

論文 乾燥収縮応力解析に基づくコンクリート部材のひび割れ予測に関する研究

青木優介*1・下村匠*2・丸山久一*3

要旨:コンクリート表面の微細なひび割れによる応力緩和をモデル化したひずみ軟化型構成則を用いて、コンクリート部材の乾燥収縮応力を評価し、部材を貫通するひび割れの発生を予測する方法を提案した。一軸拘束ひび割れ試験の結果と解析結果を比較し、モデルの妥当性と予測手法の適用性について検討した。ひび割れの発生に及ぼすコンクリートの時間依存性変形の影響について議論した。

キーワード:乾燥収縮ひび割れ、貫通ひび割れ、微細ひび割れ、応力解析

1. はじめに

コンクリート部材に発生する乾燥収縮ひび割れの発生を、コンクリート中の水分移動解析・応力解析に基づき予測するためには、材料の挙動を合理的に表現するモデルの開発が課題である¹⁾。本研究は、乾燥収縮応力解析に用いるコンクリートの構成則について検討する。

コンクリートの含水率と非拘束収縮ひずみの関係を仮定し、部材中の水分分布にこれを適用し弾性応力解析を行った場合、部材表面付近において高い引張応力が評価されることが既往の多くの研究において指摘されている²⁾³⁾。現実には、コンクリート表面における微細なひび割れの発生、リラクゼーションなどのメカニズムにより、応力緩和が生じていると考えられる⁴⁾。コンクリート部材に導入される乾燥収縮応力を適切に評価するためには、これら収縮が拘束された条件下におけるコンクリートの変形・破壊挙動を考慮する必要がある。

本研究では、微細なひび割れの発生・成長にともなうコンクリートの応力伝達能力低下をひずみ軟化として表現し、コンクリート部材内部に導入される乾燥収縮応力を評価した。一軸拘

束ひび割れ供試体の実験結果をもとに、評価された応力と部材を貫通する乾燥収縮ひび割れの発生の関係について検討した。

2. 解析方法

2.1 解析フロー

本研究において行う解析の全体フローを図-1に示す。コンクリート中の水分移動解析、応力

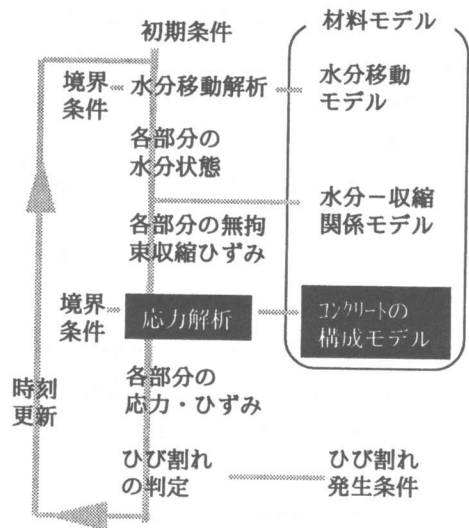


図-1 解析のフロー

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)

*3 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D (正会員)

解析，ひび割れの判定を逐次行う。一連の解析に用いる材料モデルについて以下に説明する。

2.2 コンクリート中の水分移動モデルおよび コンクリートの乾燥収縮モデル

コンクリート中の水分移動，水分量の変化にともなう各部分の乾燥収縮ひずみ（非拘束ひずみ）は，著者らの提案したコンクリートの細孔構造に基づくモデルを用いる⁵⁾。これらについての詳細は，本論文では省略する。

2.3 コンクリートの構成モデル

各部分の水分量に応じた非拘束ひずみを初期ひずみとして与え，部材の応力解析を行うことにより，乾燥収縮応力が評価される。

乾燥過程におけるコンクリート部材では，表面近傍において水分分布が急激な勾配を描くため，表面付近が引張領域となる。乾燥収縮応力を適切に評価するためには，この領域において生じている現象を表現することが不可欠であると考えられる。

微細なひび割れの発生・成長にともないコンクリートの応力伝達能力が徐々に低下することが重要なメカニズムであると考え，本研究では，これを表現するため図-2 に示すひずみ軟化型構成モデルを用いる。

コンクリートに導入される乾燥収縮応力は，式(1)で表す。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここで， σ ：コンクリートの応力

ε ：コンクリートの有効ひずみ

である。引張領域における弾性係数 E は，過去に受けた最大の有効引張ひずみに依存するとする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \{ \varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_t \} \text{ のとき} \\ E = E_0 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{ \varepsilon_t < \varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_u \} \text{ のとき} \\ E = E_0 \cdot \frac{\varepsilon_t \cdot (\varepsilon_u - \varepsilon_{\max})}{\varepsilon_{\max} \cdot (\varepsilon_u - \varepsilon_t)} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{ \varepsilon_u < \varepsilon_{\max} \} \text{ のとき} \\ E = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

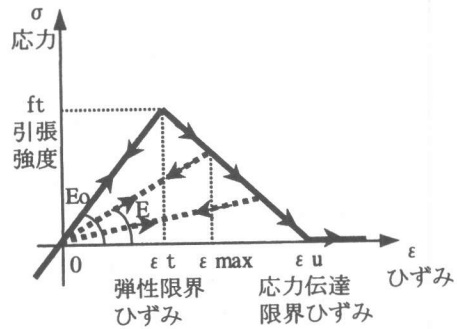


図-2 コンクリートの引張応力
— 引張ひずみ関係

ここで， E_0 ：初期弾性係数

ε_t ：弾性限界ひずみ ($=f_t/E_0$)

ε_u ：応力伝達限界ひずみ

ε_{\max} ：過去に受けた最大の有効引張ひずみ

f_t ：引張強度

である。なお，圧縮領域では，常に初期弾性係数を用いる。

2.4 貫通ひび割れの発生条件

提案した解析手法は，均質な連続体を対象としたものであるため，離散的な現象である部材を貫通するひび割れの発生は本来評価できない。そこで，JIS 原案の一軸拘束ひび割れ供試体を解析対象として，提案した構成モデル中の応力伝達限界ひずみ ε_u の値を種々変化させた解析を行い，その結果と実験における一般的な貫通ひび割れの発生過程を比較することにより，貫通ひび割れの発生条件について検討する。

一軸拘束ひび割れ供試体と，自由収縮供試体 ($10 \cdot 10 \cdot 40 \text{cm}$) の乾燥収縮挙動を解析した。供試体中の水分の移動は，供試体長軸と直交方向の成分のみを考慮した二次元解析により評価した。ひずみと応力は供試体軸方向の成分のみを考慮し，供試体の変形は軸方向に一樣であると仮定した。乾燥収縮モデルの材料パラメータは， $W/C=50\%$ ，乾燥開始材齢 7 日のコンクリートを想定して定め⁹⁾，乾燥条件は温度 20°C ，湿度 60% とした。コンクリートの引張強度は 3MPa ，弾性係数は 30000MPa ，弾性限界ひずみは 100

μ とした。コンクリートの応力伝達限界ひずみ ϵ_u を図-3 に示すように種々変化させたケースについて解析を行った。

供試体中の水分移動解析と応力解析の結果、各時間、各場所における、水分、応力、ひずみが評価される。自由収縮供試体の収縮ひずみの経時変化を図-4 に示す。一軸拘束供試体の乾燥収縮挙動の代表値として、実験値と比較可能な、断面平均応力（軸方向の直応力を断面内で平均した値）の経時変化を図-5 に示す。

弾性解析によると、一軸拘束供試体の断面平均応力は時間の経過とともに単調に増加する（図-5）。一方、ひずみ軟化型構成モデルを用いた場合、断面平均応力の経時変化には極大点が現れ、この点を過ぎると漸減し、0 に近づく傾向を示す。断面平均応力の極大値の大きさ、および極大値に対応する時間は、応力伝達限界ひずみ ϵ_u に依存する（図-6）。なお、自由収縮供試体の収縮挙動に及ぼす応力伝達限界ひずみ ϵ_u の影響は、拘束供試体の場合に比べて小さい（図-4）。

図-5 には、代表的な一軸拘束ひび割れ試験の結果を示してある。実験で観察される一般的な傾向は、断面平均応力（すなわち拘束鋼材のひずみ）は、単調に増加し、ある時点において貫通ひび割れが発生する。多くの場合応力が減少することはない。また、貫通ひび割れが発生する断面平均応力は、コンクリートの静的な引張強度よりも小さいことが認められている⁶⁾。

ひずみ軟化型構成モデルが実際の現象を正しく表現しているとした場合、以下の仮説が成り立つ。すなわち、解析結果に認められる応力減少過程、つまりコンクリートが連続体としての性質を保ちながら安定的に損傷を累積しつつ断面の応力を減少させてゆく過程は、現実には起こらず、実際には極大点あるいはそれ以前のいずれかの時点で、貫通ひび割れが形成され連続体としての性質を失う。

以上の仮説に基づき、本研究では、供試体の断面平均応力が極大となった時点で貫通ひび割

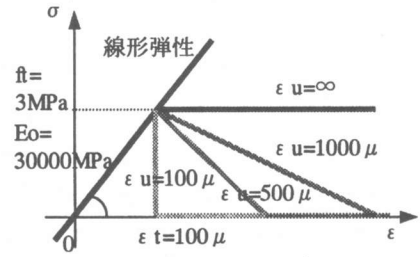


図-3 パラメータスタディに用いた応力-ひずみ関係

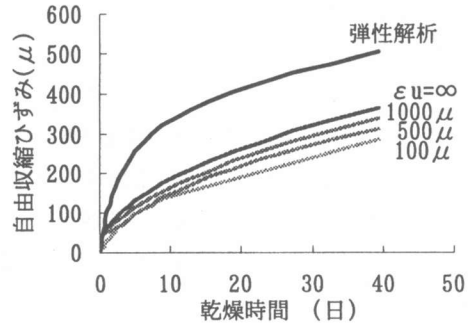


図-4 ϵ_u を変化させた場合の自由収縮ひずみの経時変化

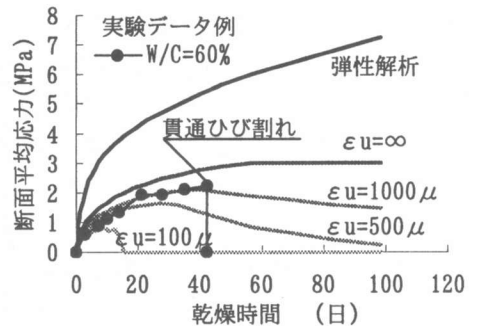


図-5 ϵ_u を変化させた場合の断面平均応力の経時変化

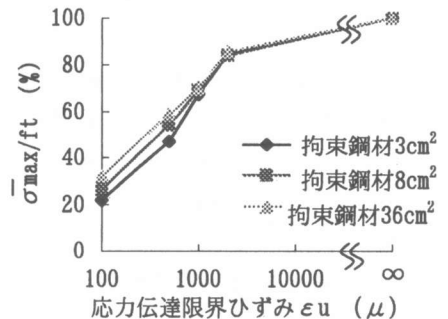


図-6 ϵ_u 変化の場合の最大断面平均応力の変化

れが発生すると仮定する。

なお、本モデルではコンクリートを均質な連続体と仮定しているため、応力・ひずみの状態が一樣な区間内では貫通ひび割れ発生位置は特定できない。貫通ひび割れ発生位置を特定するには、微視的なひび割れが局在化するモデル化を行う必要がある。今後の検討課題である。

3. 解析法の検証

3.1 概要

提案した解析手法を検証するために、JIS 原案の一軸拘束ひび割れ供試体の挙動を解析し、実験結果と比較した。実験条件を表-1 に示す。供試体 NS1 および NS2 は既往の実験結果であり⁷⁾、供試体 A1 は今回著者らが行った実験結果である。

3.2 解析に用いた材料パラメータ

水分移動モデル、乾燥収縮モデル中のコンクリートの材料パラメータ⁵⁾は、拘束供試体と並行して試験した自由収縮供試体の逸散水量および収縮ひずみの経時変化の実験結果から同定した⁹⁾。コンクリートの弾性係数・引張強度・弾性限界ひずみは、圧縮強度試験の結果から推定した。応力伝達限界ひずみは、前章におけるパラメータスタディの結果をもとに、標準的な値として弾性限界ひずみの4倍とした。なお、3.4 節に述べるように供試体 NS1、NS2 については、実験結果より同定した値を用いた場合についても解析を行った。各供試体の材料パラメータを表-1 に示す。各自由収縮供試体の収縮ひずみの経時変化の実験結果を図-7 に、逸散水量の経時変化の実験結果を図-8 にそれぞれ示す。A1 供試体については、解析結果も示してある。

3.3 一軸拘束供試体の解析

決定した材料パラメータを用いて、一軸拘束供試体の乾燥収縮挙動の解析を行った。

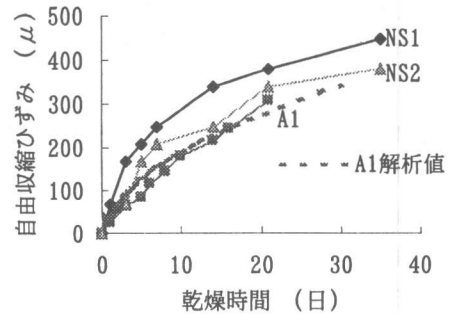


図-7 自由収縮ひずみの経時変化

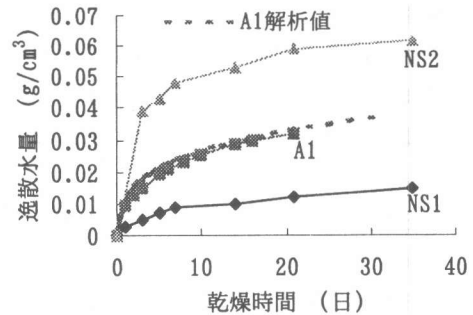


図-8 逸散水量の経時変化

表-1 実験条件および解析に用いた材料パラメータ

項目		NS1	A1	NS2
水粉体比	W/P (%)	33	50	34
単位水量	W (kg/m ³)	172	170	172
単位セメント量	C (kg/m ³)	308	340	308
単位高炉スラグ量	SL (kg/m ³)	200	—	—
単位石灰石粉量	L (kg/m ³)	—	—	184
単位細骨材量	S (kg/m ³)	828	768	828
単位粗骨材量	G (kg/m ³)	827	1034	827
Con断面積	Ac (cm ²)	10×10	10×10	10×10
Con引張強度	ft (MPa)	3.69	2.70	3.14
Con初期弾性係数	Eo (MPa)	32000	27000	28000
Steel断面積	As (cm ²)	7.97	7.94	7.97
Steel弾性係数	Es (MPa)	210000	210000	210000
温度	temp. (°C)	20	20	20
湿度	R.H. (%)	60	50	60
乾燥開始材齢	T.D. (day)	7	7	7
水分移動モデル ⁵⁾	Vo	0.1229	0.1305	0.1338
乾燥収縮モデル ⁵⁾	B	26000	18000	12000
の材料パラメータ	C	0.5	0.5	0.5
	Kv	0.033	0.060	0.167
	KL	0.00067	0.00120	0.00333
	E _{cap}	3000	4500	4500
弾性限界ひずみ	εt (μ)	115	100	112
応力伝達限界ひずみ	εu (μ)	460と260	400	449と1300

Conはコンクリート、Steelは拘束鋼材

図-9, 10, 11 はそれぞれ一軸拘束供試体 NS1, A1, NS2 の断面平均応力の経時変化の実験結果および解析結果を示したものである。前章で述べたように、供試体の断面平均応力が極大となった時点で貫通ひび割れが発生すると判定し、その時点までの計算値を示してある。図-12 は、供試体 A1 の貫通ひび割れ発生時における断面内の応力分布を示したものである。対称性を考慮して、断面の 1/4 を図示している。乾燥面付近では内深部に比べ乾燥が進行しているため応力が解放されている部分が存在する。その内部にはひずみ軟化域にある部分が存在し、中心部付近はまだ健全な弾性域にある。図は提案した手法により部材断面内の応力分布を評価した場合の一例として示している。

まず応力伝達限界ひずみ ϵ_u を弾性限界ひずみ ϵ_t の 4 倍とした場合の解析結果について検討する。供試体 A1 については、乾燥開始時からひび割れ発生に至るまで断面平均応力の解析結果と実験結果はよく一致しているが、供試体 NS1, NS2 については追従できていない。実験において貫通ひび割れの発生が早い NS1 の場合、断面平均応力の解析値は初期段階から常に実験値を上回り、ひび割れが発生すると判断される応力も実験値より大きい。逆に貫通ひび割れの発生が遅い NS2 の場合、初期段階では解析値が実験値を上回るものの、実験値よりも小さい応力でひび割れ発生と判定されている。

3.4 コンクリートの引張応力伝達挙動に

及ぼす時間の影響に関する検討

応力伝達限界ひずみに及ぼす载荷時間、すなわち乾燥時間の影響を検討するために、貫通ひび割れ発生時の断面平均応力が実験値と解析値において等しくなるように応力伝達限界ひずみを同定した。その結果、ひび割れ発生の早い NS1 では 260μ 、ひび割れ発生の遅い NS2 では 1300μ となった。

この結果より、仮定したコンクリートの引張応力伝達挙動には、現実には時間依存性変形の影響が無視できない程度に存在すると推察でき

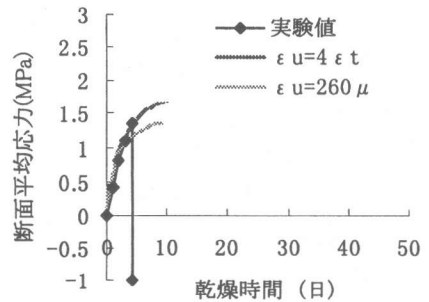


図-9 拘束供試体NS1における断面平均応力の経時変化

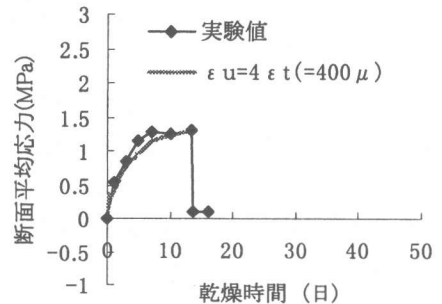


図-10 拘束供試体A1における断面平均応力の経時変化

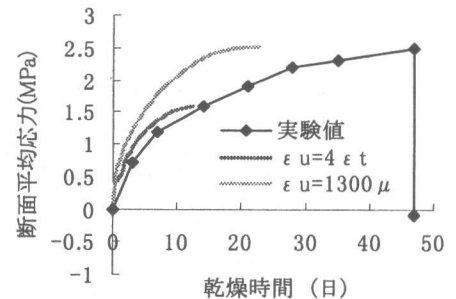


図-11 拘束供試体NS2における断面平均応力の経時変化

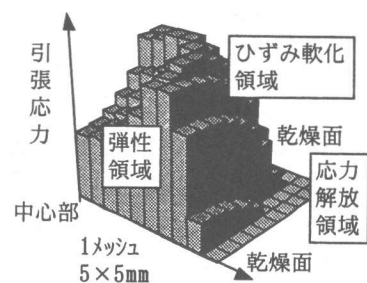


図-12 A1拘束供試体の貫通ひび割れ発生時の応力分布

る。収縮が早い場合と緩慢な場合とでは、観察される変形に含まれる時間依存性変形の割合が異なるため、同定される応力伝達限界ひずみ

ϵ_u にその違いが現れたと仮定すれば、本結果は合理的に説明できる。図-13 は、この概念を模式的に示したものである。

以上の仮説を検証するために、大野らにより行われたさらに広範な条件の一軸拘束収縮ひび割れ試験の実験データ¹⁰⁾を用い、ひび割れ発生時の応力が一致するように応力伝達限界ひずみ ϵ_u を同定し、実験におけるひび割れ発生日との関係をプロットしたものが図-14 である。ひび割れ発生日が遅いケースほど、同定される応力伝達限界ひずみが大きくなる傾向が明確に現れている。このことは、時間依存性変形の影響を考慮することにより、より適切なひび割れ予測が行えることを示唆している。

なお、引張領域における時間依存性変形の理由として、コンクリートのクリープ（リラクゼーション）が考えられる。今後は、この現象を明らかにして行きたい。

4. まとめ

本研究では、ひずみ軟化型構成モデルに基づく応力解析と、断面平均応力によるひび割れ判定により、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れを予測する手法を提案した。引張領域におけるコンクリートの時間依存性変形を適切に考慮することで、本予測手法の適用範囲が拡大すると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会クリープ・乾燥収縮小委員会：コンクリート技術シリーズ No.24 コンクリートのクリープおよび乾燥収縮，土木学会，pp.126-130，1997.10
- 2) 秋田 宏，藤原忠司，尾坂芳夫：含水率分布に基づいた乾燥収縮応力の評価，コンクリート工学年次論文報告，Vol.13，No1，pp.403-408，1991.6
- 3) 下村 匠，陳 丙学，小沢一雅：真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル，コンクリート工学年次論文報告，Vol.13，No1，pp.391-396，1991.6

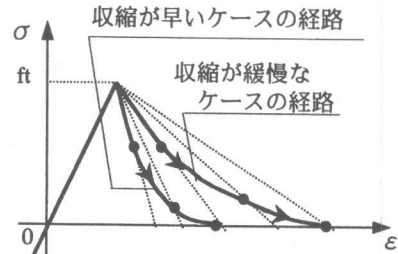


図-13 応力-ひずみ経路における時間の影響の概念図

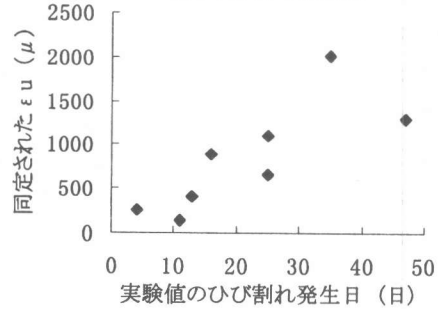


図-14 ひび割れ発生日と ϵ_u の関係

- 4) 橋田 浩：コンクリートの乾燥クリープとその機構，コンクリート工学，Vol.35，No10，pp.33-36，1997.10
- 5) 下村 匠，前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.35-45，1995.8
- 6) 牧角龍憲，太田俊昭：外的に線拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する基礎的研究，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.137-146，1987.2
- 7) 下村 匠，宇野洋志城：早期脱枠を行ったハイパフォーマンスコンクリートの硬化後の品質，土木学会論文集，No.508/V-26，pp.15-22，1995.2
- 8) 下村 匠，西田徳行：各種粉体を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性，1994，未発表資料
- 9) 下村 匠，福留和人，前川宏一：微視的機構によるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析，土木学会論文集，No514/V-27，pp.41-53，1995.5
- 10) 大野俊夫，魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.733-738，1997.6