매스콘크리트 구조물에서의 시멘트 종류별 수화발열 특성 평가

Evaluation of Thermal Characteristics in Association with Cement Types in Massive Concrete Structure

김상철*
Kim, Sang-Chel

강석화**
Kang, Suck-Hwa

김진근***
Kim, Jin-Keun

ABSTRACT

The larger, loftier and more highly strengthened the recent structures become, the greater attention is paid to the problem of thermal crack occurrence associated with hydration heat. As one of methods to solve the problem, a care has been taken to the improvement of construction such as the application of pre-cooling or pipe-cooling, adjustment of concrete block size, concrete placement timing, joint arrangement and so on. But it is expected that a proper selection of cement shall additionally contribute to the control of thermal cracks. In this study, thus, we selected 4 types of cements such as Type V for anti-sulphate, blast furnace cements (slag content of 45% and 65% respectively) and ternary blended low heat cement, and carried out mock-up tests. In every assigned time, temperatures and thermal stresses were measured and calculated from raw data.

As a result of measurement, it was found that the magnitude of hydration heat is in order of blast furnace slag cement, Type V and ternary blended low heat cement. Results of thermal stresses were same as the order of temperature. In addition, thermal stresses calculated from the data of strain gauges showed almost similar to those measured from effective stress gauges only when strain values were adjusted properly in accordance with initial time of stress appearance. Theoretical results agreed

* 정회원, 한서대학교 토목공학과 조교수
** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀장
*** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

well with the measured values comparatively, but showed slight differences. It is inferred that these differences shall be reduced if more tests capable of evaluating thermal characteristics of concrete are carried out.

Keywords : temperature, thermal stress, thermocouple, strain gauge, non-stress gauge, effective stress gauge, Type V, blast furnace slag cement, ternary blended low heat cement

1. 서 론

최근 들어 사회 간접 자본 사업의 활성화에 따라 구조물이 대형화되면서 매스콘크리트를 이용한 콘크리트 구조물 축조가 가속화되고 고강도콘크리트가 연구단계에서 실용화 단계로 접어들면서 다량의 시멘트 사용에 따른 수화열에 의한 온도균열 문제가 큰 관심사로 대두되고 있다. 기존에 매스콘크리트라 하면 댐 구조물로 국한되어 시공시 골재의 크기를 크게 하고 시공방법을 개선하거나 시멘트량을 대폭적으로 감소시키므로써 수화열제어가 가능하였다. 그러나 근래에 와서는 일반콘크리트에서 사용되던 배합상태는 그대로 유지하고 외적조건으로 내구성을 충분히 갖추고 있으면서 수화열제어를 하여야 하는 조건을 필요로 하고 있다.

기존 댐 등과 같은 구조물에서의 온도균열제어는 배합시 재료의 사용량을 조절하기 때문에 단순히 프리쿨링이나 파이프쿨링 등을 적용하므로써 치기 전후의 콘크리트 온도를 낮추는 시공방법에 주로 의존하였으며, 현재도 대형 매스콘크리트 구조물에서는 이 방법들이 널리 활용되고 있다. 또한, 구조적으로 문제가 발생되지 않는 범위에서 치기블럭크기 조정, 이음위치, 콘크리트치기 시간간격 조정, 유도줄눈 선정 등이 온도균열을 제어하기 위해 유효하게 적용되는 방법이라 할 수 있다. 그러나 이상의 제시된 방법과 병용하여 사용하는 시멘트의 종류, 혼화재료, 골재 등을 적절히 선정한다면 그 효율성은 크게 증가될 수 있을 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 재료적인 측면에서의 수화열 제어방안으로 지금까지 해양 매스콘크리트 구조물에 많이 사용되어 왔던 시멘트와 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬 등 산업부산물을 혼입시킨 혼합형시멘트의 수화열 발생 및 온도응력의 크기를 비교하고자 하였다. 본 연구를 수행하기 위한 방법으로 실 구조물 내부의 수화열 분포 및 온도응력 파악이 가능한 범위에서 최소치수의 모의시험체를 제작하여 시멘트종류별로 온도발생량 및 온도응력을 재령별로 계측·비교하고, 수화열 해석을 통한 해석치의 신뢰성 검증 및 각 계측기별로 온도응력 결과에 대한 평가를 실시하였다.

2. 모형시험에 사용되는 시멘트 선정

본 연구에서는 대형 콘크리트 구조물이 거의 대부분 해상에 축조된다는 입지조건과 매스콘크리트 시공시 재료적인 측면에서 수화발열량이 적어야 한다는 점을 감안하여 현재 시판되고 있는 시멘트 중에서 선정하였다. 기존 실적으로부터 해양에 근접하거나 해중구조물에 주로 사용되어 왔

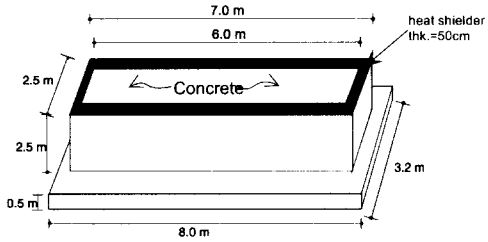
Table 1 Chemical composition of cement

Cement	Chemical Composition(%)											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	Mn_2O_3	P_2O_5	I.g loss
Type V	22.9	3.0	4.4	63.1	3.2	1.9	0.6	0.1	0.2	0.2	0.1	1.1
Slag 45%	26.7	9.6	1.6	51.3	4.9	3.4	0.6	0.1	1.0	0.4	0.1	0.02
Slag 65%	28.4	10.5	1.4	49.1	5.1	2.7	0.6	0.2	1.2	0.4	0.1	0.4
Low heat	33.8	12.9	3.2	40.6	4.2	2.6	0.7	0.2	1.2	0.3	0.2	1.4

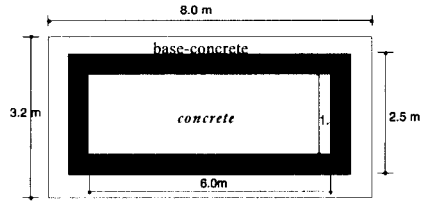
Table 2 Results of physical analysis for cement

Cement	Specific Gravity	Blain (cm^2/g)	Consistency (%)	Setting(h:m)		Compressive Strength(kgf/cm^2)			
				Initial	Final	3	7	28	91
Type V	3.22	3,277	22.7	04:24	07:59	208	285	393	490
Slag 45%	3.05	4,034	25.0	02:57	06:29	168	255	484	536
Slag 65%	2.97	4,294	27.0	02:43	07:40	136	196	377	500
Low heat	2.78	3,929	27.5	03:08	06:40	121	206	404	488

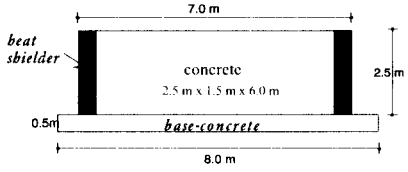
던 내황산염시멘트인 5종시멘트와 잠재수경성 성질로 인해 초기강도 발현은 낮지만 장기강도 발현이 높은 것으로 알려져 있는 2성분계 혼합 시멘트인 고로슬래그시멘트중에서 슬래그 함유량이 각각 45%, 65%인 시멘트를 선정하였고, 플라이 애쉬, 고로슬래그 및 보통의 포틀랜드시멘트를 혼합한 3성분계 혼합 저발열형 시멘트 (이하 저발열시멘트로 약칭) 등 4종류를 모형시험에 사용될 시멘트로 선정하였다.



GENERAL VIEW



PLAN



SIDE-VIEW

Fig. 1 Size and shape of specimen

2.1 시멘트 종류별 물리·화학적 특성

Table 1은 각 시멘트 종류별 화학분석결과를 나타낸 것으로 혼합형시멘트인 고로슬래그시멘트와 저발열시멘트에서는 슬래그 치환첨가로 인해 5종시멘트보다 MgO, SiO_2 및 Al_2O_3의 함량은 많으나 CaO의 함량은 적게 나타난 것이 특징이라 할 수 있다.

또한, Table 2와 같이 물리적 성질에서는 혼합형시멘트계가 5종시멘트에 비해 비표면적이 높은 것으로 나타났으며 이로 인해 동일한 반죽질기를 얻기 위해 필요로 하는 단위수량이 상승하게 되어 주도가 높게 나타났다. 강도발현측면에서는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 5종시멘트가 혼합형시멘트에 비해 초기강도가 높게 나타났으며 강도증진율은 모든 시멘트에서 거의 비슷한 정도이지만 슬래그 함유량이 45%경우에서는 장기강도발현이 가장 높게 나타났다.

2.2 콘크리트 배합 및 관련시험 결과

시험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 3과 같으며 그에 따른 콘크리트 압축강도 및 단열온도상승시험결과는 Table 4와 같다. 강도시험결과에 나타난 바와 같이 5종시멘트는 초기재령 7일까지 다른 대상시멘트에 비해 강도발현이 월등히 크게 나타나고 있으며, 혼합형시멘트인 고로슬래그시멘트와 저발열시멘트는 무기혼화재의 잠재수경성으로 인하여 재령 14일 이후부터 강도발현 증진율이 5종시멘트에 비하여 커지는 것으로 나타났다.

3. 실험 항목 및 개요

3.1 시험체의 크기

Table 3 Mix design proportion of concrete used in experiment

Cement	Max. coarse agg. size	Unit Water Content (kg/m³)	W/C (%)	S/A (%)	Unit Content(kg/m³)				
					Cement	Gravel	Sand	SP (C×%)	A.E Admixture (C×%)
Type V	25㎜	162	47.6	48.5	340	929	858	0.75	0.06
Slag 45%		160	47.5	49.0	337	918	866	0.7	0.08
Slag 65%		174	47.5	45.0	366	953	765	0.8	0.09
Low heat		166	47.5	46.0	349	947	791	0.7	0.095

본 연구에서 모의시험체의 크기는 각 시멘트별로 측정한 최대온도상승치(K)와 반응속도(α)값을 수화열 해석에 적용하여 각 시멘트 종류별로 비교·평가할 수 있는 온도균열지수를 산정하고, 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 균열의 발생확률을 서로 달리할 수 있는 모형크기(2.5m×1.5m×6.0m)를 구하여 시험체를 제작하였다. 실 구조물의 경우 일반적으로 균열의 발생은 내부구속에 의한 영향보다는 외부구속의 영향이 크므로 시험체를 치기 이전에 미리 베이스콘크리트를 8.0m×3.2m×0.5m 크기로 제작하여 외부구속을 받도록 하였으며, 기존의 연구결과[1,2]를 토대로 시험체의 주변은 50cm두께의 스치로폼을 설치하여 외기온도의 영향은 최소화하였다. 본 모형실험에 사용된 모의시험체의 크기와 형상은 Fig. 1과 같다.

3.2 계측항목

구조체 내부에 발생하는 온도와 온도응력을 산정하고자 시험체 내부에 계측기를 매설하였고 시험체의 좌우대칭을 이용하여 계측기를 Fig. 2와 같이 한 쪽에 집중적으로 배치하였다.

3.2.1 온도계측

콘크리트의 초기 경화시 내부구속에 의한 균열은 시험체의 내·외부 온도차로 인해 발생하므로 중앙부와 표면부에 열전대(thermocouple)를 설치하여 온도를 측정하였다. 온도계측을 위해 열전대의 일단은 측정대상물에 부착하고 타 단은 Data Logger에 접속하여 모의시험체에서 발생하는 온도를 측정하였다.

3.2.2 초기변형률 계측

재령에 따른 콘크리트의 변형률 변화를 측정하여 구조체 내부에 발생하는 재령별 온도응력을 산정할 목적으로 변형계를 각 모의시험체당 9개씩 총 36개 매설하였다.

3.2.3 열변형률 계측

콘크리트 변형계에 의해 측정된 변형률로부터

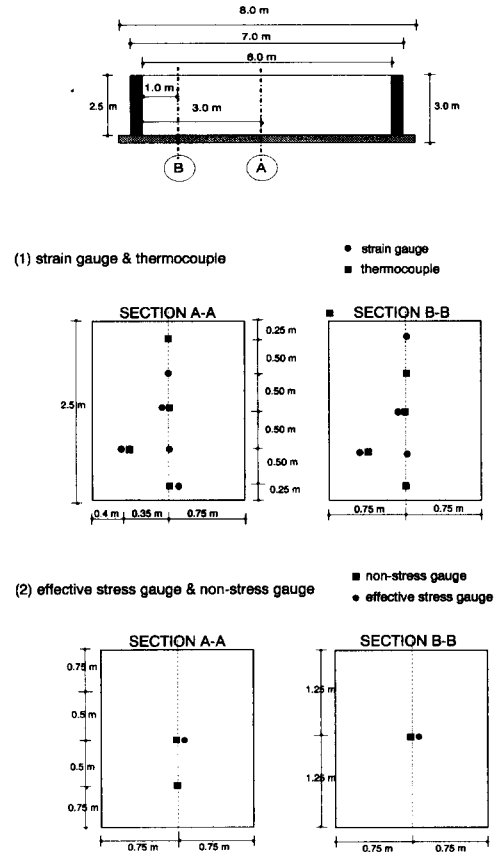


Fig. 2 Location of gauge installation

Table 4 Results of compressive and adiabatic temperature rise tests for concrete

Cement Type	Compressive Strength (kgf/㎠)						Adiabaic Temp. Rise	
	3 day	7 day	14 day	21 day	28 day	91 day	K	α
Type V	58	204	283	320	332	396	43.9	0.63
Slag 45%	50	140	222	294	311	380	51.7	0.44
Slag 65%	29	103	186	257	295	371	41.9	0.36
Low heat	61	137	206	268	291	378	36.7	0.36

온도응력을 환산할 때 응력을 야기하지 않는 자유변형량을 측정하기 위하여 무응력계를 매설하였으며, 본 실험에서는 각 시험체당 중앙부에 2개, 측면부에 1개씩 총 12개 설치하였다.

3.2.4 온도응력 계측

콘크리트 내부에 실제로 발생하는 응력을 측정하기 위하여 유효응력계를 시험체의 중앙부와 측면부에 각 시험체당 2개씩 총 8개 설치하였다. 유효응력계는 로드셀을 통하여 직접 콘크리트 내부에서 발생하는 건조수축변형률, 자기수축변형률, 크리프변형률 등이 측정된 후 응력으로 환산되므로 변형계와 같이 측정된 값을 응력으로 환산하지 않고도 콘크리트 내부에서 발생하는 응력을 직접 구할 수 있다.

3.3 측정 방법 및 계측기 보정

3.3.1 데이터 측정

데이터 측정은 수화반응이 가장 활발한 타설 후 1주간은 매 30분씩, 그 다음 1주간 즉, 2주가 시작되는 시점부터는 1시간씩, 3주부터는 2시간 간격으로 타설일로부터 약 50일에 걸쳐 계측을 실시하였다.

3.3.2 변형계의 초기치 설정 및 보정

콘크리트가 경화되기 이전에 계측기에서 측정된 초기 변형값은 실질적으로 콘크리트의 응력유발과 관계가 없는 유동변형에 의한 값들로써 정확한 온도응력을 산정하기 위해서는 초기치 보정과 영점보정을 실시하여야 한다. 기존 연구[2,3]에서는 초기치 설정시기를 콘크리트의 탄성계수가 게이지보다 커지는 값으로 콘크리트 탄성계수가 대략 400kgf/cm^{2}에 도달한 시기나 타설후 6~12시간이 경과한 후를 초기치 설정시기로 정하고 있다. 그러나, 본 모형실험에서는 변형계와 동시에 유효응력계를 설치하였으므로 유효응력계에서 응력이 감지되는 시점에서의 변형률을 초기치로 설정하였다.

또한, 본 시험에 사용된 변형계의 영점 이동량은

$$\triangle \varepsilon = \varepsilon (T_i) - \varepsilon (T_0)$$

이며 여기서,

$\varepsilon (T_i) =$

$(-0.000052T_i^3 + 0.0142T_i^2 + 0.15T_i - 10)$

T_0 = 초기치 설정시의 측정온도

T_i = 임의의 시간의 측정온도

를 나타낸다. 이 때 계산된 영점 이동량을 보정한 실제의 변형률(ε)은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{K_m}{K_g} ((\varepsilon_i - \varepsilon_0) - \triangle \varepsilon) + \beta (T_i - T_0)$$

K_m : 데이터로거의 게이지 계수

K_g : 변형계의 게이지 계수

ε_i : 임의의 시간에 측정한 변형률

ε_0 : 초기치 설정시 측정한 변형률

$\triangle \varepsilon$: 변형계의 영점 이동량

β : 변형계의 열 팽창률(11.7×10^{-6})이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 온도측정결과

Fig. 3은 시멘트종류별 모의시험체 표면부에서(상단에서 25cm 아래쪽) 측정된 온도값을 나타낸 것으로, 최고온도크기는 슬래그 65%, 슬래그 45%, 5종, 저발열시멘트 순으로 나타났다. 문헌에 따르면[4,5], 5종시멘트가 고로슬래그시멘트에 비해 최고도달온도가 높은 것으로 알려져 있으나,

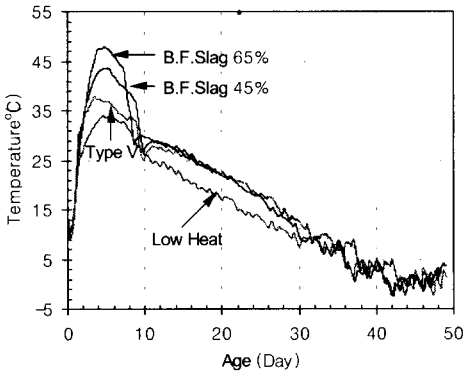


Fig. 3 Temperatures measured from the upper part of section A-A

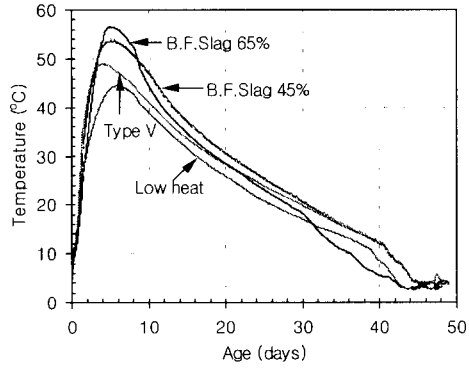


Fig. 4 Temperatures measured from the center part of section A-A

본 실험결과에 따르면 오히려 수화열저감을 위해 첨가한 슬래그 함유량이 높은 시멘트(슬래그 함유량 65%)에서 가장 높은 온도값을 나타내고 있다. 이와 같은 현상의 발생 원인을 추정하면, 고로슬래그는 일반적으로 온도의존성이 높은 무기혼화재로써 자체는 수경성이 없으나 시멘트의 알카리성분에 의해 자극을 받게 되면 수화현상이 진행되는데 이때 주변온도가 높아질수록 활성화가 활발하게 된다. 따라서 하절기에 고로슬래그를 함유한 콘크리트로 치게 되면 오히려 일반 1종시멘트를 사용한 콘크리트보다 높은 수화열이 발생하여 자체가 갖는 장점을 살리지 못한다는 연구보고 등이 있다.[5, 6]

그림에서 보면 최고온도도달시기도 시멘트종류별로 차이가 있어 5종시멘트는 약 3일만에, 그리고 나머지 3종류의 시멘트는 약 4일만에 최고온도에 도달하는 것으로 나타났다.

Fig. 4와 5는 시험체 중앙부에서의 시멘트종류별 온도값을 나타낸 것으로 앞서 표면부에서와 동일한 순서로 최고온도값이 나타나고 있으며, 최고온도도달시기도 5종시멘트에서 가장 빠르고 고로슬래그 45%, 고로슬래그 65% 그 다음이 저발열시멘트순으로 나타났다. 온도하강율을 검토해 보면 고로슬래그 65%가 나머지 3종류의 시멘트

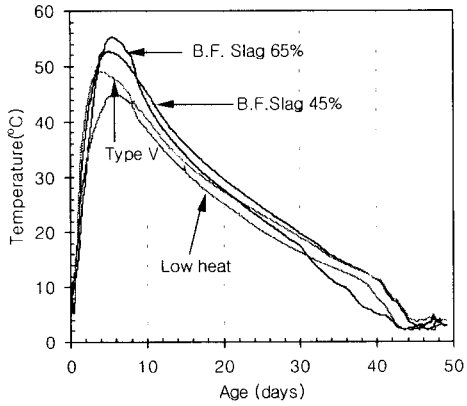


Fig. 5 Temperatures measured from the center part of section B-B

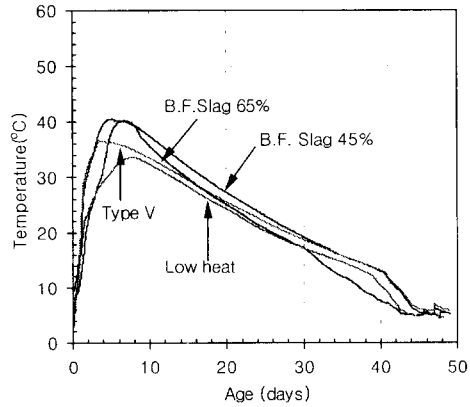


Fig. 6 Temperatures measured from the lower part of section A-A

보다 급격히 하강하고, 그 외의 시멘트는 비슷한 온도 하강율을 나타내고 있다. 최고온도에 도달한 후 하강되는 온도비율이 급격할 경우에는 실질적으로 균열발생의 원인이 되므로 균열예방 측면에서 볼 때 고로슬래그 45%, 5종시멘트나 저발열 시멘트가 고로슬래그 65%보다는 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 4와 5는 단면위치가 상이함에도 불구하고 온도값들이 거의 일치하고 있다. 이는 콘크리트 주변이 소요 두께의 스치로폼에 의해 완전히 단열되었음을 나타내는 것으로 실 시공을 모의시험체와 동일한 치기높이 및 외부온도조건에서 수행한다면 모의실험을 통해 얻은 온도값과 거의 유사할 것으로 예상된다.

Fig. 6은 베이스콘크리트로부터 25cm 떨어진 A-A단면 하단부에서의 온도측정치를 나타낸 것이다. 이 그림과 Fig. 3, 4를 비교하면 위치별 최대온도발생량에는 차이가 있지만 최대온도도달 시간에는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해 구조물의 내·외부 온도차가 작을수록 균열발생 확률이 작아진다는 점을 감안하여 볼 때, 중앙부에서의 최고온도값이 가장 낮은 값을 나타내고 있는 3성분계 혼합 저발열형 시멘트가 균열방지차원에서 가장 유리한 것으로 나타나고 있다.

4.2 변형계 측정결과

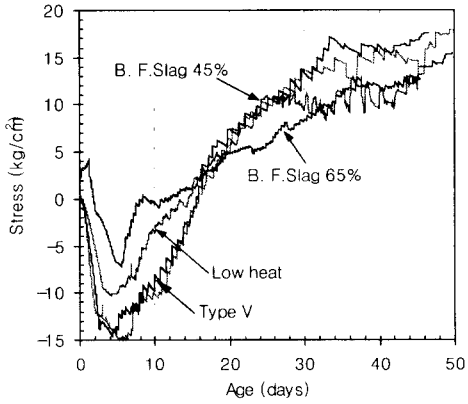


Fig. 7 Effective stresses converted from the data of strain gauges at the center of section A-A

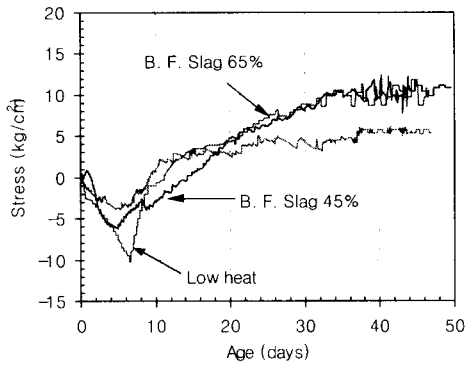


Fig. 8 Effective stresses converted from the data of strain gauges at the center of section B-B

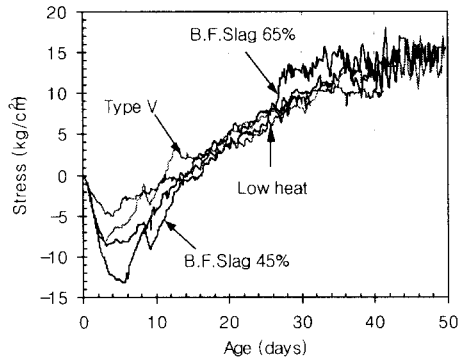


Fig. 9 Effective stresses at the center of section A-A

변형계에서 계측된 데이터로부터 온도응력을 산출하기 위해 앞서 설명한 초기치 보정과 영점보정을 실시하고 무응력계의 측정치를 뺀 후 탄성계수를 곱하여 구한 응력값들을 Fig. 7과 8에 도시하였다. 탄성계수는 각 재령별로 공시체를 제작하여 탄성계수를 산출하는 것이 보다 정확한 방법이겠으나 초기재령에서는 탄성계수를 산정하는 데 어려움이 많기 때문에 본 연구에서는 숙성도(Maturity)를 이용하여 압축강도를 산정한 후 이를 토대로 탄성계수를 계산하였다.

변형율에서의 초기치 산정은 시멘트 종류 및 시험체 단면별로 유효응력계에서 응력이 감지되는 시점이 서로 다르기 때문에 Table 5와 같이

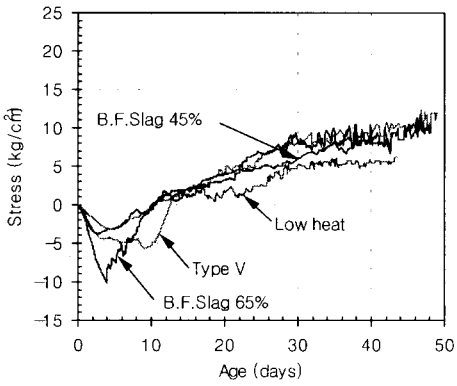


Fig. 10 Effective stresses at the center of section B-B for each cement

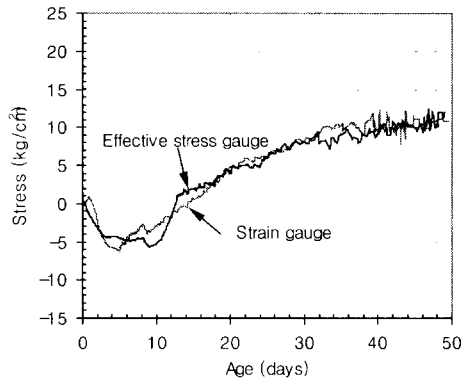


Fig. 11 Comparison of stress results obtained from effective stress gauge and strain gauge in blast furnace slag cement (slag contents of 45%)

초기치를 구한 후 영점보정을 실시하였다.

Fig. 7과 8의 결과를 보면 대상시멘트 모두가 외부구속을 받는 구조물에서 나타나는 전형적인 거동인 초기 압축상태에서 인장으로 변화하는 모습을 나타내고 있다. 압축에서 인장으로 변환되는 과정에서 계측상의 오차로 인해 다소 기울기가 완만하지 못한 부분도 있으나 대상으로 하는 시멘트 대부분이 10일에서 15일을 전후하여 압축에서 인장으로 바뀌고 있다. 또한, 앞서 온도계측상에서 온도구배가 비교적 높은 2성분계 혼합시멘트인 고로슬래그시멘트에서 보다 높은 인장강도가 측정되었다.

모의시험체의 중앙단면 A-A에서 측정된 Fig. 7과 단부에서 1m 떨어져 있는 B-B단면에서의 Fig. 8을 비교하면, A-A단면의 온도응력은 B-B단면보다 크게 나타나고 있는데 이는 A-A단면이 B-B단면보다 상대적으로 구속이 강하기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

4.3 유효응력계 측정결과

Fig. 9와 10은 단면 A-A와 B-B 중앙부의 유효응력 계측결과를 나타낸 것으로써 유효응력계에 의한 계측결과를 보면 변형계를 이용한 결과와 마찬가지로 외부구속을 받는 구조물에서 나타나는 곡선형상을 보이고 있다.

고로슬래그 65%, 5종, 고로슬래그 45% 및 저발열시멘트의 경우 압축에서 인장으로 변화하는 시점이 5종 시멘트인 경우는 10일경, 그 외의 시멘트는 15일을 기점으로 하여 압축에서 인장으로 변화하고 있다.

이와 같은 응력의 변화현상이 5종과 혼합형시멘트간에 다소 차이가 있는 이유는 혼합형 저열성시멘트가 다른 포틀랜드시멘트보다 수화발열속도가 느리기 때문에 응력이 변화하는 시점이 다소 지연되어 발생한 현상으로 판단된다.

본 실험에서 응력의 절대치를 통해 시멘트 종

Table 5 Setting of initial time for the calculation of thermal stress

Time / Cement	Concrete Placing Time	Initial Setting Time of Section A-A	Initial Setting Time of Section B-B
Type V	12.12 15:40	12.13 06:00	12.13 14:30
Slag 45%	12.12 16:45	12.13 05:00	12.13 09:00
Slag 65%	12.13 11:40	12.14 18:30	12.14 21:00
Low heat	12.13 13:25	12.15 07:00	12.14 18:00

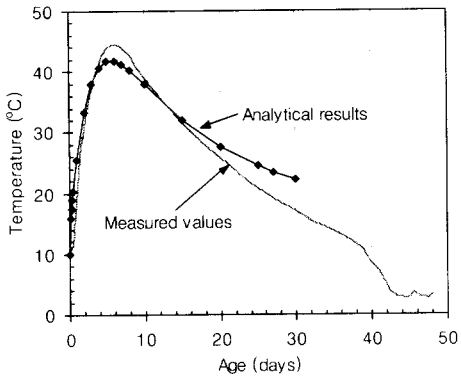


Fig. 12 Comparison between measured temperatures and theoretical ones in ternary low heat cement

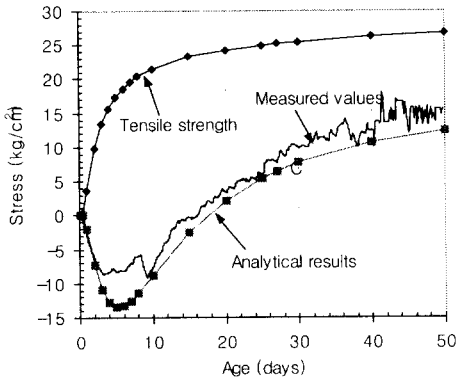


Fig. 13 Comparison of measured values and analytical ones with respect to effective stresses in blast furnace slag cement (slag contents of 45%)

류별로 비교하면 고로슬래그 65% 경우가 가장 높으며 고로슬래그 45%와 5종시멘트는 거의 비슷한 수준이고, 다음이 저발열시멘트로 나타나고 있어 수화열에 의해 계측된 온도의 순서와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 고로슬래그 45% 시멘트에 있어서 단면 B-B의 유효응력계를 이용하여 계측한 값과 변형계를 이용하여 산정한 응력값을 서로 비교한 그림으로 응력값 상에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4.4 계측결과와 해석결과의 비교

Fig. 12는 저발열시멘트의 중앙부에서의 계측온도와 해석온도를 대표적으로 비교한 것으로 해석결과는 계측결과를 잘 모사하고 있으며 특히, 온도에서 중요한 인자로 작용하고 있는 최대온도 크기 및 발생시점은 해석결과치와 거의 일치하고 있어 이론적 해석을 통해 매스콘크리트의 온도를 비교적 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림의 후반 곡선부터는 해석치와 계측치간에 차이가 발생하고 있는데 외기온도의 변화와 콘크리트 특성치, 즉 콘크리트의 열전도율, 비열, 외기대류계수 등이 실험을 통하여 구해진다면 좀 더 정확하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 모형시험을 실시할 당시가 12월 초였기 때문에 30일 이후는 거푸집 및 단열재 제거에 따른 외기온도의 영향이 다소 크게 작용하였고, 단열재 제거에 따른 구조적 변동, 즉 무한 슬래브구조에서 벽체에 가까운 구조로 변경됨으로써 치기 후 30일이 경과한 시점에서는 더 큰 온도차가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 13은 고로슬래그 45% 시멘트의 계측과 해석된 온도응력을 비교한 것으로 계측값이 해석값보다 다소 크게 나타나고 있지만 해석을 통해 실제 발생하는 응력의 경향은 비교적 정확히 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 앞서 설명한 바와 같이 콘크리트의 열적 특성치 관련 시험을 추가로 보완한다면 보다 근접할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 매스콘크리트 구조물에 있어 재료적인 온도균열제어 측면에서 시멘트 종류에 따른 수화열저감효과를 비교한 것이다. 대상시멘트로는 현재 시판되고 있는 시멘트중에서 해양 매스콘크리트 구조물에 주로 사용되어 왔던 5종시멘트와 2성분계 혼합형시멘트인 고로슬래그시멘트 2종류(슬래그함유량 45%, 65%), 3성분계 혼합형 저발열시멘트를 선정하여 모의시험체를 제작하였다. 모의시험체에는 온도계, 변형계, 무응력계 및 유

효응력계를 매설하고 시멘트별로 구조물 내부에 발생되는 온도와 온도응력을 측정하였다. 그 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1) 수화열 측정결과에 의하면 수화열 발생은 슬래그 함유량 65% 시멘트가 가장 높고 그 다음이 45%, 5종시멘트순이고 저발열 시멘트에서 가장 낮은 수화열이 나타났다. 따라서, 최고도달온도가 가장 낮은 저발열 시멘트가 내부구속에 의한 균열발생확률이 낮기 때문에 온도균열을 줄이는 차원에서 유리할 것으로 판단된다.
2) 콘크리트 변형계에 의해 계측된 변형률을 응력으로 환산한 결과와 유효응력계의 결과를 보면 온도계측결과 순서와 마찬가지로 온도응력의 크기는 고로슬래그, 5종, 저발열시멘트 순으로 나타났다. 본 연구에서 온도응력의 형상이 외부구속에 의해 영향을 받는 곡선을 나타내고 있어 이 점을 고려할 때 관통균열에 대해서도 저발열시멘트가 타 시멘트에 비해 다소 유리한 것으로 나타났다.
3) 이론적 해석 결과와 계측결과는 온도 및 온도응력의 발생경향을 비교적 근사하게 모사하고 있으며 보다 근접된 결과를 얻기 위해서는 콘크리트의 열적특성에 관한 추가적인 실험이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 山川秀次, 野池悅雄, 東側豐二, 川原場博美, "コンクリートの現場斷熱溫度上昇試驗方法に關する提案", コンクリート工學年次論文報告集, 13-1, 1988, pp.815-820.
2. 강석화, 정철헌, 정한중, 이용호, 박칠림, "매스콘크리트구조물의 온도응력평가에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제 7권 2호, 1995. 4, pp.126-135.
3. 日本 コンクリート工學協會, マスコンクリートの 溫度應力研究委員會報告書", 1985. 11.
4. A. M. Neville, "Properties of Concrete", Pitman, 1981.
5. 各種セメントの耐黃酸性に關する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 50, 1996, pp.152-157.
6. 김재권, 김진근, 김상철, 강석화, "매스콘크리트 구조물에서의 수화열저감기법에 관한 연구", '96 연구개발사업 최종보고서, 건설교통부.
7. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, "시멘트 및 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제 7권 3호, 1995. 6, pp.211-219.
8. ACI Committee 207, "Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1994.
9. 日本土木學會, "最新のマスコンクリート技術-14", コンクリート技術シリーズ, 1996.10.
10. 石川雅美, 令技靑典, "マスコンクリートの外部拘束に關する檢討", 土木學會論文集, No. 460, Vol 18, 1993. 2, pp.13-22.

요 약

최근 콘크리트 구조물이 대형화, 초고층화, 고강도화되면서 수화열에 의한 온도균열 문제가 큰 관심사로 부각되고 있다. 이에 대한 대책의 일환으로 프리쿨링이나 파이프쿨링, 치기블럭 크기 조정, 콘크리트 치기 시간간격조정 및 줄눈선정 등 시공방법을 개선하므로써 현재 온도균열을 제어하고 있으나, 경제적이고 보다 효율적으로 온도균열을 제어하기 위해서는 적절한 종류의 시멘트 사용을 병행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 수화열 저감효과 및 내해수성이 우수한 시멘트 선정을 목적으로 해양구조물에서 많이 사용되고 있는 5종시멘트와 2성분계 혼합형 시멘트인 고로슬래그시멘트(슬래그 함유량 45%, 65%) 및 3성분계 혼합 저발열형 시멘트를 대상으로 4개의 모의시험체를 제작하여 각 시험체별로 온도 및 온도응력을 재령별로 측정하였다.

시험결과, 수화열은 고로슬래그시멘트, 5종시멘트, 3성분계 저발열형 시멘트 순서로 작게 나타났고, 온도응력의 크기 순서도 이와 비슷하게 계측되었다. 또한, 변형계에서 계측된 변형률을 이용하여 온도응력을 환산한 경우는 유효응력계에 의해 응력이 감지되는 시점을 초기치로 하여 보정하였을 때 유효응력계의 값과 유사하게 나타났다. 계측된 결과와 이론적 결과치를 비교하면 이론치가 계측 결과에 비교적 근사하게 접근하고 있으며 차이가 발생한 부분은 콘크리트의 열적 특성과 관련된 시험이 보완 수행된다면 그 차는 상당히 줄 것으로 예상된다.

(접수일자 : 1999. 1. 25)