

# 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화균열에 대한 상관관계 분석 및 온도균열지수표 제시

## A proposed temperature crack index table based on correlation between temperature cracks and construction methods in subway concrete box structures

송석준<sup>†</sup>                      박지웅\*                      김은겸\*\*  
Suk-Jun Song              Ji-Woong Park              Eun-Kyum Kim

### ABSTRACT

Thermal stresses due to the heat of hydration can cause extensive cracking in subway structures. In order to reduce heat cracks, construction methods (e.g. sequential or skipping construction methods) need to be changed. However, to our knowledge, the existing literature contains little information on the correlation between heat cracks and construction methods. Thus, in this study, the temperature crack index table was suggested based on construction lengths (6 m, 9 m and 18 m), concrete mixtures (Type I cement with FA of 20 % in cement weight, Type IV cement with FA of 10 % in cement weight, and mixture of three different cements), construction seasons (spring or autumn, summer and winter) and construction method (sequential or skipping construction methods). The index table can be easily used corresponding to changes in concrete placing method at the construction site. Also, the correlation of cracking due to sequential or skipping construction methods was derived based on the statistical approaches.

### 국문요약

지하철 구조물은 수화열에 의해 균열이 발생하기 쉬우며, 균열을 최소화하기 위해 시공방법(순차/건너뛰기 시공 등)의 개선 등 많은 노력을 하고 있으나 아직 이에 대한 상관성을 분석한 바가 없다. 이 논문에서는 시공길이(6m, 9m, 18m), 벽체높이(2m, 3m, 4m), 콘크리트 배합(1종+FA20%, 4종+FA10%, 3성분계), 콘크리트 타설시기(봄/가을, 여름, 겨울) 및 시공방법(순차시공, 건너뛰기시공) 등 14개 항목을 각각 조합하여 온도균열지수를 산출(378개)하여, 통계학적 처리를 통해 상관성을 분석하였다. 또한 “온도균열지수표”를 작성하여 현장의 콘크리트 타설 여건의 변화에 대응하여 쉽게 활용할 수 있도록 하였다. 또한, 콘크리트 타설을 순차적으로 시행하는 경우와 건너 뛰어 시행하는 경우에 대해서도 그의 상관성을 분석하여 급속 시공 방안을 검토하였다.

### 1. 서론

도심의 도심도에 건설되는 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 측벽은 바닥 슬래브에 의한 외부구속이 크기 때문에 수화열에 의한 관통균열로 인해 누수를 비롯하여 증성화 및 철근 부식, 백화현상, 조직변화 등에 의한 내구성 저하가 촉진되고 있다. 그러므로 설계단계 뿐 아니라 콘크리트 타설 시점에도 균열발생 평가의 척도인 “온도균열지수”가 콘크리트 표준시방규정에 적합한지를 확인하여 수화열에 의한 균열을 관리하여야 한다. 현재의 온도균열지수 산정은 전문성이 요구되기 때문에 현장에서 콘크리트 타설시의 온도 등 현장 여건 변화를 반영할 수 없는 것이 현실이다. 본 논문에서는 지하철의 대표단면을 선정

† 정회원, (주)SOC건설엔지니어링 부사장, 서울산업대학교 철도대학원 박사과정  
E-mail : rwpe@hanmail.net

TEL : (02)3402-2518 FAX : (02)401-2399

\* 정회원, 서울산업대학교, 토목공학과, 석사과정

\*\* 정회원, 서울산업대학교, 토목공학과, 정교수

하여 결합제, 콘크리트 타설길이 및 높이와 시기 등을 조합하여 378개의 온도균열지수를 산정하였다. 이 결과는 “표”로 제시하였으며, 현장에서 여건 변화에 쉽게 활용할 수 있도록 하였다. 또한 연속(순차) 시공과 건너 띄기 시공 간에 균열발생에 대한 상관 관계를 통계학적 방법을 통해 분석시하여 그 결과를 제시하였다.

## 2. 해석 및 온도균열지수 산정

### 2.1 해석 조건

해석 조건은 배합, 타설 길이, 타설 시기, 대기 온도 및 타설 온도, 시공 방법 등 14개 항목으로 구성되며, 그 결과를 표 1에 재료, 설계, 시공 별로 나타내었다.

표 1. 해석 세부 항목

구분	세부항목	
재료	시멘트 종류 (결합제 종류)	①1종시멘트+플라이애쉬 20% ②4종시멘트+플라이애쉬 10% ③3성분계(1종+플라이애쉬 20%+고로 30%)
설계	타설길이	6m, 9m, 18m
	타설높이	2m, 3m, 4m
시공	타설순서	①연속(순차)시공 → 연속시공 ②건너띄기시공 → 건넌시공
	타설시 온도(계절)	겨울 / 봄 · 가을 / 여름

### 2.2 해석단면

해석에 사용된 지하철 BOX 구조물은 그림 1.에 나타난 바와 같이 폭10.6m, 높이 7.61m, 벽체 및 상부슬래브의 두께 1m 로서 가장 널리 사용되고 있는 단면이며, 설계기준강도 27MPa이다.

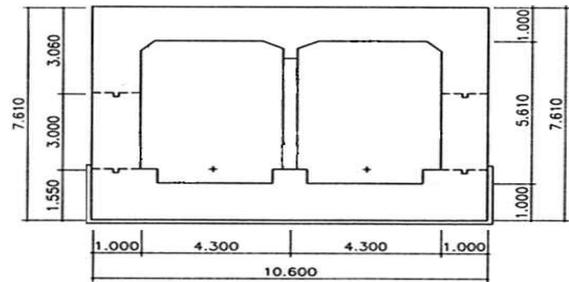


그림1. 해석단면도

### 2.3 콘크리트 배합 및 열적특성

콘크리트 배합 및 열적특성은 표 2.와 같으며, 단열온도상승곡선은 쌍용양회 중앙연구소의 단열온도시험 장치를 사용하여 구하였다.

표 2. 콘크리트 배합 및 열적특성

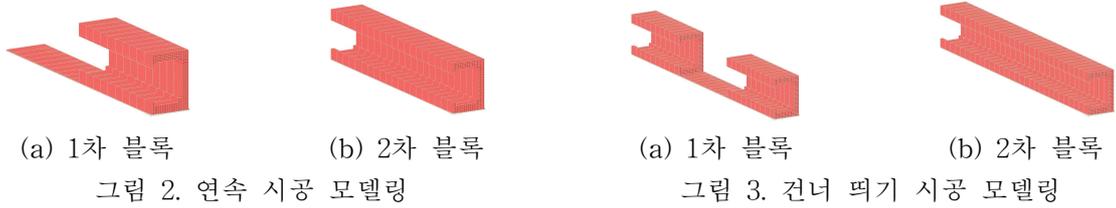
Type	Air	Slump	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					열적특성		
					W	Binder			S	G	Q <sub>∞</sub>	r
						C	FA	BFS				
1종 배합	4.5±0.5	15±1.5	43.7	47.2	163	298	75	0	844	952	46.6	0.784
4종 배합			43.5	47.5	163	337	37	0	857	955	39.6	0.345
3성분계 배합			42.3	46	169	200	40	160	825	983	48.6	0.278

※Q<sub>∞</sub> : 최종 최대단열온도 상승량(℃) , r : 온도상승속도에 관한 계수(반응속도)

### 2.4 시공 방법 별 해석 모델링

해석에 사용된 유한요소 모델은 그림 2. 및 그림 3.에 나타난 바와 같다. 그림 2.는 콘크리트를 연속

적(순차적)으로 타설하는 경우를 나타낸 것이며, 그림 3.은 한 블록씩 건너 띄면서 콘크리트를 타설하는 경우를 나타낸 것이다.



### 3. 해석흐름도 및 온도균열지수산정 결과

#### 3.1 온도균열지수

온도균열지수는 표 3.의 해석 흐름도에 따라 산정하였으며, 그 해석 결과는 표 4.에 제시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 서울산업대에서 개발한 TAMCON이며, 인천국제공항, 인천공항철도, 신분당선 등의 현장 Mock up test를 통해 그의 정확성이 검증된 바가 있다.

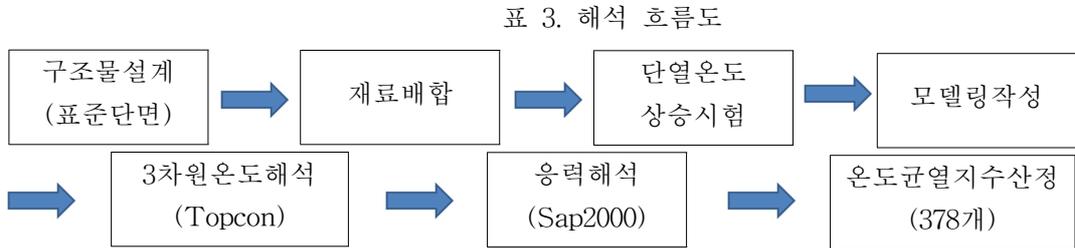


표 4. 온도균열지수 산정 결과(378개)

벽체 높이	타설시기 (대기/ 타설온도)	배합 종류	온도균열지수											
			연속시공						건너띄기시공					
			시공길이 18m		시공길이 9m		시공길이 6m		시공길이 18m		시공길이 9m		시공길이 6m	
			벽체	상부	벽체	상부	벽체	상부	벽체	상부	벽체	상부	벽체	상부
2m	겨울 (10/20)	1종+Fa20	0.99	0.53	1.06	0.71	1.19	0.95	1	0.64	1.12	0.78	1.21	0.99
		4종+Fa10	1.66	1.03	1.72	1.38	1.82	1.52	1.58	1.16	1.8	1.42	1.9	1.57
		3성분계	1.43	0.97	1.63	1.22	1.69	1.39	1.44	1.01	1.71	1.34	1.71	1.44
	봄·가을 (14/24)	1종+Fa20	0.92	0.49	1.01	0.62	1.08	0.8	0.93	0.56	1.07	0.67	1.11	0.77
		4종+Fa10	1.38	0.99	1.61	1.18	1.67	1.39	1.42	1.02	1.69	1.34	1.74	1.51
		3성분계	1.29	0.88	1.54	1.04	1.61	1.18	1.32	0.93	1.62	1.2	1.68	1.37
	여름 (24/28)	1종+Fa20	1.13	0.66	1.27	0.88	1.31	1.07	1.14	0.77	1.35	0.94	1.44	1.05
		4종+Fa10	1.84	1.14	2.05	1.34	2.11	1.61	2.04	1.23	2.19	1.37	2.33	1.74
		3성분계	1.72	1.08	1.92	1.17	2	1.44	1.84	1.14	1.97	1.23	2.04	1.54
3m	겨울 (10/20)	1종+Fa20	0.85	0.92	0.97	1.09	1.02	1.1	0.89	1.04	1.07	1.11	1.1	1.21
		4종+Fa10	1.50	1.38	1.61	1.52	1.66	1.66	1.49	1.48	1.63	1.54	1.71	1.69
		3성분계	1.33	1.27	1.54	1.39	1.6	1.58	1.37	1.39	1.55	1.48	1.64	1.51
	봄·가을 (14/24)	1종+Fa20	0.80	0.88	0.89	0.99	0.94	0.99	0.85	0.93	0.99	1.06	1.07	1.14
		4종+Fa10	1.31	1.25	1.53	1.41	1.58	1.55	1.34	1.39	1.53	1.49	1.62	1.63
		3성분계	1.14	1.19	1.45	1.37	1.5	1.46	1.25	1.23	1.51	1.41	1.57	1.47
	여름 (24/28)	1종+Fa20	1.01	1.01	1.18	1.17	1.18	1.21	1.05	1.09	1.25	1.21	1.31	1.35
		4종+Fa10	1.78	1.65	1.94	1.84	1.94	1.77	1.92	1.82	2.04	1.9	2.11	2.03
		3성분계	1.53	1.54	1.85	1.69	1.83	1.6	1.77	1.65	1.85	1.77	1.9	1.94
4m	겨울	1종+Fa20	0.78	1.17	0.83	1.34	0.93	1.47	0.71	1.21	1.04	1.37	1.01	1.53

	(10/20)	4종+Fa10	1.43	1.52	1.52	1.71	1.59	2.06	1.37	1.58	1.47	1.78	1.66	1.93
		3성분계	1.21	1.46	1.39	1.59	1.44	1.82	1.18	1.5	1.44	1.57	1.51	1.62
	봄·가을 (14/24)	1종+Fa20	0.67	1.09	0.76	1.28	0.84	1.29	0.73	1.07	0.81	1.3	0.94	1.36
		4종+Fa10	1.27	1.49	1.36	1.62	1.45	1.81	1.27	1.52	1.44	1.67	1.54	1.75
		3성분계	1.09	1.42	1.28	1.51	1.39	1.67	1.19	1.47	1.37	1.54	1.43	1.59
	여름 (24/28)	1종+Fa20	0.73	1.25	1.09	1.42	1.06	1.59	0.79	1.36	1.14	1.41	1.22	1.65
		4종+Fa10	1.52	1.86	1.82	2.06	1.78	2.37	1.67	2.01	1.91	2.14	2.08	2.26
		3성분계	1.32	1.72	1.74	1.97	1.67	2.28	1.47	1.87	1.77	1.97	1.84	2.11
	바닥	겨울 (10/20)	1종+Fa20	1.4		1.68		1.93		1.45		1.71		1.78
4종+Fa10			2.09		2.57		2.74		2.31		2.61		2.63	
3성분계			1.99		2.33		2.51		1.76		2.32		2.5	
봄·가을 (14/24)		1종+Fa20	1.38		1.62		1.81		1.42		1.67		1.91	
		4종+Fa10	2.07		2.53		2.53		2.13		2.44		2.65	
		3성분계	1.9		2.27		2.34		1.73		2.2		2.57	
여름 (24/28)		1종+Fa20	1.57		2.2		2.27		1.71		2.2		2.4	
		4종+Fa10	2.21		3.53		3.97		2.84		3.45		3.91	
		3성분계	2.09		3.45		3.51		2.16		3.28		3.64	

### 3.2 현장 수화열 관리용 온도균열지수표의 제시

표 5.는 378개의 조합에 대한 온도균열지수를 도표화한 것이다. 바닥 슬래브의 경우는 어떠한 조합에서도 온도균열지수가 1.2 이상을 충분히 확보하고 있기 때문에 이 표에서는 제외시켰으며, 균열발생이 우려되는 벽체와 상부슬래브에 대해 현장 관리가 쉽게 이루어질 수 있도록 작성된 것이다.

온도균열지수 관리치는 콘크리트표준시방서를 참고로 [균열발생을 제한할 경우]에 해당되는 1.2로 설정하였다. 이 도표에서 온도균열지수가 1.2 이하가 되는 경우는 ×표로 표시하여 조건을 변경시켜 온도균열지수가 1.2 이상이 되는 경우를 선택하여 콘크리트를 타설할 수 있도록 하였다.

표 5. 벽체 및 상부슬래브의 온도균열지수 일람

배합 길이	1종Fa20	4종Fa10	3성분계	1종Fa20	4종Fa10	3성분계	1종Fa20	4종Fa10	3성분계	배합 높이
	6m	☒☒	☐☉	☐△	☒☒	☐☉	☐☒	△☒	☐☉	
☒☒		☐☉	☐☉	☒☒	☐☉	☐☉	☒☒	☐☉	☐☉	3m
☒☉		☐☉	☐☉	☒△	☐☉	☐☉	☒☉	☐☉	☐☉	4m
9m	☒☒	☐△	☐△	☒☒	☐☒	☐☒	△☒	☐△	☐☒	2m
	☒☒	☐☉	☐△	☒☒	☐☉	☐△	☒☒	☐☉	☐☉	3m
	☒△	☐☉	☐☉	☒△	☐☉	☐☉	☒☉	☐☉	☐☉	4m
18m	☒☒	☐☒	☐☒	☒☒	△△	△☒	☒☒	☐☒	☐☒	2m
	☒☒	☐△	△△	☒☒	△△	☒☒	☒☒	☐☉	☐☉	3m
	☒△	☐☉	△☉	☒☒	△☉	☒☉	☒△	☐☉	☐☉	4m
길이 시기	겨울 (10℃/20℃) 대기온도/타설온도			봄, 가을 (14℃/24℃) 대기온도/타설온도			여름 (24℃/28℃) 대기온도/타설온도			높이 시기

범 례	시공위치	균열지수 판정	기타
	벽체: ☐ 상부: ○ 바닥: 모두 만족	1.2미만(부적합): X 1.2~1.4미만(관리요): △ 1.4이상(적합): O	순차적시공/건넌식시공

4. 시공 방법에 대한 상관성 분석.

표 6. 및 표 7.은 각각 부재별 상관분석 결과 및 배합과 부재를 조합한 상관분석 결과를 나타낸 것이

다. 상관분석에는 Pearson 상관계수를 사용하였으며, 표본상관계수  $r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$  및

검정통계량(T검정)  $T = \frac{r(\sqrt{n-2})}{\sqrt{1-r^2}}$  의 이론을 적용하였다. 표 6.으로부터 [연속 시공 방법] 과 [건너 띄

기 시공 방법]에 의한 Pearson 상관계수가 모두 0.95를 초과하여 위치별 유의 수준 5%를 확보함으로써 유사 상관성을 갖는 것으로 평가되었다. 이와 같은 결과는 부재와 배합을 조합시킨 경우에서도 동등의 결과를 얻었다. 다만, 일부의 배합에서 Pearson 상관계수가 0.95 이하의 값을 나타내고 있어 유의 수준 5%에 미달하고 있지만, 수화열 해석에 사용되고 있는 변수들의 정확도 등을 고려할 때 유의 차는 아닌 것으로 생각된다. 즉 두 시공 방법 중 어느 방법으로 시공하여도 수화열에 의한 온도균열 발생 정도는 유사할 것으로 판단된다. 따라서, 공기단축 등 현장 여건상 부득이한 경우 건너 띄기 시공을 하더라도 나중에 타설되는 2블록이 3면의 구속에 의해 균열이 증가되는 현상은 미미할 것으로 생각된다.

표 6. 부재별 상관성 분석 결과

위 치	Pearson상관계수	분석결과
바닥 슬래브	0.967(**)	위치별로 각각 유의 수준 5%에서 통계적으로 유의함. 즉 두 방법에 의한 온도균열지수 값의 차이는 없음.
벽체	0.984(**)	
상부 슬래브	0.976(**)	

표 7. 부재 및 배합별 상관성 분석 결과

위 치	배합의 종류	pearson 상관계수	분석결과
바닥 슬래브	1종+FA20	0.964(**)	유의수준 5%에서 통계적으로 유의함 즉 다른 변수(온도, 시공 길이, 벽체 높이)의 변화에 따라 정비례 관계임.
	4종+FA10	0.936(**)	
	3성분계	0.973(**)	
벽체	1종+FA20	0.946(**)	
	4종+FA10	0.970(**)	
	3성분계	0.971(**)	
상부 슬래브	1종+FA20	0.985(**)	
	4종+FA10	0.967(**)	
	3성분계	0.940(**)	

#### 4.2 온도균열지수에 의한 비교분석

「표 8.은 [1종+FA20%]의 배합에 대하여 연속 시공과 건너뛰기 시공과의 온도균열지수 차이를 나타낸 것이다. 건너뛰기 시공의 경우가 온도균열지수 0.04~0.05 정도 크게 평가되어 오히려 연속 시공에 비해 균열 발생 확률은 감소하는 것으로 보이지만, 그 차이가 크지 않기 때문에 콘크리트 타설 방법에 의한 온도균열 발생 정도는 동등한 것으로 보아도 될 것으로 본다.

그림 4.는 연속 시공과 건너뛰기 시공에 대한 온도균열지수를 나타낸 것이다. 표에 제시된 바와 마찬가지로 재령별 온도균열지수의 거동이 두 시공 방법에서 구분할 수 없을 정도의 동등한 형상을 나타내고 있다. 따라서, 이상의 결과를 고려할 때 공기 단축 등의 이유로 콘크리트 타설을 순차적인 방법 대신에 건너 뛰기 시공을 선택하더라도 온도균열 발생 확률은 거의 동등한 정도의 수준이라고 판단된다.

표 8. 콘크리트 타설 방법에 따른 균열지수 비교

시공방법	배합	대기온도	타설온도	타설길이	벽체높이	벽체	비교
순차적 시공	1종+FA20	10	20	18m	3m	0.85	
		14	24			0.80	
		24	28			1.01	
건너뛰기 시공		10	20			0.89	+0.04
		14	24			0.85	+0.05
		24	28			1.05	+0.04

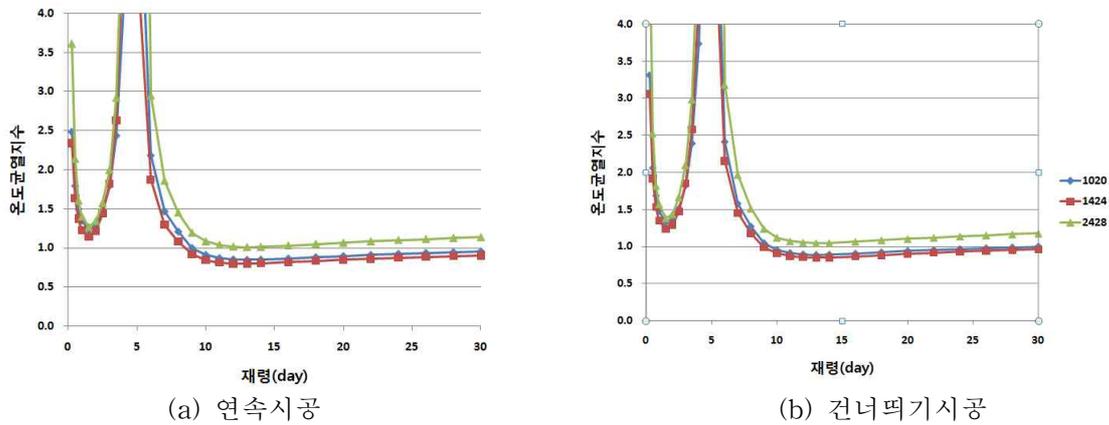


그림 4. 시공 방법 별 온도균열지수(벽체)

## 5. 결론

1. 본 논문은 지하철 BOX 구조물을 축조할 때 수화열에 의한 온도균열 제어를 목적으로 378개 조합에 대하여 수화열 해석 및 응력해석을 수행하였으며, 그 결과를 활용하여 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 온도균열지수표의 제시 및 연속 시공과 건너뛰기 시공에 대한 통계적인 분석을 통해 이들 시공의 유의성을 검토한 것이다.
2. 지하철 BOX 구조물의 균열제어 수준을 콘크리트표준시방서를 참고로 [균열발생을 제한할 경우]로 설정하였으며, 제시된 온도균열지수표를 통해 만족스럽지 못한 경우에는 이 도표를 이용, 현장 조건을 변경시켜 온도균열지수가 1.2 이상이 되는 경우를 쉽게 선택할 수 있도록 하였다.
3. 또한, 2면이 구축되는 연속시공과 3면이 구축되는 건너뛰기 시공에서 온도균열지수 상관관계를 분석한 결과, 두 경우 균열발생 정도가 유사하다는 결과를 얻었으며, 급속시공 방법으로서 건너뛰기 시공이 하나의 방법임을 확인하였다.

## 참고문헌

1. 일본콘크리트공학협회(1986), “매스콘크리트의 균열제어지침”, pp.20-21
2. 한국콘크리트학회(2004), “콘크리트표준시방서 해설”, pp.257-276
3. 한국콘크리트학회(2005), “최신 콘크리트 공학”, pp.603-634
4. 신희범, 김은겸, 김래현, 신치범(1994), “FEM에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 소프트웨어 개발”. 대한토목학회 1994년 학술발표회 논문집(구조분과), pp.143-146.
5. 한국철도학회(2004), “수화열 발생인자가 지하철 콘크리트 구조물의 내구설계에 미치는 영향”, 한국철도학회 2004년도 추계학술대회논문집, pp.264-270.
6. 한국철도학회(2007), “대기온도를 고려한 지하철 콘크리트 BOX 구조물의 수화열에 의한 온도균열 제어 대책”, 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp.577-580.
7. M. ISHIKAWA, T. TANABE(1994), “ Study of External Restraint of Mass Concrete”, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceeding of the International RILEM Symposium, pp187-194
8. T. MISHIMA, H. UMEHARA, M. YAMATA, M NAKAMURA(1994), “ Thermal Stress in Full Size RC Box Culvert”, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceeding of the International RILEM Symposium, pp171-178