

報告 膨張コンクリートを使用したはり部材のひずみ性状と曲げ載荷試験

水谷 征治*¹・酒井 貴洋*²・網野 貴彦*³・清宮 理*⁴

要旨：膨張材を添加した普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種及び低熱ポルトランドセメントを用いた RC はり部材（50×50×300cm）の膨張・収縮ひずみを計測した。また、1 ヶ月程度経過したはり部材を対象に曲げ載荷試験を実施した。その結果、何れのセメントを用いたコンクリートにおいても収縮量の低減やプレストレス作用によるひび割れ抵抗性の増加が確認できた。特に低熱ポルトランドセメントを用いたもので膨張材の効果が顕著であることが確認できた。また、膨張コンクリートは、普通コンクリートに比べて曲げひび割れ発生荷重がやや大きくなることなどが確認できた。

キーワード：膨張材、膨張コンクリート、RC はり部材、初期剛性、曲げひび割れ発生荷重、耐荷性能

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性・美観などの品質に対する性能が重要視されるようになってきており、初期ひび割れを防止することが重要な課題となっている。そのような中で膨張コンクリートは、収縮量の低減やプレストレス作用によるひび割れ抵抗性が増加することによる初期ひび割れの抑制効果を期待して使用される事例が増えてきている。

膨張コンクリートの膨張特性は、使用するセメントの種類により異なることは知られているが、これらを比較した報告例は少ない。また、膨張特性についての研究は、小型試験体によるものがほとんどであり、実大スケールにおける膨張材の効果に対する評価が不十分である。

さらに、膨張コンクリートは膨張材による膨張作用を鉄筋で拘束し、ケミカルプレストレス作用をもたらすことで、RC 部材の力学的性能が向上するとされているが、膨張特性と同様に実構造物における研究報告は少ない。

そこで、使用セメントとして、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種及び低熱ポルトランドセメントの 3 種類を用いた低添加型の膨張コンクリートで 50×50×300cm の比較的大型の RC はり部材を製作し、膨張・収縮ひずみの計測を行った。

また、1 ヶ月程度養生したはり部材について、曲げ載荷試験を実施し、前述の各種セメントを使用した膨張コンクリート製 RC はり部材の初期剛性や曲げひび割れ発生荷重など力学的性能についても確認した。

本報告では、これらの試験結果に基づき、大型のはり部材における各種セメントを用いたコンクリートに対する膨張材の効果について、膨張・収縮特性及び力学的性能に着目して評価を行った結果を報告する。

2. はり部材の膨張特性

2.1 実験方法

(1) 配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。名称の頭文字は、使用セメントの種類を示しており、N は普通ポルトランドセメント（N セメントと称す）、BB は高炉セメント B 種（BB セメントと称す）、L は低熱ポルトランドセメント（L セメントと称す）を示す。また、末尾に EX がついたものは、膨張材を添加したものを示す。

N 及び BB セメントの配合は、呼び強度を 30N/mm² とし、L セメントの配合は、これらと W/B を同程度とした。

また、膨張材は石灰系低添加型膨張材（水和熱抑制タイプ）を使用し、単位膨張材量を 20kg/m³ とした。

表-1 コンクリートの配合とフレッシュ試験結果

名称	SL (cm)	W/B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュ試験結果			
					W	C	EXP	S	G	Ad	SL(cm)	Air(%)	C.T.(°C)	凝結時間
N	12	47.0	4.5	42.5	158	337	0	753	1020	3.37	11.5	5.0	26.0	5.2h-6.7h
N-EX	12	47.0	4.5	42.5	158	317	20	753	1020	3.37	12.5	4.0	25.0	5.4h-7.6h
BB	12	48.9	4.5	41.8	165	337	0	730	1047	3.61	12.0	5.4	27.0	4.3h-6.9h
BB-EX	12	48.9	4.5	41.9	165	317	20	732	1047	3.61	12.0	5.8	28.5	6.2h-9.0h
L	12	47.0	4.5	43.9	163	347	0	781	1033	3.47	11.0	4.0	28.7	5.2h-7.3h
L-EX	12	47.3	4.5	43.9	163	325	20	783	1033	3.45	12.5	4.4	30.0	8.1h-10.1h

※SL：スランプ、Air：空気量、Ad：AE 減水剤、C.T.：コンクリート温度、凝結時間：(始発)-(終結)

*1 東洋建設（株） 美浦研究所主任研究員（正会員）

*2 五洋建設（株） 技術研究所主任

*3 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター主任研究員（正会員）

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 工博（正会員）

(2) はり部材の形状寸法

はり部材の形状寸法を図-1に示す。主筋はD19で全周に等間隔で配置し、拘束鉄筋比は1.83%とした。また、はり部材は曲げ荷重試験時に曲げ先行破壊となるように、せん断区間にD13のスターラップを20cm間隔で配置した。

(3) 測定方法及び試験項目

はり部材の膨張・収縮ひずみ（実ひずみと称す）の計測は測温機能付の埋込み型ひずみ計を、自由ひずみの計測は測温機能付の無応力ひずみ計を用いた。計測器の設置位置を図-2に示す。

また、各配合のφ10cm×20cm 円柱供試体を作製し、圧縮強度、静弾性係数及び割裂引張強度試験を実施した。なお、N及びBBセメントの配合は翌日、Lセメントの配合は材齢3日に脱型し、現場封緘養生を行った。

(4) 養生方法

はり部材は、外気温の変動の影響や乾燥収縮の影響を極力排除するため、上面のコテ押えを行った後、木製型枠の外側から全面気泡シート（#40×4重）とブルーシート（#3000）で28日間養生を行った。また、型枠・

支保工についても、養生と同期間存置した。

2.2 実験結果と考察

(1) 強度試験結果

圧縮強度、静弾性係数及び割裂引張強度について、各種セメントを用いた膨張コンクリートと普通コンクリートの強度や弾性係数の関係を図-3～図-5に示す。

圧縮強度については、何れのセメントを用いたコンクリートでも膨張コンクリートが普通コンクリートに比べやや大きい値を示したが、静弾性係数については、明確な傾向が見られなかった。

割裂引張強度については、N及びBBセメントを用いたコンクリートは、膨張コンクリートと普通コンクリートであり差が見られなかった。しかし、Lセメントを用いたコンクリートは、普通コンクリートが膨張コンクリートよりもやや大きい値を示した。この結果から、図-6に示す通りLセメントを用いた膨張コンクリートの引張強度は、コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾に示されている各材齢における圧縮強度から推定する引張強度に比べ小さい傾向を示す特性を持つ可能性があると考えられた。

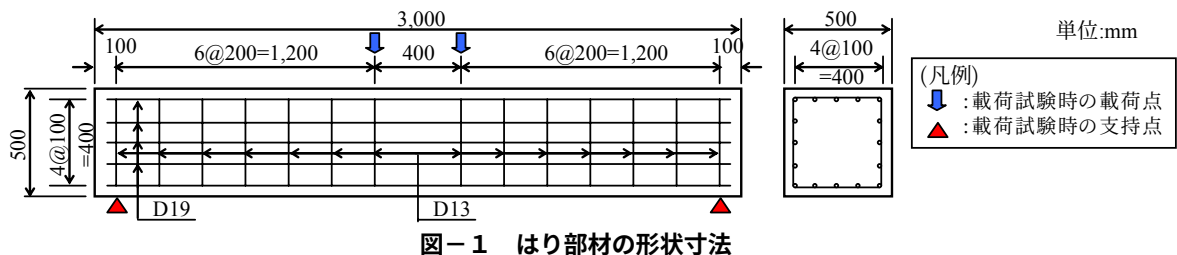


図-1 はり部材の形状寸法

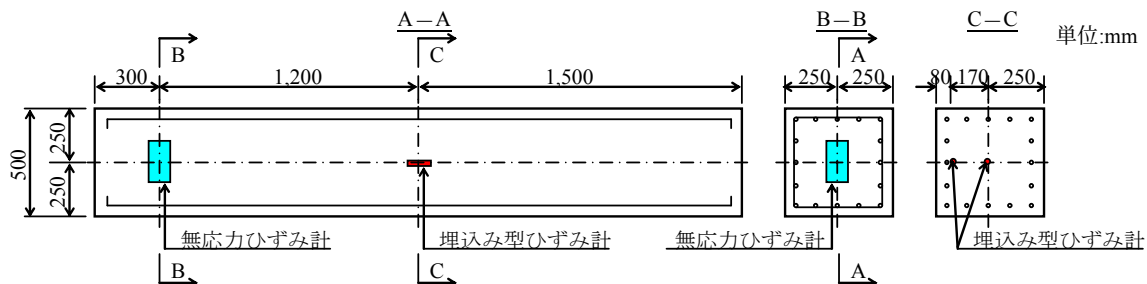


図-2 計測器配置図

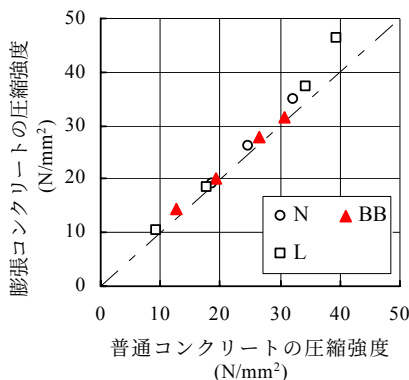


図-3 圧縮強度における膨張材の有無の影響

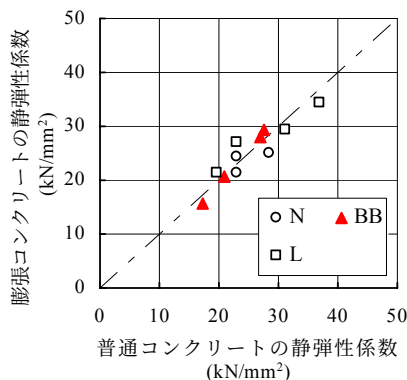


図-4 静弾性係数における膨張材の有無の影響

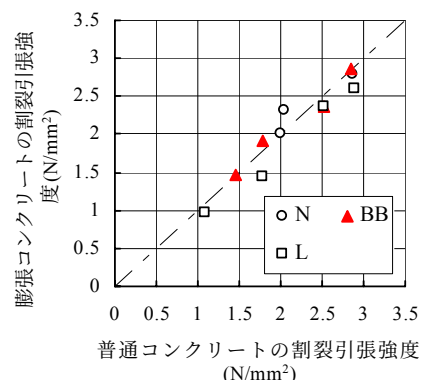


図-5 割裂引張強度における膨張材の有無の影響

(2) 温度計測結果

各セメントを用いたコンクリート製のはり部材断面中央部の温度と外気温の履歴を図-7に示す。なお、図-2で示した測温機能付埋込み型ひずみ計及び無応力ひずみ計で温度計測を実施したが、気泡シートとブルーシートの養生の効果があったため、各測点であまり温度差が見られなかった。グラフに示すはり部材の温度履歴は部材断面中央部の埋込み型ひずみ計の値のみとした。

本実験で用いた膨張材は、水和熱抑制タイプであったが、何れのセメントを用いたコンクリートでも膨張コンクリートが普通コンクリートに比べ最高温度がやや高くなる傾向が見られた。

また、気泡シートとブルーシートによる養生の効果があったため、外気温の変動の影響がほとんど見られなかった。はり部材各部の温度は、何れのセメントを用いたコンクリートでも材齢10日程度で外気温の平均値程度となり、その後計測期間中は安定していた。

(3) ひずみ計測結果

図-8にひずみ計測結果を示す。

上段は、無応力ひずみ計で計測した自由ひずみより算出した各はり部材の硬化ひずみと有効材齢との関係を示す。ここで、硬化ひずみは自由ひずみからコンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度ひずみを控除したものとした。ひずみの値は、正の値が膨張、負の値が収縮を示している。また、有効材齢は特に若材齢における評価に有効とされ、且つ各セメントの温度上昇・降下特性の違いの影響を控除できる積算温度方式による式(1)を用いた。なお、有効材齢0日は、各配合で実施した凝結時間試験の結果における終結時とした。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \left\{ (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30 \right\} \quad (1)$$

ここで、 t_e ：有効材齢(日)、 T_i ：温度($^{\circ}\text{C}$)、 Δt_i ：温度が T_i である期間(日)をそれぞれ示す。

普通コンクリートの硬化ひずみについては、BBセメント>Nセメント>Lセメントを用いたコンクリートの順で収縮量が大きい結果となった。なお、本実験では、コテ押え後から28日間前述の通り養生しており、乾燥収縮によるひずみはほとんど無かったものと考えられ、このひずみは自己収縮によるひずみと考えられる。

膨張コンクリートの硬化ひずみについては、Lセメント>Nセメント>BBセメントを用いたものの順で膨張量が大きい結果となった。特に、Lセメントを用いたコンクリートは、他セメントを用いたコンクリートに比べ大きな膨張特性が見られ、既往の知見²⁾とも合致する結果となった。また、BBセメントの配合では自己収縮の増大に伴い、若干膨張量が減少する挙動が見られた。

何れのセメントを用いたコンクリートについても膨

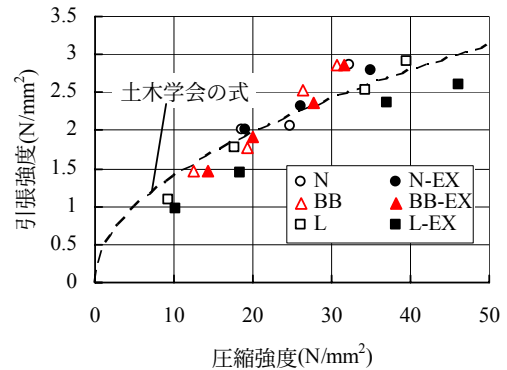


図-6 圧縮強度と割裂引張強度の関係

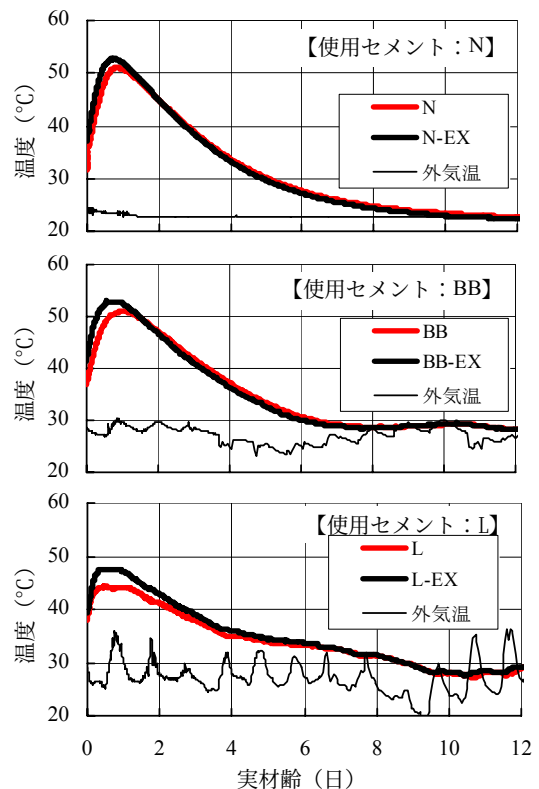
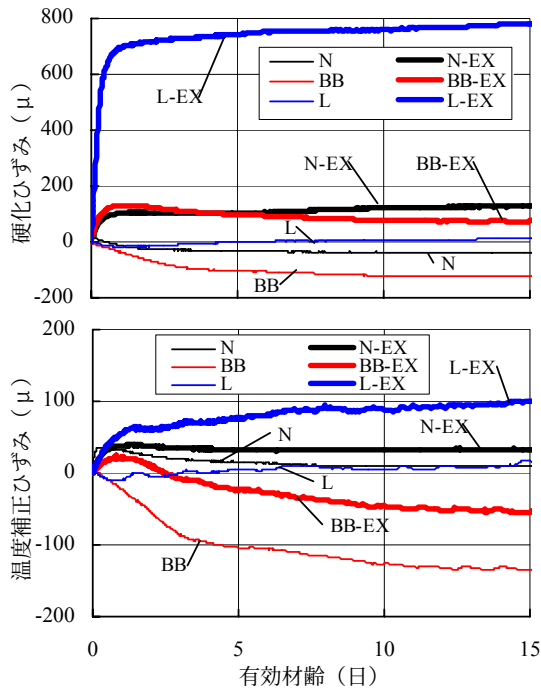


図-7 温度計測結果

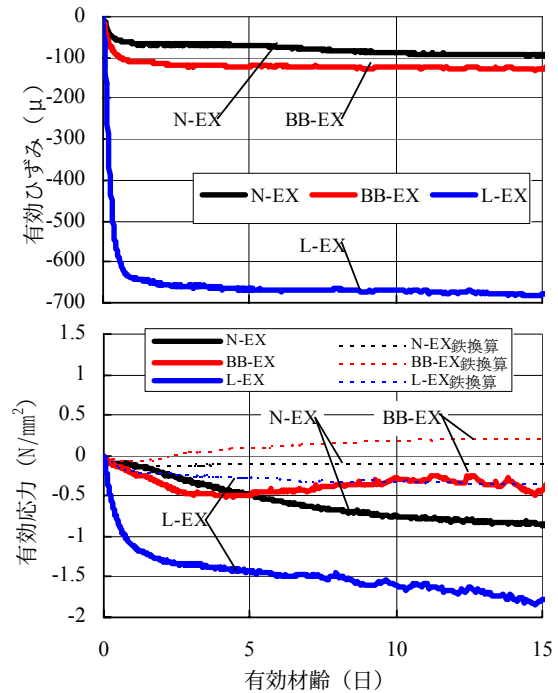
張コンクリートは普通コンクリートに比べ膨張側のひずみとなっており、膨張材の効果が確認でき、大型RCはり部材においても膨張材の収縮低減効果は有効であることが確認できた。

また、図-8下段に埋込み型ひずみ計で計測した実ひずみより算出した各セメントを用いたコンクリート製のはり部材の温度補正ひずみと有効材齢の関係を示す。ここで、温度補正ひずみは、実ひずみから前述した温度ひずみを控除したものである。実ひずみは、部材断面中央と外周鉄筋近傍で計測したが、値に差が見られなかったため、部材断面中央部の値のみを示した。

はり部材の温度補正ひずみは、硬化ひずみに比べ鉄筋の拘束効果により、何れのセメントを用いたコンクリートについてもひずみが抑制される傾向が確認できた。



図－８ ひずみと有効材齢の関係



図－９ 有効ひずみ及び有効応力と有効材齢の関係

膨張材によるケミカルプレストレス作用は、温度補正ひずみから硬化ひずみを減じたひずみ（有効ひずみと称す）に相当する応力（有効応力と称す）が部材内部に蓄積されたものと考えられ、式(2)により算出した。有効弾性係数は、コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾に示される式により算出した。

$$\sigma_e(t) = \sum_{i=1}^t \left[E_e(i) \cdot \{ \varepsilon_e(i) - \varepsilon_e(i-1) \} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_e(t)$ ：材齢 t 日の有効応力(N/mm²)、 $E_e(i)$ ：材齢 i 日の有効弾性係数(N/mm²)、 $\varepsilon_e(i)$ ：材齢 i 日の有効ひずみをそれぞれ示す。

図－９に有効ひずみ及び有効応力と有効材齢との関係を示す（正：引張側，負：圧縮側）。何れのセメントを用いた膨張コンクリートでも有効ひずみが圧縮側のひずみとなり、圧縮側の有効応力が作用しているものと考えられた。なお、有効応力は、Lセメントを用いた膨張コンクリートが最も大きく、他セメントを用いた膨張コンクリートに比べ大きな膨張材によるプレストレス作用が期待できると考えられた。

また、本実験では部材断面内の温度・ひずみにあまり差が見られなかったため、コンクリートひずみ＝鉄筋ひずみとし、力の釣合いに基いて鉄筋の拘束応力から換算したコンクリートの有効応力と比較を行った。同応力は、有効ひずみから算出した有効応力に比べ、かなり小さい値となった。要因としては、存置した型枠による拘束の影響や膨張コンクリートの初期の有効弾性係数が算定式より小さい可能性があることが考えられる。

3. はり部材の曲げ載荷試験

3.1 実験方法

ひずみ計測を実施した試験体を用いて、載荷点間距離 400mm、支点間距離 2,800mm（せん断スパン比 $a/d=2.4$ ）とする単純支持 2 点載荷（図－１参照）で曲げ載荷試験を行い、載荷荷重とはり部材中央部の変位計測を行った。変位計測は、部材中央下面に接触式変位計を 2 台設置して行った。また、部材下面に基長 100mm の π ゲージを設置し、ひび割れ幅を計測した。なお、載荷試験は、はり部材製作後 1 ヶ月程度経過したものについて実施した。

また、合わせて JCI 規準(JCI-S-001-2003)に従って切欠はりを用いた曲げ試験を各配合で 3 体ずつ製作して実施した。はりの寸法は幅 10cm、高さ 10cm、長さ 40cm で中央にコンクリートカッターで深さ 30mm の切欠を設けた。単調載荷で 3 点曲げ試験を行い、ロードセルで荷重値、 π ゲージで切欠の開口変位を計測した。

3.2 実験結果と考察

図－１０にはり部材の荷重－変位の関係を、図－１１に曲げひび割れ発生までの荷重－変位関係から得られる見かけの初期剛性を示す。なお、見かけの初期剛性は、曲げひび割れ発生荷重時の点と原点を結んだ直線の傾きとした。Nセメント及びBBセメントを用いたコンクリート製はり部材については、膨張材の添加の有無による初期剛性の違いはほとんど見られず、同程度の初期剛性と考えられた。Lセメントを用いたコンクリート製はり部材については、やや膨張コンクリートが普通コンクリートに比べ見かけの初期剛性が大きくなった。この結

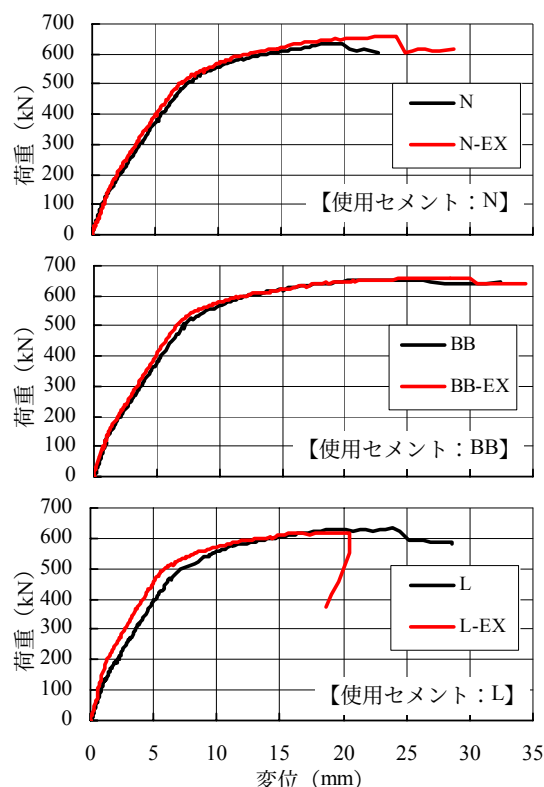


図-10 荷重-変位関係

果は、ケミカルプレストレスが比較的大きなLセメントを用いたコンクリートでは初期剛性にも違いが見られたが、比較的小さいケミカルプレストレスが小さかったNセメント及びBBセメントを用いたコンクリートでは顕著に現れなかったことを示していると考えられる。

図-12に各はり部材の曲げひび割れ発生時の荷重を示す。何れのセメントを用いたコンクリート製のはり部材においても、膨張コンクリート製のはり部材は普通コンクリート製のはり部材に比べ曲げひび割れ発生荷重がやや大きくなる傾向が見られ、既往の知見³⁴⁾とも合致する結果となった。Lセメントを用いたコンクリートで比較的小さいその差が小さかった結果は、Lセメントを用いた膨張コンクリートの引張強度が普通コンクリートに比べ小さい傾向にあったことが影響した可能性が考えられる。

図-13に各はり部材の曲げに対する耐荷力を示す。何れのセメントを用いたコンクリート製のはり部材においても膨張コンクリート製のはり部材と普通コンクリート製のはり部材の耐荷力は同程度であった。

図-14に載荷に伴うひび割れ幅の変化をπゲージで計測した結果を示す。なお、図-14に示すひび割れ幅は、等曲げ区間に発生したひび割れの内、比較するはりで類似位置に発生したひび割れの計測値とした。何れのセメントを用いたコンクリートでも膨張コンクリートが普通コンクリートよりもひび割れ幅は小さい傾向

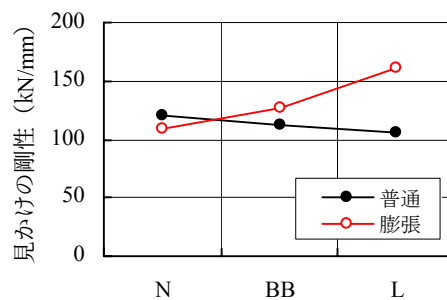


図-11 初期剛性の比較

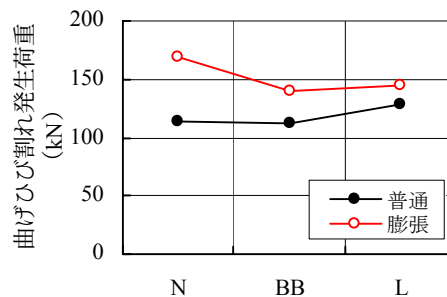


図-12 曲げひび割れ発生荷重の比較

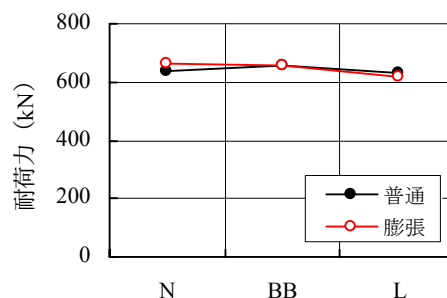


図-13 耐荷力の比較

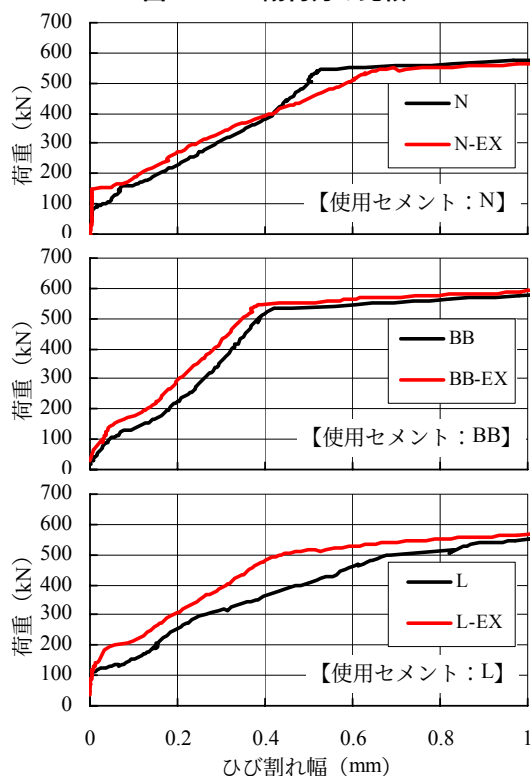


図-14 ひび割れ幅-荷重の関係

を示した。また、膨張コンクリートと普通コンクリートのひび割れ幅の差はひび割れ発生から鉄筋の降伏点付近までほぼ変わらなかった。一般に膨張コンクリートを用いた RC 部材は、外力モーメントによる鉄筋の引張ひずみが、曲げひび割れ発生後もケミカルプレストレインとほぼ同程度小さくなるとされる。定量的には合致しなかったが、N 及び BB セメントに比べやや L セメントを用いたものの差が大きい傾向は見られた。

図-15 に切欠曲げ試験の測定結果から得られた各配合の破壊エネルギーを示す。切欠きはりの破壊エネルギーは、式(3)及び(4)に示される日本コンクリート工学協会の式に従って計算した。

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \times CMOD_c \quad (3)$$

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (4)$$

ここで、 G_F ：破壊エネルギー(N/mm)、 W_0 ：試験体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積(N・mm)、 W_1 ：試験体の自重および載荷治具がなす仕事(N・mm)、 A_{lig} ：リガメントの面積(b×h)(mm²)、 m_1 ：供試体の質量(kg)、 S ：載荷スパン(mm)、 L ：供試体の全長(mm)、 m_2 ：試験機に取付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量(kg)、 g ：重力加速度(9.807m/s²)、 $CMOD_c$ ：破断時のひび割れ開口変位(mm)をそれぞれ示す。

N セメントを用いたコンクリートでは、膨張コンクリートが普通コンクリートよりも破壊エネルギーが大きくなったが、BB 及び L セメントを用いたコンクリートでは、ほぼ同程度の破壊エネルギーとなった。

L セメントを用いた膨張コンクリートで普通コンクリートに比べ比較的破壊エネルギーが小さかった結果は、L セメントを用いた膨張コンクリートの引張強度が普通コンクリートに比べ小さい傾向にあったことが影響した可能性が考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた知見は以下の通りである。

- (1) L セメントを用いた膨張コンクリートの引張強度は、一般的な圧縮強度から推定される引張強度に比べ小さい傾向が確認された。
- (2) L セメントを用いた膨張コンクリートの自由ひずみは、N 及び BB セメントを用いた膨張コンクリートに比べ明らかに大きいことが確認された。
- (3) 比較的大型のはり部材において、N、BB 及び L セメントを用いた膨張コンクリートは、収縮量の低減とプレストレス作用によるひび割れ抵抗性の増加が期待できることが確認できた。また、これらの効果は N 及び BB セメントを用いた膨張コンクリートに比べ L セ

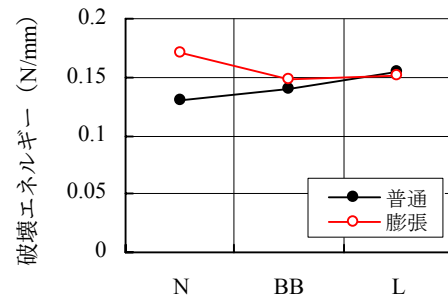


図-15 切欠曲げ試験の破壊エネルギーの比較

- メントを用いた膨張コンクリートで顕著に見られた。
- (4) N、BB セメント及び L セメントを用いた膨張コンクリート製の RC はり部材は、拘束鉄筋比が 1.8%程度で、同セメントを用いた普通コンクリート製の RC はり部材に比べてひび割れ発生荷重がやや大きくなる傾向が見られた。初期剛性については、L セメントを用いたコンクリート製のはり部材のみでやや大きい傾向が見られた。耐荷力については、何れのセメントを用いた膨張コンクリート製のはり部材でも普通コンクリート製のはり部材とほぼ同程度であった。
 - (5) N セメント、BB セメント、L セメントを用いた膨張コンクリート製の RC はり部材は、普通コンクリート製のものに比べ鉄筋降伏荷重近くまで曲げひび割れ幅が小さくなる傾向が見られた。
 - (6) 切欠曲げ試験における破壊エネルギーは、N セメントを用いたコンクリートでは膨張コンクリートが普通コンクリートよりも大きくなったが、BB 及び L セメントを用いたコンクリートではほぼ同程度であった。

なお、本実験は早稲田大学清宮研究室、五洋建設(株)、佐伯建設工業(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)、若築建設(株)、以上 6 者の共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.52-53，2002.3
- 2) 狩野 周ほか：低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.221-226，2006.6
- 3) 濱岡 洋亘ほか：低添加型膨張材を用いた RC はりの曲げ強度と軸方向鉄筋のひずみ分布，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006.6
- 4) 石田 邦洋ほか：はりの曲げ実験による膨張コンクリートの初期応力・ひずみの推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007.6