

論文 プレキャスト鉄筋コンクリートの高耐久化に関する実験的研究

溝口 稔也*1・松田 学*2・下田 誠也*3・浦野 登志雄*4

要旨：耐久性に優れるプレキャスト鉄筋コンクリート製品の開発に資する知見を得ることを目的に、高耐久化用混和材を用いたコンクリートの材料特性を評価するとともに、既存配合との比較下で RC 梁試験体の曲げ載荷試験を行った。その結果、高耐久化用混和材を用いることで既存配合に比べて各種強度が増加し、乾燥収縮ひずみの低減および塩化物イオンの浸透に対する抑制効果を確認した。RC 梁試験体による曲げ載荷試験では、既存配合の試験体に比べて曲げひび割れ耐力の向上が認められ、耐久性に優れたプレキャスト鉄筋コンクリート製品の開発が可能であることが示唆された。

キーワード：プレキャスト鉄筋コンクリート, 高耐久性, 材料特性, 曲げひび割れ耐力

1. はじめに

我が国のインフラは高度経済成長期以降に整備されたものが多く、建設後 50 年以上経過する施設の割合が増加することから老朽化が急速に進むと想定される。

更新・維持管理を適切に行うためには、点検や修繕等を実施する建設業者の確保が必要であるが、毎年 1 万人以上の人材減少が生じ、加えて時間外労働の上限規制の適用から労働時間が著しく減少している。

ICT 施工や AI 技術の活用など、生産性向上に向けた取組みに期待を寄せるが、更新・維持管理の費用縮減への要望の高まりから、コンクリート構造物の高耐久化技術に対する需要が増えている。近年では、ボックスカルバートや擁壁等の重要度の高いプレキャスト鉄筋コンクリート（以下、PCaRC と称す）製品に対して 50 年、100 年級の耐用年数を求める案件が増えつつある。

著者らは、PCaRC 製品の耐塩害性、耐硫酸性および疲労耐久性の向上に関して、経済性や施工性を踏まえて継続的に研究活動を行ってきた¹⁾⁵⁾。本研究では、PCaRC ボックスカルバートへの適用を視野に置いて、高耐久化用混和材を用いたコンクリートの材料特性の評価ならびに RC 梁試験体の曲げ載荷試験を実施し、PCaRC 製品の開発に資する知見を得ることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 材料特性の評価

2.1.1 コンクリート配合

表-1 に使用材料を示す。セメントに普通ポルトランドセメント、混和材にフライアッシュ（以下、FA と称す）、高耐久化用混和材（以下、HD と称す）および膨張材（以下、EX と称す）を使用した。

HD は初期強度の発現性や耐久性の向上を目的に開

発された混和材で SiO₂ や Al₂O₃ を多く含み、BET 比表面積 100,000cm²/g 以上の無機系微粉末である。マイクロファイバー効果に加えてポゾラン反応による緻密化により耐久性向上が期待できる⁶⁾。また、EX は RC ボックスカルバートに水密性や曲げひび割れ耐力の向上が求められる設計条件において使用している。

表-2 にコンクリート配合を示す。配合は既報にて実験に供した水結合材比 40%（設計基準強度 30N/mm² 相当）および 32%（設計基準強度 45N/mm² 相当）の FA を用いたコンクリート配合を基本とした¹⁾。

40F は水結合材比が 40%の基本配合で、40H は 40F のセメントのうち 20kg/m³ を HD に置換している。32H は水結合材比 32%の基本配合 32F（表-4 参照）からセメントの 20kg/m³ を HD に置換しており、32HE は HD と EX をそれぞれ 20kg/m³ ずつ置換している。

表-3 に実験項目および実験水準を示す。耐久性試験は試験治具・装置等の都合から、PCaRC 製品の製造で用いられる蒸気養生、あるいは水結合材比 40%のコンクリート配合に実験水準を絞って実施した。

表-1 コンクリートの使用材料

セメント	C：普通セメント（密度：3.16g/cm ³ ）
混和材	FA：フライアッシュII種（密度：2.34g/cm ³ ）
	HD：高耐久化用混和材（密度：2.37g/cm ³ ）
	EX：石灰系膨張材（密度：3.19g/cm ³ ）
細骨材	S：洗浄海砂（密度：2.57g/cm ³ ）
粗骨材	G：碎石（密度：2.92g/cm ³ , 最大寸法 20mm）
混和剤	SP：ポリカルボン酸系高性能減水剤
練混水	W：上水道水

*1 (株) ヤマックス 技術本部開発研究課 (正会員)

*2 (株) ヤマックス 執行役員 技術本部長 博士 (工学) (正会員)

*3 有明工業高等専門学校 創造工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 熊本高等専門学校 建築社会デザイン工学科教授 博士 (工学) (正会員)

2.1.2 各種強度試験

強度試験は圧縮強度試験、静弾性係数試験および割裂引張強度試験にφ100×200mmの円柱供試体、曲げ強度試験に100×100×400mmの角柱供試体を用いた。

各供試体の養生は、標準養生(W)および蒸気養生(S)とし、材齢1日(Sのみ)、14日および28日で強度試験を行った。養生方法を以下に示す。

W：打設翌日に脱型後、所定の材齢まで20±2℃の水中にて養生を行う。

S：製造工場が規定する養生条件とし、前置き2時間以上、昇温速度20℃/hr、最高温度50℃で1時間の保持を行う。打設後24時間で脱型した後、恒温恒湿室(20±2℃, 60±5%RH)で二次養生を行う。

2.1.3 耐久性試験

(1) 乾燥収縮ひずみ試験

JIS A 1129-3の「ダイヤルゲージ方法」に準拠し、100×100×400mmの角柱供試体にゲージプラグを埋設した供試体を作製した。標準養生供試体は材齢7日まで20±2℃の水中養生とし、基長の測定後は恒温恒湿室で養生を行った。蒸気養生供試体は、所定の蒸気養生を行って脱型した後に恒温恒湿室で養生を行い、材齢7日で基長を測定した。

乾燥収縮ひずみの測定は、材齢7, 14, 21, 28, 56および182日で行い、40Fおよび40Hの標準養生供試体および蒸気養生供試体を用いた。

(2) 促進中性化試験

促進中性化試験は材齢28日の角柱供試体(100×100×400mm)を用い、JIS A 1153に準拠して20℃, 60%RH, 二酸化炭素濃度5%の雰囲気で行った。材齢182日で供試体の割裂破壊した断面に、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。実験には40Fおよび40Hの標準養生供試体および蒸気養生供試体を用いた。

(3) 電気泳動法試験

電気泳動法試験はJSCE-G571-2013「電気泳動法によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」に準拠した。実験は基準の40F, 40H, 32Hおよび32HEの蒸気養生供試体を用いた。

2.2 RC梁試験体の曲げ載荷試験

2.2.1 コンクリート配合

表-4にRC梁試験体に用いたコンクリート配合を示す。実験は基本配合の32F, HDを用いた32H, EXを用いた32E, HDとEXを併用した32HEの4水準の配合で試験体を作製した。

RC梁試験体および管理供試体は、材齢14日の載荷試験時まで室内で気中養生を行った。

表-2 コンクリート配合 (材料特性)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m ³)							
			W	C	B			S	G	
					FA	HD	EX			
40F	40	38.6	165	317	100	—	—	667	1206	
40H		38.2				20	—	657		
32H	32	35.6				396	20	—		586
32HE		35.2				376	20	20		577

注) 高性能減水剤の添加量はB×0.5~0.7%で調整した。

表-3 実験項目および実験水準 (材料特性)

区分	実験項目	実験水準	
		養生方法	配合
各種強度試験	圧縮強度	標準養生 蒸気養生	40F, 40H 32H, 32HE
	曲げ強度		
	割裂引張強度		
	静弾性係数係数		
耐久性試験	乾燥収縮試験	標準養生 蒸気養生	40F, 40H
	促進中性化試験		
	電気泳動法試験	蒸気養生	40F, 40H 32H, 32HE

表-4 コンクリート配合 (RC梁試験体)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m ³)							
			W	C	B			S	G	
					FA	HD	EX			
32F	32	35.4	165	416	100	—	—	582	1206	
32H		35.2				396	20	—		577
32E		35.4				396	—	20		583
32HE		35.2				376	20	20		577

注) 高性能減水剤の添加量はB×0.5~0.7%で適宜調整した。

2.2.2 RC梁試験体および載荷方法

図-1にRC梁試験体の概要図を示す。試験体寸法は幅100mm, 長さ1800mm, 高さ200mmとした。主鉄筋には圧縮側および引張側ともにSD295のD13を2本, せん断補強筋にはSD295のD6を用いた。

配筋は全国ボックスカルバート協会規格によるRCボックスカルバート(内幅1800mm, 内高1800mm)の頂版と同等の鉄筋比となるように定めた。載荷方法はスパン長1600mm, 載荷点間距離500mmの4点曲げ載荷とし, 曲げ破壊が先行するように中央スパンを除いて100mm間隔でせん断補強筋を配置した。

図-2に測定器の取付け位置を示す。測定はスパン中央のたわみを容量100mmの変位計, スパン中央部の主鉄筋ひずみを標点距離300mmのパイ型変位計, スパン中央の下面ひずみをコンクリートひずみゲージ(ゲージ長60mm)にて測定した。

2.2.3 コンクリートの拘束膨張試験

膨張材の効果を確認するために、JCI-S-009-2012「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準拠して、RC 梁試験体の曲げ載荷試験に用いたコンクリートの膨張ひずみを測定した。

実験にはφ100×200のブリキ製円筒型枠を用い、供試体の作製後は恒温恒湿室に静置し、コンクリートの硬化が始まる前（2時間以内）に第1回目の型枠ひずみを測定した。ひずみの測定は、打設後24時間は10分間隔、その後は1時間間隔で材齢14日まで測定した。

膨張ひずみは式(1)によって算出し、四捨五入によって有効数字を3桁に丸めた。

$$\varepsilon = x_t - x_0 \quad (1)$$

ここに、 ε ：膨張ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）

x_t ：各材齢での型枠ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）

x_0 ：第一回目の型枠ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）

3. 実験結果

3.1 材料特性の評価

3.1.1 各種強度試験の結果

表-5にフレッシュ性状の結果を示す。スランプおよび空気量ともに設計値を満足し、施工性に問題がないことを確認した。表-6に各種強度試験の結果を示す。HDによって圧縮強度は増加し、40Fと40Hを各材齢で比較すると蒸気養生で33~39%、標準養生で約32%の強度増加を確認した。同様に、曲げ強度では7~12%、割裂引張強度では23~49%の増加が認められた。

一般に、ポズラン反応はセメントの水和により生成したCa(OH)₂とSiO₂やAl₂O₃がゆっくりと反応するために初期強度発現に課題があるが、HDでは初期から安定的な強度発現が得られた。HDの成分構成は不明であるが、SiO₂、Al₂O₃が豊富な超微粉末とされていることから、マイクロファイラー効果に加えて材齢初期からエトリングガイドの生成やポズラン反応による緻密化が進んでいると考えられる。

3.1.2 耐久性試験

(1) 乾燥収縮ひずみ試験

図-3に乾燥収縮ひずみと試験材齢の関係を示す。乾燥収縮ひずみの上限値は、反り、捻じれ、収縮ひび割れの低減を考慮して 800×10^{-6} 以下を目標値として設定することが多い⁷⁾。本実験による材齢182日の実験値は、40F-Wで約 600×10^{-6} 、40H-Wで約 500×10^{-6} とかなり小さく、目標値を満足する結果が得られた。

図中には40Fと同じ設計基準強度 30N/mm^2 で配合設計した普通セメントによる既報の結果（48N-W：W/C=48%、 700×10^{-6} ）を併記した¹⁾。48N-Wと比較すると、40F-W、40H-Wの順に約 100×10^{-6} ずつ小さくな

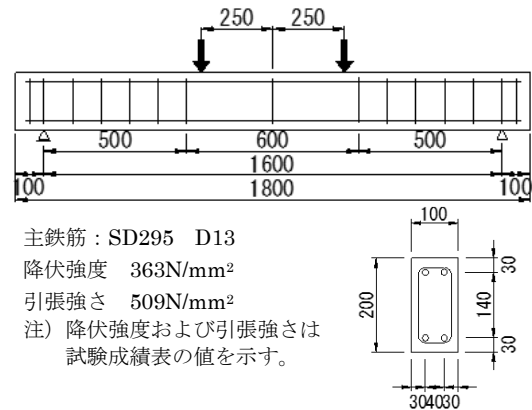


図-1 RC 梁試験体の概要図

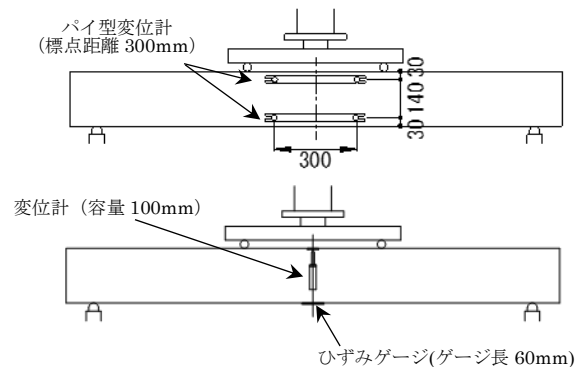


図-2 測定器の取付け位置

表-5 フレッシュ性状

配合	SL(cm)	Air(%)	コンクリート温度(°C)
40F	15.5	1.6	31
40H	16.0	1.8	32
32H	15.5	1.6	31
32HE	17.0	1.1	30

注) 設計スランプ： $18 \pm 2.5\text{cm}$ ，設計空気量： $2.0 \pm 1.5\%$

表-6 各種強度試験の結果

配合	区分	蒸気養生			標準養生	
		1日	14日	28日	14日	28日
40F	Fc	20.4	37.8	40.1	44.0	49.6
	Fb		4.14	4.27	5.67	5.67
	Ft		2.80	2.84	2.91	3.22
	Ec		33.0	34.1	38.3	38.7
40H	Fc	27.1	52.5	55.9	58.1	66.1
	Fb		4.45	4.68	6.51	7.11
	Ft		3.45	4.03	4.25	4.79
	Ec		36.5	36.7	41.9	45.8
32H	Fc	36.1	60.2	66.1	68.9	76.8
	Fb		4.33	4.50	7.17	8.67
	Ft		3.78	4.39	4.68	4.91
	Ec		39.8	43.4	45.2	44.7
32HE	Fc	37.1	59.4	68.9	73.1	79.3
	Fb		4.61	4.79	7.27	8.85
	Ft		3.87	4.45	4.86	4.93
	Ec		39.1	45.2	43.7	47.5

注) Fc：圧縮強度(N/mm²)，Fb：曲げ強度(N/mm²)，
Ft：割裂引張強度(N/mm²)，Ec：ヤング係数(kN/mm²)

り、FAに加えてHDを使用することで乾燥収縮ひずみが低減されることがわかった。

材齢 182 日の結果において養生方法で比較すると、40F-S と 40F-W の比率、40H-S と 40H-W の比率ともに 78%であった。これは初期養生中の水分逸散量の差異が影響したと考えられる。標準養生供試体は材齢 7 日まで水中養生を行うので、基長測定時の吸水率は蒸気養生供試体の方が小さくなる。すなわち、材齢 7 日以降の水分逸散量も蒸気養生供試体の方が少なくなるため、乾燥収縮ひずみは蒸気養生供試体のほうが 22%小さくなったと思われる。

(2) 促進中性化試験

図-4 に材齢 182 日の中性化深さを示す。FA と HD はともにポズランを有するため、FA と HD を併用した 40H の中性化深さが最も大きくなると思われたが、材齢 182 日の中性化深さは 40F-S > 40H-S > 40H-W > 40F-W の順であった。HD を併用しても基本配合と同等の中性化抵抗性を有することがわかった。

また、養生方法で比較すると、40F-S は 40F-W の 1.31 倍、40H-S は 40H-W の 1.07 倍の中性化深さであり、40H では養生方法による差がほとんどない。既報においては、FA や高炉スラグ微粉末等の混和材は養生方法の及ぼす影響が大きくなったが、HD では早い段階で緻密化が進んだことで養生方法による中性化の進行にあまり差が生じなかったと思われる。

(3) 電気泳動法試験

図-5 に電気泳動法試験の実験結果から求めた塩化物イオンの実効拡散係数を示す。40H は 40F に比較して実効拡散係数が 59%小さく、HD を用いることで顕著な塩化物イオンの浸透抑制効果が得られた。

40H と 32H を比較すると、実効拡散係数が 49%小さくなり、自明ではあるが水結合材比の低下による塩分浸透抑制効果が認められた。また、32H と 32HE の実効拡散係数はほぼ一致していることから、本実験の範囲では膨張材の使用が塩化物イオンの浸透性に対して影響を与えないことがわかった。

3.2 RC 梁の曲げ載荷試験

3.2.1 コンクリートの試験結果

表-7 にコンクリートの試験結果を示す。HD や EX の使用によって圧縮強度は増加し、32F に対して 32H で 24%、32E で 10%および 32HE で 14%大きくなった。曲げ強度も同様に 32H で 18%、32E で 40%および 32HE で 15%大きくなった。圧縮強度については HD による組織の緻密化効果⁶⁾、曲げ強度については EX の膨張作用により初期の収縮ひび割れが抑制されたことで 32F よりも強度が増加したと考えられる。併用した 32HE では、両者による相乗的な効果を期待したが、供試体による試験

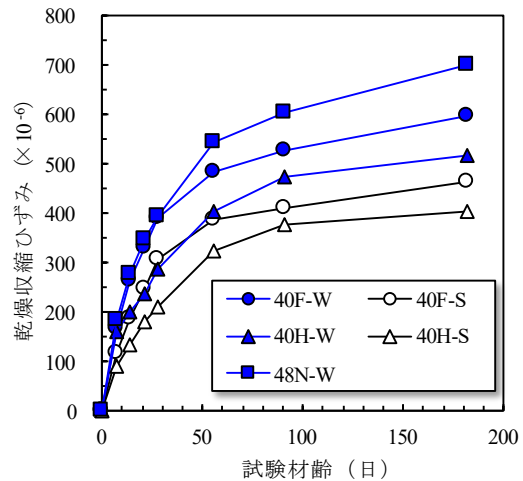


図-3 乾燥収縮ひずみと試験材齢の関係

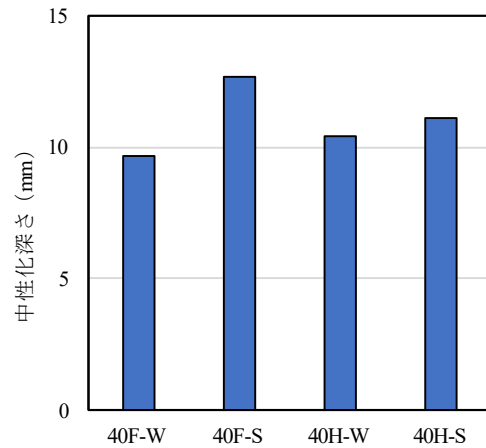


図-4 中性化深さ (材齢 182 日)

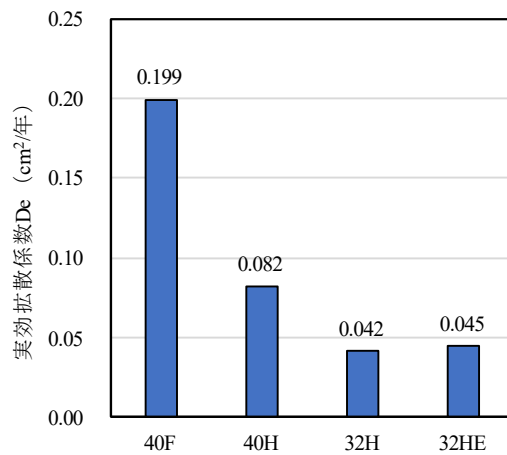


図-5 塩化物イオンの実効拡散係数

表-7 コンクリートの試験結果

配合	フレッシュ性状		硬化性状 (材齢 14 日)		
	SL (cm)	Air (%)	Fc (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	Fb (N/mm ²)
32F	19.0	0.8	54.0	37.7	5.20
32H	15.5	1.5	67.0	40.5	6.13
32E	20.5	0.6	59.4	35.5	7.26
32HE	17.0	1.1	61.7	39.9	6.00

ではそのような結果は得られなかった。

3.2.2 曲げ載荷試験の結果

(1) ひび割れおよび破壊性状

図-6にRC梁試験体の終局時のひび割れ性状を示す。全ての試験体において、純曲げ区間内での曲げひび割れの発生後にせん断スパン内での曲げせん断ひび割れが生じ、最終的には引張鉄筋の降伏後にコンクリートの曲げ圧縮破壊によって終局に至った。

(2) 曲げひび割れ耐力および変形状

図-7に荷重とスパン中央変位の関係を示す。引張鉄筋の降伏はおおよそ50kNで始まり、その後も荷重が徐々に増加しコンクリートの圧縮ひび割れの発生によって一旦は荷重の低下が認められるが、圧縮鉄筋の負担によりその後も荷重が保持された後に終局に至った。

曲げひび割れの発生荷重は、32Fで12kN、32Hで17kN、32Eで21kNおよび32HEでは23kNで確認され、RC梁試験体の曲げひび割れ耐力の向上には、HD+EX>EX>HDの順で混和材の効果が確認された。

(3) 実験値と計算値の比較

図-8に曲げモーメントと曲率の関係、表-8に実験値と計算値の比較を示す。なお、煩雑化を避けるために図中には32Fの曲げ解析値のみを示した。

曲げ解析はコンクリートの圧縮応力とひずみの関係から、曲げひび割れおよび降伏時点の計算を等価断面による弾性解析、終局時点の計算を等価応力ブロック法（コンクリートの終局ひずみ:0.0035）によって求めた。なお、材料特性値には各コンクリートの強度試験結果を代入した。

32Fの曲げ解析による計算値はひび割れ発生・成長・増加が進む弾性的応答範囲、引張鉄筋の降伏を妥当な精度で表現している。一方で、32Hの計算値はひび割れ耐力、32Eと32HEの計算値はひび割れ耐力および終局耐力の実験値を過小に評価している。

膨張作用によるケミカルプレストレスは、PC鋼材を用いて所定の導入力を与えるPC構造と違い定量的な導入力の把握が出来ないために、曲げ解析の計算値はケミカルプレストレスを考慮していない。したがって、計算値に対して増加した曲げ耐力は、混和材による膨張作用が内部の鉄筋に拘束されて導入されたケミカルプレストレスの効果であると判断される。

曲げひび割れ耐力の実験値は、32HE>32E>32H>32Fの順に大きいことから、ケミカルプレストレスの効果についてもこの順で作用していると思われる。

(4) RCボックスカルバートへの適用性

図-9にRC梁試験体のひび割れ発生荷重から求めた曲げ強度（縁応力度）を示す。図中には全国ボックスカルバート協会の規格によるRC1種（一般の構造物、

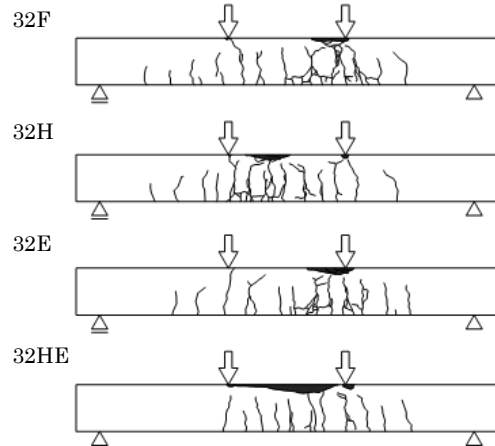


図-6 終局時のひび割れ性状

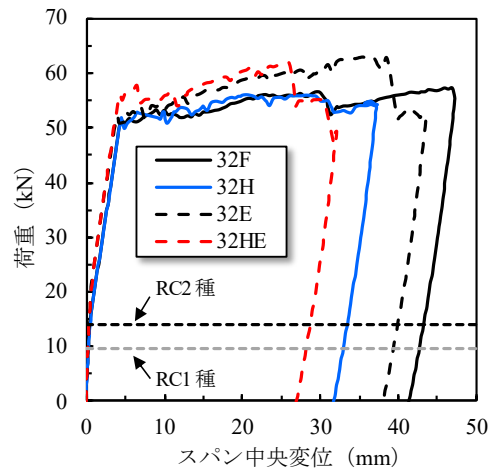


図-7 荷重とスパン中央変位の関係

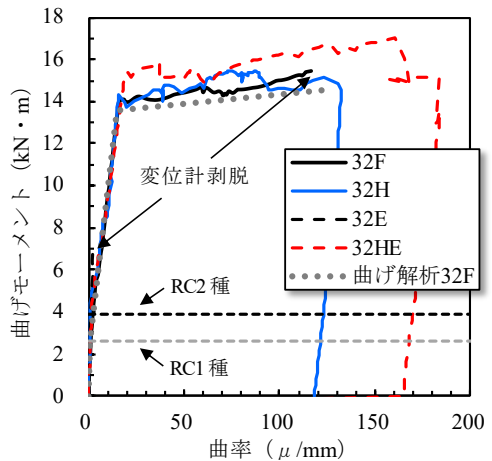


図-8 曲げモーメントと曲率の関係

表-8 実験値と計算値の比較

配合	実験値(kN・m)			計算値(kN・m)		
	Mcr	My	Mu	Mcr	My	Mu
32F	3.30	14.1	15.8	2.57	13.6	14.5
32H	4.68	14.3	15.5	2.94		14.9
32E	5.78	14.4	17.4	2.77		14.7
32HE	6.33	15.4	17.0	2.79		14.8

注) Mcr : ひび割れ発生モーメント, My : 降伏モーメント, Mu : 終局モーメント

3.4N/mm²) および RC2 種 (高い水密性を必要とする構造物, 5.0N/mm²) のボックスカルバートに要求されるコンクリートの曲げ強度を併記した。

RC1 種に要求される曲げ強度は全ての試験体で満足したが, RC2 種の規格値は 32F のみ満足しなかった。32F は膨張材を用いておらず RC1 種規格に対応した配合であり想定通りの結果であるが, HD を用いた 32H では RC2 種の規格値を満足する結果が得られた。

表-9 に RC 梁試験体および管理供試体の曲げ強度を示す。32H と 32E では RC 梁試験体と管理供試体の曲げ強度の比率がほぼ一致したが, 32F では 21%過大に, 32HE では 27%過小に評価される結果となった。

3.2.3 コンクリートの拘束膨張試験

図-10 に拘束膨張ひずみと材齢の関係を示す。32E と 32HE では膨張ひずみ, 32F と 32H では収縮ひずみが生じていることが明らかとなった。RC 梁試験体の曲げひび割れ耐力の結果から, 32HE の膨張ひずみが最も大きいものと推測されたが, 材齢 14 日の膨張ひずみは, 32E > 32HE > 32H > 32F の順であった。

HD が膨張材の水和反応を阻害した, あるいは初期の緻密化が膨張効果を抑制した等の影響が考えられるが, 今後, 組織の分析・観察による検討を進めたいと考える。

4. まとめ

本研究の結果, 以下のことが明らかとなった。

- 1) 高耐久化用混和材を用いることで既存配合に比べて各種強度が増加し, 同等の中性化抵抗性および乾燥収縮ひずみの低減が得られた。
- 2) 電気泳動法試験の結果から求めた塩化物イオンの実効拡散係数は, 既存配合よりも 59%小さくなり, 顕著な塩化物イオンの浸透抑制効果が得られた。
- 3) RC 梁試験体による曲げ載荷試験では, 既存配合の 32F 試験体に比べて 32H, 32E および 32HE の曲げひび割れ耐力の向上が認められ, RC2 種ボックスカルバートで要求される曲げ強度を満足する結果が得られた。

参考文献

- 1) 浦野登志雄ほか：フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混和材に用いたプレキャスト部材用コンクリートの強度特性および塩分浸透性について, セメントコンクリート論文集, Vol.69, pp.311-318, 2015
- 2) 浦野登志雄ほか：短繊維補強コンクリートを用いた集水蓋の開発に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.333-338, 2016
- 3) 井形友彦ほか：環境負荷低減に考慮した各種モルタル調合による耐硫酸性向上に関する研究, Vol.73,

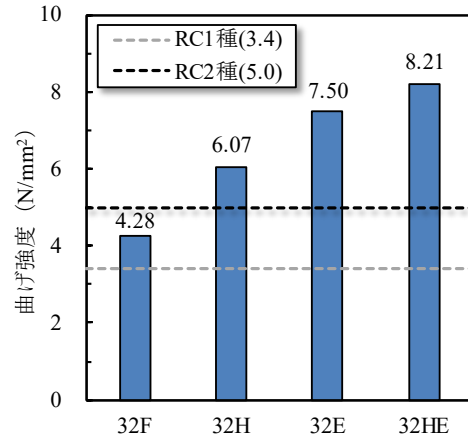


図-9 RC 梁試験体の曲げ強度

表-9 RC 梁試験体と管理供試体の曲げ強度

配合	曲げ強度(N/mm ²)		Fb/Fb'	合否判定	
	Fb	Fb'		RC1	RC2
32F	5.20	4.28	1.21	○	×
32H	6.13	6.07	1.01	○	○
32E	7.26	7.50	0.97	○	○
32HE	6.00	8.21	0.73	○	○

注) Fb : 管理供試体, Fb' : RC 梁試験体

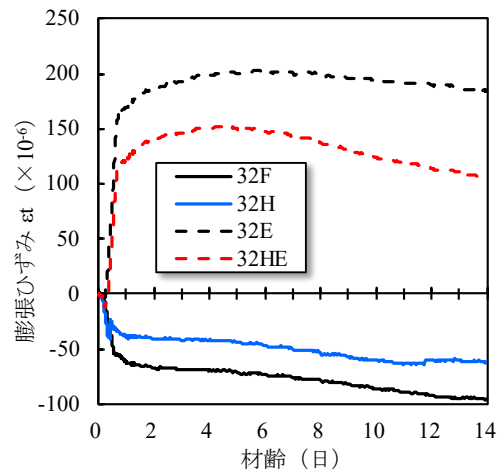


図-10 拘束膨張ひずみと材齢の関係

pp.237-243, 2019

- 4) 井形友彦ほか：特殊無機微粉末を用いたプレキャスト部材用コンクリートの塩分浸透性について, セメントコンクリート論文集, Vol.73, pp.259-265, 2019
- 5) 溝口稔也ほか：有機系短繊維を用いたコンクリートの曲げ疲労特性に関する実験的研究, セメントコンクリート論文集, Vol.74, pp.281-286, 2020
- 6) 石田剛郎ほか：耐塩害・高耐久性混和材を用いたコンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.733-738, 2015
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2018