

膨張コンクリートの体積膨張率が及ぼす力学的特性

宮崎大学	正会員	博士 (工学)	○ 李 春 鶴
NPO 法人 持続可能な社会基盤研究会	名誉会員	工学博士	辻 幸 和
デンカ (株)		博士 (工学)	栖原 健太郎

Abstract : Some relationships between the volume expansive strain and compressive strength or flexural strength of uni-axially restrained expansive concrete are proposed to estimate properly the strength reduction and the Young's modulus reduction due to large expansion. Degree of restraint were changed at one day age by mechanically pre-stressed 4 levels and were set freely at seven days age. A limit volume expansive strain is defined at the volume expansive strain of expansive concrete when the mechanical property reduction is started due to large expansion. The limit volume expansive strain is defined as an addition of uni-axially restrained expansive strain and two times of transferred expansive strain. The limit volume expansive strain becomes larger as an elapse of age is progressed and the limit volume expansive strain of compressive strength is larger than one of Young's modulus. The compressive and flexural strength reduction of expansive mortar with 3 types of portland cement is estimated totally by the volume expansive strain at each age.

Key words : Expansive concrete, Volume expansive strain, Compressive and Flexural strength, Young's modulus

1. はじめに

膨張コンクリートをコンクリートの収縮補償を目的として利用するのであれば、コンクリートの膨張率が小さいため、強度とヤング係数などの力学的特性は低下せず、膨張材を混和しない普通コンクリートとほとんど同じであると考えてよい。別な言い方をすれば、力学的特性が低下しない範囲でもっとも大きな膨張率が、コンクリートの収縮補償を目的とする場合の限界値であるといえる。またケミカルプレストレスングを目的とした膨張コンクリートは、拘束を与えずに自由膨張させると、力学的特性を低下させることになる。そのため、ケミカルプレストレスの導入のみならず、力学的特性の視点からも、拘束の方法および拘束の程度が重要な要因となる。

これまでに多くの力学的特性に及ぼす要因の種類と程度が報告されている^{1)~9)}。そして、自由膨張率、拘束膨張率と関連させて実験値が整理されているものの、実用上有用な指標が確立されていない。

本稿では、自由膨張させた供試体、拘束の程度を機械的なプレストレスを変えて一軸方向に拘束した供試体、そしてその拘束を解除した供試体の膨張率と圧縮強度およびヤング係数または曲げ強度について、膨張材を用いない普通コンクリートと比較した実験結果を報告する。そして、拘束方向の膨張率だけでなく、それに直角な方向の膨張率も含めた体積膨張率によれば、力学的特性の低下を総合して評価できることを提案する。

2. 使用材料、配合および供試体

膨張材はエトリンナイト系を用いた。またセメントは早強ポルトランドセメントを主体に用いたが、モルタルには、普通ポルトランドセメントと超早強ポルトランドセメントも用いた。骨材は、富士川産の川砂および川砂利を用いた。川砂は、密度が $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率が 3.03 であった。川砂利は、最大寸法が 25mm で、密度が $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率は 6.93 であった。コンクリートの配合は、単位水量を $173\text{kg}/\text{m}^3$ 、水結合材比を 38.5% (単位結合材量は $450\text{kg}/\text{m}^3$)、細骨材率を 36%とした。そして、スランプは $5\pm 1\text{cm}$ 、空気量は $1.5\pm 1.0\%$ と

した。膨張材は、セメントと置換して0、15、20%の3種類に変化させて用いた。

モルタルの配合は、砂結合材比が2.0、水結合材比が48.5%で、膨張材の置換率は0、13%、15%の3種類に変化させた。

コンクリートの供試体は、断面が150mm×150mmで、長さが500mmの膨張コンクリートを、断面中心に径が35mmのシースの中に呼び名が17mmのPC鋼棒を設置して、両ナットと端板により軸方向に膨張を拘束させたものである。拘束鋼材比が1.06%で、端板の厚さは30mmとした。

PC鋼棒の中央にゲージ長が6mmのワイヤストレインゲージを貼付して、膨張率を材齢1日より測定した。またコンクリート表面の膨張率は、コンタクトゲージで測定した。コンタクトゲージの標点は、図-1に示すように片側面とした。ゲージ長は、拘束の軸方向では200mm、拘束直角方向では100mmとした。なお、コンクリートの供試体の打込み前の状況を示す写真-1のように、片面のゲージの標点を図-1より少なくして両側面に設置し、両側面の平均値としたものもある。

モルタルは、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法)の強さ試験に従って40mm×40mm×160mmの供試体を用いて、曲げ強度と圧縮強度を求めた。軸方向の膨張率は、ゲージ長が100mmのコンタクトゲージで、材齢1日で脱型した後に測定した。供試体は、20±1℃の水中養生を行った。

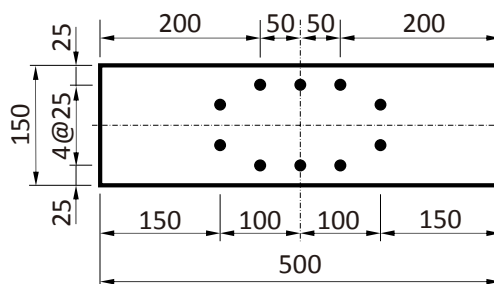


図-1 コンクリート表面の膨張率の測定位置 (片側面にゲージの標点を設置)

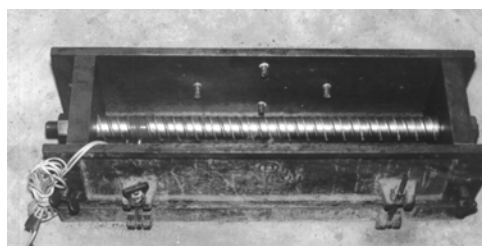


写真-1 PC鋼棒およびシースを配置した型枠

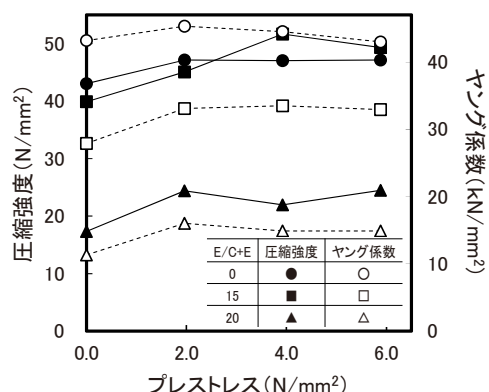


図-2 圧縮強度およびヤング係数に及ぼす機械的プレストレスの影響

3. 機械的プレストレスが及ぼす力学的特性

一軸方向に拘束する拘束鋼材比を変化させる代わりに、材齢1日に導入する機械的プレストレスの値を変えて膨張させた場合の力学的特性を、図-2に示す。なお、図中の記号E/C+Eは膨張材の置換率を示している。材齢1日において、それまでに導入された0.1N/mm²のケミカルプレストレスに加えて、呼び名が17mmのPC鋼棒を緊張して、0、2.0、4.0および6.0N/mm²程度の機械的プレストレスを加えて拘束の程度を変化させた後、20℃の水中養生を行った。そして材齢36日において拘束を取り除き、直ちに拘束していた方向に載荷した結果である。

材齢初期に機械的プレストレスを2.0N/mm²与えた膨張コンクリートは、圧縮強度およびヤング係数とともに改善されることが認められる。しかしながら、機械的プレストレスを2.0N/mm²から6.0N/mm²に増加して、拘束方向のコンクリートの膨張率を、たとえば膨張材の置換率が20%の場合の2200×10⁻⁶から670×10⁻⁶に減少させても、圧縮強度およびヤング係数ともにほぼ一定の値を示しているのである。一軸拘束の程度を増加させ、膨張コンクリートの力学的特性を改善するには限度があることを、この実験結果は示唆している。

なお、膨張材の置換率が15%の場合、圧縮強度は膨張材の使用によって低下していないが、ヤング係数は低下している。20%の置換率では、圧縮強度も低下しているが、ヤング係数ほどは低下していない。

4. 拘束膨張率と力学的特性

一軸拘束方向のコンクリートの膨張率と圧縮強度およびヤング係数との関係を、図-3に示す。図-3から、同じ拘束膨張率が生じて、圧縮強度およびヤング係数は膨張材の量によって異なること、また、同じ膨張材量のコンクリートの場合に、拘束膨張率が4倍程度に増加しても、圧縮強度およびヤング係数はともにほとんど一定になっている拘束膨張率の範囲があることが認められる。このように、拘束方向のコンクリートの膨張率と圧縮強度およびヤング係数との間には、あまり相関性は認められないのである。

図-4は、拘束直角方向の膨張率と圧縮強度およびヤング係数との関係を示す。拘束方向の膨張率よりは、良い関連性が認められるが、拘束方向の膨張率が及ぼす影響を考慮していないため、まだ充分でないと考えられる。

5. 体積膨張率の導入

膨張コンクリートの力学的特性に及ぼす膨張率としては、拘束方向の膨張率 ϵ_l だけでなく、拘束直角方向の膨張率 ϵ_t をも考慮した体積膨張率 $\epsilon_l + 2\epsilon_t$ が適切であると考えた。図-3の拘束方向の膨張率と図-4の拘束直角方向の膨張率の代わりに、体積膨張率で整理し直したのが、図-5である。

図-5で示されるように、体積膨張率で表せば、圧縮強度およびヤング係数は、膨張材の置換率にかかわらず、ほぼ一直線上にプロットされている。また、この直線と膨張材を用いない普通コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の値を水平に延ばした線とが交わる点の体積膨張率が、膨張材を用いても力学的特性が低下しない限界値と考え、限界体積膨張率と名付ける。

そして、限界体積膨張率は、ヤング係数に比べて圧縮強度の場合に大きくなっていることが認められる。前述した、圧縮強度の低下がない膨張コンクリートでもヤング係数が小さくなる現象は、膨張コンクリートのヤング係数の限界体積膨張率が圧縮強度に比べて小さいためであると言えられるのである。

6. 材齢が異なる体積膨張率と力学的特性の関係

6.1 自由膨張させたモルタルの体積膨張率と強度

自由膨張させた膨張モルタルの圧縮強度について膨張材を用いない普通モルタルの圧縮強度で除した圧縮強度比が、材齢の経過とともにどのように変化するかを示したのが、図-6である。図-7は、曲げ強度比の経時変化について、図-6と同様に示している。水和反応速度の異なる3種類のポルトランドセメントを用いて、膨張材の置換率を13%と15%に変化させている。

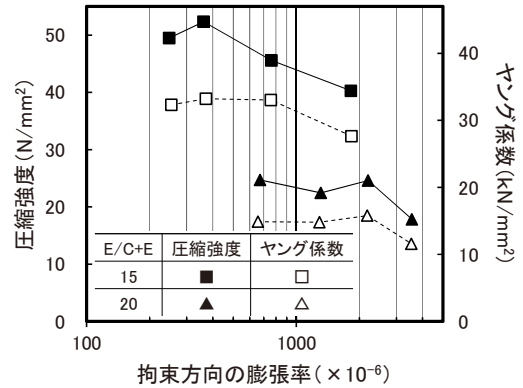


図-3 拘束方向の膨張率と圧縮強度およびヤング係数との関係

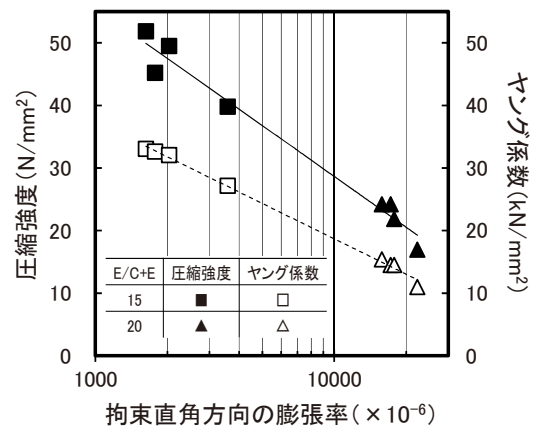


図-4 拘束直角方向の膨張率と圧縮強度およびヤング係数との関係

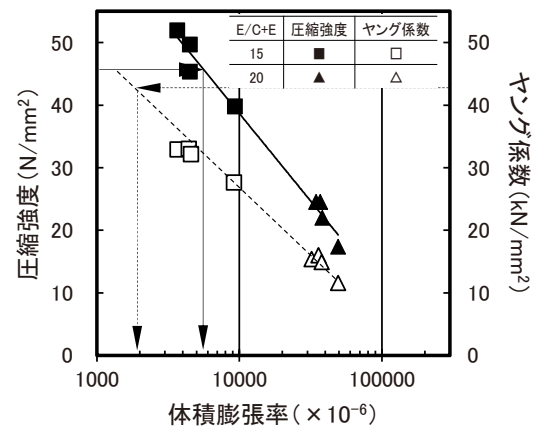


図-5 体積膨張率と圧縮強度およびヤング係数との関係

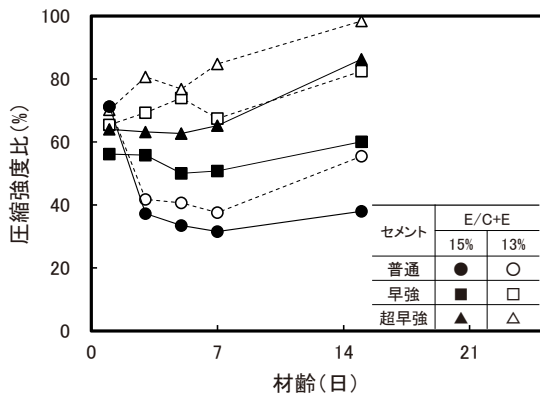


図-6 異なるセメントの圧縮強度比の経時変化

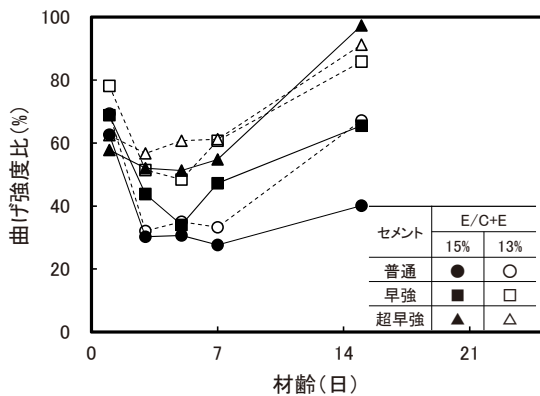


図-7 異なるセメントの曲げ強度比の経時変化

膨張モルタルは、一般に膨張作用の著しい材齢 7 日までは強度増加が少なく、強度比も減少している。そして、その後材齢 7 日から 15 日までの間は、強度が回復して強度比も増加していることが認められる。このような現象は、膨張材の置換率だけでなく、セメントの種類にかかわらず認められる。そして、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメントの順番で、膨張率が少ないため、膨張材の多量使用による強度低下は、3 種類のポルトランドセメントのうち、超早強ポルトランドセメントを用いた膨張モルタルが一番小さくなっている。なおこのような現象は、圧縮強度試験と同時に試験した図-7 に示す曲げ強度比についても、同様に認められている。

このような圧縮強度比と曲げ強度比の現象は、図

-8 に示すモルタルの自由膨張性状によって説明できる。すなわち、膨張材の置換率が 13%および 15%のいずれの膨張モルタルについても、各材齢における自由膨張率は、普通ポルトランドセメントを用いたモルタルが大きく、早強ポルトランドセメントから超早強ポルトランドセメントを用いた膨張モルタルへと小さくなっているのである。これは、材齢初期に強度の増進が大きいと、膨張を拘束する程度が大きくなるためと推測される。

膨張モルタルの圧縮強度比を、体積膨張率と対比して示したのが図-9 で、曲げ強度比を体積膨張率と対比して示したのが図-10 である。いずれも、自由膨張であるため、体積膨張率は自由膨張率の 3 倍とし、材齢

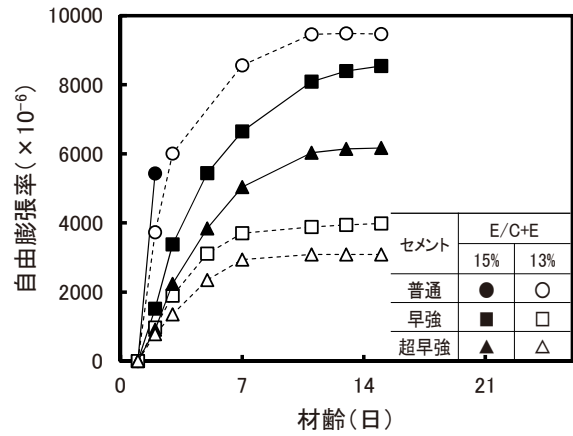


図-8 セメントの種類が自由膨張性状に及ぼす影響

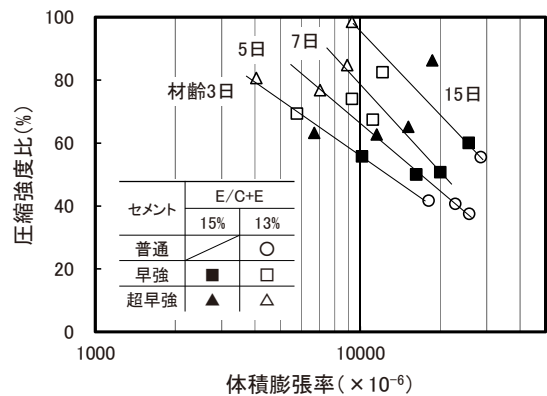


図-9 異なるセメントの膨張モルタルの体積膨張率と圧縮強度比との関係

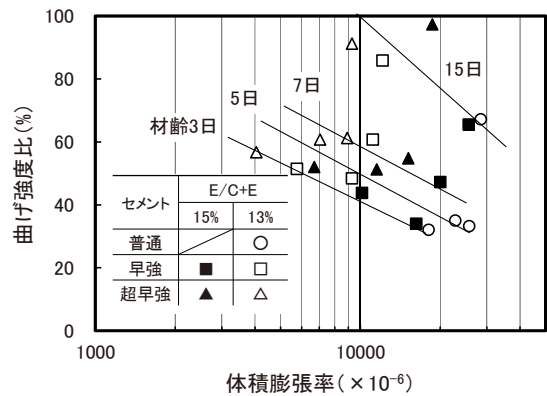


図-10 異なるセメントの膨張モルタルの体積膨張率と曲げ強度比との関係

をパラメータにとっている。図-9, 図-10 では, 水和反応速度の異なる3種類のポルトランドセメントの圧縮強度比と曲げ強度比が同じ直線状に表せている。すなわち, 体積膨張率と圧縮強度比および曲げ強度比との関係は, 膨張材の置換率だけでなく, セメントの種類にもかかわらず, 各材齢について, それぞれ直線関係を示すことが認められるのである。そして, これらの直線を延長して, 圧縮強度比と曲げ強度比が100%の水平線と交わる体積膨張率が, 圧縮強度と曲げ強度の低下が生じない限界体積膨張率である。この限界体積膨張率は, 材齢の経過に伴って, 大きい値となっていることが認められる。

6.2 一軸拘束の有無に伴う体積膨張率と曲げ強度

断面が 150×150mm で, 長さが 500mm の, 拘束鋼材比が 1.06%の一軸拘束供試体を, 材齢 7 日において拘束を取り除いて直ちに載荷して求めた場合, その後材齢 14 日と材齢 36 日まで自由膨張させて求めた場合および材齢 36 日まで一軸拘束を継続した後, 拘束を取り除いて直ちに載荷して求めた場合におけるそれぞれの曲げ強度を示したのが, 図-11 である^{9),10)}。図-11 において, 一軸拘束を取り除いて自由膨張させたケースに着目すると, 膨張率の置換率が 15%および 20%のいずれの場合においても, 材齢7日に比べて材齢14日では, 曲げ強度が一時低下するものの, 材齢 36 日においては強度が回復して, ほぼ等しい値またはそれ以上の強度になっていることが認められる。つまり, 図-12 に拘束方向の膨張率の材齢に伴う変化を示すように, 拘束を取り除いて, たとえば材齢 7 日から 36 日までに拘束していた方向に 2500×10^{-6} から 8500×10^{-6} と, 大きな膨張率を生じている。その間に, 図-12 には示していないが, 拘束していた方向に直角な方向に 5100×10^{-6} から 13800×10^{-6} と, 拘束していた方向よりも大きな自由膨張率が生じた。このように大きな自由膨張をさせても, 図-11 からは強度の低下が生じない場合が示される。そして, 材齢 36 日まで継続して拘束し, 拘束方向に 2000×10^{-6} から 2500×10^{-6} に, それに直角な方向に 4900×10^{-6} から 6750×10^{-6} まで材齢 7 日から膨張させたにもかかわらず, 図-11 に示したように曲げ強度が大きくなっていることも, 明瞭である。

図-13 は, 拘束方向だけでなく, 拘束直角方向の膨張率も加味した体積膨張率と図-11 に示した曲げ強度との関係を求めたものである。膨張材の置換率にもかかわらず, 材齢 7 日で拘束を解除して自由に膨張させると, 体積膨張率も増加して, 曲げ強度が低下している。そして材齢 36 日における曲げ強度は, 体積膨張率は増加しているにもかかわらず, 曲げ強度は増加しているのである。そして, 一軸拘束を継続したものと拘

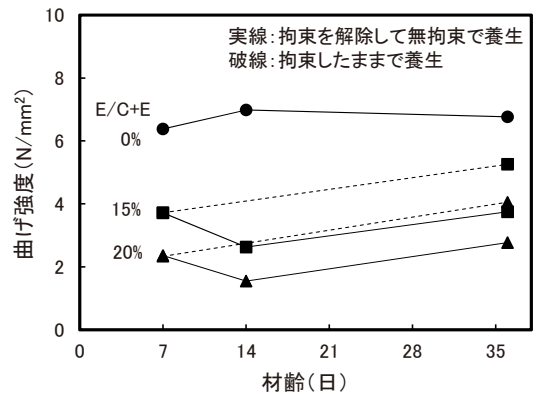


図-11 外的一軸拘束を受けた膨張コンクリートの曲げ強度の経時変化

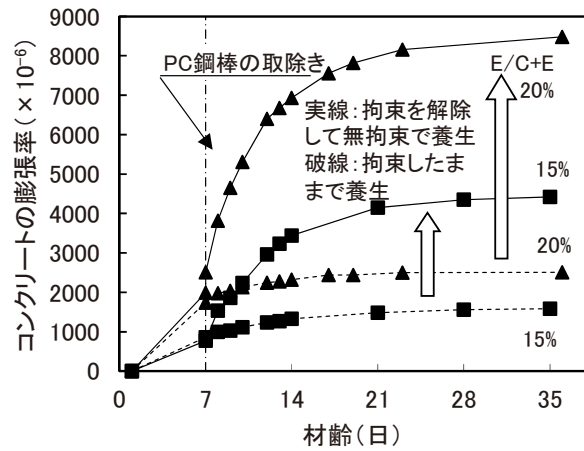


図-12 一軸拘束状態と拘束解除後の膨張コンクリートの拘束方向の膨張性状

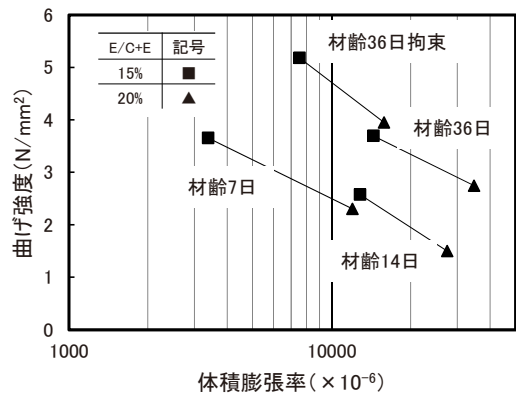


図-13 体積膨張率と曲げ強度の関係

束を解除して自由膨張させたものもほぼ同じ直線状で示すことができるのである。

以上のように、膨張コンクリートの力学的特性に及ぼす膨張が生じている材齢の影響についても、体積膨張率または限界体積膨張率の概念を用いることで、前述したように、説明できるのである。実験の範囲が限られているため、明確なことはいえないが、膨張コンクリートの力学的特性を解明するために、体積膨張率は有力な概念であると考えられる。

なお、これまで示した体積膨張率は、材齢1日を基長としている。実際に生じている体積膨張率は、材齢1日までのものが含まれて、もう少し大きな値となる。すなわち、図-5、図-9、図-10、図-13で示した直線はもう少し右側へ移動し、限界体積膨張率ももう少し大きな値となるのである。材齢1日までの体積膨張率をも考慮して、膨張コンクリートの力学的特性を検討する必要があるが、設計においては、材齢1日を基長にした体積膨張率を用いて力学的特性を安全側に設定することができるので、実用上は支障ないものと考えられる。

7. おわりに

本稿では、自由膨張させた供試体、拘束の程度を機械的なプレストレスを変えて一軸方向に拘束した供試体、そしてその拘束を解除した供試体の膨張率と圧縮強度およびヤング係数または曲げ強度について、膨張材を用いない普通コンクリートと比較した実験結果から、体積膨張率によりこれらの力学的特性を対比して示し、限界体積膨張率を基準にすれば、過大な膨張による力学的特性の低下を総合して評価できることを提示した。なお体積膨張率は、一軸拘束方向の膨張率に、それに直角な方向の膨張率を2倍にして累加したものであり、自由膨張させた場合は、自由膨張率の3倍で表示するものである。

本報告が、今後の膨張コンクリートの用途の拡大において基礎となり、積極的にケミカルプレストレスングを導入するに際して、過大な膨張を生じる各種の拘束を受けた膨張コンクリートの力学的特性の解明に参考になれば、幸甚である。

参考文献

- 1) 國分, 鈴木, 辻: 一軸拘束によるコンクリートのケミカルプレストレスングに関する基礎研究, 土木学会第26回年次学術講演会講演概要集, V-101, 1971年10月
- 2) 岡村, 辻, 後藤: 一軸拘束を受ける膨張コンクリートの強度, コンクリート工学年次講演会講演論文集, 第1回, 1979年
- 3) 岡田, 平沢, 陳: 膨張セメントコンクリートのセルフプレストレスおよびクリープに関する一実験, 土木学会論文報告集, 第223号, 1974年3月
- 4) 長瀧, 米山, 飯田: 化学的プレストレスの導入に関する基礎研究, セメント技術年報, Vol. 22, 1968年
- 5) 長瀧, 米山, 後藤, 八巻: 拘束を受けた膨張セメントコンクリートの基礎的性状, セメント技術年報, Vol. 24, 1970年
- 6) 戸川, 荒木: 膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研究, プレストレストコンクリート, 1972年4月
- 7) 長瀧, 米山: 膨張セメントコンクリート舗装に関する研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972年10月
- 8) Bertero, V. and Polivka, M.: Effect of Degree of Restraint on Mechanical Behavior of Expansive Concrete, Proc. of ASTM, Vol. 64, 1964年
- 9) 辻: 一軸拘束を受けた膨張コンクリートの力学的特性, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp. 149~155, 1986年8月
- 10) 辻, 栖原: 各種拘束を受けた膨張コンクリートの曲げ強度, 割裂引張強度および圧縮強度特性, コンクリートテクノ, Vol. 36, pp. 34-41, No. 3, 2017年