

論文 高強度コンクリートの自己収縮応力の評価

竹内 良*1・田中 敏嗣*2・佐藤 良一*3・大野 義照*4

要旨：高強度コンクリートの自己収縮が拘束されることによって生じる収縮応力の評価を行うための試験方法の検討を行うとともに、自己収縮に及ぼす材料の影響について調べた。その結果①拘束枠拘束法は、コンクリートと拘束枠の温度差により温度応力が発生するため、拘束枠拘束法では自己収縮応力を適切に評価できない場合がある。②鉄筋拘束法は、コンクリートと鉄筋の温度差の影響を受けにくく、自己収縮応力の評価に適していると考えられる。③鉄筋拘束法での自己収縮応力の評価試験は、拘束鉄筋に異形鉄筋 D32 を使用する場合、その定着長を 60 cm とするのが適切であると考えられる。

キーワード：自己収縮、高強度コンクリート、拘束ひずみ、応力、パイクリング、鉄筋拘束、型枠拘束

1. はじめに

これまで体積変化に起因するコンクリートのひび割れは、主としてコンクリートの乾燥収縮および温度変化により発生すると言われてきた。しかし、高強度コンクリートを用いた構造物においては、さらに自己収縮によるひび割れの可能性が指摘されている[1][2]。高強度コンクリートのような富配合のコンクリートはコンクリート中の粉体量が多くなり、水和組織が緻密化することで、自己収縮が大きくなることが指摘されており[3]、自己収縮による収縮応力およびひび割れについて検討する必要性に迫られている。乾燥収縮および温度変化によって生じるコンクリートのひび割れの評価方法については、既に外部拘束型の拘束ひび割れ試験法が JIS 原案として提案され一般に広く採用されている。しかし、自己収縮によるひび割れ試験方法についての研究は散見されるものの[4][5]、まだ具体的な検討が不十分であると思われる。そこで本研究は、コンクリートの自己収縮によるひび割れ、すなわち、自己収縮応力の評価試験方法について検討を行い、さらに各種要因が自己収縮応力に及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(記号 NC、比表面積 3420 cm²/g)を使用し、細骨材および粗骨材はそれぞれ青梅産硬質砂岩系砕砂(比重 2.60、吸水率 1.65%、粗粒率 2.80)および砕石(比重 2.65、吸水率 0.70%、粗粒率 6.80)を用いた。また、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。また、自己収縮量を変化させるため、鉱物組成の異なる低熱ポルトランドセメント(記号 LC、比表面積 3120 cm²/g)および自己収縮の主因と考えられる毛細管張力を低減可能な有機化合物系の収縮低減剤(記号 TG)を使用した。

*1 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部、工修(正会員)

*2 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部副主任研究員、工修(正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科・建設工学コース、工博(正会員)

*4 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

2. 2 コンクリート配合

コンクリートの配合を表-1に示す。スランブは15~18 cmとなるよう高性能 AE 減水剤量により調節した。また、空気量の目標は $2 \pm 1\%$ とした。

表-1 コンクリートの示方配合

記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			圧縮強度 (N/mm ²)			自己収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)		
		W	C	TG	1日	3日	28日	0.5日	1日	20日
NC750	21.3	160	750	—	23.6	87.7	98.7	570	670	970
NC600	27.5	165	600	—	43.2	80.6	80.4	340	390	660
LC600	27.5	165	600	—	17.8	57.3	89.0	170	240	310
NC600+TG6.0	27.5	165	600	6.0	34.8	81.5	96.0	230	300	460

2. 3 試験項目および試験方法

(1)自己収縮

コンクリートの自己収縮は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法[6]に準じて測定した。

(2)拘束枠拘束試験

「JIS 原案コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」に準拠し、自己収縮応力を測定した。なお、自己収縮応力試験の目的に照し、次の措置をとった[7]。

- ・ 底板にテフロンシートを2重に敷き、若材齢時(材齢1日以内)における底板とコンクリートの摩擦低減を図る。
- ・ 乾燥を防止するため、ポリエステルフィルム(厚さ0.1 mm)を用い、打込み後直ちにコンクリート全体を覆う。

拘束枠のひずみの測定は、曲げの影響を除くため、鋼材の重心位置に対応するようにフランジのウェブ側の端から1.0 cmの距離の部分に貼り付けたポリエステルゲージにより行った。測定されたひずみより、コンクリートの自己収縮応力を計算した。すなわち、鋼材の平均ひずみに鋼材の弾性係数と断面積を掛合わせ、拘束枠に加わっている力を求め、この力をコンクリートの断面積で除してコンクリートの応力を求めた。

また、コンクリートの水和熱による温度上昇が自己収縮応力へ及ぼす影響を調べるため、断面に銅パイプを通し、20℃の水を循環させるパイプクーリングを行った。銅パイプは、FEM 温度解析によるシミュレーションにより、直径2.0 cmで2 cm間隔で2本使用することが適切と判断され、図-1に示すように断面に2箇所配置した。

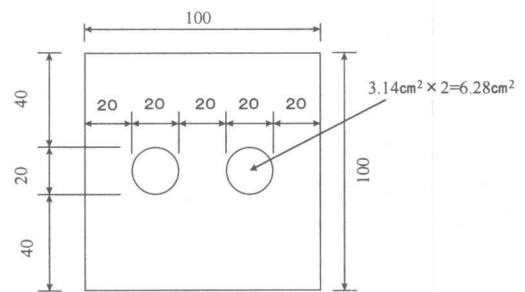


図-1 パイプクーリング試験で用いた銅パイプの位置

(3)鉄筋拘束試験

型枠の形状の一例を図-2に示す。拘束用の鉄筋には異形鉄筋を用いた。鉄筋の中央部の30 cmはリブを除くため削出し加工を施し丸鋼状態とし、必要な定着長を調べるため、定着長は片側30 cm、60 cmおよび90 cmの3水準とした。なお、定着長とは鉄筋両端の削出し加工を施していない部分の長さである。

鉄筋の本数は、定着性能への影響を調べるため4本と1本とし、鉄筋断面積は拘束枠拘束試験における拘束枠の断面積7.94 cm²とほぼ同等となるようにした。すなわち、4本使用の場合、D16

(単位:mm)

を用い、削出し加工部の直径を 15.0 mm(削出し部分の断面積の合計=7.07 cm²)とし、1 本使用の場合 D32 を用い、削出し加工部の直径を 31.0 mmとした(削出し部分の断面積=7.55 cm²)。

供試体中央部では鉄筋が受ける力の不均一性をなくすために、削出し部分にテフロンシート(厚さ 0.1 mm)を 3 重に巻き、コンクリートと鉄筋との間の付着を切った。

鉄筋のひずみは、鉄筋の削出し部中央にポリエステルゲージを対面させて接着し測定した。測定されたひずみより、コンクリートの自己収縮応力を計算した。すなわち、鉄筋の平均ひずみに鋼材の弾性係数と断面積を掛合わせ、鉄筋に加わっている力を求め、この力をコンクリートの断面積で除してコンクリートの応力を求めた。

供試体寸法は拘束鉄筋の長さに応じて 10×10×90 cm、10×10×150 cm および 10×10×210 cm の 3 種類とした。鉄筋拘束試験においても、拘束枠拘束試験と同様の措置をとった。

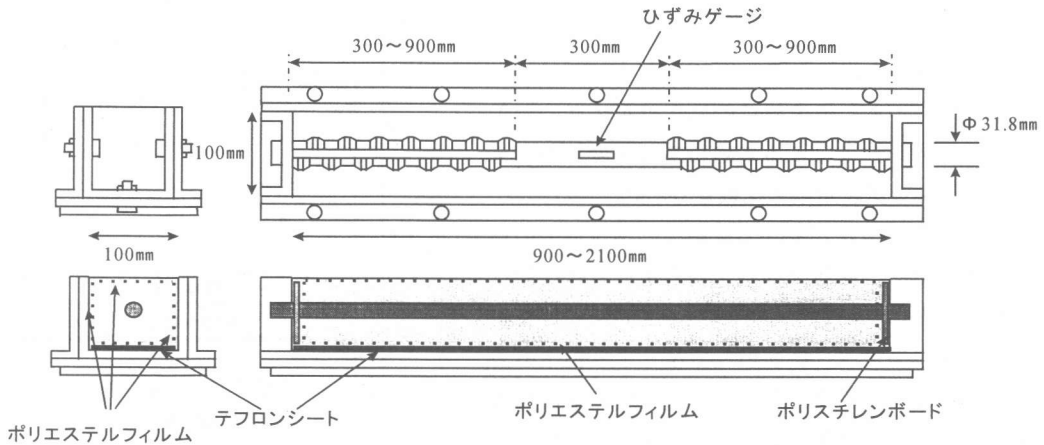


図-2 鉄筋拘束試験型枠の形状 (鉄筋 1 本使用の場合)

3. 実験結果および考察

3. 1 拘束枠拘束試験法におけるコンクリート温度上昇の影響

図-3 および図-4 に、それぞれ単位セメント量 600kg/m³ および 750kg/m³ の場合の拘束枠拘束試験法における拘束応力とコンクリート温度の経時変化を示す。いずれの配合においても凝結始発時間付近から応力が発生しており、始発時間が自己収縮応力の発生時間を概略示すと考えられる。また、拘束応力は、クーリングを行ないコンクリートの温度上昇を抑制した場合、クーリングしない場合と比較して、約 10%程度小さくなっている。また、クーリングの有無に関わらず、温度の上昇とともに拘束応力が大きくなっているが、コンクリート温度が低下した付近から応力の差が認められる。応力の差異が認められた時点の温度と室温との温度差、線膨張係数 (10×10⁻⁶/°C) およびコンクリートの弾性係数を 1.0×10⁴N/mm²[8]と仮定し、温度応力を求めた結果、単位セメント量 600kg/m³ で 0.3N/mm²、750kg/m³ で 0.4N/mm²程度となり実験結果と一致する。つまり、拘束枠拘束試験法では、コンクリートと拘束枠の温度差によって生じる応力(温度応力)によるひずみが測定値に加算されていることを示している。この点から、拘束枠拘束試験法では、温度応力の影響がその機構上必ずはあるため、自己収縮応力を評価する方法としては適していないと思われる。なお、図-4 の材齢 2~3 日における拘束応力の急激な減少はひび割れ発生によるものである。

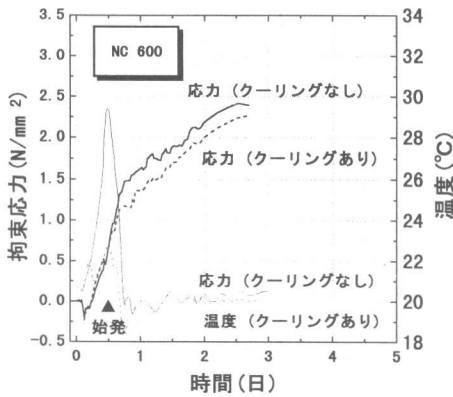


図-3 拘束応力の経時変化(NC600)

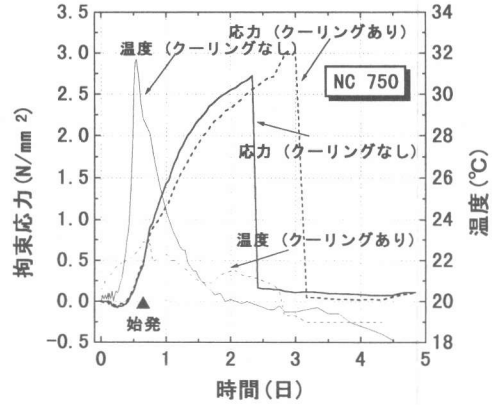


図-4 拘束応力の経時変化(NC750)

3. 2 拘束方法の影響

コンクリートと拘束鋼材の温度差が小さいと考えられる鉄筋拘束による試験結果と温度差の大きい拘束枠拘束試験結果の比較を行った。

図-5 に拘束方法が異なる試験体の拘束応力の経時変化を示す。鉄筋比はいずれの場合もほぼ同一であるにもかかわらず、クーリングのない拘束枠拘束試験の場合は、鉄筋拘束の場合より拘束応力が大きくなっている。これは、前述のように拘束枠拘束の場合、コンクリートと拘束枠の温度差による応力が加わっているためと考えられる。

一方、鉄筋拘束した場合の拘束応力は、クーリングした拘束枠拘束法の拘束応力と近似している。これは、鉄筋拘束の場合、拘束応力に影響を及ぼすコンクリートと拘束鋼材の温度差が小さいことを示している。

以上より、鉄筋拘束法は、コンクリートと拘束鉄筋との温度差による応力の発生が少なく、自己収縮応力を評価するのに適した方法と考えられる。また、拘束枠拘束試験法で自己収縮応力を評価する際には、コンクリートの温度上昇を抑制し、温度応力の影響を取り除く必要がある。

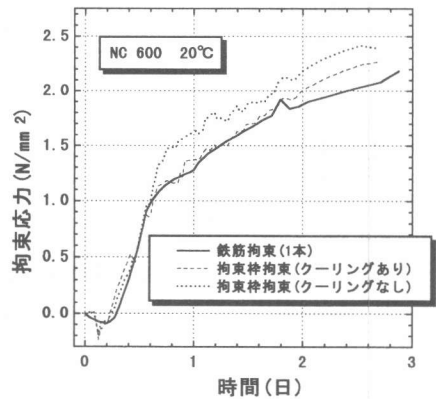


図-5 拘束方法が拘束応力に及ぼす影響

3. 3 鉄筋拘束法における鉄筋本数の影響

図-6 に鉄筋拘束法において鉄筋4本用いた場合(鉄筋の定着長 30 cm)の鉄筋ひずみの経時変化を示す。3つの試験体のうち1体(No.1)では、平均値が 120×10^{-6} 程度となったが、他の2体では、材齢10日における最終ひずみが平均 140×10^{-6} 程度となっている。

図-7 に鉄筋拘束法において鉄筋1本用いた場合(鉄筋の定着長 30 cm)の鉄筋ひずみの経時変化を示す。試験体3体の間のばらつきは小さく、最終ひずみは平均 140×10^{-6} 程度であり、鉄筋4本の場合とほぼ同じである。

定着部分の鉄筋の表面積は、鉄筋4本の方が広いが、鉄筋を1本用いた場合でも4本用いた場合と鉄筋ひずみはほぼ同じで、同程度の定着性能が得られており、計測の容易さなども考慮し、鉄筋1本を用いる方法が実用的と思われる。

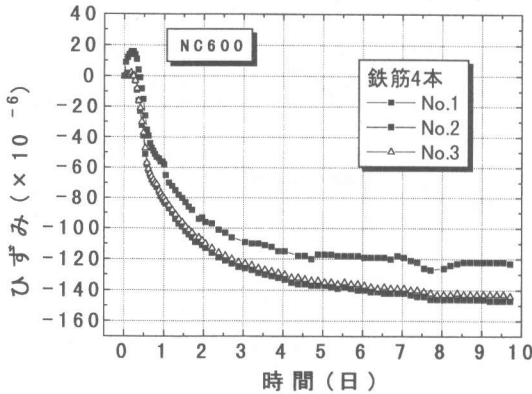


図-6 鉄筋拘束法における鉄筋ひずみの経時変化 (D16を4本使用)

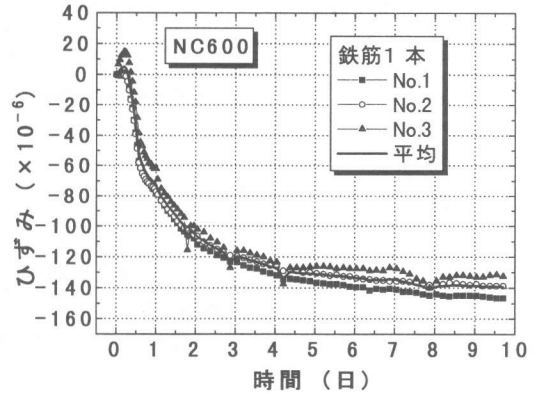


図-7 鉄筋拘束法における鉄筋ひずみの経時変化 (D32を1本使用)

3. 4 鉄筋拘束法における定着長の影響

図-8 に鉄筋拘束法の鉄筋の定着長の異なる試験体（鉄筋 1 本）における鉄筋ひずみの経時変化を示す。この図より、定着長 30 cm の場合と比較して、定着長 60 cm および 90 cm の場合の方が約 10% 程度ひずみが大きくなっていること、また、定着長 60 cm の場合と 90 cm の場合を比較した場合、両者の鉄筋ひずみやコンクリート応力はほぼ同等であることが認められる。以上より、十分な定着を得るための定着長は、異形鉄筋 D32 の場合、60 cm 程度であればよいと考えられる。したがって、自己収縮応力の評価試験は、拘束鉄筋に異形鉄筋 D32 を使用する場合、その定着長を 60 cm とする鉄筋拘束法が適切であると考えられる。(図-2 参照)

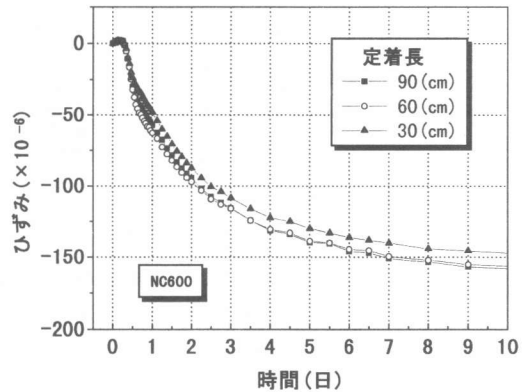


図-8 拘束ひずみに及ぼす鉄筋の定着長の影響

3. 5 各種配合の自己収縮応力

図-9 および図-10 に、それぞれ使用材料の異なる自己収縮ひずみおよび拘束応力（鉄筋 1 本、定着長 60 cm）の経時変化を示す。同一の単位セメント量の場合、自己収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート (NC600) よりも収縮低減剤を添加したコンクリート (NC600+TG6.0) の方が材齢 28 日で約 25%、低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート (LC600) で約 52% 低下した [9]。また、拘束応力においても、NC600 と比較した場合、NC600+TG6.0 で約 21%、LC600 で約 70% 低下した。以上の結果から、本試験法によれば、幅広い範囲で自己収縮応力の測定が可能と思われる。

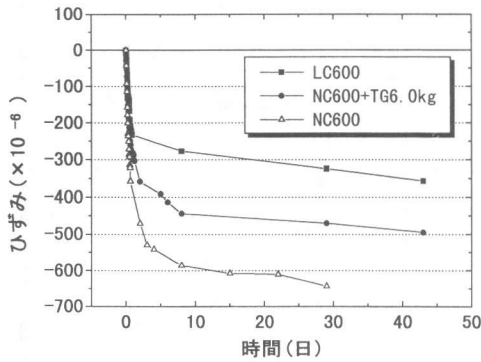


図-9 自己収縮ひずみに及ぼす材料の影響

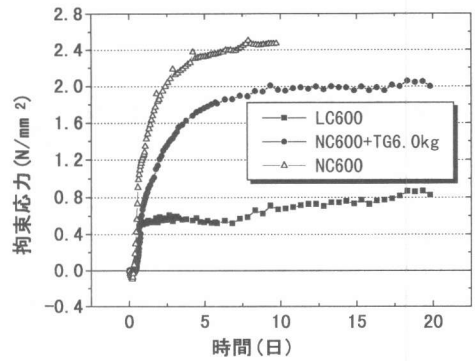


図-10 拘束応力に及ぼす材料の影響

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) JIS 原案に代表される拘束棒拘束法は、拘束棒の温度がコンクリートの温度と一致しないため、コンクリートと拘束棒の温度差により温度応力が発生する。したがって、拘束棒拘束法では自己収縮応力を適切に評価できない場合がある。
- (2) 鉄筋をコンクリート内部に埋め込む鉄筋拘束法は、鉄筋の温度がコンクリートの温度に追従し、コンクリートと鉄筋の温度差の影響を受けにくい。したがって、鉄筋拘束法は自己収縮応力の評価に適していると考えられる。
- (3) 鉄筋拘束法による自己収縮応力の評価試験は、拘束鉄筋に異形鉄筋 D32 を使用する場合、その定着長を 60 cm 程度とする鉄筋拘束法が適切であると考えられる。
- (4) 単位セメント量が同一の配合条件の場合、収縮低減剤および低熱ポルトランドセメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより自己収縮応力を低減できる。

付記：なお、本研究において、実験、解析等については筆者らが実施したものであり、その内容については、自己収縮研究委員会報告書[10]の中で概要を報告した。

参考文献

- [1] E. Tazawa, Y. Matsuoka, S. Miyazawa, S. Okamoto : Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Int. RILEM Sym. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, pp.221-228, 1994
- [2] 今本啓一、大谷博、藤巻敏之：超高強度コンクリートの諸物性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、A-1、pp273-278, 1994
- [3] 田澤栄一、宮沢伸吾、佐藤剛、小西謙二郎：コンクリートの自己収縮、コンクリート工学年次論文集、Vol.14, No1, pp561-566, 1992
- [4] 吉田智則、城安市、北山大八：各種セメントペーストの自己収縮にもとづく内部応力に関する研究、セメント・コンクリート論文、No.48, pp274-279, 1994
- [5] 筒井英之、佐藤良一、許明：高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討；第 50 回セメント技術大会講演要旨、pp206-207, 1996
- [6] 委員会報告「自己収縮研究委員会報告」、コンクリート工学年次論文集、Vol.18, No.1, pp29-38, 1996
- [7] 竹内良、田中敏嗣、岡本享久：ハイライトセメントを用いた高強度コンクリートの自己収縮応力とひび割れ抵抗性、日本建築学会学術講演梗概集、A-1、pp807-808, 1996
- [8] 新開千弘、十河茂幸：超若材齢時におけるコンクリートの強度・変形特性、セメント技術年報、No40, pp261-264, 1986
- [9] 近松竜一、竹田宣典、鎌田文男、十河茂幸：結合材の種類がコンクリートの硬化収縮に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.15, No1, pp543-548, 1993
- [10] 「自己収縮研究委員会報告書」、(社)コンクリート工学協会、pp82-90、1996.11