

論文 短繊維を混入した RC 壁部材の温度ひび割れ幅評価に関する解析的検討

中野 祐希*1・伊藤 始*2・白根 勇二*3・渡部 正*4

要旨：RC 壁部材は、打込み後の水和熱に起因して温度ひび割れの発生が懸念される。このひび割れ幅を抑制する手法として短繊維の使用が挙げられるが、短繊維の種類や混入率などの使用条件に対して、抑制効果が異なることが課題である。本研究では RC 壁部材のモデル実験、実験を模擬した解析、および実構造物モデルのパラメータ解析を実施することで、短繊維を混入した RC 壁部材の温度応力解析手法を検討した。その結果、短繊維の効果を引張軟化モデルで表現することでモデル実験を再現できることが確認できた。加えて、実構造物モデルを用いて短繊維の高さ方向の適用範囲と混入率がひび割れ幅に与える影響を明らかにした。

キーワード：短繊維、ひび割れ幅抑制、温度応力解析、RC 壁部材、ボンドリンク要素

1. はじめに

コンクリートは打込み後のセメントと水の水和反応により発熱する。この水和熱に伴って上昇したコンクリート温度は、時間とともに外気温に近づいていく。コンクリートはこの温度変化に伴って膨張・伸縮し、外部からの拘束を受けた場合にひび割れ（温度ひび割れ）が生じる場合がある。壁状構造物はフーチングや地盤からの拘束を受けるため、温度ひび割れの発生が懸念される構造物である。

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物を施工した際に、ひび割れ幅が 0.2mm 程度を超えると耐久性上補修が必要と判定されるため、温度ひび割れを抑制する対策が必要となる。温度ひび割れを抑制する方法として、使用材料の変更（セメント、混和材など）やコンクリートの発熱抑制、養生方法の工夫などの温度収縮を低減させる方法が挙げられる。また、温度収縮を低減させずに、生じたひび割れの幅を抑制する方法としては短繊維の使用や鉄筋の追加等が考えられる。

このうち短繊維を使用する際には、材料コストの増加が懸念される。外部からの拘束を受け生じる温度ひび割れは引張応力が卓越する箇所が限定的であり、全断面に短繊維を適用することはコスト増加が大きく、効率的ではない。そこで著者らは短繊維を混入したコンクリート（以下、短繊維補強コンクリートとも記す）の部分施工を提案した。フーチング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、上部は通常コンクリートを適用することで、低コストかつ効率的に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は短繊維の種類や混入率などの使用条件に対して、抑制効果が異なるこ

とが課題である。そのため、本研究では短繊維の使用条件による抑制効果の検討を事前解析によって比較的容易に決定するために、短繊維を混入したコンクリートの引張軟化特性を考慮した温度応力解析手法を検討した。本研究の流れを図-1に示す。構造物を模擬し、短繊維を部分的に混入した RC 壁部材のモデル実験を行った（図-2）。またモデル実験の条件をもとに解析モデルを作成し、温度応力解析を実施することで、実験での計測結果を模擬した。その結果を受けて、実構造物の検討モデルを作成し、短繊維の混入率と高さ方向の適用範囲をパラメータとした解析を実施した。

2.RC 壁部材のモデル実験

2.1 実験方法

短繊維を部分的に混入したコンクリートのひび割れ性状や短繊維の応力負担を確認することを目的に壁状



図-1 研究の流れ

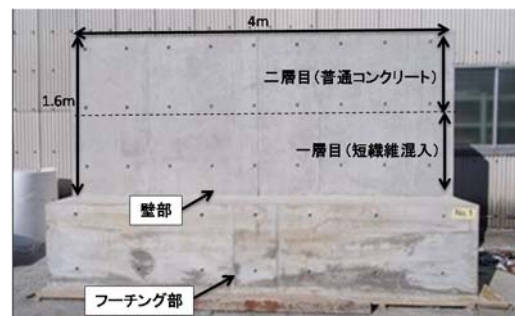


図-2 壁部材のモデル試験体の外観

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 (正会員)

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博士(工) (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術研究所 基盤技術研究グループ (正会員)

*4 日本大学 生産工学部 土木工学科 准教授 博士(工) (正会員)

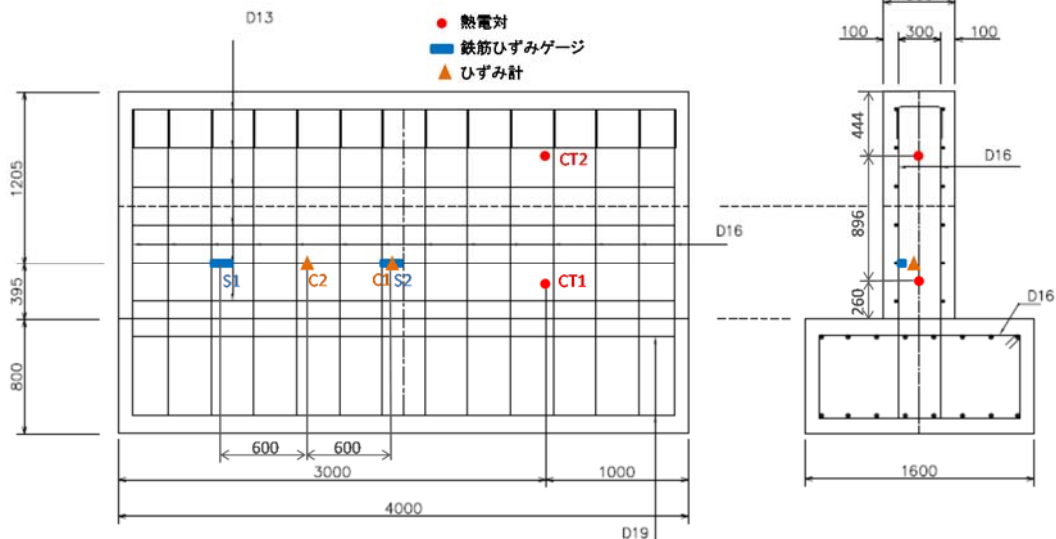


図-3 モデル試験体の形状寸法

構造物を模擬したモデル実験を実施した。

図-2と図-3にRC壁部材のモデル試験体の外観と形状寸法と配筋を示す。試験体は幅 1.6m、長さ 4.0m、高さ 0.8m のフーチング部と幅 0.5m、長さ 4.0m、高さ 1.6m の壁部で構成されており、壁部は 2 層に分けて打込み、下層（高さ 0.8m）は短繊維補強コンクリート、上層（高さ 0.8m）は通常のコンクリートとした。水平方向の鉄筋は、呼び径 D13 のものを 270mm 間隔で配置し、鉄筋比は 0.19%とした。短繊維補強コンクリートの配合を表-1に示す。短繊維は鋼繊維を使用し、外割で体積混入率 0.5%とした。また試験結果より短繊維補強コンクリートの材齢 28 日における割裂引張強度は 3.84N/mm²、曲げ強度は 4.85N/mm²であった。

試験体の製作は、まずフーチング部のコンクリートを打込み、4 週経過後に壁部のコンクリートを打ち込んだ。壁部の上層と下層のコンクリートを連続的に打込み、同一部材として扱った。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。

熱電対と鉄筋ひずみゲージ、コンクリートひずみゲージの設置位置を図-3に示す。熱電対を壁部内の 2 か所 (CT1, CT2) に設置し、コンクリート温度を計測した。CT1 が壁部の断面方向中央の下端から 260mm の位置であり、CT2 が同 1156mm の位置である。また、壁部にひび割れが発生した際の鉄筋や短繊維の応力負担を確認するため、鉄筋ひずみゲージとコンクリートひずみゲージを壁部内の各 2 か所 (S1, S2) (C1, C2) に貼り付け、ひずみを計測した。計測は壁部のコンクリート打込み後の 8 月 22 日から 2 月 28 日まで実施し、本研究ではひび割れ発生時の挙動を把握するため、8 月 22 日から 12 月 15 日までの結果に着目した。

2.2 コンクリート温度

図-4に外気温と壁部の CT1 と CT2 との温度履歴を示

表-1 短繊維混入コンクリートの配合

配合名		ST	
セメント種類	普通ポルトランドセメント		
繊維の種類 (混入率vol.%)	鋼繊維 (0.5%)		
空気量(%)	4.5±1.5		
水セメント比W/C(%)	50.7		
細骨材率s/a(%)	50.8		
粗骨材最大寸法(mm)	20		
単位量 (kg/m ³)	水	W 175	
	セメント	C 345	
	細骨材	S1	313
		S2	134
		S3	446
	粗骨材	G 878	
	混和剤	Ad 3.795	
繊維(外割り)	Fi 39.25		

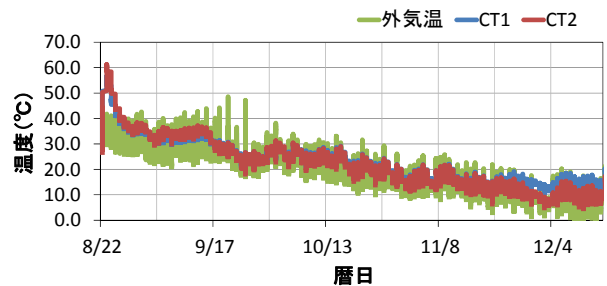


図-4 コンクリートの温度履歴

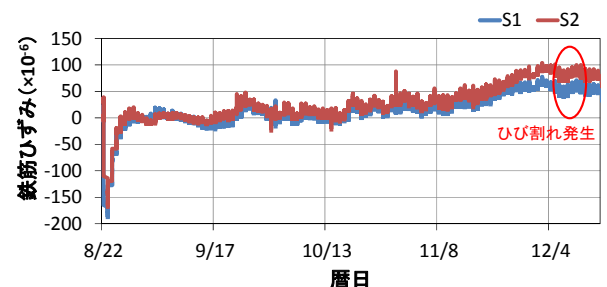


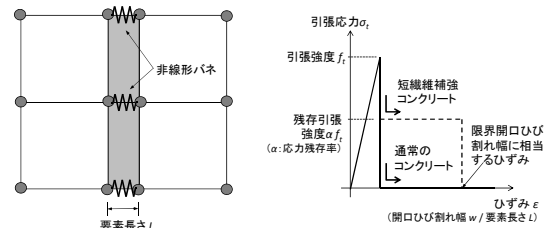
図-5 鉄筋のひずみ履歴

す。2 点のコンクリート温度は同様の傾向を示し、初期に水和熱により上昇し、約 60℃まで達した。その後、コンクリート温度は外気温に曝されて下降する履歴となり、12 月に約 10℃になった。

2.3 鉄筋ひずみ

図-5 に壁部の S1 と S2 の鉄筋ひずみの履歴を示す。

11 月下旬まで 2 点の鉄筋ひずみは同様の傾向を示したが、11 月下旬から壁部中央の S2 の鉄筋ひずみのみが大きくなる傾向を示した。これは、ひずみゲージ設置位置付近でひび割れが発生したためと考えられる。



(a) 非線形バネの配置 (b) バネ応力-ひずみモデル
図-6 ボンドリンク要素の概要

3. モデル実験を模擬した解析

短繊維を混入した RC 壁部材でのひび割れのモデル化の妥当性や解析の信頼性を検討するため、解析プログラム ASTEA-MACS²⁾を用いて、モデル実験を模擬した解析を実施し、温度やひずみの実験値と解析値を比較した。

3.1 ひび割れのモデル化

短繊維を混入した RC 壁部材のひび割れを再現するため、既往の研究³⁾を参考に、引張軟化特性を考慮したボンドリンク要素を解析に適用した。

(1) ボンドリンク要素

ボンドリンク要素は、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、その間をバネで結び、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-6 に示す。ボンドリンク要素では、図-6 (a) のように節点間に非線形バネを形成し、節点間の直応力とせん断応力が伝達される。

バ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-6 (b) に示す。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。

(2) 引張軟化モデル

本解析の通常のコンクリートでは図-6 (b) のように軟化時に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⁴⁾。本研究では引張強度に対する残存引張強度の割合を応力残存率と定義した。短繊維の混入率はモデル実験と同様に 0.5% とするため、既往の研究を参考に応力残存率を 0.5 と設定した⁵⁾。また限界開口ひび割れ幅に要素寸法を除いたものを付着切れひずみと定義し、0.2 とした⁴⁾。

3.2 解析条件

モデル実験における計測データをもとに、土木学会「コンクリート標準示方書[設計編]」(2007 年制定)⁶⁾(以下、示方書)の方法に準じて温度応力解析を行った。解析では図-7 のように試験体を模擬した解析モデルを作成した。試験体の対称性を考慮して 1/2 モデルとした。解析期間は実験に合わせて 8 月 22 日から 12 月 15 日ま

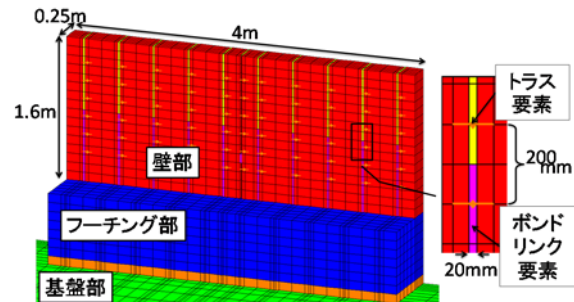


図-7 解析モデル

表-2 解析の物性条件

	フーチング部	壁部	基盤部	合板部
初期温度(°C)	39.0	33.2	30.0	30.0
単位セメント量(kg/m ³)	345		-	-
熱伝達係数(W/m ² °C)	養生前: 8 養生後: 14		14	14
養生期間	7日間		-	-
外気温(°C)	実測値			
熱伝導率(W/m°C)	2.70		1.70	0.12
密度(kg/m ³)	2400		2100	1000
比熱(kJ/kg°C)	1.15		1.40	0.30
ポアソン比	0.20			0.25

でとした。表-2 に解析に用いた物性条件を示す。コンクリートの初期温度と外気温は実験で計測した値を用いた。コンクリートの断熱温度上昇特性や圧縮強度、ヤング係数の算定式、および熱物性値は主に示方書を参考に定めた。また、ひび割れ発生時期やひび割れ発生位置をモデル実験と同様に再現するため、割裂引張強度と曲げ強度に基づいて、短繊維補強コンクリートの引張強度の算定式を示方書の算定式の 1.6 倍として用いた。

$$f_{tk}(t) = 1.6 \times (0.44 \sqrt{f'_c(t)}) \quad (1)$$

ここで $f_{tk}(t)$: 材齢 t 日における引張強度、 $f'_c(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度とする。

鉄筋はトラス要素を用いた離散鉄筋モデルを使用した。離散鉄筋モデルは鉄筋を独立した要素とし、コンクリート要素と共有する節点のみ完全付着するモデルである。トラス要素の設置位置を図-7 に示す。ボンドリンク要素の設置位置に鉛直方向 200mm 間隔で設置し、全体の鉄筋量が試験体の鉄筋量と一致するように、トラス要素の断面積を変更した。基盤(地盤上のコンクリート面)とフーチングの間の要素には木材の物性を与えて合板を再現し、表-2 のように基盤および合板のヤング係数は 30.0kN/mm² および 10.0kN/mm² とした⁷⁾。

3.3 解析結果と実験結果の比較

(1) 温度履歴

モデル実験のCT1（壁下部）における実測値と解析値の温度履歴を図-8に示す（測点：図-3）。温度は解析値、実測値ともに打込み後、水和熱により上昇を示し、外気温に曝されて下降していく履歴を辿り、おおむね整合する結果となった。実測の温度が解析の温度よりやや高くなっており、8月下旬から9月中旬にかけて約5°Cの差異が見られる。これは日射による影響と考えられるが、設計に用いる温度応力解析では日射を考慮しないことが多く、最高温度や最低温度で差が小さいことから、この温度履歴を応力解析に適用することとした⁶⁾。

(2) ひずみ履歴

ひずみ履歴の実測値と解析値を図-9と図-10に示す。本研究において実験における各ひずみの関係は以下の式を用いて定義した。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_T \quad (2)$$

ここで ε : 実ひずみ, ε_e : 拘束ひずみ, ε_T : 温度ひずみとする。実ひずみはひずみ計で実際に計測された値を用いた。本研究における実ひずみは乾燥収縮、自己収縮による影響を考慮しないものとする。温度ひずみは熱電対によって計測された温度の変化量に線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を乗じた値である。発生応力に係わる拘束ひずみは、式(2)を用いて、温度ひずみと実ひずみの差で算定した。壁部のひずみは鉄筋とコンクリートで計測したが、ここでは比較的安定した値が得られた長手方向中央部の鉄筋ひずみ(S2)を検討に使用した。

各ひずみはおおむね整合したものの、材齢初期における解析の実ひずみが 100×10^{-6} ほど小さい値となった。解析の温度ひずみは8月下旬から9月中旬にかけて 50×10^{-6} ほど負側に大きい値となった。また解析の拘束ひずみは全体として 50×10^{-6} ほど正側に大きな値を示す結果となった。

3.4 ひび割れ挙動の考察

前述のように解析ではひび割れが12月上旬に壁部中央に生じた。このひび割れ発生箇所におけるトラス要素とボンドリンク要素の応力履歴を図-10に示す。ボンドリンク要素の応力が 4.0 N/mm^2 を超えたあたりでひび割れが生じ、 2.5 N/mm^2 程度まで急激に下降している。その後、短繊維の効果により応力が保持され、一定値を保っていることがわかる。トラス要素の応力は11月下旬ごろから徐々に上昇し 50 N/mm^2 あたりに達し、ひび割れが生じると同時に 120 N/mm^2 あたりまで急激に上昇している。

このひび割れ発生箇所では、ひび割れ発生後に荷重が鉄筋（トラス要素）と短繊維で受け持たれ、周囲のコンクリート要素の荷重とつり合った時にひび割れの開口

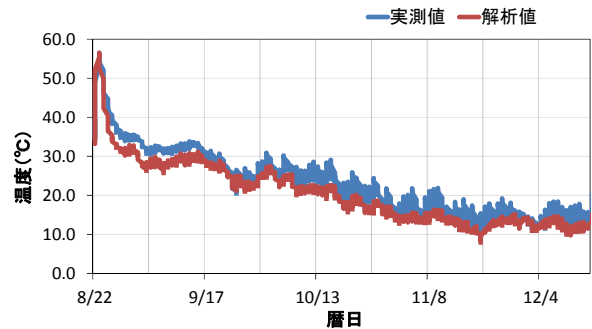


図-8 温度履歴 (CT1)

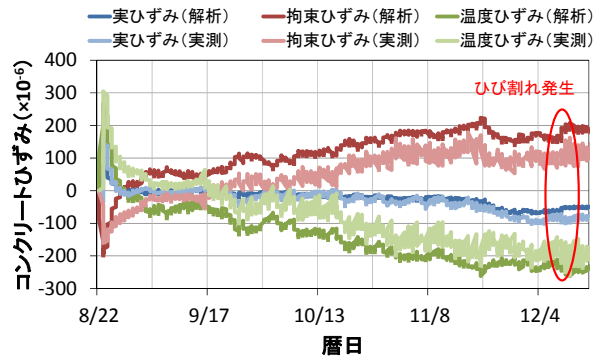


図-9 ひずみ履歴

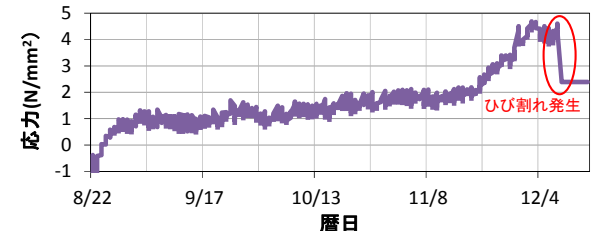
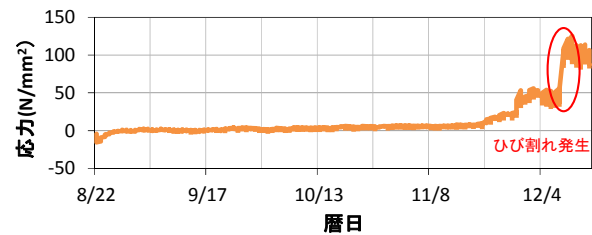


図-10 応力履歴 (上: トラス要素, 下: ボンドリンク要素)

幅が決まる。両要素の荷重のつり合いは、ひび割れ付近を局所的に見ると、以下の式で表すことができる。

$$P = A_c \cdot \sigma_c = A_s \cdot \sigma_s + A_c \cdot \sigma_f \quad (3)$$

ここで、 P : 荷重 (N), A_c : コンクリートの断面積 (mm^2), σ_c : コンクリート応力 (N/mm^2), A_s : 鉄筋の断面積 (mm^2), σ_s : 鉄筋応力 (N/mm^2), σ_f : 短繊維補強コンクリートの残存引張強度 (N/mm^2) とする。

図-11にひび割れ要素（ボンドリンク要素）および隣接するコンクリート要素における荷重の変化を示す。ここでの荷重は、ひび割れが最も開口した位置の高さ方向2要素（高さ 200 mm ×幅 250 mm ）の断面を対象として計算した。ひび割れ発生箇所における鉄筋の荷重（緑線）

は式(3)の $A_s \cdot \sigma_s$ で、短繊維補強コンクリートの荷重(青線)は $A_c \cdot \sigma_f$ で、隣接するコンクリート要素の荷重(赤線)は $A_c \cdot \sigma_c$ で算出した。同図には $(A_s \cdot \sigma_s + A_c \cdot \sigma_f) - A_c \cdot \sigma_c$ の荷重差もあわせて示した。

ひび割れ周囲のコンクリートの荷重、短繊維補強コンクリートの荷重は、ひび割れ発生前に 1400kN あたりに達し、ひび割れ発生後に 1000kN に低下して一定値を保った。両要素の荷重はおおむね一致し、荷重差がほぼ 0kN となった。またひび割れ発生後から鉄筋の荷重が若干大きくなっていることが確認できる。この結果から、ひび割れ発生前はコンクリートが荷重を負担し、ひび割れ発生後は鉄筋と短繊維に荷重が伝達しており、温度応力解析においても短繊維補強コンクリートのひび割れ発生前後の挙動を再現することができた。したがって本解析でのひび割れモデルの妥当性が確認できたといえる。

4. 壁状構造物モデルのパラメータ解析

4.1 解析条件

モデル実験を模した解析で検討した引張軟化特性を考慮したひび割れモデルを用いて、壁状構造物モデルのパラメータ解析を実施した。

検討モデルを図-12に示す。検討対象構造物はフーチング部と壁部で構成される開口カルバートとし、解析モデルは1/2モデルとした。壁部は長さ15m、幅0.8m、高さ4.0mとした。壁部内にはボンドリンク要素を1m間隔で設置している。

検討ケースを表-3に示す。パラメータ解析では短繊維の高さ方向の適用範囲と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、混入率は0.0%、0.3%、0.5%、0.7%の4水準、また高さ方向の適用範囲は0.0m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m、4.0mの6水準とし、計16ケースについて解析を実施した。ケース名は鋼繊維混入率0.5%、部分施工高さ1.5mのケースを「ST05-H15」として表記するものとする。

表-4に、解析に用いた物性条件を示す。他の物性は条件をモデル実験の解析条件と同様とした。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。

RC壁部材に設置したボンドリンク要素の入力条件は、既往の研究を参考に設定した。短繊維混入率が0.0%、0.3%、0.5%、0.7%の時、応力残存率はそれぞれ0.0、0.3、0.5、0.7とした。また付着切れひずみは全て0.2とした。

鉄筋はトラス要素を用いてボンドリンク要素を跨ぐように鉛直方向の300mm間隔で配筋した。鉄筋比は0.2%とした。

4.2 解析結果

解析結果の一例として、図-13と図-14に「ST0」と

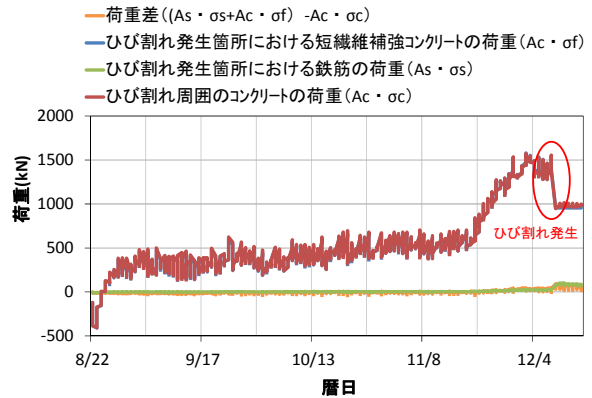


図-11 荷重履歴

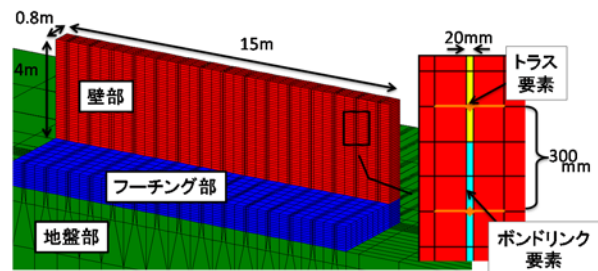


図-12 検討モデル

表-3 検討ケース

ケース名	繊維混入率 (%)	高さ方向の適用範囲 (m) (全高4m)	最大ひび割れ幅 (mm)
ST0	無し	0.0	0.248
ST03-H10	0.3	1.0	0.203
ST03-H15		1.5	0.178
ST03-H20		2.0	0.158
ST03-H25		2.5	0.159
ST03-H40		4.0	0.158
ST05-H10	0.5	1.0	0.201
ST05-H15		1.5	0.183
ST05-H20		2.0	0.087
ST05-H25		2.5	0.087
ST05-H40	4.0	0.087	
ST07-H10	0.7	1.0	0.211
ST07-H15		1.5	0.047
ST07-H20		2.0	0.054
ST07-H25		2.5	0.055
ST07-H40	4.0	0.055	

表-4 物性条件

	フーチング部	壁部	地盤
打ち込み日	8月2日	9月1日	-
初期温度(°C)	30.0	30.0	25.8
単位セメント量(kg/m ³)	350		-
外気温(°C)	月別平年値(東京)		
ヤング係数(N/mm ²)	土木学会式		500
ポアソン比	0.2		0.3

「ST05-H15」の結果を示す。図-13はひび割れ発生時の応力分布を示している。「ST0」はひび割れが生じたことにより壁中央で上部から下部までの応力が解放された。「ST05-H15」では「ST0」と同様に壁中央にひび割れが生じたものの、繊維の効果で壁下部の応力が解放されなかった。図-14は材齢153日での変形図を示しており、「ST0」は壁中央の5箇所、「ST05-H15」は壁中央の3箇所にひび割れが発生し、「ST0」のひび割れが拡大していることがわかる。最大ひび割れ幅は、ボンドリンク要

素長（20mm）に最大ひずみを乗じることで計算した「ST05-H15」の最大ひずみは $9171 (\times 10^{-6})$ であるため、このケースの最大ひび割れ幅は 0.183mm と算出された。それに対し「ST0」の最大ひずみは $12422 (\times 10^{-6})$ であり、最大ひび割れ幅は 0.248mm と算出された。

4.3 短繊維の混入率と高さ方向の適用範囲による影響

全ケースにおける短繊維の混入率、高さ方向の適用範囲と開口ひび割れ幅の関係を図-15に示す。短繊維の高さ方向の適用範囲に関しては、適用範囲を大きくするほどひび割れ幅を抑制することが確認できた。ある一定の高さまで短繊維を混入すると、ひび割れの進展は繊維部分のみに留まり、それ以上に高さ方向の適用範囲を大きくしても、ひび割れ抑制効果は見られなかった。混入率が 0.3% のケースでは高さ方向の適用範囲が 2.5m を越えるとひび割れ進展は繊維部分のみに留まり、抑制効果は見られなかった。同様に混入率 0.5% と 0.7% ではそれぞれ高さ方向の適用範囲 2m と 1.5m を越えるとひび割れの進展は繊維部分のみに抑えることができた。

短繊維の混入率に関して、図-15のように混入率を高くするほどひび割れ幅を抑えることができた。これは混入率が高くなるほど、応力の残存率が高くなるため、その分短繊維による高い架橋効果が得られた結果である。

以上のことから、構造物の種類やその要求性能に応じた許容ひび割れ幅に対し、必要な範囲や量の短繊維を適用することで、効率的かつ効果的なひび割れ抑制効果を得ることが可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) モデル実験とそれを模擬した解析の結果から、材料強度特性と引張軟化特性を考慮した温度応力解析を用いることで、短繊維を混入した RC 壁部材のひび割れ発生前後の挙動を再現し、本解析のひび割れモデルの妥当性を確認することができた。
- (2) 実構造物を模擬したパラメータ解析の結果から、短繊維を壁部材の高さ方向の半分程度まで適用することで、高さ方向の全てに適用したときと同様のひび割れ幅の抑制効果が得られた。また、混入率が大きいほど抑制効果が大きいことが確認できた。
- (3) 今回のひび割れモデルや解析方法を用いることで、短繊維の種類や混入率、高さ方向の適用範囲等の使用条件に対して、ひび割れ幅を効率的に評価することができることを示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2009，2009

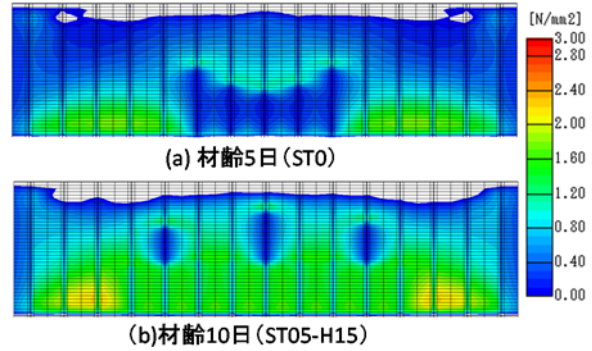


図-13 ひび割れ発生時の応力分布

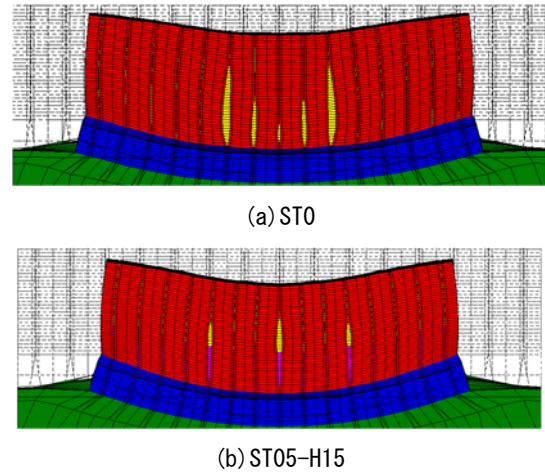


図-14 材齢 153 日の変形図（倍率 20 倍）

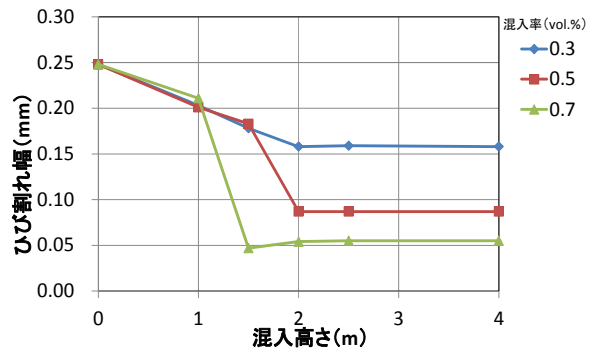


図-15 短繊維の混入率ごとの高さ方向の適用範囲と開口ひび割れ幅の関係

- 2) 計算力学研究センター：ASTEА-MACС 技術資料
- 3) 土木学会：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，No.50，pp.88-104，2003
- 4) 伊藤始，岩波光保，横田弘：PVA 短繊維で補強した RC はりのせん断耐力評価に関する実験的研究，土木学会 vol.65，No. 774，pp. 123-138，2004
- 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) 土木学会：コンクリート標準示方書 2007 年制定【設計編】，2008
- 7) 川村満紀：土木材料学，森北出版，pp.142-150，1996