

論文 膨張コンクリートの蒸気養生製品への適用性

小田部裕一*1・寺野宜成*2・鈴木康範*3

要旨：本研究は、膨張コンクリートの強度、膨張特性を実験的に検討し、蒸気養生製品に適用した場合に要求される圧縮強度および曲げ強度を満足するための配合設計方法を提案するものである。所定の圧縮強度を得るためには、膨張コンクリートについて水結合材比と圧縮強度の関係を先ず求めることにした。次に、膨張材を混和しないコンクリートの曲げ強度に対し、単位膨張材量の増加による曲げ強度の増分と単位膨張材量との関係を求め、所要の曲げ強度を得るための単位膨張材量を決定した。

キーワード：膨張コンクリート、蒸気養生、圧縮強度、曲げ強度

1. はじめに

膨張コンクリートの蒸気養生製品への適用に関する研究は、これまで多くの研究者によって実施され、その成果に基づき遠心力鉄筋コンクリート管の JIS 規格に膨張コンクリートが取り入れられ、普及している。更に、近年ボックスカルバートの大型化や高性能化に伴い、ボックスカルバートの設計施工に関する指針¹⁾には、製品規格2種に膨張コンクリートを用いることが規定された。今後、ボックスカルバート製品の普及につれて益々膨張コンクリートが使用されるものと思われる。

膨張コンクリートの配合設計方法は、実験等の基礎資料を基に所要の性能、例えば圧縮強度、耐久性、水密性が得られるように定めるのが一般的である²⁾。しかしながら、ボックスカルバートの設計施工指針のように、材料特性として、コンクリートの曲げ強度が規定されることは少なく、それを満足する配合設計方法は必ずしも確立されていない。また、標準養生下におけるセメントの種類が膨張特性に及ぼす影響についての検討はなされているが、蒸気養生下における検討例は少ない³⁾。更に、コンクリート製品

の製造省力化のために高流動コンクリートの使用が検討されているが、蒸気養生を行った場合の膨張特性は明らかにされていない。

本研究では、蒸気養生下におけるセメントの種類が普通および高流動コンクリートの膨張特性に及ぼす影響を明らかにした上で、ボックスカルバートの製品規格2種として所要の性能を得るための配合設計法を提案した。

2. 実験概要

2.1 実験項目

本実験では、蒸気養生を行った膨張コンクリートについて強度・膨張特性に着目し、検討した。対象とした膨張コンクリートは、普通および高流動コンクリートである。実験は、表-1に示すシリーズに分けて実施した。シリーズ2における単位膨張材量は 50, 65kg/m³ の2水準としたが、所定の曲げ強度が得られない場合は、結合材量一定のもとで単位膨張材量を増加した追加実験を行った。

圧縮強度は JIS A 6202 の参考2に準じ、膨張発現期間においては型枠による拘束状態で養生を行った。曲げ強度は JIS A 1106 に従って

*1 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 研究員 工修 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 関東セメント・コンクリート開発センター所長 工博 (正会員)

表-1 実験の要因と測定項目

シリーズ No.	要因	水準	測定項目	ポイント区分
1	配合強度 (45N/mm ²) を満たす W/B の決定	W/B=45,50,55% E=50kg/m ³	圧縮強度	A
	決定 W/B における曲げ強度基準値 (σ_{bd}) の算定	W/B=45,50,55% E=0kg/m ³	曲げ強度	
2	膨張率と曲げ強度増分、単位膨張材量と膨張率の関係を求める	E=50,65 kg/m ³	圧縮強度 曲げ強度 膨張率	B
3	配合設計法の検証	---	圧縮強度 曲げ強度 膨張率	C

* 図-8 参照

求めた。ただし、膨張コンクリートの場合には、ケミカルプレストレスの効果を含んだ曲げ強度を測定するために、JIS A 6202 の B 法の一軸拘束供試体を試験に供した。膨張率は、JIS A 6202 の B 法により測定した。試験材齢は、1, 7, 14, 28, 91 日とし、強度の管理材齢は 14 日である。蒸気養生は、前置き 3 時間後、昇温速度 15°C/hr、最高温度 65°C で 3 時間保持した後、自然冷却とした。その後は、温度 20 ± 2°C、湿度 80% の恒温恒湿室内で気乾養生とした。なお、標準水中養生供試体の膨張率も測定した。

2. 2 使用材料

普通コンクリートを対象とした場合は、普通ポルトランドセメント (比重: 3.15, 粉末度: 3300cm²/g, 以下 OPC と称す)、高炉セメント B 種 (比重: 3.04, 粉末度: 3930cm²/g, 以下 BB と称す) および高ビーライト系セメント (比重: 3.20, 粉末度: 4040cm²/g, C₃S=33%, C₂S=46%, 以下 LHPC と称す) を用いた。高流動コンクリートでは、OPC, LHPC の 2 種類とし、粉体量の確保を目的に石灰石微粉末 (比重: 2.70, 粉末度: 7500cm²/g) を混和した。

膨張材は、カルシウム・サルフォ・アルミニウム系のものを用いた。混和剤は、普通コンクリートにリグニンスルホン酸を主成分とした AE 減水剤、高流動コンクリートにポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。空気量調整剤は、アルキルエーテル型の陰イオン界面活性剤である。骨材は細骨材に陸砂 (比重: 2.56,

表-2 コンクリート配合の一例

コンクリートの種類	セメントの種類	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	膨張材 E	石灰石粉 L	細骨材 S	粗骨材 G
普通	OPC	45	165	317	50	---	758	1003
		50	165	280	50	---	788	1001
		55	165	250	50	---	817	997
	BB	45	168	323	50	---	731	1007
		50	169	288	50	---	759	1003
		55	168	255	50	---	790	1003
LHPC	45	165	317	50	---	761	1003	
	50	165	280	50	---	790	1003	
	55	165	250	50	---	814	1003	
高流動	OPC	45	165	317	50	174	876	707
		50	165	280	50	206	876	707
		55	165	250	50	232	876	707
	LHPC	45	165	317	50	179	876	707
		50	165	280	50	210	876	707
		55	165	250	50	235	876	707

吸水率: 2.15%, 粗粒率: 2.67), 粗骨材に砕石 (比重: 2.66, 吸水率: 0.6%, 粗粒率: 6.76) を使用した。

2. 3 コンクリートの配合

普通コンクリートでは、スランプ 8cm, 空気量 4.5% を目標とした。高流動コンクリートは、スランプフロー 65cm, 空気量 4.5%, 更に十分な自己充填性を得るため、ボックス型充填試験による自己充填高さ (流動障害条件 S1)⁴⁾ が 30cm 以上となるように、混和剤量および水粉体容積比で調整した ($G/G_{lim}=0.475$, $V_s/V_m=0.47$ 一定)⁴⁾。なお、設計基準強度および設計曲げ強度は、ボックスカルパートの設計施工指針で 2 種として規定されている 35N/mm² および 4.5N/mm² とした¹⁾。割り増し係数は各現場、工場の条件に合わせて設定すべきものであるが、ここでは圧縮強度および曲げ強度とも 1.3 の値を用いて配合強度を算出した。したがって、配合強度は、それぞれ 45N/mm² および 6.0N/mm² となった。

コンクリート配合の一例とし、単位膨張材量 50kg/m³ とした配合を表-2 に示す。

3. 実験結果

3. 1 配合強度を満たす水結合材比と曲げ強度基準値の決定 (シリーズ 1)

水結合材比と圧縮強度の関係は図-1 に示す通りである。本実験では使用するセメントおよび普通・高流動コンクリートに拘わらず、水結合材比の水準を共通としたため、その多

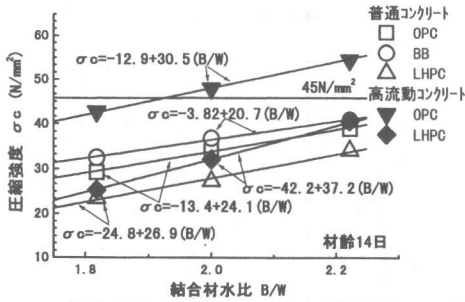


図-1 結合材水比と圧縮強度の関係(E=50kg/m³)

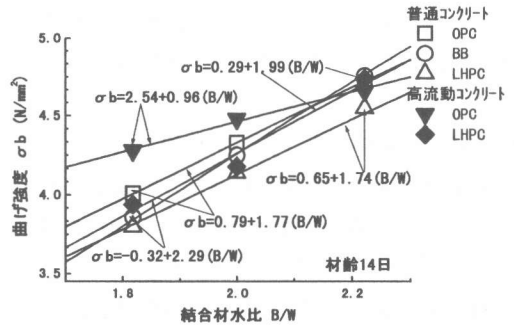


図-2 結合材水比と曲げ強度の関係(E=0kg/m³)

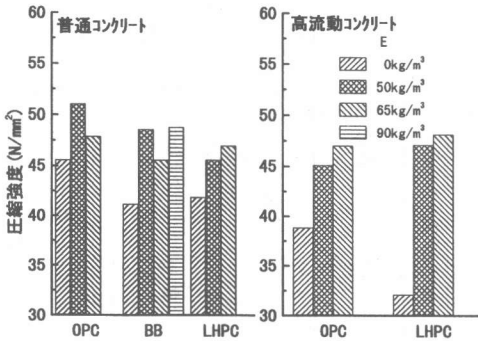


図-3 圧縮強度試験結果

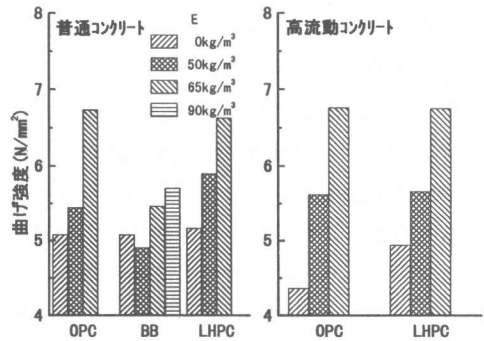


図-4 曲げ強度試験結果

くが目標とする配合強度の範囲外での試験となった。ここでは、 $B/W - \sigma_c$ 線の直線性を仮定して、外挿により配合強度を満足する水結合材比を算定してみた。

図-1より、配合強度の 45N/mm^2 を満足する水結合材比は、普通コンクリートの OPC で 41.3%、BB で 42.4%、LHPC で 38.5%となり、高流動コンクリートでは、OPC で 52.7%、LHPC で 42.7%となった。このように、高流動コンクリートは、普通コンクリートに比べて、石灰石微粉末の影響により配合強度を満足する水結合材比が大きい。

膨張材無混和のコンクリートの水結合材比と曲げ強度の関係は、図-2に示す通りである。この結果より得られる曲げ強度の基準値は、上記の圧縮強度が 45N/mm^2 となる水結合材比より、普通コンクリートの OPC で 5.08N/mm^2 、BB で 5.08N/mm^2 、LHPC で 5.17N/mm^2 となる。また、高流動コンクリートでは、OPC で 4.36N/mm^2 、LHPC で 4.95N/mm^2 と、普通コンクリートより小さくなる。

3. 2 膨張率と曲げ強度増分、単位膨張材量と膨張率の関係(シリーズ2)

圧縮強度、曲げ強度および膨張率の測定結果を図-3～図-5に示す。ただし、ここでの圧縮・曲げ強度は管理材齢である14日の試験結果である。また、BBは単位膨張材量を 90kg/m^3 とした追加実験を実施した。

図-3より、普通コンクリートおよび高流動コンクリートとも、膨張材を混和しない場合に対して混和した場合に圧縮強度が幾分増加していた。これは、膨張発現期間において型枠により拘束されたためと考えられる。また、単位膨張材量により圧縮強度の増減が幾分認められるが、配合強度を下回することはなかった。

図-4より、曲げ強度は、単位膨張材量の増加により、増加する傾向が見られ、ケミカルプレストレスの効果と推察される。

膨張率は、単位膨張材量が一定であってもセメントおよびコンクリートの種類によって、差が生じており、 $LHPC > OPC > BB$ の順となっている。今回の実験範囲では、この原因を特定で

きないが、硬化体が緻密化する速度と膨張発現速度との兼ね合いによるものと推察される。また、カルシウム・サルフォ・アルミネート系の膨張材は、高炉スラグ微粉末の混入によりセメント中の石膏の消費が促進され、膨張圧が減少するといった報告があり⁵⁾、これも BB の膨張率が小さくなった一因と考えられる。

図-4 と図-5 より求めた膨張率と曲げ強度増分の関係を、図-6 に示す。多少のばらつきは認められるが、各コンクリートとも膨張率と曲げ強度増分の関係は、セメントの種類によらず一つの直線式で表すことができる。ただし、コンクリートの種類では大きく異なっている。曲げ強度増分がケミカルプレストレスのみによるものと考えた場合、コンクリートの種類によらず、これらの関係は同じ直線となるはずである。しかし、高流動コンクリートの増分値は、普通コンクリートに比べてかなり大きくなっていることが分かる。これは、高流動コンクリートは普通コンクリートと比較して、硬化体組織が緻密で膨張作用による強度低下が少ないためと思われる。

単位膨張材量と膨張率の関係 (図-7 参照) は、ほとんどが2点間によるものであるが、内挿して所定の膨張率を得るのに必要な単位膨張材量を求めることとした。

シリーズ1より、所要の圧縮強度を得るための水結合材比および曲げ強度の基準値の算定が可能となる結果を得た。そして、膨張率と曲げ強度増分、単位膨張材量と膨張率の関係を、各種セメントを用いた各コンクリートごとに求めた。よって、圧縮強度を満足する水結合材比を決定した上で、所要の曲げ強度を得る膨張率を曲げ強度増分との関係から求め、この時の単位膨張材量を算定する。それにより、所要の圧縮、曲げ強度が得られるものと考え、配合設計方法を図-8 のように提案する。

3.3 配合設計法の検証(シリーズ3)

図-6, 図-7 から、曲げ強度の目標値 6.0N/mm^2 を満足する単位膨張材量は、普通コン

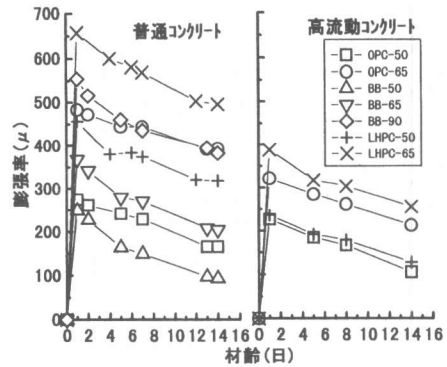


図-5 膨張率測定結果

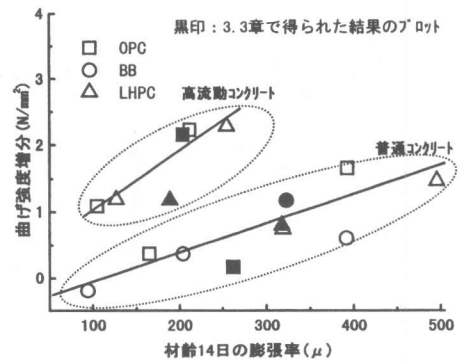


図-6 膨張率と曲げ強度増分の関係

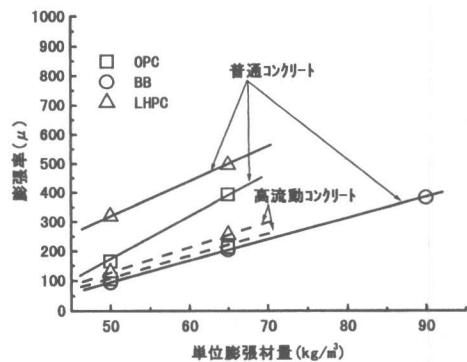


図-7 単位膨張材量と膨張率の関係

クリートの OPC, LHPC で $60, 55\text{kg/m}^3$, 高流動コンクリートの OPC, LHPC で $60, 55\text{kg/m}^3$ と推定された。しかし、普通コンクリートの BB では、単位膨張材量 90kg/m^3 の場合も所定の曲げ強度を満足することはできなかった。そこで、膨張材多量置換による強度低下の懸念および図-6 で得られた直線式を勘案して、単位膨張材量を 80kg/m^3 とした。

これらの単位膨張材量を用いた各コンクリ

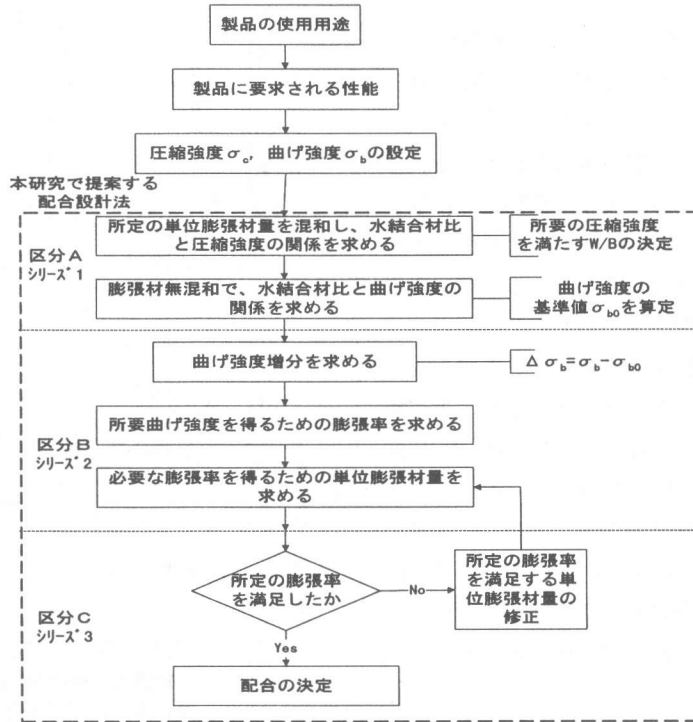


図-8 配合設計フローチャート

ートの強度試験結果を図-9、図-10に示す。管理材齢である材齢14日の圧縮強度は、配合強度をすべて満足していることが分かる。しかし、曲げ強度は、普通コンクリートのOPCを用いた場合において、配合強度を下回る結果となった。図-11の膨張率測定結果を見ると、材齢14日におけるOPCの膨張率は、所定の膨張率を下回っており、これが曲げ強度不足の原因とされる。本来ならば、図-8のフローチャートに従い、単位膨張材量の修正が必要とされる。この場合、図-7を参考に、膨張率の不足分に相当する膨張材の増量が必要となる。なお、図-9、図-10より、材齢28日以降の強度発現は、BBに関しては、同等もしくは低下する傾向にあるが、OPCおよびLHPCについては増加傾向にあり、蒸気養生後気乾養生とした場合も強度発現が良好であることが分かる。

以上の結果より、図-8のフローチャート

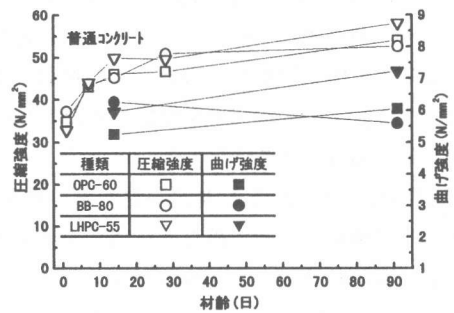


図-9 普通コンクリートの強度試験結果

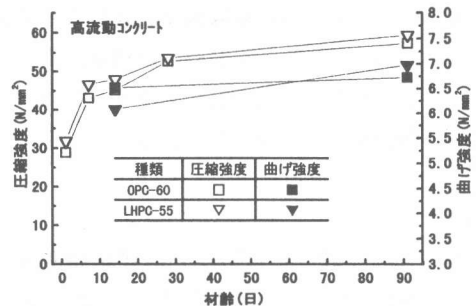


図-10 高流動コンクリートの強度試験結果

に沿った配合設計が可能と思われる。

ただし、ボックスカルバートの製品規格 2 種では、1 種に比べ高い曲げ強度が求められるとともに、鋼材のケミカルプレストレスによるひび割れ幅増大の抑制も期待されている。そこで、所定の膨張率は、土木学会指針⁶⁾に示されているように、標準養生7日で200 μ 以上1000 μ 以下の標準値も参考にして定める必要がある。今回の結果は、蒸気養生下において所要の曲げ強度を満足する膨張率を求めているので、上記条件下との相関を確認した。その結果、本実験の範囲では図-12に示すように、BBの1200 μ を除き、400~1000 μ の膨張率が適当と思われる。これは、膨張材を多量に混和した場合の強度発現性の阻害を考慮したものであり、BBのように上記の上限値を超えるようであれば、強度レベルを増し、膨張率を所定の範囲に収めることが必要である。

4. まとめ

本研究で提案した配合設計方法により、所要の圧縮、曲げ強度を満足するための水結合材比および単位膨張材量を求めることが可能となった。また、実験的検討の中で得られた知見は下記に示す通りである。

- 1) 膨張率は、単位膨張材量が一定であっても、セメントの種類によって異なり、高ピーライト系セメント>普通ポルトランドセメント>高炉セメントB種の順に大きくなることが分かった。
- 2) 膨張率と曲げ強度増分の関係は、セメントの種類によらず一つの直線式で表せることが分かった。しかし、コンクリートの種類によっては、大きく異なり、高流動コンクリートの方が少ない膨張率で大きな増分値となった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、終始懇切な御指導、御教示を賜った群馬大学 工学部 建設工学科の辻幸和教授に感謝の意を表し、ここに記します。

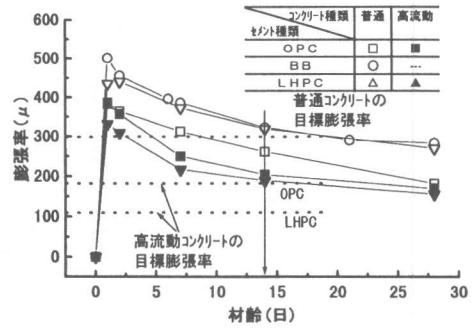


図-11 膨張率測定結果

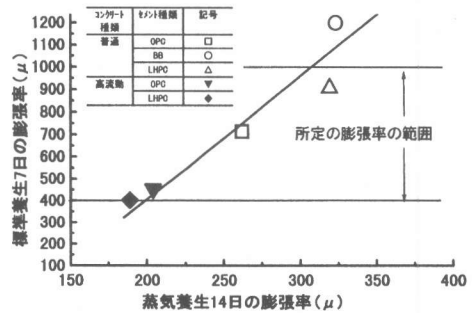


図-12 標準養生と蒸気養生の膨張率の関係

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート製プレキャストボックスカルバート道路埋設指針, (財)国土開発技術研究センター, 全国ボックスカルバート協会, 1991
- 2) 國府勝郎・福澤公夫: 最新コンクリート技術選書, No. 8, 山海堂, 1987
- 3) 河野俊夫・一家惟俊・中野昌之・綿貫輝彦: 各種セメントコンクリートにおよぼす石灰系膨張材の影響, コンクリート・ライブラリー第39号, (社)土木学会, 1984
- 4) 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ15号, (社)土木学会, 1996
- 5) 所司大輔・岸利治: 高炉スラグを混入したセメントペースト中における膨張混和材の水和発熱特性, 土木学会年次講演会講演概要集V, pp. 66-67, 1995
- 6) 膨張コンクリート設計施工指針, (社)土木学会, 1993