擬似完全拘束下における高強度コンクリートの自己収縮による ひび割れポテンシャル評価に関する研究

EVALUATION OF CRACKING POTENTIAL OF HIGH-STRENGTH CONCRETE INDUCED BY AUTOGENEOUS SHRINKAGE UNDER THE QUASI-COMPLETE RESTRAINT CONDITION

早野 博幸*, 丸山 一平**, 野口 貴文***, 棚木 隆****

*Hiroyuki HAYANO, Ippei MARUYAMA, Takafumi NOGUCHI
and Takashi TOCHIGI*

In order to evaluate the effect of autogenous shrinkage and tensile creep property on stress of concrete under quasi-complete restraint condition as well as cracking behavior, Variable Restraint Testing Machine (VRTM) was developed. Using this machine, cracking potential of variable high-strength concrete in early ages were evaluated. According to those experiments, following results were obtained:

- (1) Tensile strength of concrete was higher than splitting tensile strength, while concrete under small stress/strength ratio.
- (2) Tensile strength of concrete under restrained condition was changed according to the amount of tensile creep strain. Larger amount of tensile creep strain reduced the tensile strength.

Keywords : High-strength Concrete, Autogenous Shrinkage, Crack, Tensile strength, Stress Strength Ratio, Tensile Creep

高強度コンクリート, 自己収縮, ひび割れ, 引張強度, 応力強度比, 引張クリープ

1. はじめに

近年のコンクリートはさらなる高強度化が推し進められ、設計基準強度レベルは年々上昇する傾向にある。高強度コンクリートは、スパンの長大化や高層化だけでなく高耐久化をも実現可能とする材料であるが、一方で、自己収縮や温度変形などによって拘束条件の厳しい場合にはひび割れの発生が懸念される¹⁾。自己収縮は、セメントの水和反応に起因する自己乾燥現象に基づくものと考えられており、本質的に不可避な収縮現象である。また、セメントの反応過程、つまり若材齢の拘束下で許容値以上の応力やひび割れの危険性が生じるために適切に評価する必要があり、ひび割れが生じた実物大モデルにおいての解析的検証も行われている²⁾。

ひび割れ発生条件を評価する指標としては、割裂引張強度に対するひび割れ発生強度の割合が挙げられ、その値は40~90%と広範囲にわたる³⁾。この割合は、比較的長期の乾燥収縮による影響を考慮したものであり、若材齢の自己収縮を対象とした場合には水和反応が活発である点で大きく異なるものと考えられる。また、拘束下にある実構造物は応力履歴を受けており、ベースとなる割裂引張強度

はこの影響が反映されていない。したがって拘束条件下で水和を継続するコンクリートの引張強度特性が不明瞭であるという本質的な問題が含まれており、このため、拘束条件下で水和した供試体の応力、クリープ、強度の成分を適切に把握する必要がある。

本研究では自己収縮によるひび割れ危険性を評価する目的で、拘束して引張応力履歴を受けた試験体の直接引張強度をもとに、擬似完全拘束されたコンクリートの自己収縮応力を対象としたひび割れ発生ポテンシャル評価を行った。評価に際しては、近年の性能設計の枠組みの中で利用が図られつつある⁴⁾低発熱系セメントや膨張材等の使用材料の影響についても検討を行った。これは、様々な物性を有するセメント系材料について自己収縮ひび割れのポテンシャルを評価するという枠組みの中において広く俯瞰すること、また、各種材料の性能設計に資するデータの取得を目的としたものである。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および調査

コンクリートの引張強度、収縮性状、クリープ性状およびこれら

* 太平洋セメント(株)中央研究所 主任研究員・修士(工学)
(東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程)

** 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻
准教授・博士(工学)

*** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

**** 太平洋セメント(株)中央研究所 チームリーダー

Research Scientist, Research & Development Center, Taiheiyo Cement Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., The University of Tokyo, Dr. Eng.

Leader, Research & Development Center, Taiheiyo Cement Corporation

の時間依存性は構成する材料の影響を受ける。コンクリートのひび割れポテンシャルを把握する観点から、様々なセメント、混和材、骨材種を用いるとともに、水セメント比を変化させて実験を行った。コンクリートの使用材料を表1に示す。

また、コンクリートの調合を表2、表3に示す。シリーズ1(表2)では使用材料の種類の影響を、シリーズ2(表3)では普通セメントを用いて水セメント比の影響をそれぞれ検討することとした。調合条件は粗骨材絶対容積を $0.34\text{m}^3/\text{m}^3$ 、空気量を2%、スランプフローを $60\pm 10\text{cm}$ とし、コンクリートは100ℓパン型ミキサを使用してモルタルを90秒間練り混ぜ、その後、粗骨材を投入して90秒間練り混ぜ、排出した。

2.2 収縮試験

(1)自由収縮試験

自由収縮試験は、日本コンクリート工学協会で提案されている「セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法」⁹⁾に準じて行った。型枠底部には摩擦低減のためテフロンシートを敷き、ポリエステルフィルムで密閉したコンクリート(100×100×400mm)のひびきを低圧型接触変位計(反力0.25N)で測定した。

(2)擬似完全拘束試験

コンクリートを擬似的に完全拘束する試験としては、図1に示す可変拘束応力試験機 VRTM⁶⁾ (Variable Restraint Testing Machine) を用いた。本試験機は、中央に打ち込まれたコンクリートの試験区間(長さ500mm、断面100×100mm)の硬化過程における変位ならびに応力状態をモニタリングし、クロスヘッドを任意に制御することによって様々な拘束条件を擬似的に再現することができる。擬似完全拘束試験は、コンクリート試験体を外部からの拘束によって変位を一定変位以下に制御するもので、自己収縮を対象とした場合にはひび割れが最も発生しやすい条件を実現するものであり、コンクリートの自己収縮ひび割れを対象としたポテンシャルを計測する試験と言える⁷⁾。擬似完全拘束試験の制御フローを図2に示す。本実験では、予め制御の基準となるひずみトリガー、応力トリガーを設定する。まず、クロスヘッドを固定しておき、材齢とともにコンクリートが収縮すると、ひずみおよび応力が生じる。これらが増大し応力がトリガー値に達すると、応力をキャンセルする方向にクロスヘッドが動く。これを繰り返すことで、一定応力内でコンクリートを擬似的に自由変形させる。すなわち、ステップ1では応力トリガー制御のもとでコンクリートを自由変形させる。ステップ2では、コンクリートに発生する応力はトリガー内で制御されるが、ひずみは収縮ひずみおよびクロスヘッドの移動の繰り返しによって増大し、図

2のA点のように設定したひずみトリガーに達すると、ひずみが0になるB点までクロスヘッドが移動する。このステップ1および2を1サイクルとし、次サイクルか

表1 使用材料

種類	記号	材料名	物性および成分
セメント	NC	普通ポルトランドセメント	密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3290\text{cm}^2/\text{g}$
	BBC	高炉セメントB種	密度 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3810\text{cm}^2/\text{g}$
	MC	中熱ポルトランドセメント	密度 $3.21\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3200\text{cm}^2/\text{g}$
	LC	低熱ポルトランドセメント	密度 $3.22\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $3360\text{cm}^2/\text{g}$
	SFPC	シリカフェュームブレックスセメント	密度 $3.07\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $6190\text{cm}^2/\text{g}$
粗骨材	EC	エコセメント	密度 $3.17\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積 $4100\text{cm}^2/\text{g}$
	CS	砕石(青梅産)	表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.60%
	LS	石灰石(藤原産)	表乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 0.71%
細骨材	S	陸砂(大井川水系産)	表乾密度 $2.59\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率 1.97%
混和材	EX	膨張材	石灰系早強型, 密度 $3.19\text{g}/\text{cm}^3$
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表2 コンクリートの調合 (シリーズ1: 使用材料の影響)

記号	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					f _{c28} (封かん)
				W	C	EX	S	G	
N25	25	44.9	2.0	160	640	—	719	903	98.6
BB25		44.2				—	698		95.5
M25		45.2				—	727		101.3
L25		45.3				—	729		96.4
SFP25		44.4				—	704		101.5
E25		45.0				—	721		95.8
NEX25		44.9			610	30	717		96.9
LS25		44.9			640	—	719	919	94.3

※)記号は、N(使用材料の種類)25(水セメント比)

表3 コンクリートの調合 (シリーズ2: W/Cの影響)

記号	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				f _{c28} (封かん)
				W	C	S	G	
N20	20	40.0	2.0	160	800	588	903	108.4
N25	25	44.9			640	719		98.6
N30	30	47.8			534	807		83.8
N35	35	49.7			458	869		72.4

図1 VRTMの概要

図2 擬似完全拘束の制御フロー

らはB点の応力を基準応力として制御を繰り返すことで、コンクリートの測長区間変位をひずみトリガー値以内に保持する。なお、各トリガー値は既往の研究⁹⁾を参考にしてひずみトリガーを 4μ 、応力トリガーを 0.01N/mm^2 に設定した。クロスヘッド制御は50msecインターバルで実施し、クロスヘッド移動速度は材齢1日までは 0.005mm/min 、それ以降は 0.003mm/min とした。

2.3 強度試験

VRTMで材齢7日の測定終了後、クロスヘッド移動速度 0.003mm/min でコンクリート試験体の直接引張試験を行い、ひび割れ発生までの引張強度を試験体2体について測定してその平均をひび割れ発生強度とした。併せて、材齢1、3、7日に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の封緘供試体で割裂引張試験、材齢1、3、7、28日に圧縮強度試験およびヤング係数の測定を行った。また、ヤング係数の測定は別途材齢7日においてVRTMによる圧縮載荷および引張載荷時にも行い、VRTMに設置している変位計と測定区間のコンクリート両側面中央に貼付したひずみゲージの値による算出をそれぞれ行い、圧縮載荷時の円柱供試体のヤング係数と比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 自由収縮ひずみ

各コンクリートの凝結始発時からの自由収縮ひずみを図3に示す。左図のシリーズ1における使用材料の影響に関しては、膨張コンクリート(NEX)以外は収縮側の値を示し、材齢7日の時点で収縮ひずみが小さいものから、低熱セメント(L)、シリカフェウムプレミックスセメント(SFP)、中庸熱セメント(M)、石灰石(LS)、普通セメント(N)、高炉セメントB種(BB)、エコセメント(E)を使用したコンクリートの順になった。なお、L、SFP、Mについては材齢7日ではほぼ収束する傾向となったが、その他では材齢7日以降も収縮量が増加する傾向があるものと考えられる。右図の水セメント比の影響に関しては、水セメント比の減少とともに自己収縮ひずみは増大する結

図3 各コンクリートの自由収縮ひずみ(左: シリーズ1, 右: シリーズ2)

図4 ひずみの変化(左: N25, 右: NEX25)

果となった。

3.2 擬似完全拘束下における各種物性

擬似完全拘束試験でのひずみ挙動の一例として、普通コンクリート(N)と膨張コンクリート(NEX)の結果を併せて図4に示す。Nの場合は材齢初期から収縮ひずみが生じるため、収縮側でひずみトリガーとなる 4μ (図中の点線内)に達すると0に戻るというサイクルが繰り返されているが、NEXでは自己収縮ひずみよりも膨張ひずみが上回るために、材齢初期の0.4日程度までは膨張側のひずみでほぼ制御されていることがわかる。NEXではその後、収縮側のトリガー制御に変わり、両者ともにひずみトリガー内で擬似的な完全拘束制御が実施されていることが確認できる。なお、ひずみトリガーが作動した点を図中の点線で示したが、応力トリガーは 0.01N/mm^2 と小さく設定しており、その除荷に伴うひずみ変化は非常に微小なものであるため、図からは読み取ることができない。

VRTMのクロスヘッド移動により測定した試験体の引張ヤング係数について検討を行った。材齢7日のN25のVRTM試験体を用い、側面に貼付したひずみゲージでの引張および圧縮ヤング係数とVRTM変位計での引張ヤング係数をそれぞれ測定した結果を図5に示す。算出方法は原点からの割線ヤング係数とし、同調合、同材齢となる円柱供試体の圧縮ヤング係数と比較した。既往の研究では、引張ヤング係数の方が圧縮ヤング係数より大きくなる場合⁹⁾や同等となる報告⁹⁾があるが、本結果では引張ヤング係数の方が若干ではあるが大きくなる傾向はみられるものの、すべてほぼ同等とみなしてよく、円柱供試体の結果とも差異はみられないことから円柱供試体の圧縮ヤング係数が適用できるものと考えられる。

続いてVRTMにおける応力挙動に関して再現性を確認するため、若材齢時でひずみ変化の大きいBBとNEXの2回の試験結果を一例として図6に示す。VRTMにおける応力挙動は、ある一定範囲内で推移する応力トリガー制御によるものと、その後トリガーひずみに達してクロスヘッド移動による完全拘束制御が行われて応力が急増

するひずみトリガー制御の2種類のステップで構成される。したがって材齢と応力の関係は階段状に似た形状となる。図のBBの例のように、高強度コンクリートは材齢1日程度までの自己収縮ひずみの変化が大きい初期は頻繁にひずみトリガーに達するが、その時間的間隔が短く、さらに初期材齢のヤング

図5 測定したヤング係数の比較

係数が小さいことから応力変化も微増であり、その階段の形状は相対的に小さくなる。材齢後半になるにしたがって、今度は逆に自己収縮ひずみの増分が小さくヤング係数は大きくなるため、大きな階段状となる挙動を示すようになる。また、再現性については、2回の試験で材齢7日時の応力差はNEXで13%、BBでは8%程度であり、過程の挙動をみても大きな差異はないことが確認された。

次に、各コンクリート(シリーズ1のセメント種類の影響、ひび割れ抑制材料の影響、シリーズ2の水セメント比の影響)における収縮応力の変化を図7に示す。これらはすべて1回目の試験結果を示し、比較としてN25をすべてに図示した。セメント種類の影響に関しては、低発熱系のL、SFPは共に材齢7日の自己収縮応力は 1.0N/mm^2 以下と小さく、続いてM、Nの順に大きくなり、BBとEに関してはそれぞれ材齢6.9日および5.1日にひび割れが発生して応力がほぼ0に低下した。この2種類のセメントは、図3の自己収縮ひずみの傾向からわかるように、材齢1日程度までは他と同様に自己収縮ひずみは増大しているが、若材齢であるためにこれに相当する収縮応力の変化は小さい。しかし、それ以降の挙動は他と大きく異なり、硬化体の骨格が形成され剛性が高くなっていく材齢後半についても自己収縮ひずみは継続して増えていくことが確認できる。その結果、自己収縮応力が増大しひび割れ発生に至ったと考えられる。ひび割れ抑制材料に関しては、石灰石骨材を使用した場合は材齢0.75日まではNと同様な挙動であったが、その後若干の差が生じ、膨張材を使用した場合は初期から圧縮応力が導入され、材齢0.6日程度で最大 0.86N/mm^2 の圧縮応力となった後、以降引張応力側に転じた。Nと比較した場合には、材齢7日時にそれぞれ 0.4N/mm^2 、 2.6N/mm^2 の自己収縮応力の低減が可能となる。水セメント比の影響に関しては、水セメント比の減少とともに材齢7日の収縮応力が増大していることは明らかであり、また、発生する応力はコンクリートの自己収縮ひずみによる収縮応力増加とクリープ・リラクゼーションによる応力緩和現象のバランスで決定され、応力の減少している部分は後者が上回っているものと推察できる。

3.3 強度特性によるひび割れポテンシャル評価の検討

材齢7日まで疑似完全拘束下での測定を行った後、クロスヘッドの強制移動による試験体の引張載荷を行い、ひび割れ発生強度の測定を行った。直接引張試験に関しては偏心などの影響によるばらつきが予想されるが、本試験では試験体を作成してから引張治具に固定するのではなく引張試験機に直接コンクリートを打ち込む形になるため、すべてのコンクリートで条件は同じであり、その影響は小さい。実際に引張試験時の硬化コンクリートの左右にひずみゲージ

を貼付し、偏心が生じていないことを確認するとともに、N25の標準調合で材齢7日においてばらつきの検討を行った。直接引張強度(N/mm^2)は変動係数0.046(標準偏差0.189, $n=4$)、割裂引張強度は変動係数0.065(標準偏差0.278, $n=6$)であり、本検討において直接引張強度は割裂引張強度のばらつきより若干小さいものとなった。また、定着部には組立て鉄筋を配しているため、端部でひび割れ破断は生じていない。

コンクリートのひび割れ発生危険度を評価する指標としては、同じ材齢の割裂引張強度に対するひび割れ発生強度の比(ひび割れ強度/割裂引張強度)が挙げられ、その割合は様々な実験要因の影響により広範囲にわたっている。この割裂引張試験をベースとした指標は、コンクリート試験体自体が応力履歴を全く受けていないため、通常の構造物のひび割れ発生という過程を考えた場合には、引張応力の継続とクリープによる応力緩和という要素が欠けている。また、これらは全ての調合で同一ではなく、拘束を与えることによってそのコンクリート固有の自己収縮や剛性などの時系列的変化が応力履歴となって表れることになり、コンクリートの自己収縮特性に応じた拘束条件が自然と与えられることになるといえる。本研究ではこれらを勘案し、拘束を与えることによって応力履歴を受けた試験体の直接引張試験を行い、自己収縮応力がひび割れ発生強度のどの程度の割合となるかという直接引張強度をベースとした応力強度比に基づいたひび割れ発生ポテンシャルを各コンクリートにおいて評価した。

材齢7日における直接引張強度と割裂引張強度を比較した結果を図8に示す。これらを比較した既往の研究¹⁰⁾においては、両者はほぼ同等という結果が得られており、ともに試験で偏心などが生じなければ本質的に同一と考えられる。本研究と異なるのは、直接引張試験体が拘束を受けることによって応力履歴を受けている点であり、

図6 収縮応力の再現性の検討(BB, NEX)

図7 収縮応力の変化(左:セメント種類の影響, 中:ひび割れ抑制材料の影響, 右:水セメント比の影響)

結果は調合によって異なる傾向を示した。シリーズ1のNEX25については、直接引張強度が割裂引張強度を15%ほど上回ったが、直接引張試験体の膨張ひずみを完全拘束したことによる組織の緻密化の効果¹¹⁾が引張強度増進につながったと思われる。NEX25を除くと、図の点線のようにやや直接引張強度の方が高い傾向を示した。シリーズ2については、N20は直接引張強度の方が 0.58N/mm^2 低下しており、ばらつきについて事前検討した標準偏差が本調合でも同等であると仮定すると、偏差は直接引張、割裂引張ともに 2σ 以上となっていることから、ばらつきを考慮しても実際に強度低下が生じている可能性が高い。N20は、図7をみるとわかるように若材齢から継続して高い収縮応力が生じているため、この影響があらわれたものと考えられる。N25についても同様に直接引張強度の方がやや小さくなっており、シリーズ2だけ見た場合は、強度が高くなると図の曲線のような傾向となる。これらの傾向については応力履歴との関連性が重要であるため、後に考察を付け加えることとする。

材齢7日の応力強度比によるひび割れ発生ポテンシャル評価結果を図9に示す。シリーズ1の使用材料の比較に関しては、BB25(材齢6.9, 6.7日にひび割れ)およびE25(同5.1, 4.3日)についてはいずれもひび割れが発生したため100%となる。その他ではN25の収縮応力が直接引張強度の約80%を占め比較的高い割合となっており、続いてLS25、M25となり、低発熱系セメントのL25、SFP25が20%程度と低い割合で自己収縮ひずみ量と同様の傾向を示した。自己収縮ひずみは鉱物組成のうち C_2S が多いほど小さいといわれており¹²⁾、低発熱系セメントは C_2S 量が多いため自己収縮ひずみは小さくなるが、一方で強度発現性が遅く引張強度についても同様な傾向を示すため、応力強度比でみたひび割れ発生ポテンシャル評価という観点からは判断が難しいところである。しかし、本実験結果より、低発熱系セメントの強度発現性が遅いという欠点をカバーするだけの自己収縮応力の低減効果が定量的に明らかになったといえる。また、この中ではNEX25が最も低い値を示し、前述した引張強度の増進と材齢初期の膨張応力導入による自己収縮応力低減効果が寄与する形となった。

シリーズ2に関しては、水セメント比の減少とともにひび割れ発生の危険性は高くなるといえるが、N20とN25はそれほど大差ない結果となった。すべての調合の中で自己収縮ひずみが最大となったN20で応力強度比が約80%となりひび割れは生じなかったが、それより自己収縮ひずみの小さいBB25とE25ではひび割れが生じる結果となった。

また、若材齢の経時変化におけるひび割れポテンシャル評価を行うため、割裂引張強度試験の結果と同様な引張強度発現比を試験体が生じるものと仮定して、材齢1, 3, 7日における引張強度を求め、応力強度比の推移として図10に示す。シリーズ1の材料種類の比較については、Mを含む低発熱系セメントおよびNEXの応力強度比

はいずれも低い割合で推移し、材齢3日から7日にかけて大きな変化はみられない。擬似完全拘束下でこのような低い応力強度比であれば、低発熱系セメントの自己収縮発現が材齢7日ではほぼ収束していることも勘案すると、実構造物の拘束下では自己収縮応力のみの要因でひび割れが発生する可能性は非常に小さいと考えることができる。一方、その他のコンクリートは材齢とともに応力強度比は高くなっていき、きわめて高くなった一部の調合(BB25, E25)ではひび割れが発生した。長期材齢のコンクリートに関しては、応力強度比70%程度でクリープ破壊が生じるといわれているが¹³⁾、本研究ではBBやEでは既に材齢3日から70%以上の応力強度比を示しているものの、すぐにひび割れ発生には至っていない。若材齢時と長期材齢時で異なる点は、水和が活発に進行しているか否かという大きな相違があり、これらが大きな影響を及ぼしていることが考えられる。

シリーズ2の水セメント比の影響に関しては、N35およびN30は材齢1日では自己収縮応力が小さいためひび割れ発生の危険性はかなり小さく、材齢3日ではやや増加するが、その後はクリープの影響のため応力自体がやや低下し、一方で引張強度が増加するため、材齢7日ではひび割れは発生しにくい状況となる。N25は、材齢とともに応力強度比は上昇し、引張強度の増進よりも自己収縮応力の増加割合が大きいことを示している。N20に関しては、材齢1日から継続して応力強度比が80~90%の間にあり高い応力履歴を受けてはいるが、BBなどのようにひび割れ強度に達してはいないためひび割れ発生には至らない。以上より、自己収縮ひずみの絶対値がひび割れに直接結び付くものではないが、少なくとも自己収縮の小さい低発熱系セメントや膨張コンクリートでは自己収縮に起因するひび割れの危険性は低いことが明らかとなった。

図8 引張強度の比較

図9 ひび割れポテンシャル評価結果

図10 応力強度比の推移 (左: シリーズ1, 右: シリーズ2)

3.4 引張クリープ特性およびひび割れ発生に影響を及ぼす各種要因の考察

自己収縮応力で生じるひび割れは自己収縮ひずみの大小のみが影響するものではなく、剛性を含む引張強度特性や引張クリープ特性が大きく関与するものと考えられる。完全拘束下のひずみに関しては、TSTMにおけるKovler¹⁴⁾の提案した概念図を図11に示すように、トリガー応力の範囲内である一定応力下におけるひずみと、そのひずみがトリガーひずみに達した場合、クロスヘッド制御によってひずみを0に戻す弾性ひずみによって構成されている。前者は比較的長期間にわたって生じる収縮ひずみとクリープひずみが含まれ、この和と制御時の弾性ひずみがひずみトリガー制御終了時に等しくなる。そのため、この累積値と別途測定した自由収縮ひずみとの差分によりクリープひずみを求めることができる。ただし、このクリープは一般的にいう一定応力下のものではなく、コンクリートの自己収縮に応じて蓄積される変動応力下におけるクリープひずみの総和を表わすものとなる。以上がKovlerの示した概念を説明したものであるが、これ以外の知見として、各々のステップにおける弾性ひずみはその制御時に完全拘束を再現するものであるため、ひずみを0と考えたとその材齢における引張拘束ひずみと考えることができる。ここでは、自己収縮ひずみ、累積クリープひずみ(クリープひずみの総和)および累積引張拘束ひずみと収縮応力の関係からコンクリートのひび割れ発生過程との関連性について検討した。本実験では、ひび割れの発生直前においてもひずみおよび応力挙動を細かくモニタリングしているため、この点も併せて考察を加える。

自己収縮ひずみと収縮応力の関係をシリーズ1のひび割れが発生した調査およびシリーズ2について図12に示す。なお、直接引張強度(ひび割れ強度)の値も図中に併記した。まず、自己収縮ひずみ自体が小さいN35を除く調査では100μ前後で応力が発生しており、

それ以下となる応力に寄与しない自己収縮ひずみが存在する。また、各々の調査における自己収縮ひずみ-応力曲線の勾配は見掛けのヤング係数を表わすものであるが、材齢の進行に伴う自己収縮の増大とともに収縮応力が緩やかに増加する範囲から急激な増加を示す範囲に移行する点、すなわち見掛けのヤング係数が大きく変化する屈曲点が存在する(図中の●)。これ以降の自己収縮ひずみは応力に大きく寄与することを示すものであり、この点について検討を行った。検討項目は、図では時間依存性が示せないため屈曲点の材齢、その時点の自己収縮ひずみおよび応力に影響するヤング係数とした。なお、若材齢のヤング係数は既往の研究¹⁵⁾を参考にした式(1)に本実験データを代入して S_E および a_E を定め、算出した。

$$E(t) = E_{28} \cdot \exp \left\{ S_E \left[1 - \left(\frac{28 - a_E}{t - a_E} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (1)$$

ここに、 $E(t)$:有効材齢 t 日のヤング係数(N/mm²)、 E_{28} :材齢28日のヤング係数(N/mm²)、 S_E :調査の係数、 a_E :凝結時間の影響による係数(日)、 t :有効材齢(日)とする。図中の屈曲点に関して算出した詳細を表4に示すが、材齢に関してはN35を除いて自己収縮ひずみが大きい調査ほど長くなっており、そのときのヤング係数も同様に大きい傾向を示している。自己収縮ひずみについては、全自己収縮ひずみと屈曲点における自己収縮ひずみの全体に対する割合も括弧内に記載した。ひび割れの生じたBB25とE25では屈曲点以降のその割合は高く、N30やN35もその割合は高いものの駆動力となる自己収縮自体が小さいので大した応力は発生しない。N20に関しては初期の見掛けのヤング係数が小さいことから、屈曲点までのクリープ量は非常に大きいことが予測できるが、屈曲点以降の自己収縮ひずみ量の割合は低い結果となった。コンクリートのヤング係数が小さい若材齢時に生じる自己収縮ひずみは、応力増大に寄与するものでは

表4 見掛けのヤング係数における屈曲点の詳細

調査	材齢(日)	自己収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)	ヤング係数(kN/mm ²)
N20	1.732	641(85.7%)	31.4
E25	0.760	582(53.6%)	24.6
BB25	0.670	467(49.1%)	19.2
N25	0.534	404(61.6%)	17.5
N30	0.548	239(51.5%)	15.0
N35	1.900	70(31.6%)	25.9

図11 擬似完全拘束下におけるひずみの概要¹³⁾

図12 自己収縮ひずみと収縮応力の関係

図13 累積クリープひずみと材齢の関係(左:シリーズ1, 右:シリーズ2)

図14 累積引張拘束ひずみと収縮応力の関係

なく、硬化体の骨格が形成され、剛性がある程度高くなる材齢以降、すなわち屈曲点以降の自己収縮ひずみの変化量が大きい場合には応力増大に繋がり、ひび割れの危険性が高くなる。以上より、自己収縮ひずみが大きく、かつ自己収縮ひずみ全体に対してこの屈曲点以降の応力増大に寄与する自己収縮の割合が大きくなっているコンクリートは、ひび割れの危険性が高くなるものと考えられる。

次に、算出した累積クリープひずみと材齢の関係を図 13 に示す。引張クリープ変形は従来よりひび割れ発生につながる重要な要因であることが示されており、その発生メカニズムとして微小なひび割れに起因するものであるとの考えが多くある¹⁶⁾¹⁷⁾。実際に空隙構造の変化を測定した報告¹⁶⁾やペーストクラック量との関係に基づいて実証した報告¹⁷⁾もみられる。したがって引張クリープ量が大きいほど微細ひび割れが増加・進展していき、ひび割れ発生につながっていくものと考え、図 13 に示すように BB と E のクリープは他と比べて大きく、その結果ひび割れに至ったものと考えられ、N20 も同様にひび割れが発生しやすい状況にあると言える。一方、N25 については累積クリープひずみがこれらに比べて小さいことから、まだその領域に至っていないことが推測できる。

応力強度比とクリープの関係については、クリープ破壊という観点からは、継続して応力強度比の高い履歴を受けたコンクリートの引張強度は、応力履歴を受けていない健全な場合の引張強度に比べて低下すると考えられる。図 8 に示すようにそのような傾向が顕著にみられたのは N20 のみであるが、応力履歴なしの割裂引張強度と直接引張強度が同等であると仮定すると、前述した考えに矛盾することになる。これらについての既往の研究では、水セメント比が 55% あるいは 60% と高い領域で検討が行われており、根木らの報告¹⁸⁾においても似たような傾向が見受けられる。この中では、材齢 1~7 日に載荷が開始された場合の引張強度比(載荷試験体の引張強度/無載荷試験体の引張強度)は、強度試験材齢が 14 日以前のものについては 1 を上回っている。その理由としては、引張クリープによる微細ひび割れの進行と併せて若材齢では水和の進展による初期欠陥部の修復が同時に起こるため、応力履歴の影響が相殺されているとの考えを示している。これは、丸山ら¹⁹⁾の行った引張拘束を受けるセメントペーストにおいて、載荷状態の方が結合水量が増大するという実験結果からも裏付けられる。狩野らの報告⁹⁾では材齢 12~24 時間で応力強度比 40~85% の載荷を 3 日間行い、引張試験を実施しているが、いずれの場合も引張強度比はほぼ 1~1.1 の範囲内であった。以上の結果より、根木らが示したような現象は本実験でも生じていると思われる。N20 のように若材齢時から 80% 以上となるきわめて高い応力強度比の履歴を受け続けた場合は、水和の修復作用を上回る微細ひび割れが発生して引張強度が低下するが、それ以下の場合には強度低下には大きな影響を及ぼさないと言える。また、若材齢時における水和の活発度からすると、本実験のような低水セメント比の方が欠陥部の修復という効果は大きいものと思われる。

累積引張拘束ひずみと収縮応力の関係を図 14 に示す。N30 および N35 は、収縮応力のピーク後、徐々にリラクゼーションによるものと考えられる軟化の傾向を示し、応力減少過程の挙動が応力増大過程と同一曲線状を逆に辿っている。これは、線形クリープの範囲でコンクリートは大きな損傷を受けていない健全な状態であることを示唆しているものと考えられる。一方で、N20 は応力増加の曲線上

と乖離して応力低下が生じており、ひび割れ発生への遷移領域にある可能性が高い。これは、図 8 の健全な試験体による割裂引張強度に対して応力強度比の高い履歴を受けた試験体の直接引張強度の割合が低下していることを裏付けているものと推察できる。

以上、ひび割れが最も生じやすい完全拘束を再現して高強度コンクリートのひび割れ発生に至る自己収縮挙動について検討してきたが、今回ひび割れが生じた高炉セメント B 種やエコセメントはこのような低水セメント比の割合で使用されるケースは少なく、あくまでも厳しい拘束下での条件であることを付記しておく。また、他の割合に関しても水セメント比が小さい場合は自己収縮の影響のみでひび割れが発生しなくとも、ある程度の自己収縮応力が発生しており、脱型後の急激な乾燥収縮によってひび割れが生じることも十分にあり得る。今後は、より実態に即した自己収縮に乾燥収縮の影響を考慮した評価、さらには実構造物の拘束条件を再現した評価が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、様々な材料を用いた高強度コンクリートを対象に擬似完全拘束下における自己収縮ひび割れポテンシャルについて評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 応力履歴を受けたコンクリートの直接引張強度は、若材齢時に膨張ひずみが拘束された膨張コンクリートにおいては割裂引張強度より高くなり、材齢初期から極めて高い応力履歴を受けたコンクリートではひび割れが発生するか、あるいは直接引張強度の低下が生じた。また、応力強度比が比較的低い場合の直接引張強度は、割裂引張強度と同等以上となった。
- (2) 上記理由として、引張クリープが微細ひび割れに起因するものとの立場をとると、低い応力履歴を受けたコンクリートは水和による修復作用が影響し、高い応力履歴を受けた場合はその修復作用を上回る微細ひび割れが生じたものと考えられる。
- (3) 自己収縮によるひび割れには、自己収縮ひずみ量の絶対値が影響するだけでなく、特に応力増大に寄与する見掛けのヤング係数が急増する時点以降の、自己収縮ひずみの全自己収縮ひずみに対する割合が影響している可能性を示した。
- (4) 累積引張拘束ひずみと収縮応力の関係より、材齢後半で拘束応力がピークを示した後、応力減少過程の挙動が増大過程と同一曲線状となった場合は、線形クリープの範囲で大きな損傷を受けていない健全な状態であることを示唆している。一方、同一曲線状とならず乖離している場合は、強度低下に繋がる損傷を受けていると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp.97-101，2002
- 2) 早川智浩，許明，佐藤良一，今本啓一：高強度コンクリートラーメンの自己収縮応力 2 次元 FEM 解析，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20，No.2，pp.1027-1032，1998
- 3) 関田徹志：ひび割れ発生条件，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.60-66，2005
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施

- 工指針案・同解説, pp.4-7, 2006
- 5) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書, pp.195-198, 1996
 - 6) 丸山一平, 朴宣圭, 野口貴文：擬似完全拘束下における若材齢高強度コンクリートの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.485-490, 2003
 - 7) 丸山一平：コンクリートのひび割れ抵抗性測定を目的とした疑似完全拘束試験に関する研究, コンクリート工学, Vol. 45, No. 2, pp. 54-57, 2007
 - 8) 橋田浩, 山崎庸行：初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造体の自己収縮応力の算定法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No.537, PP.7-12, 2000.11
 - 9) 狩野敏也, 渡辺博志, 河野広隆：温度ひび割れ評価のためのコンクリートの引張強度特性に関する研究, 土木学会第 50 回年次学術講演会梗概集, pp.732-733, 1995
 - 10) 米田俊一, 竹田宣典, 十河茂幸, 芳賀孝成：各種低熱セメントを用いたコンクリートの伸び特性, 土木学会第 47 回年次学術講演会梗概集, pp.732-733, 1992
 - 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状－付録, pp.94-95, 2003
 - 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp.106-107, 2002
 - 13) 森永繁：ひび割れ抑制技術の現状－対策と効果－, コンクリート工学, Vol.34, No.8, pp.13-20, 1996
 - 14) Kovler, K., Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, Material and Structures, pp.324-330, 1994
 - 15) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書, pp.95-96, 1996
 - 16) 熊野知司, 西林新蔵, 井上正一, 吉野公：コンクリートの空隙構造の変化に基づく引張クリープ予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.613, V-42, pp.121-135, 1999
 - 17) 吉本彰, 長谷川博, 川上正史：引張クリープ機構に関する一研究, セメント技術年報 36, pp.333-336, 1982
 - 18) 根本崇文, 入矢桂史郎, 梅原秀哲：若材齢のクリープがコンクリートの引張破壊に与える影響に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.757-762, 1999
 - 19) 丸山一平, 野口貴文, 朴 宣圭, 岡沢智：引張拘束下におけるセメントの結合水量増大現象に関する考察, セメント技術大会, pp.224-225, 2002

(2007年5月10日原稿受理, 2007年9月4日採用決定)