

# 論文 SEC コンクリートによる橋梁床版の品質改善に関する検討

伊藤 祐二<sup>\*1</sup>・戸田 勝哉<sup>\*2</sup>・塩永 亮介<sup>\*3</sup>

**要旨:** 橋梁床版コンクリートにはひび割れや活荷重に対しての高い耐久性が要求されており, SEC コンクリートの適用が増加しつつある。本報では, SEC コンクリートの強度の安定性やひび割れ抵抗性の向上に着目し, 圧縮および純引張強度, 載荷時 AE, 載荷応力レベルと透水係数の関係, および初期微小欠陥について検討した。その結果, SEC コンクリートはその練混ぜ方法から通常の場合と比べて初期微小欠陥が少ないことが, 純引張強度や圧縮強度の向上と安定性に寄与し, さらにある程度の応力レベルまでは内部欠陥の連結が少ないことが最終的には透水性など耐久性の向上に関係していると考えられた。

**キーワード:** SEC コンクリート, 強度特性, 変動係数, AE 計測, 透水係数, 微小欠陥

## 1. はじめに

橋梁床版は版厚が小で面積が大であり, 舗装が施工されるまで天候による乾湿が繰り返される。また, 供用後は常に活荷重を受け, 雨水や融雪剤の床版内部への侵入による鋼材腐食が懸念される。すなわち, 橋梁床版コンクリートにはひび割れや活荷重などに対しての高い耐久性が要求される。そこで, SEC コンクリートのひび割れ抵抗性や耐久性の向上を生かし, 橋梁床版への適用が行われつつある。以下, 本報では SEC コンクリートの強度の安定性と, ひび割れ抵抗性の向上に着目した検討について報告する。

## 2. SEC コンクリート

SEC コンクリートは製造時に練混ぜ水が分割投入され, 一次練りと二次練りに分けられることを特徴とする分割練混ぜで製造されたコンクリートの一種である。図-1 に SEC 練混ぜのフローを示す。この図のように, まず骨材表面に一次水を均等に配置した後セメントを投入して練混ぜる(一次練り)ことによって, 後述する「キャピラリー状態」でセメントと水を練混ぜることが可能となる。さらに骨材表面がキャピラリー状態の(低水セメント比の)セメントペーストによって覆われること(造殻)が, 「SEC コンクリート」の特長である。

写真-1 に細骨材と造殻された細骨材の比較を示す。この造殻がコンクリート中に存在することと, キャピラリー状態を経てスラリー状態になったセメントペーストがコンクリートを形成することが, SEC コンクリートの特徴を生み出す。通常は水を一度に投入して練混ぜるので, キャピラリー状態を経ることがなく, コンクリートにセメントのダマが多数残る。

図-2 に粉体粒子における水の存在状態<sup>2)</sup>を示す。粉

体工学によると粉体粒子(セメントなど)が水と混合されるとき, 水の量に応じて図-2の(a)から(d)の状態にいたる。キャピラリー状態(c)では粒子間が水で満たされ, 粒子間結合力が最大となり, 練混ぜトルクも最大となる。キャピラリー状態で練混ぜられたセメントは, 大きなエ

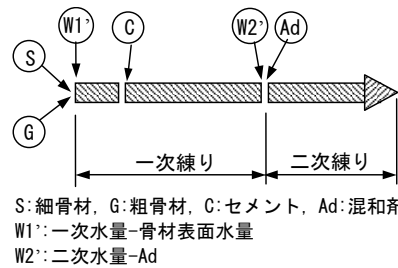


図-1 SEC 練混ぜのフロー(全造殻方式)



写真-1 細骨材(左)と造殻された細骨材(右)の比較

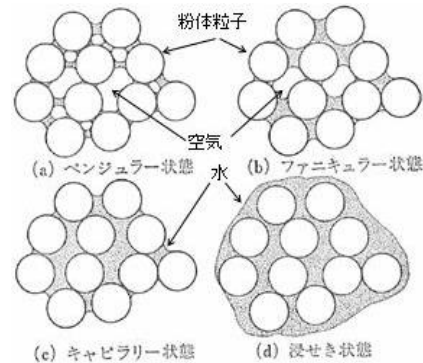


図-2 粉体粒子における水の存在状態

\*1 リブコンエンジニアリング(株) 代表取締役社長 工修(正会員)

\*2 (株) I H I インフラシステム 開発部 課長 工博(正会員)

\*3 (株) I H I 技術開発本部 基盤技術研究所構造研究部 主任研究員 工修(正会員)

エネルギーで練混ぜられた後に、さらに水を加えて練混ぜてペーストとなると、セメント粒子が分散して保水性が向上するため、ブリーディングが減少する<sup>3)</sup>。

SEC コンクリートには以下のような特徴がある。

- 1) ブリーディングが減少，材料分離抵抗性が增大<sup>3)</sup>。
- 2) ポンプ圧送性が向上<sup>4)</sup>。
- 3) 振動下の充てん性が向上<sup>5)</sup>。
- 4) 構造体コンクリートのひび割れが減少<sup>6)</sup>。
- 5) 構造体コンクリートの強度が安定し，向上<sup>7)</sup>。

### 3. SEC と通常コンクリートの強度比較

#### 3.1 圧縮強度の比較

図-3 に SEC および通常コンクリートの場合のセメント水比(C/W)と圧縮強度の関係を示す。この時の水セメント比は 31.3%~65%までの広い範囲で、試験室で練混ぜたコンクリートで圧縮強度を比較した。

この図によると、同一 C/W と材齢では SEC の圧縮強度は通常の場合と比べて 2~3N/mm<sup>2</sup>大きく、C/W とほぼ直線の関係があることが分かる。

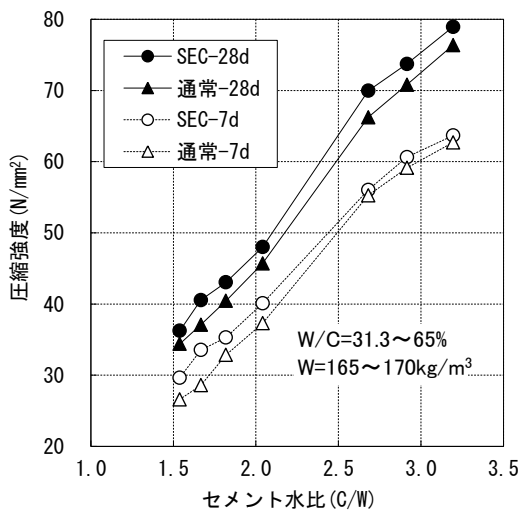


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

### 3.2 純引張強度の比較

表-1 にコンクリートの使用材料を、表-2 に配合およびフレッシュ試験結果を示す。通常コンクリートと比べて SEC の場合には乾燥収縮ひび割れが減少することや、構造体コンクリートのコア強度が安定していることが報告されている<sup>7)</sup>。これらの特徴は練混ぜ方法の相違によって、コンクリートの初期微小欠陥が SEC の場合に通常と比べて少ないのではないかと考えられた。そこで、練混ぜ方法を SEC および通常とした橋梁床版配合のコンクリート(表-2 参照)を作成し、試験体の純引張強度を比較した。なお、試験体はφ10×20cm 円筒型枠にコンクリート打込み後、材齢 1 日で脱型して標準養生を材齢 7 日まで実施する。両端面を研磨して 20°C60%RH の恒温恒湿室にて材齢 10 日まで乾燥させた後、純引張強度試験用端盤をエポキシ樹脂で接着した。材齢 14 日にユニバーサルジョイント付テンションロッドを端盤に接続し、試験体軸方向の引張荷重を与えて、純引張強度を試験した

表-3 純引張強度試験結果(材齢 14 日)

種別	No.	純引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	平均強度 (N/mm <sup>2</sup> )	強度の最大値/最小値	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	備考
SEC	1	1.77	2.10	2.43/1.77	0.23	10.8	圧縮強度: 37.5 (N/mm <sup>2</sup> ) 割裂引張強度: 2.69 (N/mm <sup>2</sup> )
	2	2.06					
	3	2.11					
	4	2.28					
	5	1.86					
	6	2.43					
	7	2.19					
	8	2.13					
	9	2.36					
	10	1.82					
通常	1	2.22	2.03	2.50/1.36	0.33	16.2	圧縮強度: 37.3 (N/mm <sup>2</sup> ) 割裂引張強度: 2.64 (N/mm <sup>2</sup> )
	2	2.22					
	3	2.20					
	4	1.73					
	5	1.71					
	6	2.10					
	7	1.36					
	8	2.50					
	9	2.13					
	10	2.10					

表-1 コンクリートの使用材料

材料種類	記号	種別・産地・特性値	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメント	C	普通ポルトランドセメント(拘束水率 α 25%)	3.16
細骨材	S1	佐野市砕砂 (FM3.27, 吸水率 1.27%, β <sub>OH</sub> =1.39%)	2.66
	S2	成田市陸砂 (FM1.90, 吸水率 2.72%, β <sub>OH</sub> =3.44%)	2.60
粗骨材	G	静岡県大井川砕石 (最大寸法 20mm, 吸水率 0.37%)	2.65
標準型 AE 減水剤	Ad	変性リグニンスルホン酸化合物	1.08

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							スラン プ(cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W1	W2	C	S1	S2	G	Ad			
SEC	49.3	45.3	97.6	69.4	339	575	241	986	3.726	12.0	4.2	19.3
通常			167							11.5	5.2	19.4
練混手順 SEC: S1+S2+G+W1 投入→練り 15 秒→C 投入→練り 30 秒→W2+Ad 投入→練り 60 秒→排出 通常: G+S1+S2+C+W+Ad 投入→練り 90 秒→排出												

(写真—2 参照)。表—3 に純引張強度試験結果を、圧縮および割裂引張強度とともに示す。

これによると、圧縮強度、割裂引張強度とともに通常と SEC の純引張強度にはそれほど大きな差は無いが、SEC の純引張強度が通常の場合と比べて大きくなっている。さらに、各 10 体の試験値のバラツキを SEC と通常の場合とで比較すると明らかに通常の場合が大きく、その標準偏差と変動係数はほぼ 1.5 倍となっている。このことは、「コンクリートの初期微小欠陥が SEC の場合には通常と比べて少ないのではないか」という推定の裏付けの一つと言える。

#### 4. コンクリート荷重時の AE 計測

##### 4.1 概要

コンクリートに荷重した場合、アコースティックエミッション(AE)は、内部の微小なクラックの発生や進展に伴って発生する。練混ぜ方法を変えたコンクリートの荷重時に AE 計測を行うことで、硬化コンクリート内部状態の相違を検討した。表—4 に試験項目を示す。なお、応力レベル 35%は弾性領域を、応力レベル 85%はクリープ破壊領域の代表として採用した。

##### 4.2 圧縮荷重

試験体は橋梁床版工事で用いられたコンクリートを、現場で採取して作成した。表—5 と 6 にコンクリート材料と配合およびフレッシュ試験結果を示す。

図—4 に圧縮荷重の場合の応力レベルと AE 累積イベント数の関係を示す。この図より SEC と通常コンクリートの場合を比較すると、以下のようになる。

- 1) 各応力レベルにおける AE 累積イベント数は、SEC の場合が通常と比べて大きい。
  - 2) 破壊直前から破壊にかけて発生した AE 累積イベント数は、SEC の場合に通常と比べてはるかに大きい。
- 1)のことは、SEC の場合に発生した AE はマイクロク

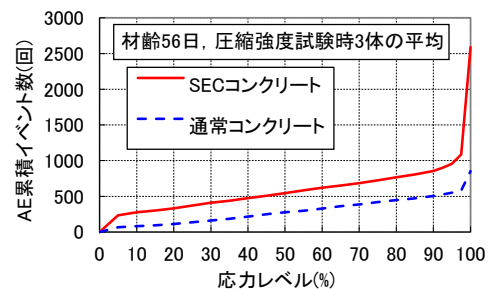
ラック(MC)の大きさが比較的小さく連結しない状態が発生するため、ある応力レベルで AE 発生数が多くなると考えられる。また、2)のことは SEC コンクリート特有の造殻によるクラックアレスト効果を、打ち破って MC が連結してクラックとなるのに必要な MC 数が通常の場合よりも大きいためと考えられる。

##### 4.3 純引張荷重

3.2 節で述べた試験体の純引張強度試験を材齢 21 日にて、AE 計測を行いながら実施した。写真—2 に AE 計測純引張強度試験状況を示す。AE 計測は試験体中央に設

表—4 AE 計測試験項目

荷重方向	項目	水準
圧縮	圧縮強度試験	応力レベル100%
	AE計測	応力レベル35, 85, 100%
純引張	引張強度試験	応力レベル100%
	AE計測	



図—4 応力レベルと AE 累積イベント数の関係



写真—2 AE 計測純引張強度試験状況

表—5 コンクリートの使用材料

材料種類	記号	種別・産地・特性値	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメント	C	普通ポルトランドセメント(拘束水率 $\alpha=25\%$ )	3.16
細骨材 (合成砂, $\beta_{OH}=1.49\%$ )	S1	横瀬町石灰砕砂 (FM2.76, 吸水率 1.18%)	2.66
	S2	佐原市陸砂 (FM1.80, 吸水率 2.76%)	2.59
	S3	西多摩郡砂岩砕砂 (FM3.04, 吸水率 1.28%)	2.66
粗骨材	G	西多摩郡砂岩砕石(最大寸法 20mm, FM6.58, 吸水率 0.61%)	2.65
標準型 AE 減水剤	Ad	変性リグニンスルホン酸化合物	1.08

表—6 コンクリートの配合およびフレッシュ試験結果

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							スラン プ(cm)	空気 量(%)	温度 (°C)	
			W1	W2	C	S1	S2	S3	G				Ad
SEC	51.6	45.0	89.9	70.1	310	332	166	332	1019	3.10	11.0	4.4	28.0
通常			160								10.5	5.2	25.0

置した AE センサ 1 点で実施した。表-7 に試験結果を、図-5 に応力レベルと AE 累積イベント数の関係例を示す。表-7 によると材齢 14 日の試験結果と同様に、SEC コンクリートの場合には通常と比べて平均強度が大きく (1.14 倍)、標準偏差と変動係数が明らかに小さい (変動係数はほぼ 60%) ことが分かる。なお、この傾向は材齢 14 日の場合よりも 21 日の場合に明瞭となっており、SEC コンクリートの強度安定性は、通常の場合と比べて非常に高いと言える。

また、純引張試験時に発生した AE 累積イベント数は、予想では引張強度の大きい SEC の場合に多いと予想したが、結果は逆であった。図-5 は AE 累積イベント数が近い SEC の No.1 と通常の No.3 を比較したが、応力レベルと AE 累積イベント数の関係は、SEC コンクリートの場合には破壊直前の応力レベル 95% から AE が急増するのに対して、通常の場合には応力レベル 90% 程度から AE が急増している。平均累積 AE イベント数も、SEC の場合にバラツキが通常と比べてはるかに小さい。

本章の載荷応力レベルと AE 累積イベント数の関係を考えると、SEC コンクリートは通常の場合と比べて、純引張載荷によって発生するマイクロクラック (MC) の大きさが小さく、MC の連結も発生しにくい (クラックアレスト効果) ことに特徴があると考えられる。そのため、SEC の場合には、純引張強度に達する直前に MC の発生と連結が急速に進行し、破壊に至ると考えられるので、最終発生 AE を計測できていない可能性もある。

## 5. SEC と通常コンクリートの透気透水性状

### 5.1 概要

4. 章の結果より、載荷によって発生する MC やその連結状態が SEC と通常コンクリートの場合とで異なると考えられる。そこで、アウトプット方式の透水透気試験装置を用い、表-8 に示す試験条件で透気係数と透水係数を比較した。この試験は試験体側面をシールして装置 (圧力容器中) に設置し、気圧 (水圧) を作用させて試験体上部から下部への単位時間当たりの透気 (透水) 量を測定して、係数を求める試験である。

### 5.2 透気係数

表-9 に透気係数試験結果を示す。この表によると SEC コンクリートの透気係数は通常の場合と比べて小さく、80% 程度であった。応力レベル 0% の試験体 (未載荷状態) の場合には両方のコンクリートの内部で、透気に関係する初期微小欠陥の量はそれほど大きな差では無いと考えられる。

### 5.3 透水係数

表-10 に透水係数試験結果を示す。この表によると応力レベル 0% の場合の透水係数には両方のコンクリー

表-7 純引張強度および AE 計測結果 (材齢 21 日)

種別	No.	純引張強度	純引張強度の状況	AE 累積イベント数	AE 累積イベント数の状況
		(N/mm <sup>2</sup> )			
SEC	1	3.13	平均強度: 3.04(N/mm <sup>2</sup> ) 変動係数:5.5(%)	31	平均イベント数: 17.4(回) 変動係数:46.6(%)
	2	2.85		10	
	3	3.07		18	
	4	2.89		14	
	5	3.25		14	
通常	1	2.89	平均強度: 2.67(N/mm <sup>2</sup> ) 変動係数:9.2(%)	64	平均イベント数: 30.0(回) 変動係数:71.1(%)
	2	2.76		9	
	3	2.89		36	
	4	2.47		25	
	5	2.36		16	

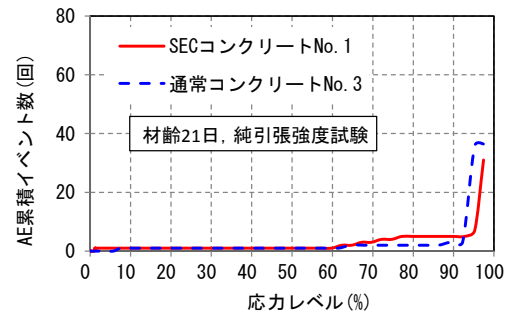


図-5 応力レベルと AE 累積イベント数の関係例

表-8 透気および透水試験方法

種別	試験条件
透気試験	試験体:φ10×5cm, 載荷圧力0.5MPa, 応力レベル0%, 透気量は最小二乗法により算出
透水試験	試験体:φ10×5cm, 載荷圧力2MPa, 応力レベル0.35,85%, 透水量は最小二乗法により算出

表-9 透気係数試験結果

種別	No.	厚さ (cm)	面積 (cm <sup>2</sup> )	透気量 (ml/s)	透気係数 (×10 <sup>-8</sup> m/s)	
					各値	平均
SEC	1	15.04	164.67	0.0232	1.493	1.360
	2	15.14	164.67	0.0196	1.270	
	3	15.02	164.67	0.0205	1.318	
通常	1	15.11	164.44	0.0287	1.859	1.693
	2	15.03	164.44	0.0265	1.707	
	3	15.02	164.44	0.0235	1.513	

表-10 透水係数試験結果

種別	応力レベル (%)	No.	厚さ (cm)	断面積 (cm <sup>2</sup> )	流出量 (ml/s)	透水係数 (×10 <sup>-13</sup> m/s)		
						各値	平均	
SEC	0	1	5.0	78.54	0.000016	5.09	5.2	
		2			0.000013	4.13		
		3			0.000020	6.37		
	35	1			0.000013	4.28		5.3
		2			0.000018	5.92		
		3			0.000018	5.71		
	85	1			0.000197	62.7		50.4
		2			0.000127	40.4		
		3			0.000151	48.1		
通常	0	1	5.0	78.54	0.000015	4.77	6.9	
		2			0.000026	8.27		
		3			0.000024	7.64		
	35	1			0.000037	11.6		12.5
		2			0.000035	11.2		
		3			0.000044	14.6		
	85	1			0.001887	601		660.0
		2			0.001192	379		
		3			0.003137	999		

トに透気の場合と同様に、それほど差が無いことが分かる。しかしながら、応力レベルが大きくなるとともに透水係数の増加状況が、SEC コンクリートと通常の場合では大きく異なっている。

そこで、応力レベル、AE 累積イベント数、透水係数と圧縮強度をまとめて整理して、表-11とした。また、応力レベルと透水係数の関係を図-6に示す。これらの図表により、以下のことが分かる。

- 1) SEC コンクリートの透水係数は応力レベルが弾性領域の35%では0%の場合とほぼ変わらず、クリーブ破壊領域である85%の場合に9.7倍(=50.4/5.2)の値となった。
- 2) 通常コンクリートの場合には応力レベルが弾性領域の35%では0%の場合の1.8倍(=12.5/6.9), クリーブ破壊領域である85%の場合に約96倍(=660/6.9)となった。
- 3) 応力レベルを変化させた載荷試験時(35,85,100%)のAE 累積イベント数を、SEC コンクリートと通常とで比べると、どの応力レベルでもSEC の場合が通常よりも大きく、100%の場合に特に大きくなっている(図-7参照)。
- 4) 前述の1)~3)を考慮すると、SEC コンクリート試験体載荷時に発生するマイクロクラック(MC)は通常の場合と比べて小さくて連結しにくい特徴が有り、破壊直前で連結が急速に進行すると考えられる。
- 5) 一般に実施される未載荷状態試験体の透水係数試験では、応力状態下にある実構造体コンクリートの透水係数を小さめに評価している可能性が有る。

## 6. 試験体内部の初期微小欠陥観察

### 6.1 試験概要

SEC および通常コンクリートの試験体を作成し、試験体内部の初期微小欠陥を観察した。試験体高さは橋梁床版打設高さのほぼ最大と見なされる40cmとし、直径は10cmとした。試験体はコンクリート打込み後、材齢1日で脱型して標準養生を材齢7日まで実施する。その後、20°C60%RHの恒温恒湿室に移して、材齢10日まで乾燥させ、試験体を切断して観察に供した。

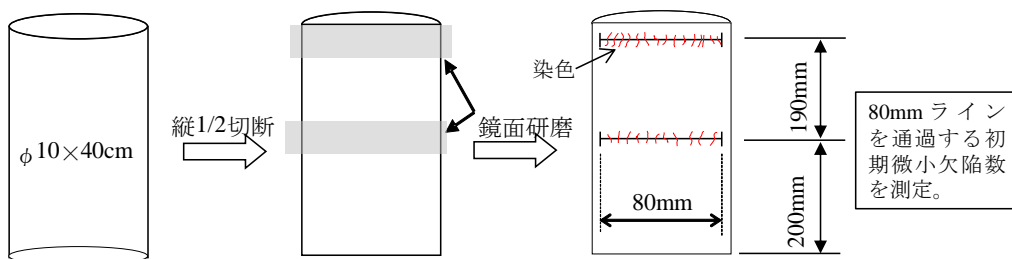


図-8 初期微小欠陥部の観察方法

微小欠陥(MD)観察は各試験体の上部および中心部のライン付近を鏡面研磨し、染色してMDを際立たせ、ラインを横切るMD数を測定した(図-8参照)。なお、試験体数は各ケース5体とした。

### 6.2 観察結果

初期微小欠陥観察結果を図-9に、典型的な初期微小欠陥を写真-3に示す。この図より以下のことが分かる。

- 1) SEC コンクリートのMD本数は通常と比べて上部と中央部も半分以下である。

表-11 透水係数とAE 累積イベント数

項目	SECコンクリート				通常コンクリート			
	0	35	85	100	0	35	85	100
応力レベル(%)	0	35	85	100	0	35	85	100
AE累積イベント数(回)	-	439	805	2589	-	186	472	852
透水係数( $\times 10^{-13}$ m/s)	5.2	5.3	50.4	-	6.9	12.5	660.0	-
応力レベル0%透水係数に対する比率	1.0	1.0	9.7	-	1.0	1.8	95.7	-
材齢56日圧縮強度	46.8 (N/mm <sup>2</sup> )				44.6 (N/mm <sup>2</sup> )			

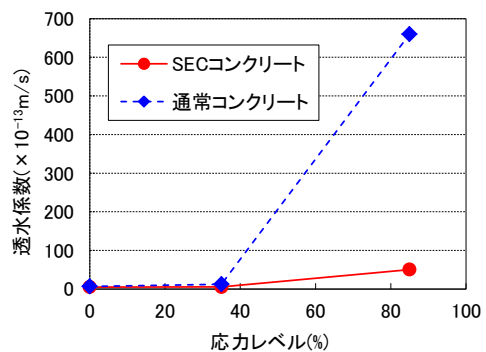


図-6 応力レベルと透水係数の関係

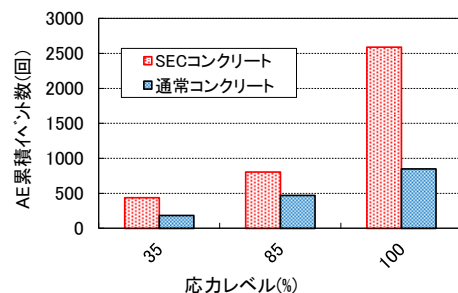


図-7 応力レベルとAE 累積イベント数の関係

- 2) MD本数はコンクリート種別にかかわらず、上部よりも中央部の場合に多い。
- 3) SEC コンクリートはその練混ぜ方法から通常の場合と比べて初期微小欠陥が少ないことが、純引張強度や圧縮強度の向上と安定性に関係していると考えられる。

7. まとめ

橋梁床版コンクリートにはひび割れや活荷重などに対する高い耐久性が要求される。そこで、SEC コンクリートの強度の安定性やひび割れ抵抗性の向上に着目し、種々検討を実施した。その結果、本検討の範囲内で以下のことが言える。

- 1) SEC コンクリートの純引張強度を通常の場合と比べると、平均強度が大きく標準偏差と変動係数が明らかに小さく、強度安定性は通常の場合と比べて非常に高いと言える。
- 2) 応力レベルを変化させた荷重試験体(0,35,85%)の透水係数をSECコンクリートと通常とで比べると、SECの場合には応力レベル85%の場合であっても0%と比べて10倍程度になるだけだが、通常の場合には約100倍となった(表-11参照)。
- 3) SECおよび通常コンクリートの試験体を作成し、試

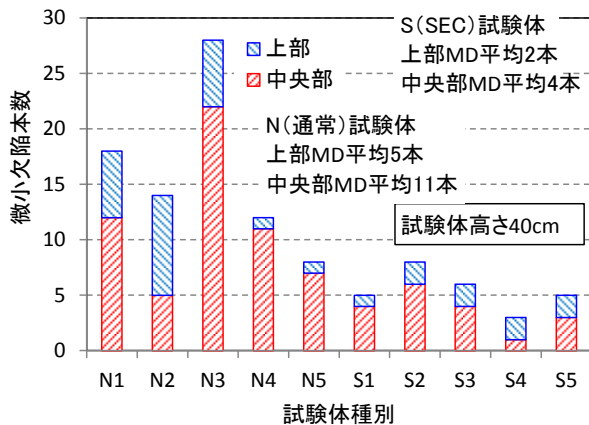


図-9 初期微小欠陥観察結果

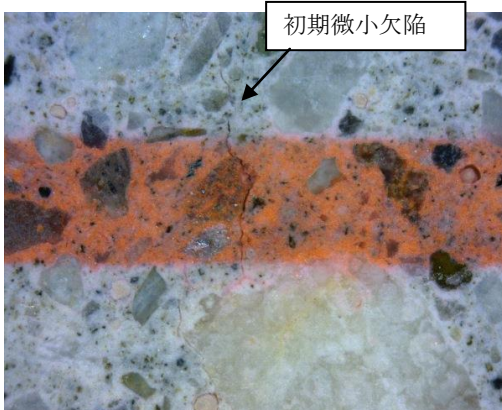


写真-3 典型的な初期微小欠陥(200倍)

験体内部の初期微小欠陥を観察したところ、SECの場合の欠陥数は通常と比べて半分以下であった(図-9参照)。このことが、純引張強度や圧縮強度の向上と安定性に関係すると考えられる。

- 4) 圧縮および純引張方向荷重試験時のAE計測によると、SECコンクリートのAE累積イベント数は通常の場合と比べて、破壊直前の応力レベルになってから急速に増大(図-4, 5参照)するが、これは発生したマイクロクラックがSECのクラックアレスト効果を打破って、連結するときにAEが多数発生するためと考えられた。
- 5) 一般に実施される未荷重状態試験体の透水係数試験では、応力状態下にある実構造体コンクリートの透水係数を小さめに評価している可能性が有る。

橋梁床板のように活荷重の作用を受ける過酷な使用環境にある構造物では、高品質なコンクリートが必要とされる。SECコンクリートを使用することで、安定した品質の構造物の構築が可能となる。これまでの検討によって、SECコンクリートのひび割れ抵抗性や耐久性向上の機構解明の一端を得たと考えている。

参考文献

- 1) 伊藤祐二ほか：高品質吹付けコンクリートの施工特性に関する研究，土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.419-430, 2009.10
- 2) 三輪茂雄：粉体工学通論，日刊工業新聞社，pp.43, 1981.2
- 3) 岸谷孝一，伊東靖郎，加賀秀治，山本康弘：SECコンクリート工法，建築技術，No.380, pp.1-18, 1983.4
- 4) 加賀秀治，山本康弘，伊東靖郎：SECコンクリートの特性と建築工事への適用，建築の施工技術，No.226, pp.53-64, 1984.10
- 5) 伊達重之，御領園悠司，渡辺健，橋本親典：コンクリートの振動充てん性能に及ぼすフレッシュ性状の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, pp.25-30, 2007.6
- 6) 戸田勝哉，中村義彦，伊藤祐二：SECコンクリートの橋梁床版への適用検討，土木学会第67回年次学術講演会，第VI部門，pp.711-712, 2012.9
- 7) 加賀秀治ほか：S.E.C.コンクリートの研究(特性と強度)，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.57-58, 1980.9