

東京大学 正員 岡村 南
 東京大学 鈴木 正治
 東京大学 学生員 ○ 國島 正彦

1. 研究の動機

膨張コンクリートの特性に関しては、数多くの研究報告がなされており、いくつかの興味ある特性が指摘されている。一例を挙げると、24時間の持続荷重によって、膨張混和材を用いたモルタルのたわみが、膨張混和材を用いない場合の約5倍にもなった例がある。しかし、これらの特性が何故に膨張コンクリートに現れるのかについての明かな説明はなされていない現状である。

本文は、膨張コンクリートの応力-歪曲線が、普通コンクリートと大きく異なることを詳細に検討し、その弾塑性的特性の一解析方法を述べたものである。すなわち、膨張コンクリートと、膨張の起因であるエトリンガイトと、それと直接拘束していると考えられるセメント硬化体その他のなる複合材料として取扱うアプローチを示したのである。

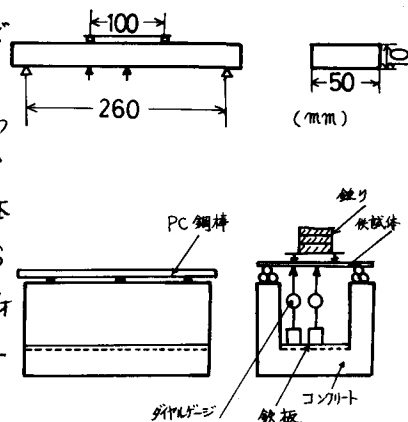
本研究を行なうに際し、懇切丁寧なる御指導を賜った、國分正胤先生に深く感謝の意を表します。

2. 膨張混和材を用いたモルタルの力学的特性

モルタルの曲げ載荷試験は、 $1 \times 5 \times 30$ cmの供試体と、試験図-1 曲げ試験 供試体および載荷装置した載荷装置(図-1)にセットし、1 kgの鉋りを1分間間隔で載荷し、載荷した瞬間のたわみ量(弾性たわみ量と称する)と、次の鉋りを乗せるまでの1分間に生ずるたわみ量(クリープたわみ量)を分離して測定した。1 kgの載荷は、縁応力度で約4.8 kg/cm²の増加である。試験は、20°Cの恒温室内で行ない、供試体をポリエチレンでラップして乾燥を防いだ。モルタルは、W:C:Sを1:2:2とし、セメントの11%および13%をカルシウムサルファアルミネート系膨張混和材(電気化学工業K.K.製)で置き換えた。なお、セメントは、早強ポルトランドセメントを用いた。

スパン中央における全たわみ量(弾性たわみ量+クリープたわみ量)についての荷重-たわみ曲線は、図-2に示すようであつて、膨張モルタルの場合は、著しく曲線状となつた。しかし、瞬間の弾性たわみ量だけをとりだして加えあわせていった。荷重-弾性たわみ曲線で整理すると、枚令および膨張混和材の使用量によらず両者の関係は、ほぼ直線となつたのである(図-3参照)。この直線の勾配は、枚令1日では、膨張混和材の有無にかかわらず、ほぼ同様であるが、枚令2日では、膨張モルタルの場合、普通モルタルより、約20%小さくなった。曲げ引張強度も同様の傾向を示し、枚令1日では大差がないが、枚令2日では膨張モルタルの強度は、普通モルタルの強度より約30%低下した。

一方、破壊時における最終変形能力には、枚令1日より相違が認められ、膨張モルタルは、枚令1



日では1.2倍、枚令21日では1.7倍となり、普通モルタルに比べて著しく変形能力に富むことが示されたのである。また、普通モルタルの最終変形能力は、枚令によらず、ほぼ一定であったが膨張モルタルは、枚令1日から枚令21日までに約50%の増加を示した。この現象を説明する為に、載荷ごとに分離して測定した1分間のフリープ量を加えあわせた、荷重-クリープたわみ曲線について整理すると、破壊時の全たわみ量のなかのフリープたわみ量の比率は、普通モルタルの場合、枚令によらず10~15%であるが、膨張モルタルの場合は、枚令1日で25~30%、枚令21日では約50%を占めている(図-4参照)。

この間の事情について、さらに詳しく検討する為に、破壊荷重の70%および30%の載荷と24時間継続した。その結果、24時間の間に生ずる膨張モルタルのクリープ量は、枚令1日および枚令21日のいずれに載荷した場合でも、普通モルタルの場合の約5倍にもなることが示されたのである(図-6参照)。

圧縮試験における膨張モルタルの、*Initial Tangent Modulus* は、普通モルタルの場合より約15%小さい値を示した。これは、静弾性係数試験における試験時間は、5~10分は必要であるので、その間の短期クリープが混入してくる為と思われる。このことは、動弾性係数が、膨張混和枚の有無にかかわらず、ほぼ同様であることから確認されたのである(図-7参照)。

これを要するに、膨張混和枚を用いたモルタルにおいては、“真の弾性変形”は、応力に比例すると共に、膨張混和枚の置き変え率が、11~13%の範囲では膨張混和枚を用いない場合と、ほぼ同様の弾性係数となるが、短時間におけるクリープ変形が著しく大きい為に、“みかけの応力-歪曲線”は、著しく曲線状となり、普通モルタルよりも、歪が大きくなるのである。

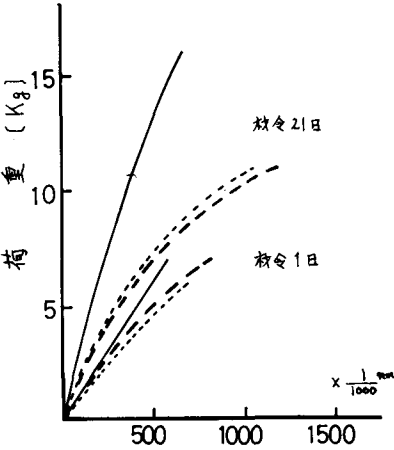


図-2 スパン中央の全たわみ量

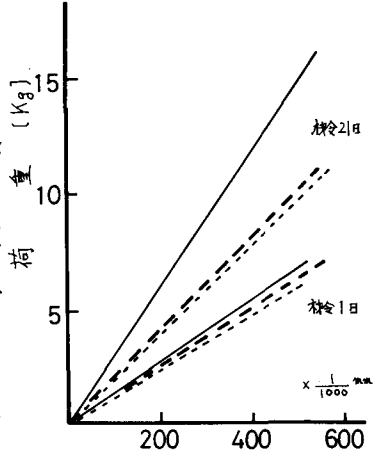


図-3 スパン中央の弾性たわみ量

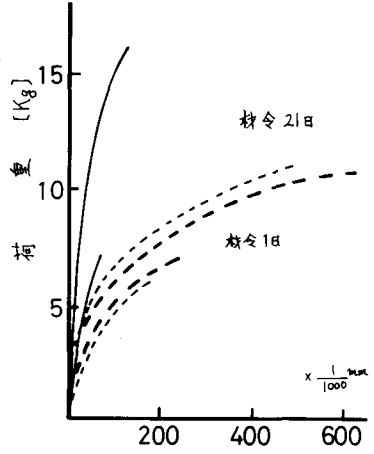


図-4 スパン中央のクリープたわみ量

表-1 曲げ試験結果

使用量 枚令(%)	0 %		11 %		13 %	
	1	21	1	21	1	21
曲げ引張強度 Kg/cm^2	354	786	306	546	354	546
1 Kgあたりの弾性たわみ $\times \frac{1}{1000}$	78	36	70	43	68	46
1 Kgあたりのクリープたわみ (5 kg載荷時) $\times \frac{1}{1000}$	5	3	25	11	24	11
最終変形能力 $\times \frac{1}{1000}$	620	680	700	1100	800	1250
最終クリープたわみ $\times \frac{1}{1000}$	60	100	180	540	240	700
最終変形能力の中の クリープたわみの比率	0.10	0.17	0.25	0.45	0.29	0.56

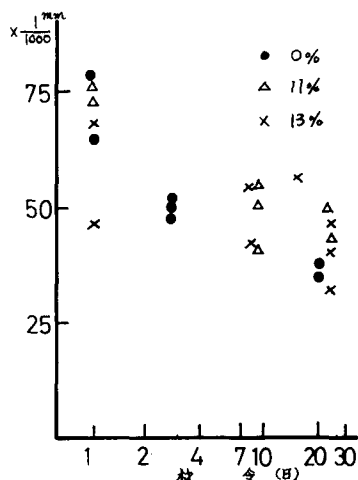


図-5 鍾り1kgあたりの弾性たわみ

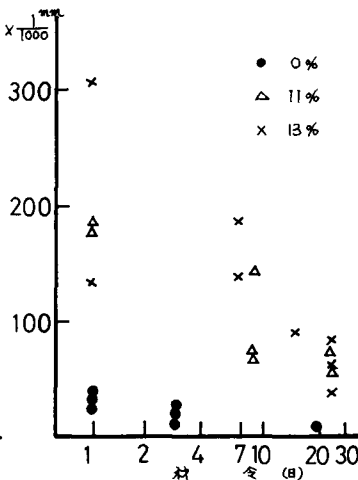


図-6 24時間の1kgあたりのクリープたわみ

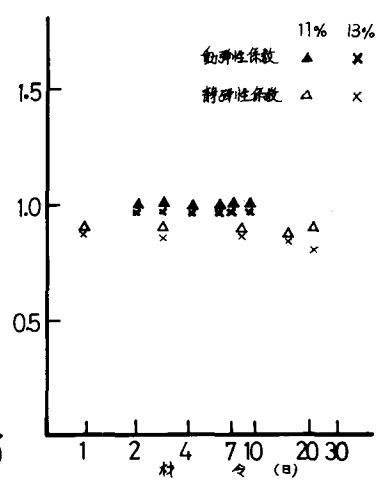


図-7 膨張モルタルと普通モルタルの弾性係数比

3. 膨張コンクリートの特性を解析するためのアプローチ

上述したように、短時間のクリープが膨張混和材を用いると非常に大きくなるが、その要因は、エトリンガイトの生成、その他の化学的収縮によるものか、エトリンガイトの生成に伴う膨張によるマイクロクラックなどの物理的収縮によるものかは不明である。しかし、いずれにしても、モルタルについて行なった結果が、コンクリートの場合にも適用でき、弾塑性的特性に大きな差が生ずることだけは間違いない。従って、膨張コンクリートの理論的解析を行なう場合には、弾性変形とクリープ変形とを分離する必要がある。普通コンクリートの場合に行なわれている弾性理論で解析するのは不適当であって、弾性理論と塑性理論の両方を使っての解析が必要と思われる。また、普通コンクリートの塑性解析には、バネとダッシュボットの力学モデルが使われるが、膨張コンクリートの特性を解析する力学モデルは、それ自身の膨張するという要因を加味しなければならない。そこで、“潜在膨張量”の概念を導入した複合モデルを考案し、その適否について検討を加えたのである。

3-1. 膨張コンクリートの複合モデル

膨張コンクリートの特性が、エトリンガイトの生成の影響であると考えるのは自然であって、まず、セメント硬化体とエトリンガイトとの最も簡単な二相系複合モデル(図-8)について検討した。この場合、簡単のため、1方向のみの膨張および拘束を考慮した。エトリンガイトの生成して、図中のエトリンガイト部が膨張すると、直列部のセメント硬化体は圧縮応力を受け、並列部では引張応力を受ける。また、エトリンガイト部は、セメント硬化体による拘束によって圧縮応力を受ける。なお、膨張コンクリートは、図-8に示した極めて小さいモデルが集まってできたものとして議論を進めることとした。

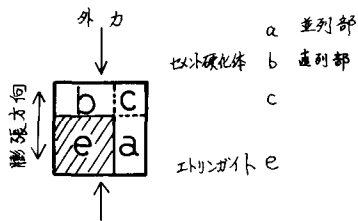


図-8 簡単な二相系複合モデル

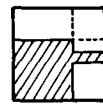


図-9 修正した複合モデルの一例

3-2. 潜在膨張量

ある種の膨張混和材と、ある配合および養生条件(温度、水の

供給)で用いられ、拘束条件によって、その膨張量の発現は異なっても、生成する膨張率の量は一定であると考え、**“潜在膨張量は一定である”**との仮説を設けることにした。図-8に示す複合モデルにおいて、**潜在膨張量 ε_0** を導入し、エトリンガイト部の歪 ε ($\varepsilon_0 + \varepsilon_e$)と表現することにしたのである。これによって、応力によって生ずる歪 ε_e と、エトリンガイト生成による歪 ε_0 とを区別して取扱うことができるのである。すなわち 時間の経過に伴って、 ε_0 は増加するが、短期間に外力が作用する場合は、 ε_0 は一定とし、 ε_e のみが変化すると考えたのである。また、拘束条件だけが異なる場合にも、 ε_0 は一定であると考えたのである。なお、エトリンガイトの一部は、マイクロクラック、気泡、その他の空隙中に生成すると考えられるので実際に膨張に寄与するエトリンガイトの量は、これらと考慮して補正する必要がある。

3-3 潜在膨張量と顕在膨張量との関係

図-8に示す複合モデルにおいて、潜在膨張量が、 Δt 時間の間に $\Delta \varepsilon_0$ だけ増加した場合に、それによって生ずる拘束応力の変化 $\Delta \sigma$ や、顕在膨張量の増加 $\Delta \varepsilon$ の増加は、二相間の相対変位の有無によって著しく異ってくる。極端なケースは、両相間に全く相対変位がない場合(ケースⅠ)と、両相間に、全く付着のない場合(ケースⅡ)とであって、通常は、この両者の中間にある。そこで、この両極端について検討した結果、 $\Delta \sigma$ および $\Delta \varepsilon$ を表現する式も一応たてることができた。しかし、膨張コンクリートの特性を、この種の複合モデルを用いて解析する為には、まず、以下の事項を検討する必要があることが明示されたのである。

- (i) 各部分における応力 σ と歪 ε との関係(時間 t の関数でもある)
- (ii) 各部分におけるフリーア ε_{fi} と時間 t との関係(応力 σ の関数でもある)
- (iii) エトリンガイト部の容積率 ρ^3 と膨張混和材料との関係
- (iv) 潜在膨張量 ε_0 と時間 t との関係
- (v) マイクロクラックおよび気泡などの空隙による潜在膨張量 ε_0 の補正

3-4 複合モデルの修正

エトリンガイト部の実際の応力と歪との関係を表わす一次近似として、ケースⅠとケースⅡの平均値を用いて、膨張の発現による内力の変化を検討した。セメント硬化体の弾性係数を一定とし、 μ の値を0.5、潜在膨張量を顕在膨張量の5~10倍として計算すると、セメント硬化体部の引張応力が100 kg/cm^2 を越えてしまい、常識的な値が得られなかった。また、外力の変化に対して、膨張モルタルの瞬間弾性変形が普通モルタルと大差がないにもかかわらず、短期間におけるフリーア変形が、著しく大きいという現象を説明するには、エトリンガイトとセメント硬化体との相互関係に、純粋な並列部がある図-8のような力学モデルは不適当であることもあきらかになった。

そこで、これを考慮して修正したモデルの一削を示すと、図-9である。なお、エトリンガイト部のフリーア変形が著しく大きいので、この部分における歪 ε_{fi} を、さらに、フリーア歪と弾性歪とに分離して取扱う必要がある。

エトリンガイトの影響を分離した、この種の複合モデルについて、さらに検討を加え、この種のモデルを用いて膨張コンクリートの諸特性を解明する可能性について、今後さらに研究を進めてゆく所存である。