

매스콘크리트 壁體構造物의 打設改善을 위한 解釋的 研究

Analytical Study on the Improvement of Concrete Placement in a Massive Wall-Structure

김진근^{*} 김상철^{**}
Kim, Jin-Keun Kim, Sang-Chel

이두재^{***} 김국한^{****}
Rhee, Doo-Jae Kim, Kook-Han

ABSTRACT

Since the length of massive wall-structure is generally longer and larger than its thickness and a lift height of concrete placement, cracks induced by hydration heat are governed by outer structural restriction rather than inner one. However, the degree of restriction control is expected to be affected by the sizes of wall thickness, length and a lift height. Thus, this analytical study aims at the development of relationship among those to minimize thermal cracks. In addition, the effect of types of cement on the thermal heats and stresses is evaluated for anti-sulphate and 2 blended Portland cements concrete.

It was found from analytical study that a lift height of concrete placement is the most important factor controlling thermal cracks, and the increase of lift heights is not always detrimental to structural safety.

1. 서론

최근들어 콘크리트 구조물이 특수화, 대형화되고 중요 구조물에 고강도 콘크리트를 적용하려는 경향에 따라 종전보다 단위시멘트의 사용이 증가되고 있는 추세이다. 이로 인해 다량의 수화열이 발생되고 시공 초기단계부터 온도균열이 발생하여 구조물의 안정성은 물론이고 내구성상에도 악 영향을 미치게 되므로 이를 제어하기 위한 방안 및 사전에 균열을 예측할 수 있는 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 초기 재령시 시공단계에서 일어날 수 있는 온도균열 제어 차원에서

- 1) * 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수
- 2) ** 정회원, 동아건설산업(주) 책임연구원, 공박
- 3) *** 동아건설산업(주) 주임연구원
- 4) **** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

매스콘크리트의 응력상태 및 거동을 해석할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였고, 이 프로그램을 현재 부산에서 시공중에 있는 광안대로 현수교 구간의 기초케이슨 벽체 구조물에 적용하여 벽체구조 조건 및 크기에 따른 온도응력 및 수화발열량을 검토하고자 하였다. 현수교에 있어서 앵커구체와 하부기초는 상부에서 작용하는 하중을 지지하는 중요 콘크리트 구조물로서 자중에 의한 안정도와 구조적 특성이 모두 확보되어야 하므로 댐과 같이 일반적으로 알려져 있는 매스콘크리트와는 차이가 있다. 토목에서 사용되는 일반 매스콘크리트는 수화열을 제어하기 위해 골재 치수를 크게 할 수도 있고, 시멘트의 사용량을 줄일 수 있는 방안도 있겠으나, 본 구조물은 하중을 지지하는 구조적 특성과 구조물의 설치 입지 여건에 따른 해양구조물인 만큼 내구성 문제들이 함께 고려되어야 한다. 따라서 일반 토목구조물에서 사용하는 골재크기 및 시멘트량을 유지하는 조건에서 매스콘크리트의 균열을 최대한 방지할 수 있는 최적의 시공방법 연구가 필요한 것으로 판단된다. 이미 전 연구¹⁾에서는 수화열 해석을 통해 하부 기초 케이슨 구조물 정·저판의 수화열 저감을 위한 최적의 타설방법 및 블록 크기를 결정하였으므로 본 연구에서는 벽체구조물에 있어서 시멘트 종류별 영향평가와 벽체 두께 및 1회 타설고, 타설길이의 상관 관계를 통해 실 시공방법의 개선을 도출하고자 한다.

2. 수화열 해석을 위한 재료적 제원 및 유한요소 모델링

2.1 수화열 해석을 위한 재료적 특성

매스콘크리트에 있어서 콘크리트 내부에 발생하는 수화열 및 온도응력은 사용된 콘크리트별 열적 특성치와 외기 환경조건에 따라서 그 크기가 서로 다르게 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 3종류의 시멘트, 즉 내황산염시멘트와 현재 수화열 저감을 위해 사용되고 있는 혼합형 저발열시멘트인 2성분계 시멘트 및 3성분계 시멘트에 대해 검토하였다. 수화열 해석을 위해 사용한 각각의 시멘트별 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 시멘트 종류별 물성

종류	비 중	분말도 cm ² /g	응결 시간		안정도
			초결	종결	
내황산염	3.17	3190	5:00	8:40	0.01
2성분계	3.05	3830	4:50	6:40	0.03
3성분계	2.85	4080	5:25	8:45	0.02

표 2. 시멘트 종류별 콘크리트 배합비

설계강도 (kg/cm ²)	시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	배합비 (kg/m ³)					
				물	시멘트	세골재	조골재	AE제	SP
240	내황산염	43	49	155	360	877	947	0.1188	2.52
	2성분계	50	45	162	324	809	1025	0.0972	2.268
	3성분계	50	45.6	160	320	817	975	0.128	2.7

개발한 수화열 해석프로그램은 재료적 특성 및 외기의 상태를 입력하도록 되어 있으며, 프로그램 수행을 위해 필요로 하는 콘크리트의 재료적 특성은 각각의 시멘트별로 단열온도상승시험을 실시하여 최대상승온도 (K) 및 수화반응속도 (α)를 산출하고, 콘크리트의 탄성계수, 압축강도 및 인장강도는

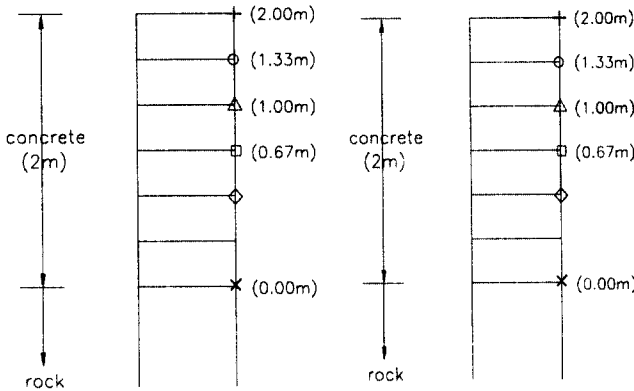
콘크리트 속성도 개념에 입각하여 산출하였다. 각각의 시멘트 종류별 콘크리트 배합은 표 2에 나타난 배합비에 기준하여 실시하였고, 그 시험결과를 토대로 수화열 해석을 위해 사용된 열적 특성치는 표 3과 같다.

표 3. 해석프로그램에 사용한 시멘트별 입력 데이터

입력 항목	내황산염	2성분계	3성분계	암 반	
단열온도	K (°C)	51.5	43.8	34.1	-
상승식	α	1.05	0.63	0.45	-
열전도율 (kcal/m · hr · °C)		2.3	2.3	2.3	2.5
비열 (kcal/kg · °C)		0.25	0.25	0.25	0.18
외기대류계수 (kcal/m ² · hr · °C)		9 (상부) 5 (측면)	9 (상부) 5 (측면)	9 (상부) 5 (측면)	-
초기온도 (°C)		20	20	20	20
28일 압축강도 (kg/cm ²)		240	240	240	-
28일 탄성계수 (kg/cm ²)		2.3×10^9	2.3×10^9	2.3×10^9	3.0×10^9
열팽창계수 (/°C)		1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
포아송비		0.17	0.17	0.17	0.17

2.2 유한요소 모델링

일반적으로 기초케이슨의 격벽과 같은 벽체 구조물은 케이슨 정·저판이나 후딩 기초 구조물과는 달리 벽체길이가 벽체두께나 타설고에 비해 상대적으로 매우 길기 때문에 균열의 발생원인이 내부구속보다는 외부구속에 의해 크게 영향을 받게 된다. 그러나 벽체두께나 1회 타설고가 일정 크기 이상을 확보하게 되면 그 구속도에 미치는 정도가 달라질 것이고, 또한 벽체의 두께와 길이 및 1회 타설고에 따라 온도응력 및 온도 발생량의 크기가 상이할 것으로 예상된다. 따라서 온도균열을 최소화하기 위해서는 이들의 상관관계가 수화온도 및 온도균열에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다고 판단된다.



(a) 온도해석위치

(b) 온도응력 해석위치

그림 1. 출력위치

하여 해석하였다. 또한 타설높이 및 시멘트 종류에 따른 영향 평가를 위해 1회 타설높이는 1m, 2m, 4m일 때와 3 종류의 시멘트에 대해 발생한 수화열과 온도응력의 변화를 검토하였다.

벽체구조물의 유한요소 매쉬는 타설길이별로 0.5m씩 분할하고, 타설높이별로는 타설고가 1m일 때 0.2m씩, 타설고가 2m와 4m인 경우는 0.33m씩 분할하였고, 암반의 경우는 1m씩으로 하였다. 벽체두께 방향으로는 벽체의 두께가 0.5m와 1.0m인 경우에는 0.1m씩, 1.5m인 경우는 0.15m씩으로 하고, 2.0m인 경우는 0.2m로 분할하였다. 해석출력 위치는 그림 1과 같이 온도해석의 경우 절점에서 출력하도록 하고 온도응력 결과는 매쉬요소에서 출력하도록 하였다.

표 4. 시멘트 종류별 타설고, 길이, 두께 해석

시멘트 종류	타설고(m)	길이(m)	폭(m)	비 고
내황산염시멘트 2성분계시멘트 3성분계시멘트	1m 2m 4m	5	0.5m	2성분계 및 3성분계 시멘트는 1m에 대해서 해석함
			1.0m	
			1.5m	
			2.0m	
		10	0.5m	
			1.0m	
			1.5m	
			2.0m	
		15	0.5m	
			1.0m	
			1.5m	
			2.0m	
		20	0.5m	
			1.0m	
			1.5m	
			2.0m	
		25	0.5m	
			1.0m	
			1.5m	
			2.0m	
30	0.5m			
	1.0m			
	1.5m			
	2.0m			

표 5. 시멘트 종류에 따른 벽체두께별 해석결과 (타설고 1m, 벽체길이 5m)

시멘트종류	벽체두께(m)	최대온도		온도균열지수	
		크기(℃)	발생시기(일)	균열지수	위치
내황산염 시멘트	0.5	42.3	1	1.25	중앙
	1.0	47.5	1	1.12	"
	1.5	48.9	1	1.12	"
	2.0	49.9	2	1.14	"
2성분계 시멘트	0.5	33.9	1	1.89	"
	1.0	38.5	2	1.60	"
	1.5	40.8	2	1.55	"
	2.0	41.7	2	1.57	"
3성분계 시멘트	0.5	28.5	2	3.07	"
	1.0	32.3	2	2.48	"
	1.5	33.7	2	2.32	"
	2.0	34.3	2	2.33	"

3. 벽체구조물의 해석 결과 및 분석

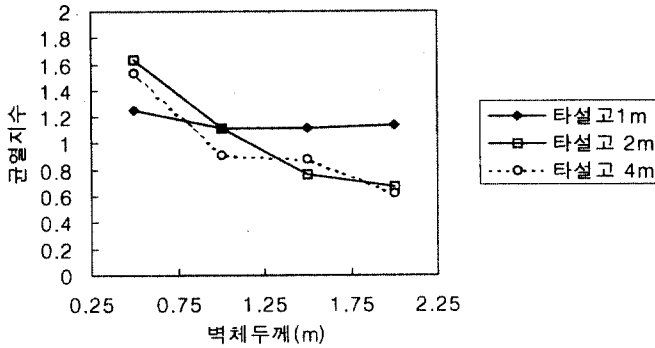
3.1 벽체두께 및 시멘트 종류에 따른 영향평가

벽체구조물은 앞절에서 언급한 바와 같이 외부구속이 균열발생의 지배요소로 작용하는 특성을 갖는 구조물이지만, 벽체의 두께가 두꺼울 경우에는 얇은 벽체에 비해 외부로 열을 방출하는데 다소 시간이 소요될 것이므로 구속조건이 양상이 바뀔 가능성이 있다. 벽체의 두께와 균열발생의 상관관계를 파악

하기 위해 세 종류의 시멘트별로 벽체두께를 변화하면서 1회 타설고 1m, 2m, 4m에 대해 해석을 수행하였다. 표 5는 1회 타설고를 1m로 하였을 때 시멘트 종류별 벽체 두께의 변화에 따른 온도해석 결과를 정량적으로 나타낸 것으로, 벽체의 두께가 증가하여도 균열지수는 거의 일정한 값을 보여주는 이른바 벽체 두께는 균열지수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그러나 그림 2와 같이 각 타설고별 해석 결과에 따르면, 타설고가 1m에서 2m, 4m로 증가함에 따라 균열지수는 벽체 두께에 대해 심각한 의존성을 나타내어 벽

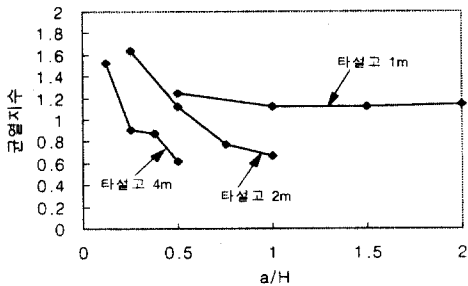
그림 2. 벽체길이 5m에 대한 타설고별 벽체두께와 균열지수의 상관관계 (내황산염 시멘트)



체두께가 두꺼울수록 균열지수는 급격히 감소하였다. 또한 타설고가 낮을수록 균열발생 확률이 저감한다는 일반적인 기대와는 달리 일정 벽체두께 범위 이하에서는 타설고 1m보다 타설고가 높은 2m와 4m에서 오히려 균열 발생 확률이 낮게 나타났다.

그림 3은 타설고에 대한 벽체두께의 비 (a/H)와 균열지수의 상관관계를 도시한 것으로, 벽체두께 방향으로 타설높이에 대한 구조물의 구속 정도에 따른 영향을 평가하였다. 이 그림은 타설고가 높아질수록 온도균열지수는 a/H 비에 대해 의존도가 높아지는 것을 나타내고 있다. 그 일례로 동일한 벽체두께-타설고비(a/H)에서 타설고 2m와 4m에 따른 균열지수를 비교하면, 타설고 4m가 타설고 2m에 비해 a/H 에 대해 곡선구배가 급격히 저하되므로 타설고 2m에서 균열지수가 높게 나타났다. 이는 벽체길이가 동일한 조건에서 벽체 측면의 가로, 세로비가 동일하다 하여도 균열지수는 일치하지 않고 실질적으로는 타설고에 따라 균열 발생 확률이 다

그림 3. 벽체길이 5m에서의 벽체두께-타설고비와 균열지수의 상관관계 (5종시멘트)



르다는 것을 제시한다. 또한, 균열발생위치를 살펴보면 타설고 1m의 경우는 벽체두께에 비해 타설고가 작기 때문에 외부구속에 의한 균열이 지배적으로 작용되어 구조적 안정상에 문제를 유발하는 중앙부에서 균열이 발생되나, 타설고를 증가시키에 따라 내부구속의 영향은 증가하고 이와 반면에 외부구속의 영향은 감소되어 균열발생위치가 점차 구조물 표면부쪽으로 전환되는 양상을 나타내었다. 따라서 벽체두께에 대해 내부구속과 외부구속이 적절히 평형을 이룰 수 있는 높이까지 타설하게 되면 균열발

생 확률이 확연히 줄어들지만 어느 범위 이상 타설고를 증가하게 되면 내부구속에 의한 지배가 급증하기 때문에 균열발생 확률은 다시 증가된다.

이상의 결과에 비추어 벽체구조물에 있어서 균열의 발생여부는 벽체의 두께보다는 타설고에 의한

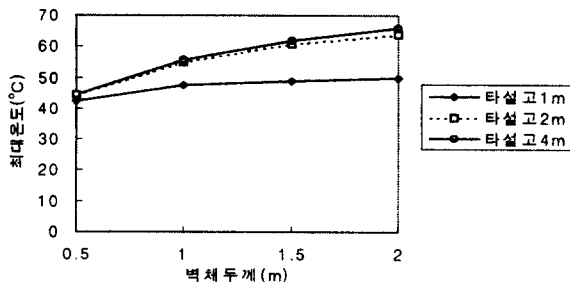


그림 4. 벽체두께에 따른 최대온도 발생량 (내황산염 시멘트)

구속의 영향력이 더욱 크게 작용함을 본 연구는 나타내고 있다. 또한 균열을 방지하기 위한 차원으로 단순히 타설고를 낮추는 것보다는 계획하고 있는 벽체두께에 대해 내부구속과 외부구속이 적절히 평형을 이룰 수 있는 타설고를 결정하여야 균열을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

시멘트종류별 최대온도 발생량을 비교하면 표 5와 그림 4와 같이 동일한 타설고 및 벽체길이에서 내황산염 시멘트가 가장 높은 수화열을 발생하였고 최대온도 발생 시기도 다소 빨리 발생하였다. 벽체두께에 대해서는 벽체두께가 두꺼울수록 외부로 열방출이 어려워져 최대온도 값은

상승하게 되고, 타설고가 낮을수록 온도상승률은 작게 나타났다. 또한 타설고가 증가할수록 최대온도는 이와 비례하여 상승하지 않고 그 타설고에 따른 온도영향은 감소하는 양상을 보였다.

3.2 벽체길이에 따른 영향평가

벽체길이 변화에 따른 균열의 의존성을 평가하기 위해 벽체길이를 5m씩 증가하면서 각 1회 타설고 별로 해석을 수행하였다. 그림 5는 내황산염시멘트를 이용한 해석결과로서 벽체두께가 동일한 조건에서 벽체길이가 증가함에 따라 벽체 균열 발생 확률은 높게 나타났다. 또한, 타설고에 따라 벽체길이별 균열 발생 의존도가 상이하여, 타설고가 1m 경우에는 벽체길이가 늘어남에 따라 서서히 균열지수가 감소하나 타설고가 4m로 증가된 경우에는 임의의 벽체길이 (15m)에서부터 균열지수가 급격히 감소되는 경향을 보여 준다. 따라서 벽체두께에서와 마찬가지로 타설고가 낮다고 항상 균열억제에 유리한 것이 아니라 벽체길이에 따른 구속도와 타설고와의 적합한 내,외적 구속이 평형을 이루었을 때 균열 발생 가능성이 감소됨을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 타설고가 낮은 1m인 경우 균열의 주 발생요인이

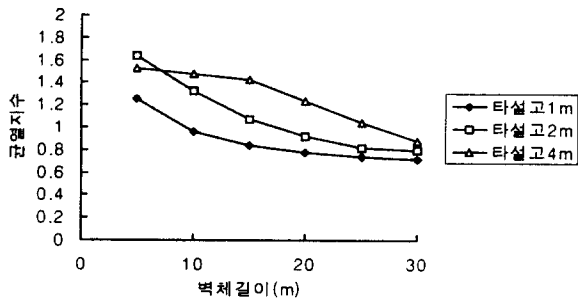


그림 5. 벽체두께 0.5m에서 벽체길이별 균열지수의 상관관계 (내황산염 시멘트)

이 외부구속에 의해 영향을 받으나, 타설고가 상대적으로 증가함에 따라 벽체길이에 대한 타설고 비(L/H)가 감소하므로써 균열의 발생요인이 점차적으로 내부구속으로 전환되면서 기인한 것으로 판단된다.

그림 6은 벽체길이를 타설고로 나눈 벽체길이-타설고비(L/H)에 대해 각 타설고별로 균열지수를 도시한 것으로 벽체길이-타설고비는 구조물을 구속하는 구속정도를 나타낸다고 할 수 있다. 이런 조건에서 균열지수를 비교하면 동일한 L/H값에 대해 타설고 별로 서로 다른 균열지수를 나타내고 있다. 이는 구속조건이 동일하다 하여도 타설고에 따라 구조물의 내,외부 구속 증감 기여도가 서로 다르기 때문에 경우에 따라서는 내

부구속에 의한 증가가 외부구속 감소에 비해 클 수 있고 혹은 그 반대가 될 수 있으므로 각 타설고 별로 수화열 해석을 실시하여 균열을 억제할 수 있는 최적의 타설크기를 결정하여야 할 것이다.

온도발생크기 측면에서 살펴보면 벽체두께와 타설고가 일정하다면 벽체길이에 대해 거의 일정한 최대 온도 발생량을 나타내고 있어 최대온도 발생량과 벽체길이와는 서로 무관한 것으로 나타났다. 또한 벽체구조물의 경우 후딩기초에 비해 벽체두께가 얇고 벽체 길이에 대한 최대온도 발생크기의 영향이 작으므로 타설고 증가에 따른 온도의 의존성은 매우 낮게 나타났다.

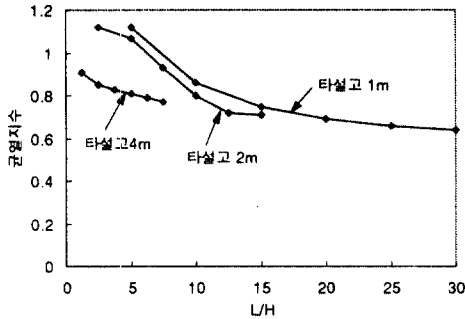


그림 6. 벽체길이-타설고비에 대한 균열지수 (벽체두께 1.0m, 내황산염 시멘트)

영향을 미치는 것이 아닌 것으로 나타났다.

(4) 같은 형상적 구속 조건이라 할지라도 타설길이와 타설고에 따라 내·외부 구속중감조건이 바뀌므로 계획하고 있는 벽체, 특히 1.0m 이상의 매스콘크리트 벽체에 있어서는 타설고별로 해석을 실시하여 최적의 타설크기를 결정하여야 한다.

4. 결 론

(1) 벽에서도 저판 해석과 마찬가지로 단열온도상승 값이 큰 시멘트로 제작된 콘크리트가 균열발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

(2) 타설고가 1m인 경우는 주로 외부구속에 의한 영향을 받게 되나 타설고가 2, 4m로 증가함에 따라 내부구속 의존도가 상승하게 되면서 균열발생위치는 중앙부에서 표면부 방향으로 전환되는 양상을 나타내었다.

(3) 벽체구조물에 있어서 1회 타설고가 벽체두께나 길이에 비해 균열발생에 지배적 요소로 작용하며 저판해석에서도 마찬가지로 타설고를 높인다고 반드시 불리하게

참 고 문 헌

1. 김진근, 김상철, 이두재, 김국한, "매스콘크리트에서 최적의 타설 단면 결정을 위한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 1997년도 봄학술발표회, 제9권 1호, 1997.5, pp.422~429.
2. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, "시멘트 및 콘크리트의 수화발열 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제7권, 제3호, 1995.6, pp. 211~219.
3. 정철현, 강석화, 정한중, 박칠립, 오병환, "매스 콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제6권, 제5호, 1994.10, pp. 203~212.
4. 이장화, 변근주, "매스 콘크리트의 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석 연구", 대한토목학회 논문집, 제15권, 제2호, 1995.3, pp. 337~346.
5. 内田清彦, 構原弘辛, "積算發熱量に基づくセメントの水和熱拘束度の定式化と溫度上昇の豫測", 콘크리트工學, Vol. 24, No. 4, 1986.4, pp. 105~113
6. 鈴大康範, "溫度依存性を有するセメントの水和發熱過程と熱傳導との連成を考慮した非線型溫度解析", 土木學會論文集 第426號, V-14, 1991.2, pp. 167~176
7. 日本コクリート工學協會, "마스콘크리트의 온도應力發生 메카니즘에 關す 코로키움", pp.112, 1982