초고강도 콘크리트의 배합 및 온도균열에 대한 연구

Study on the mix proprotion and the thermal crack of Ultra High Strength Concrete

문 한 영* 김 병 권** 손 영 현** 강 훈*** 김 정 식****

Moon, Han-Young Kim, Byoung-Kwon Son, Young-Hyun Kang, Hoon Kim, Jeong-Sik

ABSTRACT

In this study, we manufactured the ultra-high strength concrete using mineral admixture which is easily workable. From the test results of compressive strength, It is concluded that the proper replacement ratio of silica fume should not exceed to 10% and the replacement of slag is more effective than the replacement of fly ash to gain very high compressive strength.

Thermal stress analysis is conducted to find the way of controlling the thermal crack of ultra-high strength concrete. As results of thermal stress analysis, it was found that reducing placing temperature of concrete(pre-cooling) is effective to reduce thermal crack and placing concrete in high air temperature is more effective than placing concrete in low air temperature.

1. 서론

최근 콘크리트구조물에도 초고층화, 장대화 및 경량화 등이 요구되고 있는 추세이므로 이러한 시대적배경에 호응하기 위하여 콘크리트의 고강도 및 고성능화는 필요불가결하다고 생각된다.

본 연구에서는 설계기준강도 1,000~1,200kg/㎠정도되는 초고강도 콘크리트의 실용화를 위한 기술축적에 따른 기초단계 연구의 일환으로 고로슬래그미분말, 플라이애쉬 및 실리카흄을 각각 시멘트와 몇 단계로 대체하여 혼합하였으며, 물-결합재비를 대폭 낮추기 위하여 고성능감수제의 사용량을 증대시켰을 뿐만아니라, 단위결합재량도 700, 750 및 800kg으로 크게 늘인 배합을 사용하여 압축강도가 1150kg/cm^{2}정도의 초고강도콘크리트를 생산이 가능할 것으로 생각되었다

또한 온도균열억제에 영향을 미치는 인자들 중에서 시공시기, 부재크기 및 치기온도 등을 변화시켜 FEM해석을 실시하여 수화열로 인한 온도균열을 저감시킬 수 있는 기초자료를 얻었다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 주임연구원
*** 정회원, 고려산업개발(주) 기술연구부 책임연구원
**** 정회원, 고려산업개발(주) 기술연구부 선임연구원

2. 실험개요

(1) 사용재료 : 본 실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 표 1과 같으며, 고강도를 확보하기 위하여 굵은골재의 최대치수 13mm인 쇄석을 사용하였다.
(2) 콘크리트의 제조 : 믹싱방법은 시멘트, 잔골재, 굵은골재를 투입한 후 20초간 건식으로 비빈 다음, 물과 유동화제을 넣고 60초간 혼합하였다.
(3) 단열온도측정 : Adiabatic calorimeter를 사용하여 콘크리트의 단열온도를 7일간 측정하였다.

표 1 사용재료의 물리적 성질

구 분	특 성
시멘트	비중 : 3.15, 분말도 : 3,366cm^2/g
고로슬래그	비중 : 2.90, 분말도 : 4,500cm^2/g
플라이애쉬	비중 : 2.18, 분말도 : 3,720cm^2/g
실리카흄	비중 : 2.60
잔골재	비중 : 2.60, 흡수율 : 0.95, 조립률 : 2.80
굵은골재	비중 : 2.65, 흡수율 : 0.87
유동화제	비중 : 1.049, 폴리칼본산계

(4) 콘크리트의 배합 : 초고강도콘크리트를 얻기 위하여 결합재량을 700, 750 및 800 kg/m^3, 물-결합재비는 18~22%범위, 잔골재율 28~50%범위로 정하였으며, 3종류의 광물질혼화재로 대체한 배합을 정리한 것이 표 2이다.

표 2 콘크리트의 배합설계표 및 압축강도 시험결과

배합 번호	Binder (kg/m^3)	W/B (%)	S/a (%)	FA (%)	GGBF (%)	SF (%)	HRWR (%)	Slump flow(cm)	압축강도(kg/cm^2)		
									3일	7일	28일
1	800	20	35	0	30	10	3.5	70	501	811	926
2	800	20	50	0	30	10	3.5	70	494	691	872
3	800	20	35	0	30	10	3.0	62	535	849	1025
4	800	20	35	0	30	20	3.5	45	409	750	1029
5	800	19	35	0	30	10	4.3	60	490	791	927
6	800	19	28	0	40	10	2.5	59	525	835	1142
7	800	19	28	0	40	15	2.8	40	463	777	1036
8	800	18	35	0	30	10	3.5	61	571	813	1131
9	800	18	35	0	30	20	3.9	47	550	828	1145
10	800	18	37	0	40	10	3.3	70	427	793	1069
11	800	18	35	0	30	10	2.9	60	507	814	1123
12	800	18	33	0	30	15	3.1	40	519	745	1091
13	750	22	37	20	0	20	4.0	49	431	651	889
14	750	21	37	0	30	10	3.0	62	525	758	1071
15	750	21	37	0	30	20	3.8	41	431	737	998
16	750	19	37	0	30	10	3.5	53	565	793	1135
17	750	19	37	0	30	20	4.2	35	459	768	1110
18	700	22	39	0	30	10	3.1	59	517	781	1085
19	700	22	39	0	30	20	4.0	46	392	691	942
20	700	20	39	0	30	10	3.7	65	475	808	1152
21	700	20	39	0	30	20	4.4	41	396	729	1089

3. 압축강도 실험결과에 대한 고찰

그림 1은 물-결합재비에 따른 콘크리트의 압축강도로 정리한 그림으로써, 물-결합재비와 압축강도 및 단위시멘트량과 압축강도와의 사이에는 명확한 상관관계를 알 수 없었다. 그러나 단위시멘트량 700kg에서 압축강도가 오히려 큰 경향을 나타내었다.

또한 그림 2에서 알 수 있듯이 실리카흄의 대체율을 25%까지 변화시켜도 콘크리트의 압축강도에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.

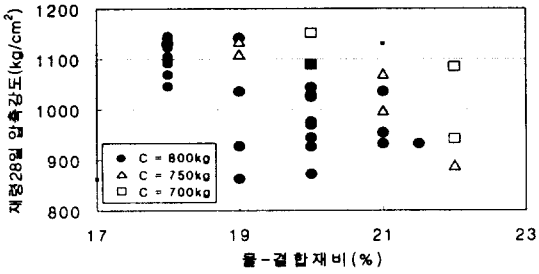

그림 1 물-결합재비와 압축강도와의 관계

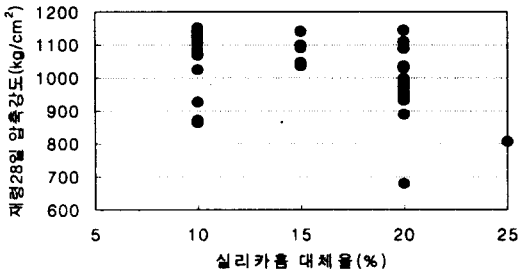

그림 2 실리카흄 대체율과 압축강도와의 관계

4. 온도응력 해석결과에 대한 고찰

콘크리트부재의 온도응력해석을 위하여 유한요소 해석을 위한 Tool로서 DIANA를 사용하였으며, 해석에 사용된 콘크리트의 수화발열특성치를 구하기 위하여 표2의 20번 배합으로 단열온도상승실험을 실시하여 측정한 값과 FEM 모델링에 사용된 입력값을 표3에 정리하였다.

표 3 입력데이타

항 목	입 력 값
최종단열온도 Q_∞(℃)	54
단열온도상승속도 α	1.697
열전도율(Kcal/m · hr · ℃)	2.3
열팽창계수	0.00001
시간별 탄성계수(t/m²)	CEB-FIP Model
포아슨비	0.18
압축강도(kg/cm²)	1150
비열(Kcal/kg · ℃)	0.28

유한요소해석을 위한 입력변수로서 부재크기를 0.5m×0.5m, 1m×1m, 2m×2m로 정하고, 타설시기 3월(1~10℃), 5월(12~22℃), 7월(22~29℃)로 가정하여, Sine 함수식으로 외기온도변화를 모델링하였으며, 치기온도를 5℃, 10℃, 15℃, 20℃ 및 25℃로 달리하여 해석을 하였다. 이때 해석결과 비교지점을 그림 3에 나타내었다. 각 변수의 해석결과중 7월의 대기온도하에서 부재크기가 1m×1m인 초고강도콘크리트용 재료를 pre-cooling하여 타설온도를 10℃로 낮추고 타설했을 경우의 시간에 따른 온도이력을 나타낸 것이 그림 4이며, 내, 외부 온도차를 나타낸 것이 그림 5이다.

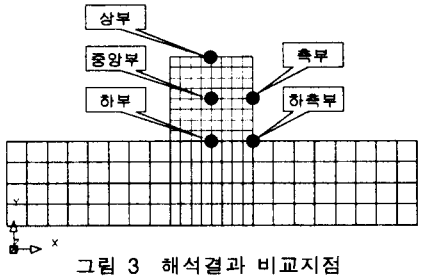

그림 3 해석결과 비교지점

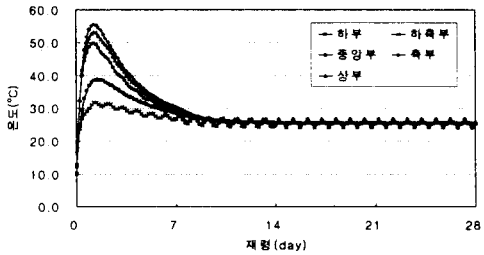

그림 4 온도이력

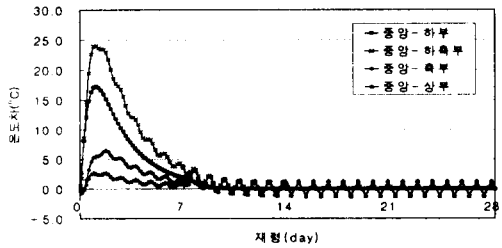

그림 5 내외부 온도차

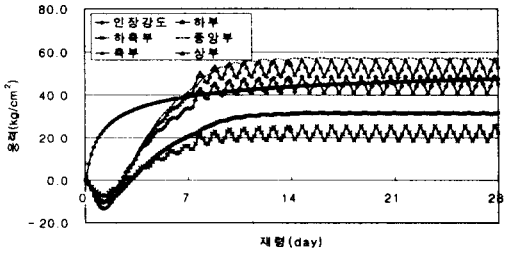

그림 6 온도응력이력

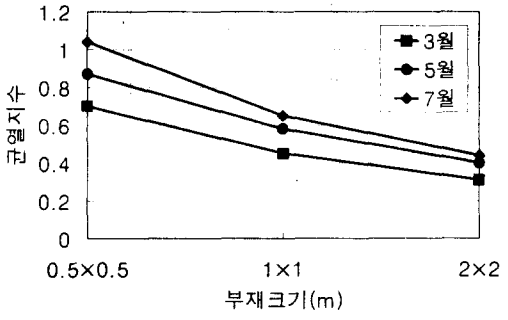

그림 7 대기온도와 부재크기에 따른 균열지수

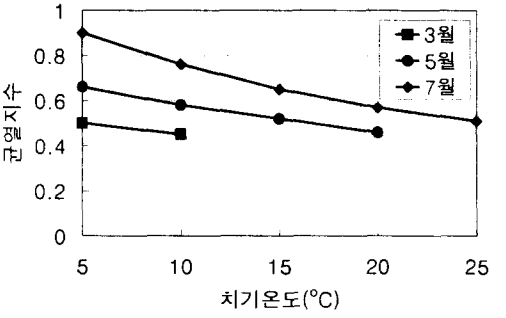

그림 8 대기온도와 치기온도에 따른 균열지수
(부재크기 1m×1m)

이번에는 온도응력해석을 실시한 결과를 정리한 것이 그림 6이다. 이 그림에서 y축의 양(+)의 값은 인장응력을 음(-)의 값은 압축응력을 나타내며, 각 지점의 온도응력은 초기에 압축응력이 작용하다가 최대온도발현시기인 1~2일을 기점으로하여 인장응력으로 전환되고, 이러한 인장응력은 6~7일사이에서 콘크리트의 인장강도를 초과하고 있음을 알 수 있다.

균열발생에 대한 안정성의 척도를 나타내는 온도균열지수로 각 변수들을 비교해보았고, 3월, 5월, 7월의 대기온도하에서 부재크기에 따른 최대균열지수를 나타낸 것이 그림 7과 같다. 7월에 타설하는 것이 온도균열제어에 유리함을 알 수 있다. 또한 부재치수 1m×1m에서 타설온도를 낮추었을 때의 최대균열지수는 그림 8과 같으며 치기온도를 낮출수록 균열발생가능성이 줄어드는 것을 알 수 있다.

콘크리트와 외기와의 온도차를 줄이기 위하여 양생포를 사용하여 보양양생을 실시한 경우에 대해서 해석하였으며, 기존콘크리트의 온도와 신설콘크리트의 온도차를 줄이기 위해서 기존 콘크리트의 온도를 5℃, 10℃높인 데이터를 사용하여 해석을 해보았으나 최대균열지수에 미치는 영향은 거의 없었다.

또한 기존 콘크리트의 압축강도를 변화시켜 해석해 보았으나 최대균열지수에는 아무런 영향을 미치지 않는 결과를 나타내었다.

5. 결론

지면의 제약 관계상 본문에서 생략했던 모르터의 압축강도 측정결과를 포함한 실험 및 온도응력 해석결과를 정리해 보면 다음와 같다.

(1) 실리카흄의 대체율 0~20%, 플라이애쉬 및 고로슬래그의 대체율 0~30%의 범위에서 모르터의 압축강도 측정결과, 플라이애쉬와 실리카흄을 혼합한 모르터보다는 슬래그와 실리카흄을 혼합한 모르터의 압축강도가 상대적으로 크게 발현되었다.

(2) 물-결합재비 19~22% 범위로 제조한 초고강도콘크리트에서 물-결합재비 및 단위시멘트량과 압축강도와의 사이에는 명확한 상관관계가 없었으며, 단위시멘트량 700kg, 실리카흄 및 고로슬래그의 대체율이 30% 및 10%인 콘크리트가 가장 큰 압축강도를 나타내었다.

(3) 초고강도콘크리트의 온도응력 해석결과, 기존 콘크리트의 온도를 높히는 방법은 온도균열 저감효과가 적었으며, 온도응력을 유효하게 제어하기 위해서는 pre-cooling 등에 의하여 재료 및 타설온도를 가능한 낮추어 시공하는 것이 유리하다고 생각되었다.