High Volume Slag Powder를 사용한 해양 매스콘크리트 구조물의 내구성 향상

김강민* · 송용순 · 강석화

<동양시멘트)>

1. 서 론

본 연구의 적용 대상 방파제 상치콘크리트 구조물은 대표적인 해양 매스콘크리트로서 총 레미콘 물량 약 45,000㎥로 1블록 당의 크기가 B10.0m×L10.0m×H1.4~5.1m로서 모두 매스콘크리트 범주에 해당한다.

이러한 매스콘크리트 구조물은 내부적으로는 시멘트 수화열로 인한 내부구속응력 및 케이슨 또는 기존 상치콘크리트에 의한 외부구속응력으로 시공 초기단계에서부터 구조물에 유해한 균열 발생이 우려되며, 이러한 균열은 염분 침투에 따른 철근부식 등의 사용성, 방수성 그리고 내구성 저하의 주요원인으로 작용되기 때문에 시멘트 수화열 및 온도응력에 의한 온도균열발생을 최소화할 수 있는 재료 선정 및 시공관리가 요구되어진다.

따라서 균열 제어 대책으로 High Volume Slag Powder (HVSP)를 사용하여 수화열에 의한 균열을 최소화하고 염해에 대한 내구성 향상을 실현하고자 타설 전 콘크리트 배합설계 단계에서부터 콘크리트 단열온도상승시험 및 유한요소 해석, 염해 침투 해석 등의 충분한 사전검토를 거쳐 최고 일괄타설 높이 설정 및 현장시공관리를 위한 기초자료로 활용하여 해양 매스콘크리트의 내구성 향상을 위한 현장 품질관리를 실현하고자 하였다.

2. 콘크리트 단열온도상승시험

콘크리트의 단열온도상승특성은 콘크리트 타설 후 내부의 온도변화를 해석하기 위한 기본자료이며, 일반적으로 콘크리트 표준시방서 제18장에서 제시한 식 $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-rt})$을 사용하여 구한다. 단, 콘크리트 표준시방서에 명기된 시멘트 이외의 수화열 저감목적의 시멘트를 사용할 경우 콘크리트 단열온도상승시험결과 혹은 시험실시와 동등한 검토 자료를 제출하여야 한다. 그리고 콘크리트 단열온도상승시험은 시험용기 50ℓ이상의 것을 표준으로 한다.

Table 1.은 당 현장 적용 콘크리트 배합이며, 본 배합을 이용하여 Fig. 1과 같이 콘크리트 물성을 평가하여 Fig. 2의 콘크리트 단열온도상승시험을 진행하였다. 그 결과 Table 2.와 같이 시멘트

Table. 1 콘크리트 배합설계표 (25-24-150)

W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/㎥)					
		W	C	자연사	부순모래	굵은골재	AD
45.0	49.6	156	347	490	409	923	3.12

Table. 2 해석에 사용된 콘크리트 단열온도상승시험결과

구분	단열온도상승계수		타설온도 (℃)
	Q_∞(℃)	γ	
HVSP 콘크리트	35.7	0.857	15
	35.0	1.160	20
저발열형 콘크리트	41.6	0.637	20

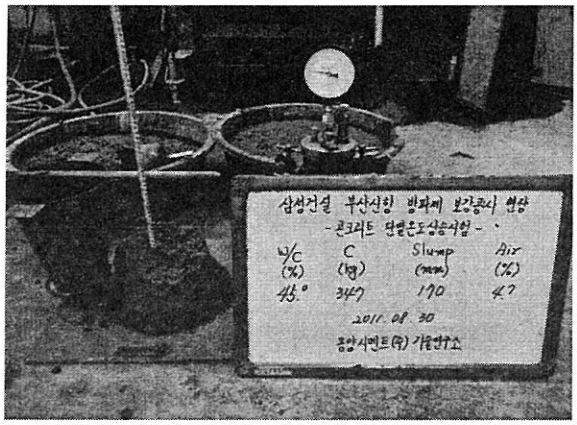

Fig. 1 콘크리트 물성 평가

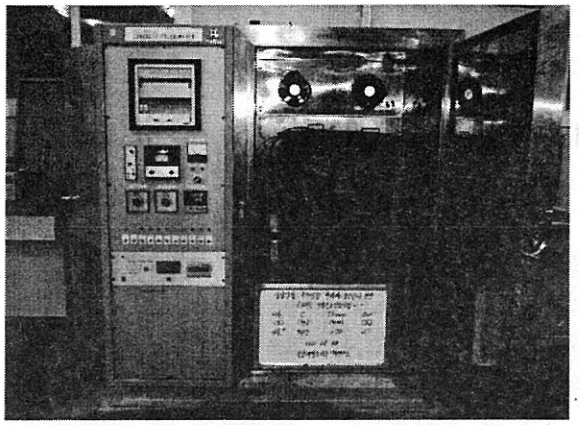

Fig. 2 콘크리트 단열온도상승시험기

종류별 콘크리트 단열온도상승량(Q_∞) 및 단열온도상승속도(γ)를 확보할 수 있었으며, HVSP 콘크리트를 적용할 경우 단열온도상승량은 플라이애시가 혼입된 배합에 비해서도 약 15% 정도의 저감효과를 확인하였으나 슬래그 미분말의 발열특성 상 콘크리트 타설온도에 의한 변화만을 확인할 수 있었다.

3. 매스콘크리트 수화열 검토

3.1 사전 수화열 검토 상의 가정사항

콘크리트 단열온도상승계수는 Table 2.의 시험결과를 적용하였으며, Table 3.은 유한요소해석 시 콘크리트 및 지반의 열특성치이고, 시멘트별 압축강도 발현계수는 Table 4.와 같다.

Table. 3 콘크리트와 지반의 열특성치

항 목	단 위	콘크리트	지 반
열전도율	(kcal/m hr ℃)	2.3	1.7
비열	(kcal/kg ℃)	0.25	0.2
대류계수	(kcal/m² hr ℃)	유로폼(8), 비닐+양생포(7)	

Table. 4 시멘트별 압축강도 발현계수

구 분	a	b	d(91)
HVSP 콘크리트	5.6	0.85	1.4
저발열형 콘크리트	8.9	0.87	1.5

3.2 온도균열의 평가

콘크리트 표준시방서 제18장 매스콘크리트편에 균열발생에 대한 안정성을 정량화하기 위해 온도균열지수(I_{cr}) 개념을 도입하여 이를 평가할 때에는 콘크리트의 인장강도를 온도응력으로 나눈 값으로 나타낸 다음 식에 의하여 구할 수 있게 하였다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_t(t)}{f_x(t)}$$

온도균열지수는 값이 클수록 균열이 생기기 어려우며, 균열발생확률과 온도균열지수의 관계는 콘크리트 표준시방서에 의거 아래 Fig. 3에 의해 구할 수 있고, 관리기준은 Table 5와 같다.

3.3 사전 수화열 검토결과

검토 대상 구조물인 상치콘크리트에 HVSP 콘크리트와 저발열형 콘크리트를 적용하여 1회 타설높이 2.0m에 대해 수화열 해석을 수행한 결과 중심부 최고온도 및 내·외부 온도차, 최저 온도균열지수는 Table 6.에서 보는 바와 같으며, 콘크리트 표준시방서에 의거 HVSP 콘크리트를 사용한 경우 최저 온도균열지수 1.2이상으로 온도균열의 발생을 제한할 수 있는 수준을 확보하였으나 저발열형 콘크리트를 적용한 경우 0.7이상으로 유해한 온도균열의 발생을 제한할 수 있는 수준만을 확보하는 것으로 나타나 일반적으로 현장에서 사용중인 저발열 배합보다 HVSP 콘크

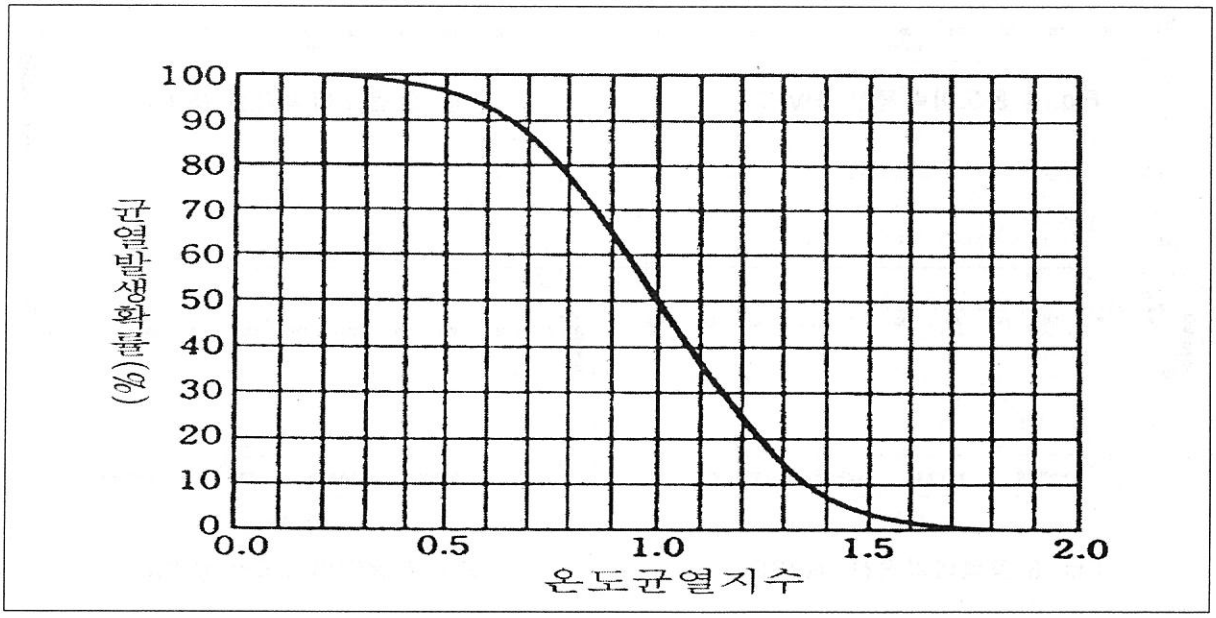

Fig. 3 온도균열지수와 균열발생확률 (콘크리트 표준시방서, 2009)

Table 5. 관리기준에 따른 온도균열지수

구 분	온도균열지수 (I_{cr})
균열을 방지하고 싶은 경우	$1.5 \geq I_{cr}$
균열발생을 제한하고 싶은 경우	$1.2 \leq I_{cr} < 1.5$
유해한 균열발생을 제한하고 싶은 경우	$0.7 \leq I_{cr} < 1.2$

Table 6. 검토 대상 구조물의 중심부 최고온도, 내·외부 온도차 및 온도균열지수

구 분	타설높이 (m)	중심부 최고온도 (℃)	내·외부 온도차 (℃)	온도균열지수 (I_{cr})
HVSP 콘크리트	2.0	51.2	18.0	1.38
저발열형 콘크리트		52.4	19.4	0.98

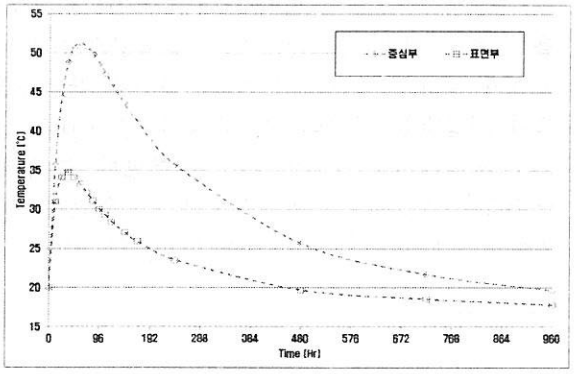

Fig. 4 온도이력곡선 (HVSP)

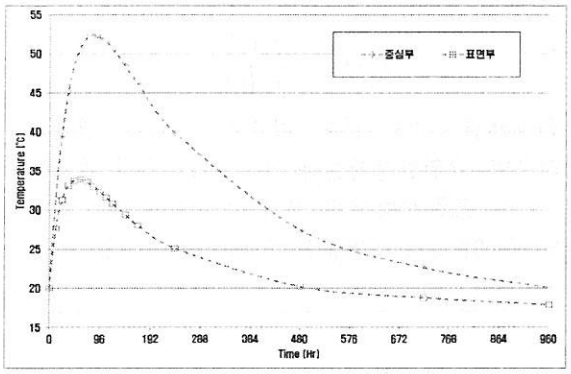

Fig. 5 온도이력곡선 (S/C)

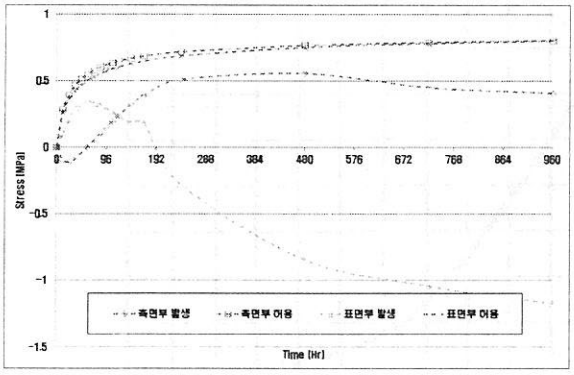

Fig. 6 응력이력곡선 (HVSP)

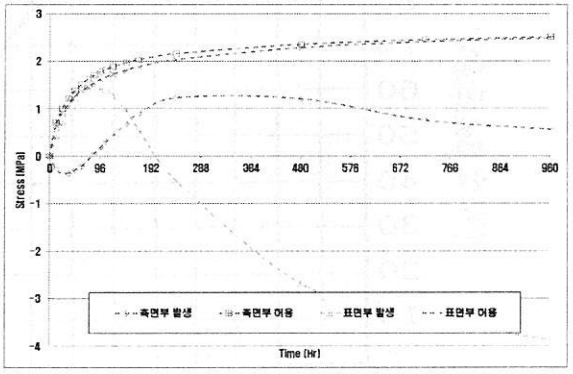

Fig. 7 응력이력곡선 (S/C)

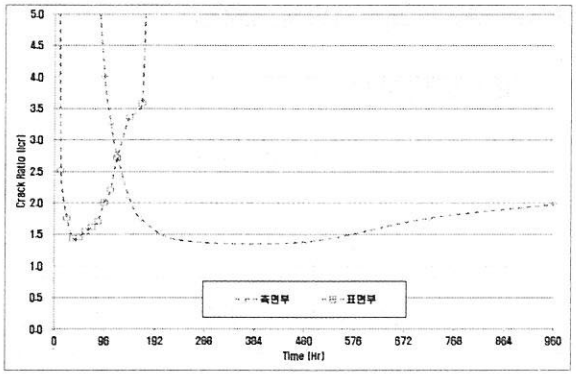

Fig. 8 온도균열지수이력곡선 (HVSP)

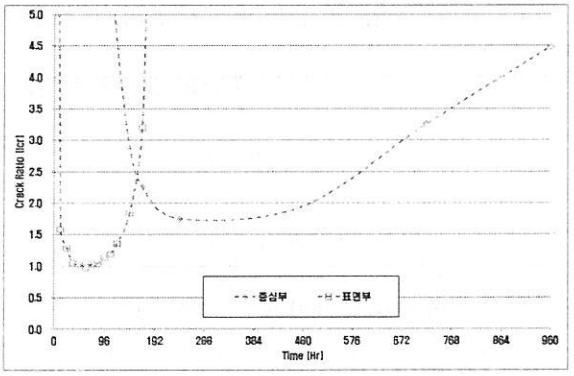

Fig. 9 온도균열지수이력곡선 (S/C)

리트가 수화열에 의한 균열 저감에 효과적인 것으로 판단된다. Fig. 4~9는 각 적용 콘크리트별 온도 및 응력 그리고 온도균열지수 이력곡선이다.

3.4 현장 수화열 계측결과 분석

사전 수화열 검토결과를 바탕으로 타설완료된 상치콘크리트 구조물에 대해 현장 수화열 계측을 실시한 결과는 Fig. 10과 Table 7.에서와 같이 타설완료 후 약 38시간에 중심부 최고온도 54.7℃, 표면부 44.4℃를 나타내어 내·외부 온도차가 10.3℃ 발생하였고, 중심부 최고온도 및 내·외부 온도차 즉, 구조물의 중심부와 표면부의 온도차 그리고 현장타설 조건을 재구성하여 해석한 최저 온도균열지수는 Table 7.에서 보는 바와 같이 1.24를 나타내어 사전 수화열 검토결과와 같은 수화열에 의한 균열발생을 제한할 수 있는 수준인 것으로 나타나 현장조건의 불확실성 등을 고려할 때 전반적으로 해석결과가 실제 구조물의 거동을 잘 묘사한 것으로 판단된다. Fig. 11~13은 현장타설 및 수화열 계측센서 설치관련 사진이다.

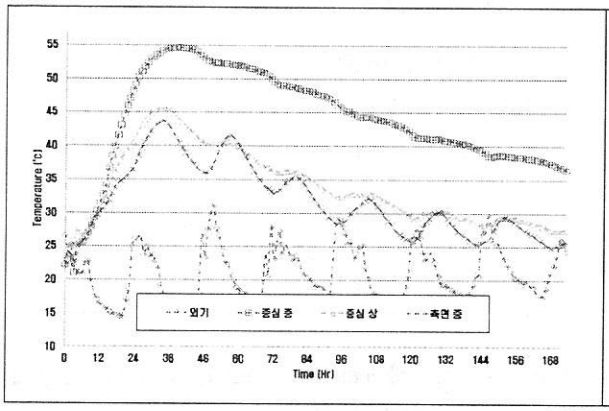

Fig. 10 현장 수화열 계측결과

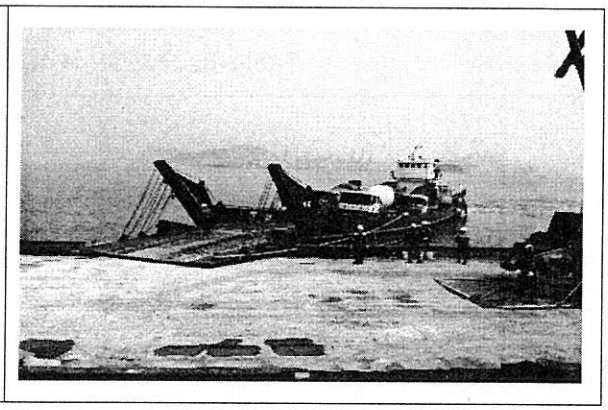

Fig. 11 레미콘 도선운반 후 바지선 접안

Table 7. 수화열 해석결과 및 계측결과 비교

구분	중심부 최고온도(℃)	도달시간(hr)	내·외부 온도차(℃)	온도균열지수(I_{cr})
해석결과	52.4	36	10.8	1.24
계측결과	54.7	38	10.3	-

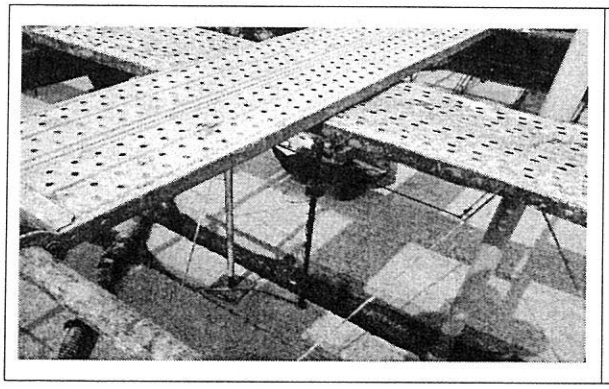

Fig. 12 구조물 중심부 계측센서 설치

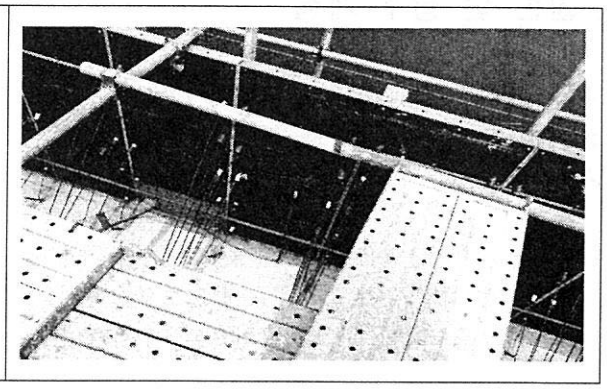

Fig. 13 구조물 측면부 계측센서 설치

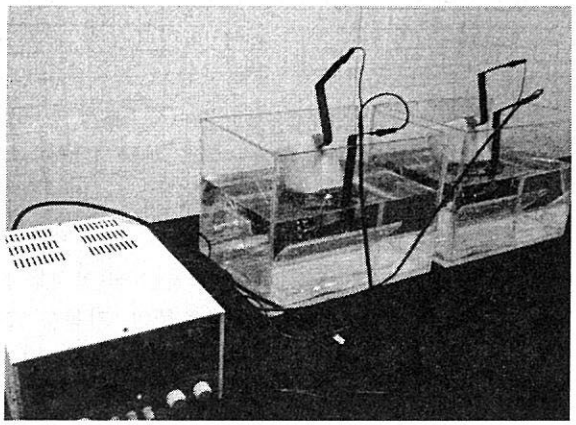

Fig. 14 염분 침투 확산시험

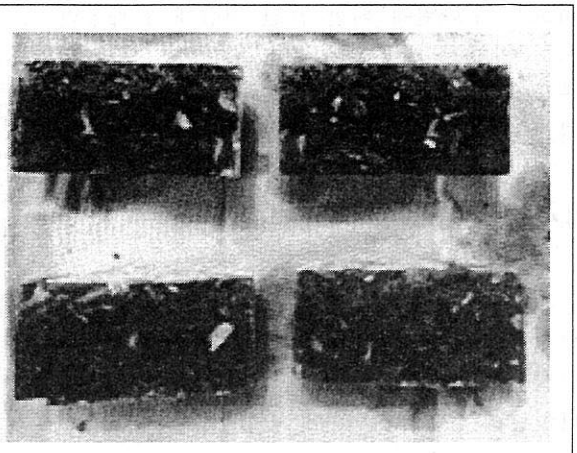

Fig. 15 염분 침투 확산 시험체

Table 8. 수화열 해석결과 및 계측결과 비교

구분	재령(Day)	침투깊이 (mm)	확산계수 ($\times 10^{-12}$ ㎡/sec)
HVSP 콘크리트	7	15.9	8.693
저발열형 콘크리트		18.5	10.252

4. 염해 내구성 평가

Fig. 14와 같은 시험장비를 이용한 콘크리트의 염분 침투 확산시험결과는 Table 8.과 같으며, Fig. 15는 시험체 사진이다. 역시 저발열형 콘크리트에 비해 High Volume Slag Powder를 사용한 콘크리트의 염해에 대한 내구성이 더욱 우수한 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 계획

대표적인 해양 매스콘크리트인 상치콘크리트에 High Volume Slag Powder를 사용하여 타설한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트 단열온도상승시험결과를 이용한 사전 수화열 검토결과를 바탕으로 한 시공계획으로 해양 매스콘크리트의 수화열에 의한 균열을 제어하여 구조물의 내구성 향상에 기여하고자 하였다.

(2) 현장 수화열 계측 및 분석결과 현장조건의 여러 불확실성 등을 고려할 때 해석결과가 실제 구조물의 거동을 잘 묘사한 것으로 판단된다.

(3) 그 결과 최저 온도균열지수 1.24로 저발열형 콘크리트 0.98에 비해 우수한 수화균열 발생 저항성을 가지며, 콘크리트 표준시방서에 의거 1.2이상을 확보하여 수화열에 의한 균열의 발생을 효과적으로 제한할 수 있는 수준인 것을 알 수 있었다.

(4) 또한 저발열형 콘크리트에 비해 우수한 염해 침투 저항성을 가지는 것을 실내시험에서 알 수 있었으나 향후 현장 폭로시험을 통해 해수에 대한 염해 침투 저항성을 검증해 나갈 계획이다.