	30.0	30.0	25.8
	断熱温度	予測式	土木学会式	—
		セメント種類	普通ポルトランドセメント	—
		単位セメント量	350kg/m ³	—
	熱伝達条件	熱伝達係数	養生時: 8W/m ² °C 養生後: 14W/m ² °C	14
		養生期間	7日間	—
		外気温	月別平年値 (東京)	—
		熱伝導率	2.7 W/m°C	1.7 W/m°C
		密度	2400kg/m ³	2100kg/m ³
		比熱	1.15kJ/kg°C	1.4kJ/kg°C
硬化物性	圧縮強度	予測式	土木学会式	—
		91日強度	41.7N/mm ²	—
	引張強度		土木学会式	—
	ヤング係数		土木学会式	500N/mm ²
	クリープ特性		土木学会 (有効弾性係数法)	—
	ポアソン比		0.2	0.3

表-10 ボンドリンク要素の入力条件

短繊維混入率 (vol. %)	応力残存率 α	付着切れひずみ (開口ひび割れ幅 w / 要素長さ L)
0.0	0.0	0.0
0.3	0.3	0.2
0.5	0.5	0.2
0.7	0.7	0.2

5.2 解析結果

(1) 応力およびひずみ分布

解析結果の一例として、図-10～図-12 に「ST0.3-H1.5」（鋼繊維混入率 0.3%、部分施工高さ 1.5m）の結果

を示す。図-10 は応力分布、図-11 はひずみ分布を示しており、ひび割れ発生前後（材齢 5 日および 6 日）を比較している。

図-10 より、材齢 5 日では応力分布のピーク（黄緑色の山）が 1 か所であり、壁中央部に底盤から受ける拘束が集中していることがわかる。図-11 で確認できるとおり、材齢 5 日でひずみの大きい箇所は無く、ひび割れは発生していない。材齢 6 日になると応力のピークが 2 か所に分散していることがわかる。図-11 から、この時点で壁中央部と、壁中央から 3m 左右にずれた位置で縦方向にひずみが増大している箇所が認められ、ひび割れが発生したことが確認できる。

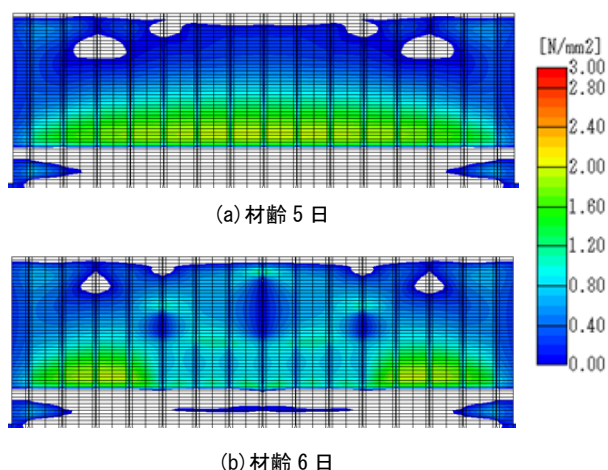


図-10 結果一例（「ST0.3-H1.5」の応力分布）

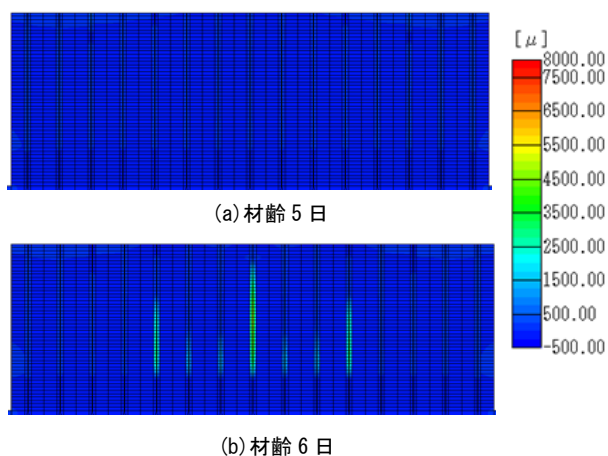


図-11 結果一例（「ST0.3-H1.5」のひずみ分布）

(2) 短繊維補強コンクリートの部分施工高さの影響

図-12 に、「ST0.3-H1.5」（部分施工高さ 1.5m）と「ST0.3-H2.5」（同 2.5m）の材齢 60 日における変形図を示す。いずれのケースも、壁中央部と、壁中央から左右に 3m の位置のボンドリンク要素が変形しており、3 箇所にはひび割れが発生していることがわかる。特に、部分施工高さが低い「ST0.3-H1.5」は、ボンドリンク要素の開口

が非常に大きく、開口が壁上部まで進展している。ひび割れの最大幅は、最大ひずみにボンドリンク要素長（20mm）を乗じることで計算されるが、「ST0.3-H1.5」（最大ひずみ $16638 (\times 10^{-6})$ ）は 0.33mm、「ST0.3-H2.5」（同 $10079 (\times 10^{-6})$ ）は 0.20mm と算出され、部分施工高さがひび割れ抑制に与える影響が大きいことがわかる。

同様に、鋼繊維を 0.3% 混入した短繊維補強コンクリートについてひび割れ幅を算出し、部分施工高さとしひび割れ開口幅の関係を図-13 のようにまとめた。部分施工高さが 2.5m（全高の約 6 割）までは適用高さに比例してひび割れ幅が小さくなる傾向を示したが、2.5m 以上ではひび割れ幅はほぼ一定となった。これは、外部拘束による引張応力が卓越する箇所が壁部の下方であり、短繊維がこの位置のひび割れの拡大を十分に抑制できたためと考えられる。短繊維コンクリートを全断面に適用しなくても、同等のひび割れ抑制効果を得ることが可能なことを示唆する結果であると言える。

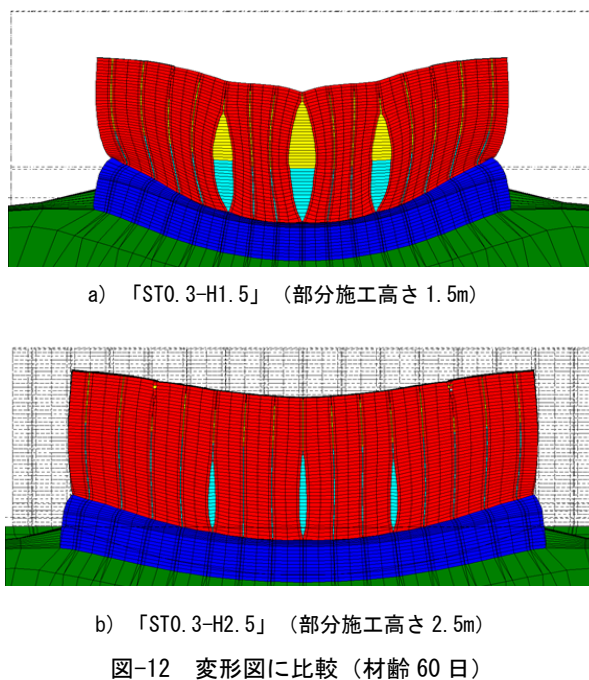


図-12 変形図に比較（材齢 60 日）

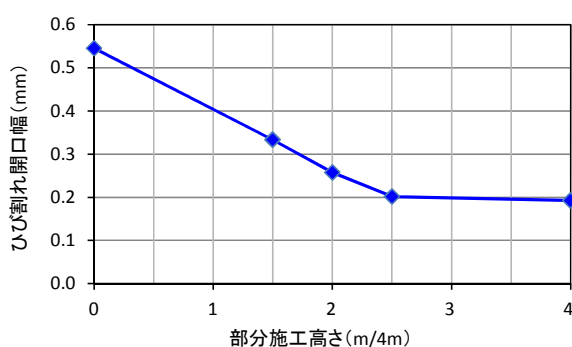


図-13 部分施工高さとひび割れ開口幅の関係

(3) 短繊維混入率の影響

図-14 に、鋼繊維を混入した短繊維補強コンクリートの部分施工高さを 1.5m に固定し、短繊維の混入率を 0%～0.7%とした場合のひび割れ開口幅の関係を示す。繊維混入率が高くなるほどひび割れ開口幅が小さくなる傾向を示し、混入率が 0%のとき 0.54mm であった開口幅が、混入率を 0.7%とすることで 0.05mm となる。これは、鋼繊維の混入率が大きくなると、ひび割れ発生後の応力残存率が高くなるためである。

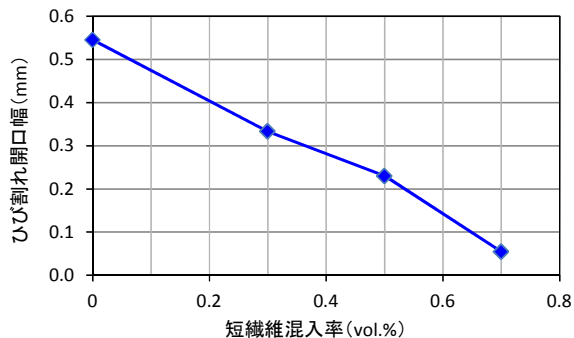


図-14 短繊維混入率とひび割れ開口幅の関係

以上のことから、構造物やその要求性能に応じた許容ひび割れ幅に対して、必要な範囲に短繊維補強コンクリートを適用する、あるいは必要量の短繊維混入率を決定することで、効率的かつ効果的に短繊維補強コンクリートを適用することが可能であると考えられる。

6. まとめ

壁状構造物やトンネル覆工を対象に、効果的かつ効率的にひび割れ幅を抑制する方法として、短繊維補強コンクリートの「部分施工」を提案し、硬化物性試験、実物大モデル試験、解析による検討を行い、その効果を検証した。その結果、得られた知見を以下にまとめる。

- ① 硬化物性試験の結果、PVA 繊維や鋼繊維を混入した短繊維補強コンクリート（体積比 0.5%）は、ひび割れ発生以降にひび割れ幅が拡大しても短繊維が荷重を負担することを確認した。特に、鋼繊維は荷重負担が大きいことが明らかとなった。
- ② 実物大モデル試験では、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみの変化を比較した。鋼繊維補強コンクリートを用

いた試験体は鉄筋のひずみ変化が小さく、鋼繊維がひび割れ幅の抑制に効果があることが示された。

- ③ 短繊維補強コンクリートの「部分施工」の施工方法（部分施工高さ、混入率）について解析的検討を可能とするため、短繊維補強コンクリートの引張側構成則を考慮したボンドリンク要素による解析手法を検討した。鋼繊維を対象に部分施工高さと混入率をパラメータとしたひび割れ幅抑制効果の検討を実施した結果、本検討の範囲では、部分施工高さは壁高さの 6 割程度で全高に適用した場合と効果が同等になること、混入率が大きいほど効果が大きいことを示した。

解析による検討は、構造物の形状や施工条件、繊維種類などを限定したものであり、部分施工の効果や解析による検討結果の一例を示したものである。実施工への適用にあたっては、これらの条件によって効果に差異が生じることに留意する必要がある。

また、本検討にあたり富山県立大学の中野祐希君に解析実施の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11
- 2) 土木学会コンクリート委員会・寸法効果小委員会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズ，土木学会，No.18，pp.6-15，32-33，1997.
- 3) 土木学会コンクリート委員会・コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会：成果報告書，コンクリート技術シリーズ，土木学会，No.50，pp.88-104，2003.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 2007 年制定〔設計編〕，2008.3
- 5) 喜多俊介，小室文也，二羽淳一郎：短繊維補強された RC 部材の力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1717-1722，2003.
- 6) 三桶達夫，福浦尚之，丸屋剛，堀口賢一：複合繊維を使用したコンクリートの力学特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.311-316，2010.