

膨張コンクリート

2020年4月 岡村 甫 記

はじめに

膨張コンクリートに関して研究を続けている間に、膨張コンクリートはひびわれが発生し易いコンクリートの欠点を改善する材料として極めて有効なものと確信するに至り、多くの論文でそのことを記して来ました。ところが、このコンクリートの真の姿を多くの方々に理解して頂けなかったように思われ、そのことが気になっていました。今までの研究を整理してみると、このコンクリートに関する私達の論文は特に分かりにくいことをあらためて認識させられました。このコンクリートは、普通のプレストレストコンクリートの常識を持って対すると誤解してしまう特性を持っています。そのことを認識している人は極めて少ないのが実情です。そこで、私が考えていたことを含めて、なぜこのコンクリートがひびわれ発生に対して、通常考えている以上に有効であるかを丁寧に書くことが重要であると思いうに至りました。

特徴

通常のコンクリートは、硬化過程において収縮することが宿命とされており、そのためにひび割れが発生し易くなるのが欠点の一つとなっています。これに対して、膨張コンクリートは、硬化過程で膨張することを唯一最大の特徴とする材料です。したがって、この特徴をうまく利用することができれば、コンクリートの欠点が補えます。それでは、一体どの位膨張するのでしょうか。

図1は、膨張コンクリートが自由に膨張する際の膨張率（これを自由膨張率と呼んでいます）を時間の経過とともに記したものです<1>。膨張材という混和材の使用量を多くすれば、いくらでも大きな膨張率を得ることができるといっても過言ではありません。しかし、あまり大きな膨張をすれば、コンクリート自身を傷め、極端な場合には自己崩壊してしまいます。また、膨張は材齢のごく初期に大きく、その増加の割合は時間の経過と共に急激に減少します。

図1には軸方向に鋼材を配置することによって、その膨張を拘束した場合の膨張率を点線で示しています。断面の1%程度の鋼材を配置することによって、膨張率が著しく小さくなります。また、材齢7日以降の増加はほとんど認められません。このように比較的小さな拘束に打ち勝って膨張するのすら結構難しいことが分かります。こ

のことが膨張コンクリートの特徴といえます。すなわち、膨張を拘束する際には、鋼材も伸びる必要があり、その反作用として、コンクリートには圧縮応力が作用しますが、その大きさはあまり大きくはならないのです。したがって、膨張コンクリートによって発生するプレストレスは、通常のプレストレスコンクリートに導入されるプレストレスよりも一般に一桁小さいのです。

そのために、プレストレスコンクリートの常識で考えると、その効果は、クリープと乾燥収縮によって無くなってしまふと考えがちですが、それがそうではなく、実はコンクリートのひびわれ発生に対する抵抗性の増加に極めて有効なコンクリートです。

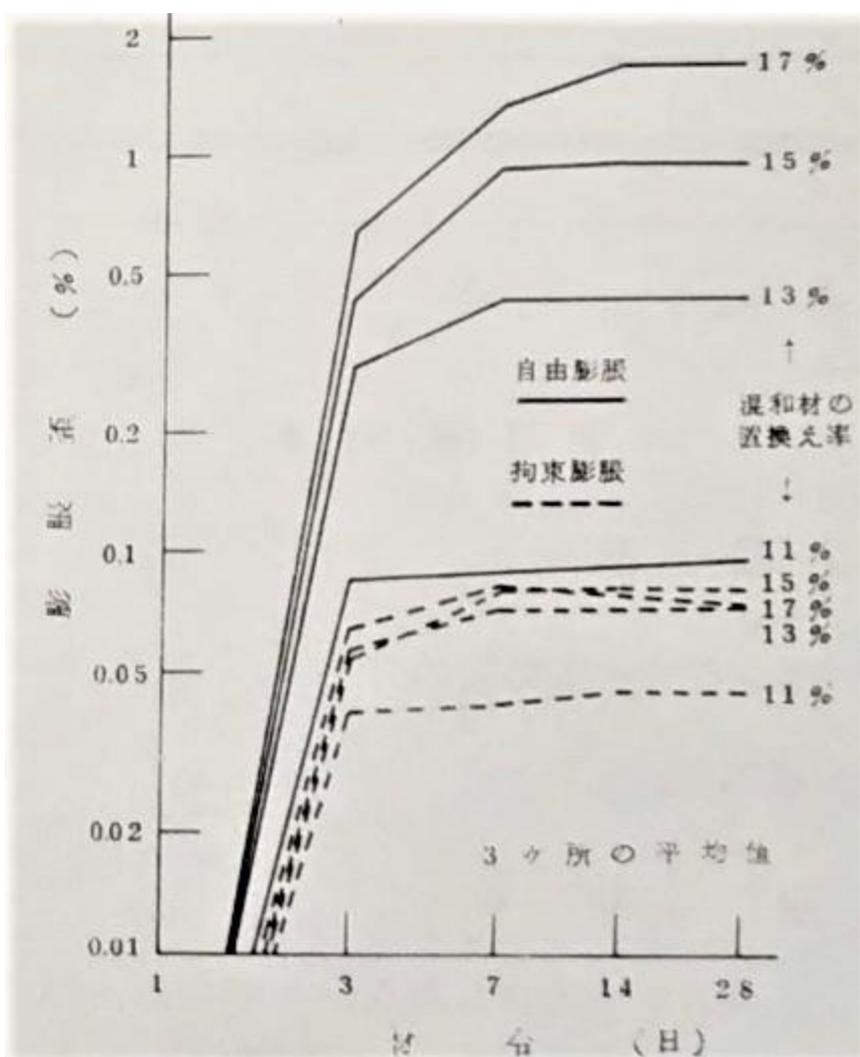


図1 膨張ひずみと混和材率<1>

図2は、材齢28日における膨張コンクリートの自由膨張率と圧縮強度との関係を示したものです。膨張率が小さい場合には通常のコンクリートとあまり変わらない強度ですが、膨張率が1,000 μ を越えると、強度低下が始まり、10,000 μ にもなるとほとんど

強度がなくなります。セメントの種類や単位セメント量が異なる場合にも、ほぼ同じことが認められています。

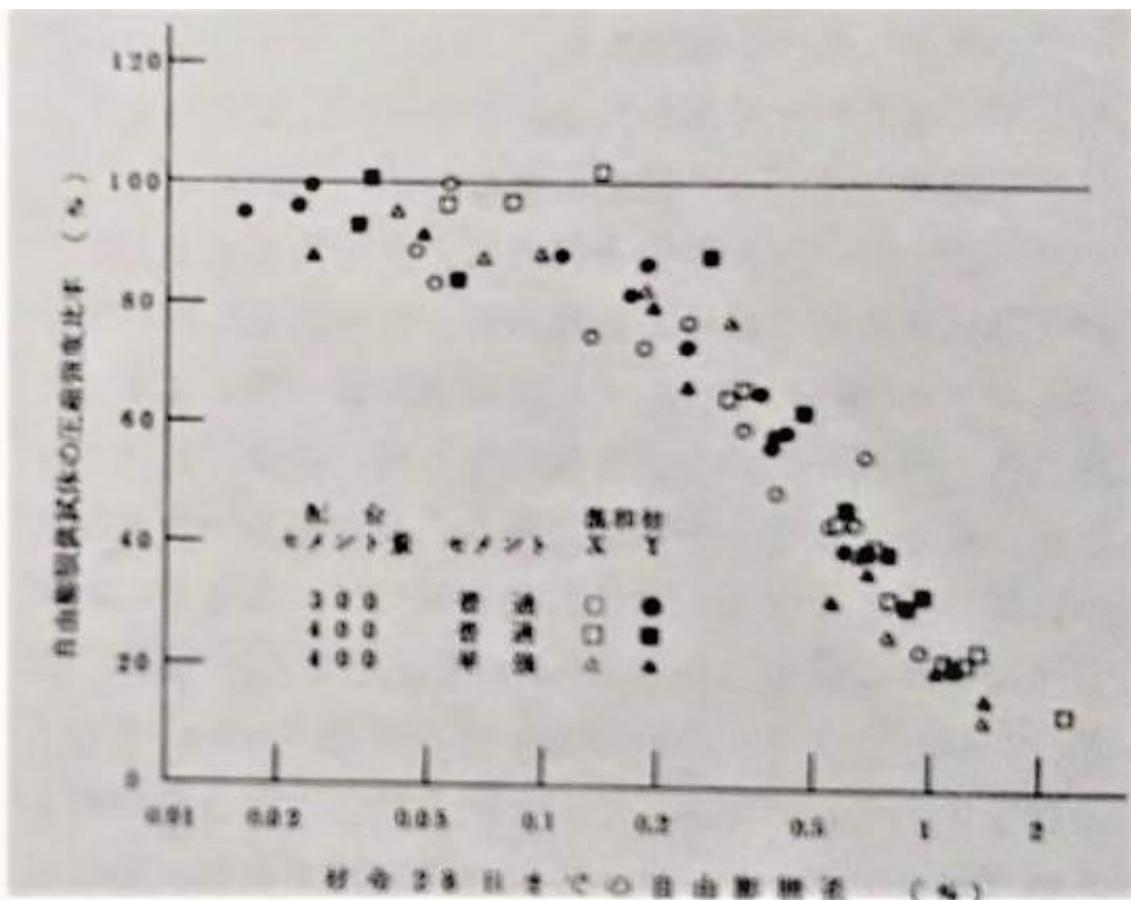


図2 自由膨張率と圧縮強度比<1>

膨張コンクリートの場合にも、セメントが水と反応すると幾分収縮します。膨張材が水と反応すると膨張しますので、その周りにあるセメント硬化体と骨材とが一体となったもの(これがほとんどの体積を占めています)を押し広げ、コンクリート全体としてこのような大きな膨張を示すのですから、コンクリート自身は相当に傷んでいるといっても差し支えないでしょう。しかし、膨張率が小さい場合には、その傷は小さく、その傷を癒すように析出物が発生してくれるようです。あまり大きな膨張とすることは好ましくないといえます。

膨張コンクリートが拘束のない状況で膨張する場合に強度低下が認められる場合でも、その膨張を多少拘束してやると、強度低下が大幅に緩和されます。図3は、図2のコンクリートを通常のコンクリート強度試験用の型枠に入れたままで、養生した結果を示したものです。拘束のない場合には、ほとんど強度がなくなるような場合でも、少なくとも80%以上の強度は確保されています。すなわち、大きな膨張を与える場合には、その膨張を拘束することが極めて重要です。

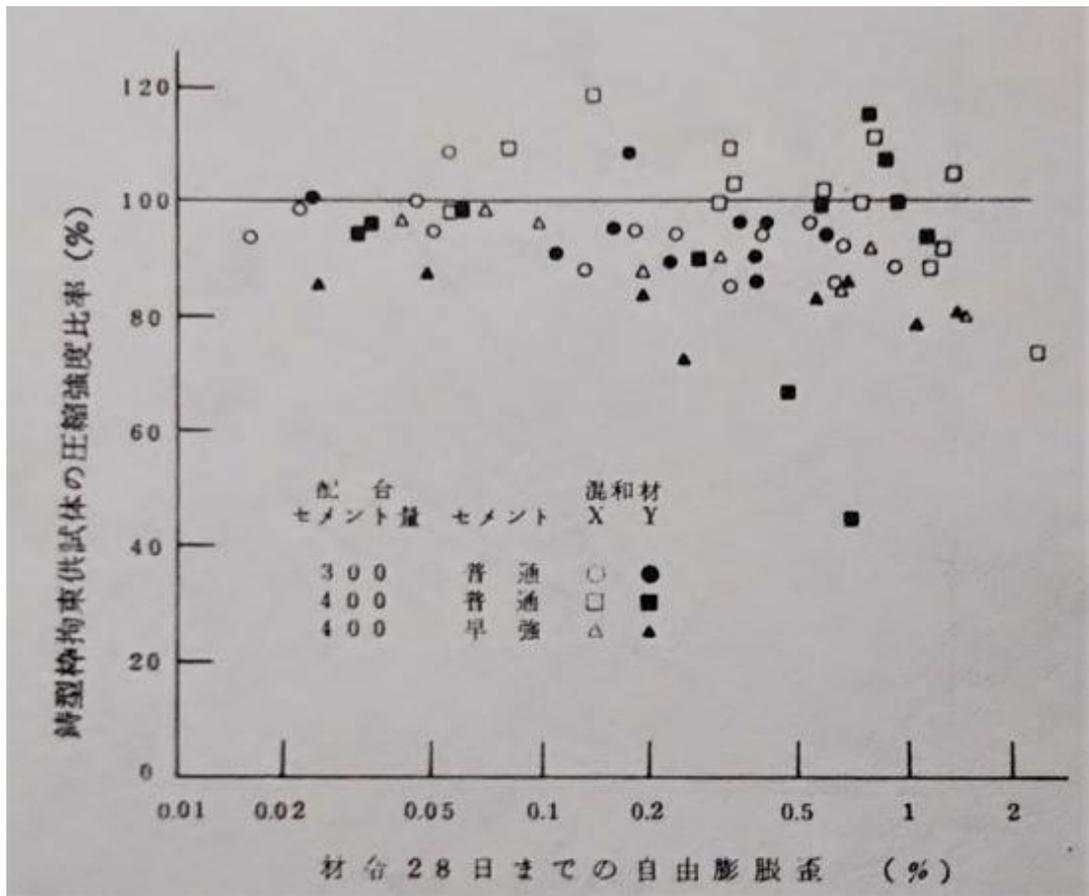


図3 鉄製型枠に入れたままの状態での強度<1>

膨張エネルギー

膨張コンクリートの膨張を拘束すると、拘束の程度やその方法に応じて、導入されるプレストレスの大きさが当然のことながら異なってきます。これを簡単に予測するうまい方法を、辻 幸和博士が見つけています<2>。その基本原理は、“膨張コンクリートが持っている膨張エネルギーは、同一配合・同一養生の場合は、同じである”という極めて簡単なものです。この基本原理は、次式のように表すことができます。

$$U = \sigma_c \cdot \epsilon_c / 2$$

U : 膨張エネルギー

σ_c : 膨張コンクリートに発生する圧縮応力度

ϵ_c : 膨張コンクリートの膨張ひずみ

コンクリートの膨張が鋼材などによって拘束される場合には、この膨張エネルギーは拘束鋼材に対して仕事をすることとなります。その場合、鋼材に作用する引張力とコンクリートに作用する圧縮力とは釣り合い、コンクリートのひずみと鋼材のひずみとは等しいと考えられます。

$$\text{力の釣り合い条件} : \sigma_c A_c = \sigma_s A_s$$

$$\text{ひずみの適合条件} : \epsilon_c = \epsilon_s$$

A_c : コンクリートの断面積

A_s : 拘束鋼材の断面積

鋼材の応力度はそのひずみから求められます。

$$\text{応力とひずみとの関係} : \sigma_s = E_s \epsilon_s$$

E_s : 鋼材のヤング係数

コンクリート供試体の中央に一本の鋼材を配置した場合には、これらの関係を利用すると、膨張エネルギーを鋼材ひずみ ϵ_s の関数として、次式で表すことができ、拘束鋼材のひずみを測定すれば、この式によって膨張エネルギーUを算出することができます。

膨張エネルギー U の算定式

$$U = p E_s \epsilon_s^2 / 2$$

膨張材の種類や拘束鉄筋比を変えて、材令28日までの鉄筋ひずみを測定した結果から、この式によって計算した膨張エネルギーの値を、図4に示しました。膨張エネルギーは、拘束鋼材比の値の如何に係わらず、ほぼ同じであることが読み取れるものと思います。なお、この考えは多くの実験結果によって支持されています。

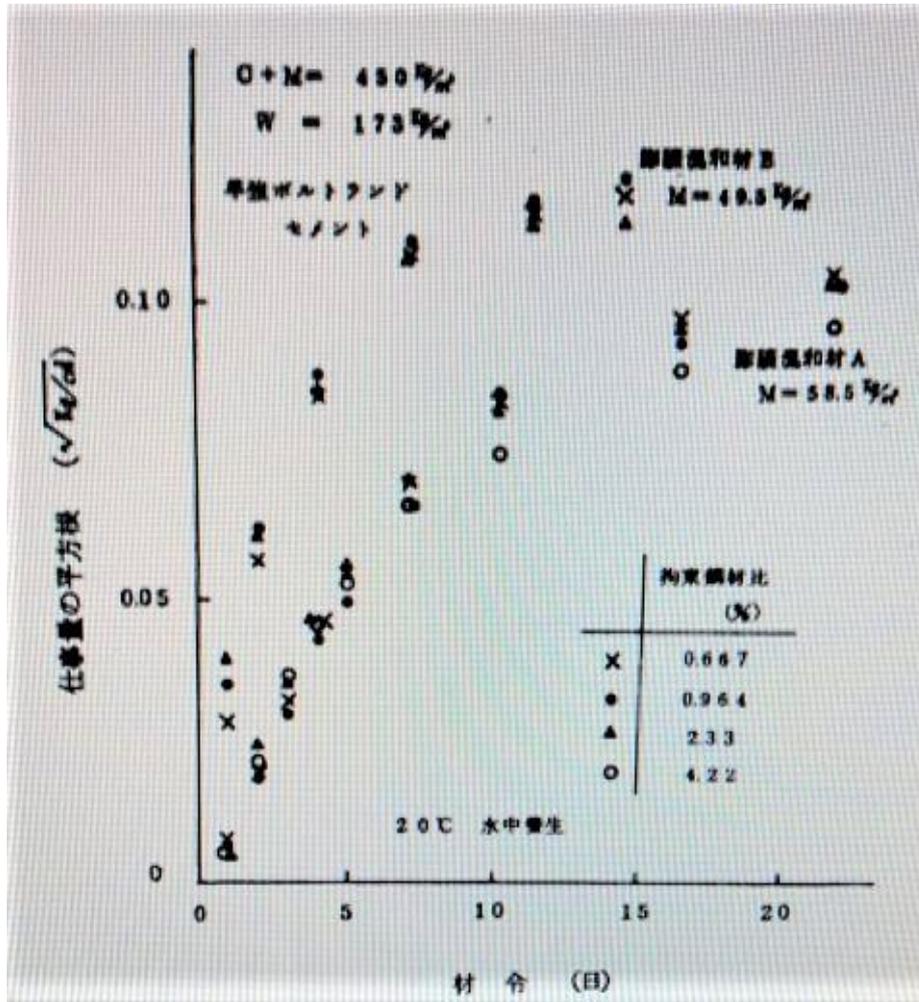


図4 膨張エネルギー<2>

この式を変形すると、次式が求まります。この式は、標準の拘束鋼材比の実験から、膨張エネルギーを求めておくと、拘束比の異なる場合における拘束鋼材のひずみあるいはコンクリートの膨張ひずみを算定するのに使えるものです。拘束鋼材のひずみは鋼材比 p の平方根に反比例することが、この式の意味するところです。

拘束鋼材のひずみ ε_s を算定する式

$$\varepsilon_s = [2U/(pEs)]^{0.5}$$

同様に、コンクリートに作用する圧縮応力、いわゆるケミカルプレストレス σ_c

を次式によって求めることができます。この式は、ケミカルプレストレスが拘束鋼材比 p の平方根に比例することを意味しています。

ケミカルプレストレス σ_c を算定する式

$$\sigma_c = (2UpEs)^{0.5}$$

ケミカルプレストレス

一般の鉄筋コンクリート部材に膨張コンクリートを用いると、コンクリートの膨張と同時に鉄筋も伸び、鉄筋には引張力が作用し、その反力としてコンクリートに圧縮力が作用します。すなわち、断面にはケミカルプレストレスが発生します。ここで、通常の鉄筋コンクリートにおけると同様、断面内の膨張ひずみ分布が直線となるという仮定を置くと、膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート断面に発生する膨張ひずみ分布およびケミカルプレストレスの分布を、計算することができます。

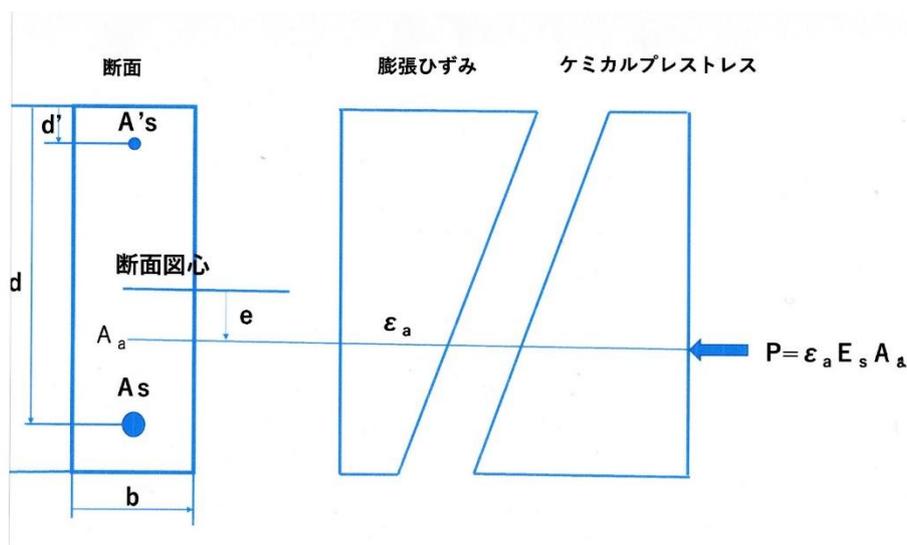


図5 鉄筋コンクリート断面・膨張ひずみ・ケミカルプレストレス<2>

矩形断面に、上下に鉄筋が配置されている場合について、説明します(図5参照)。

- (1) 鋼材比 p の標準供試体によって膨張エネルギー U を求める。

$$U = pEs \xi^2 / 2$$

- (2) 鉄筋の総断面積 A_a および鉄筋比 p_a を計算する。

$$A_a = A_s + A's$$

$$p_a = A_a / A_c$$

- (3) 鉄筋全体を代表する鉄筋の断面図心からの距離 e を計算する。

$$e = (d - h/2) + (d' - h/2)(A's / A_s)^{0.5}$$

- (4) その位置における膨張ひずみ ϵ_a を計算する。

$$\epsilon_a = [2U / (p_a E_s)]^{0.5}$$

- (5) ケミカルプレストレスの総和 P が求まる。

$$P = \epsilon_a E_s A_a$$

- (6) 総和 P と偏心位置 e から任意の位置でのケミカルプレストレスが求まる。

膨張ひずみの実測結果と計算値を図6に示してあります。実測値と計算値とが良く一致していることが分かります。

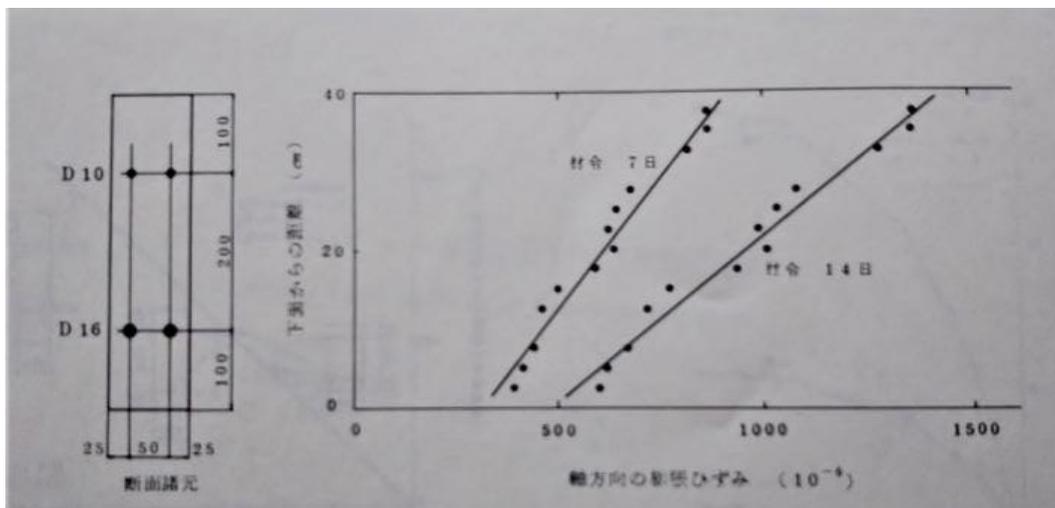


図6 膨張ひずみ分布の実測値と計算値<2>

ケミカルプレストレスの効果

コンクリートにケミカルプレストレスを導入することによって、鉄筋コンクリート曲げ部材の力学的性状が改善されることは、すでに明らかにされています。プレストレスによって、ひびわれ耐力が増加するので、曲げひびわれ耐力や斜めひびわれ耐力が増加するからです。なお、曲げひびわれ耐力が増加するだけでなく、図7に示すように、ひびわれ発生後における引張鉄筋ひずみが減少する効果も認められています<3>。

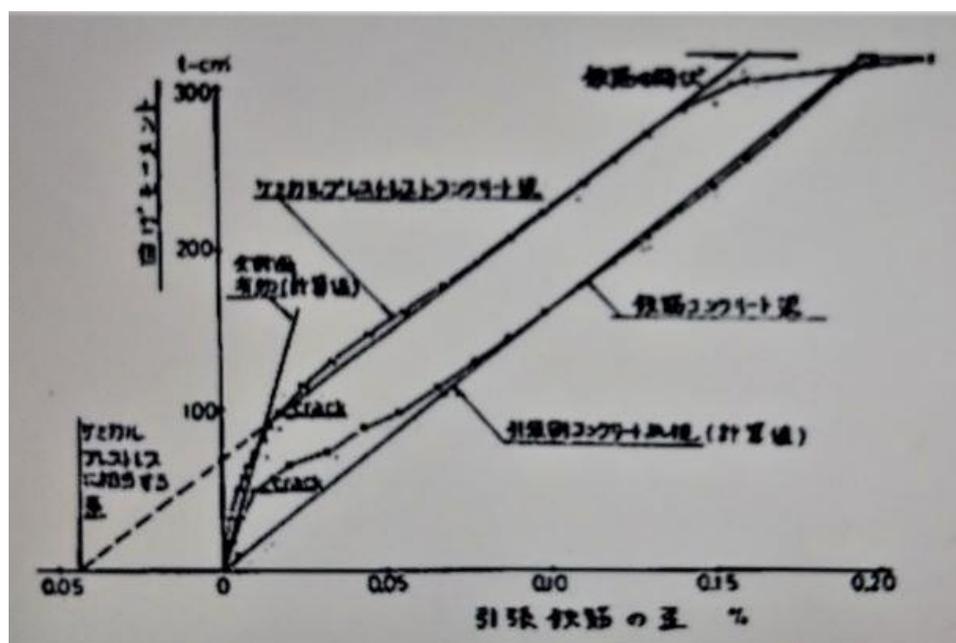


図7 曲げモーメントと引張鉄筋ひずみとの関係<3>

しかし、ケミカルプレストレスの大きさは、通常のプレストレスコンクリートと比べると、はるかに小さいので、クリープによるプレストレスの損失のために、時間が経てば、ほとんど効果が無くなると思う人がいても不思議ではありません。ところが、曲げ部材に持続荷重を載荷する実験によって、ケミカルプレストレスと機械的プレストレスの相違が明らかになり、機械的プレストレスの常識では考えられない効果が明らかにされています。以下にそのことを述べることにします。

拘束に抗して膨張していく過程では、コンクリートに発生する応力によって、クリープが生じます。将来発生すべきクリープの一部がこの時点で消費されることとなります。応力は小さいのですが、材令初期に生ずるクリープは、相当に大きいことが知られており、このことは無視できません。機械的な方法では、プレストレスを与えた時点ではその応力によるクリープは生じていません。

ケミカルプレストレスはせいぜい 3N/mm^2 程度の大きさですので、持続荷重によ

る曲げモーメントによって、引張鉄筋位置のコンクリート応力は、引張もしくはごく小さい圧縮となります。この位置におけるクリープは無視できることとなります。

材令28日以降にケミカルプレストレスの増加がみられなくなった一軸拘束供試体について、材令56日に、いったん拘束を外すと、**図8**に示すように、再びケミカルストレスが増加し始めます。すなわち、見かけ上膨張エネルギーが無くなった時点でも、本来の膨張エネルギーは存在しているのです。これを**潜在膨張エネルギー**と呼ぶことにします。

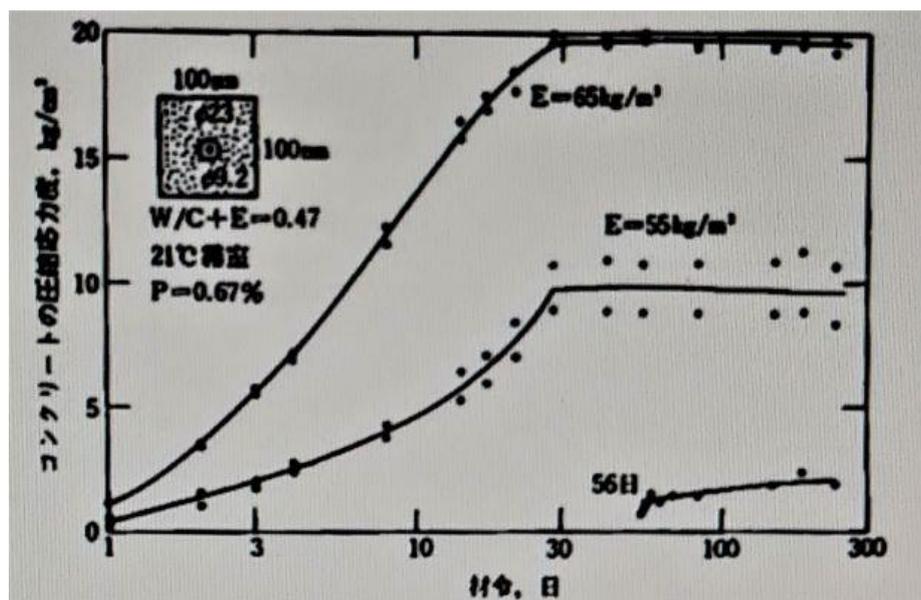


図8 ケミカルプレストレスの時間的経過<4>

荷重を載荷すると、曲げモーメントによって、引張鉄筋の応力が増加します。このことは、膨張コンクリートにとっては、拘束が緩むことを意味し、この潜在膨張エネルギーによって、新たにケミカルプレストレスが発生します。この効果は意外に大きいのです。載荷材令が若いほど、この効果は大きく、実際の工事において支保工を外す時期が打設後数日であれば、この効果は極めて大きいのです。

これらのことは、膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリートバリ供試体に、**図9**に示す方法で、持続載荷試験を行って確かめられています。この実験は、鉄筋径とその配置、膨張材使用量、持続荷重の大きさ等を変えて、行ったものです。

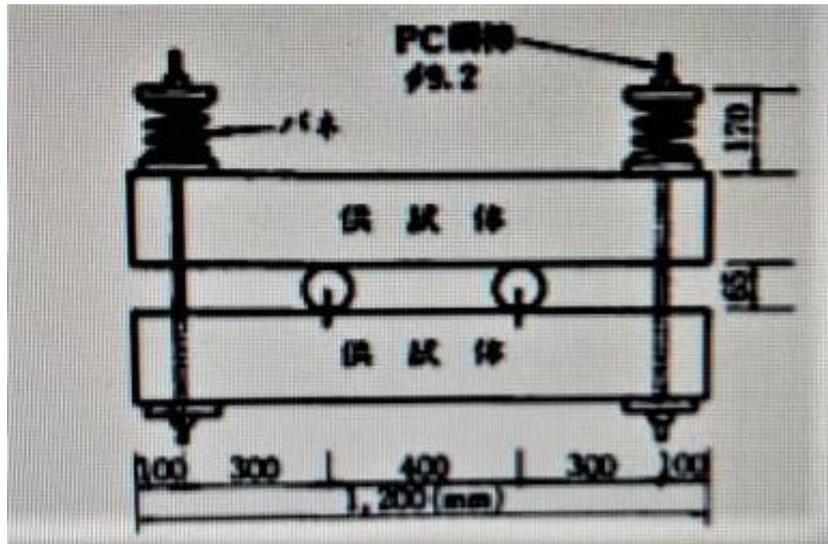


図9 持続載荷試験<5>

鉄筋ひずみ測定値と時間との関係を示す例を図10に示しています。鉄筋ひずみは、載荷によって圧縮側では減少し、引張側では増加します。持続載荷によって、材令の経過と共に、圧縮側ではさらに減少し、引張側ではさらに増加しています。この例では、引張鉄筋の位置ではコンクリート応力は圧縮であるにも関わらず、その引張ひずみが増加していくのです。なお、試験体は温度21℃、湿度100%の恒温恒湿の環境に置かれています。

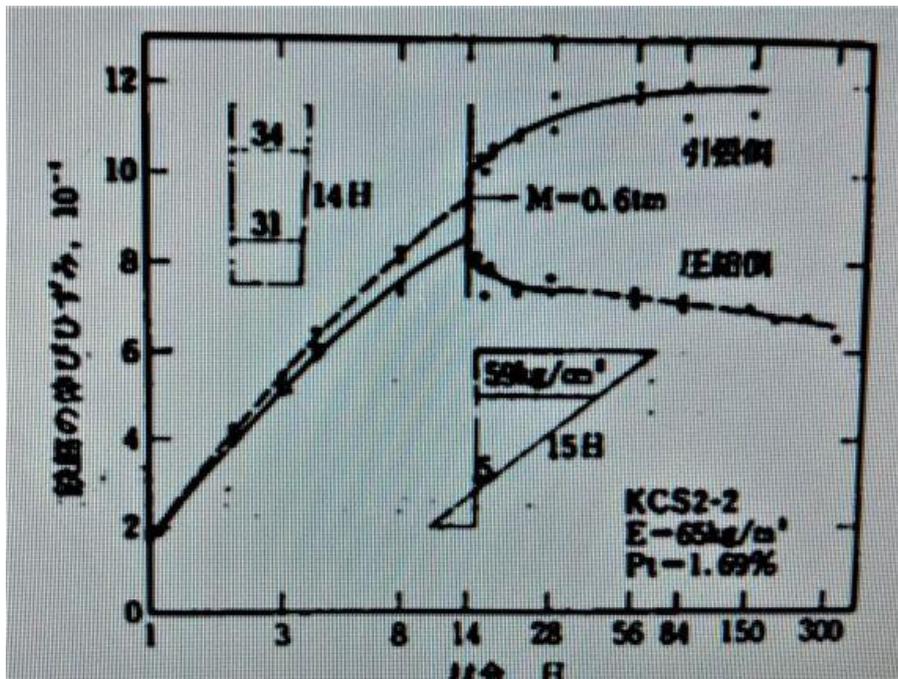


図10 持続載荷供試体のひずみ<5>

このことを明瞭な形で示したのが、図11です。 载荷後1日経過した時点から材令28日までに生じた鉄筋ひずみの増減を縦軸にとり、载荷1日後の鉄筋位置におけるコンクリート応力度を横軸にとっています。 両者にはきわめて良い相関があり、引張鉄筋位置でのコンクリート圧縮応力度が 4N/mm^2 以下では、持続荷重によって鉄筋ひずみが増加することが示されています。 すなわち、持続载荷によって、材令28日まで、ケミカルプレストレスは減少するのではなく、むしろ増加するのです。 なお、コンクリート応力は、コンクリートを弾性体と仮定し、平面保持を仮定して、鉄筋ひずみの測定値から外力との釣り合いを考慮して計算した値です。

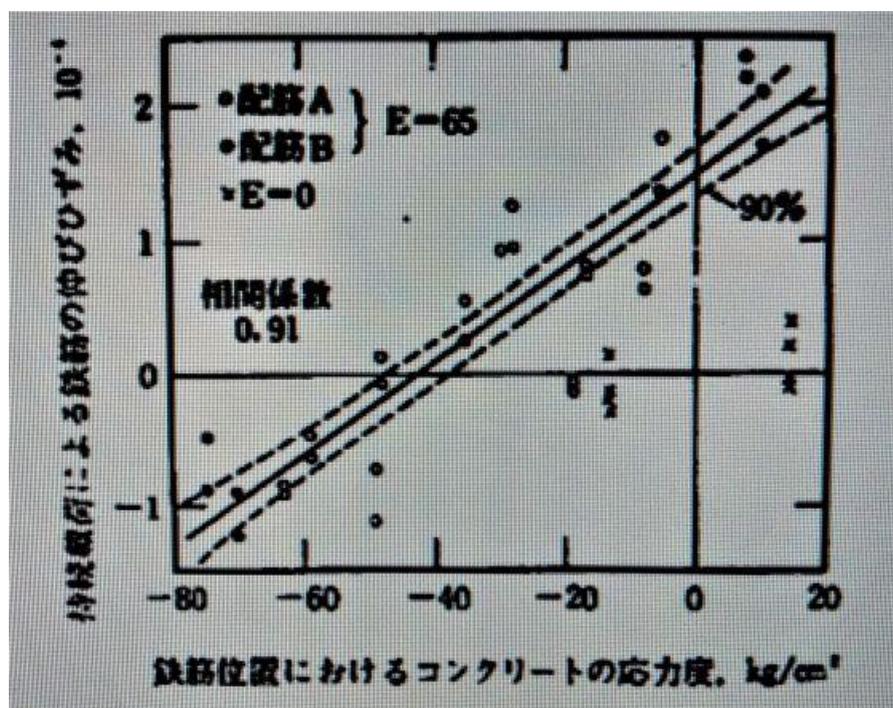


図11 持続荷重によるひずみと载荷直後におけるコンクリート応力との関係<5>

持続载荷を500日続けた後に、破壊実験を行い、持続荷重によるケミカルプレストレスの増加によって、曲げひびわれ耐力が増加することを確認しています<5>。 増加の程度は、鉄筋比および鉄筋配置によって相違しますが、この実験の場合、最大 3N/mm^2 に達しています。

まとめ

- (1) 鉄筋コンクリート部材に膨張コンクリートを用いると、コンクリートの膨張と同時に鉄筋も伸び、鉄筋には引張力が作用し、その反力としてコンクリートに圧縮力が作用します。すなわち、断面にはケミカルプレストレスが発生します。
- (2) このケミカルストレスは、標準供試体で求めた“膨張エネルギー”が鉄筋比等の影響を受けないことを利用して、容易に求めることができます。
- (3) ケミカルプレストレスは、それが導入されている時期に、クリープの一部が消費されるために、コンクリートのクリープによる減少は小さくなります。材令の初期に生じたクリープはその後のクリープを大きく減じます。
- (4) 自重を載荷すると引張鉄筋の応力が増加します。このことは、膨張コンクリートにとって拘束が緩むことを意味し、新たにケミカルプレストレスが発生します。載荷材令が若いほど、この効果は大きくなります。実際の工事において支保工を外す時期が打設後数日以下であれば、この効果は極めて大きくなります。
- (5) 外荷重によってコンクリートにひびわれが発生した後に生じる鉄筋ひずみの増加は、通常の鉄筋コンクリートの場合よりもケミカルプレストレス相当分だけ小さくなり、ひびわれ幅もそれに応じて小さくなります。

参考文献

1. 国分正胤、小林正几、長滝重義、岡村 甫、町田篤彦、膨張セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法に関する研究、土木学会論文報告集、第225号、1974年5月、pp.93-99
2. 辻 幸和、コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第235号、1975年3月、pp. 111 - 134
3. 岡村 甫、辻幸和、ケミカルプレストレスコンクリート部材の力学的諸性状、セメント技術年報26巻、1972年5月、pp.494 - 498
4. 岡村 甫、池内武文、膨張コンクリートを用いた曲げ部材におけるクリープの影響、セメント技術年報31巻、1977年5月、pp.225 - 227
5. 岡村 甫、丸山久一、辻幸和、膨張コンクリートを用いた曲げ部材の持続載荷実験、セメント技術年報31巻、1977年5月、pp.233 - 237