고유동 콘크리트를 사용한 PSC 거더 균열 분석

The Analysis of Cracks in PSC Girder Using High Flowing Concrete

노 병 철¹⁾

Lho, Byeong Cheol

안 광 수²⁾

Ahn, Gwang Su

곽 길 호^{3)*}

Kwak, Kil Ho

Abstract

Recently, mass concrete with high flowability are widely used to improve the quality and constructability in the longer span construction of prestressed concrete bridges, but it may induce nonstructural cracks due to the hydration heat and autogenous shrinkage etc. The stresses in concrete were evaluated by various experiments and numerical analysis. The tensile stress in mass concrete was increased in connection with the accumulation of hydration heat. Moreover, large amount of autogenous shrinkage from powder type admixture could add the tensile stress to mass concrete near anchorage zone. The tensile stresses in anchorage zone by heat and autogenous shrinkage exceeded the tensile strength of early stage of concrete, and small amounts of stress increasement were shown in other parts of PSC girder.

Keywords : Crack, High flowing concrete, Heat of hydration, Mass concrete, Shrinkage

1. 서 론

1.1 연구개요

최근 콘크리트 구조물이 장대화 또는 대형화됨에 따라 설계분야에서는 구조물의 자중을 가능한 감소시키기 위하여 부재의 크기를 줄이고, 고강도 콘크리트를 사용하고 있는 추세이며, 시공분야에서는 고유동 콘크리트를 이용한 고성능 콘크리트를 적용하는 것이 일반적인 추세이다. 그러나 단면의 감소에 따라 PSC 정착구 부근의 배근은 과밀하게 되어 통상의 콘크리트를 적용할 경우 타설, 다짐 및 마감등 콘크리트 품질관리에 많은 노력을 투입하여야 한다.

이로 인하여 자기충전성을 갖는 고유동 콘크리트를 계획함으로써 타설 인력의 숙련도에 좌우되지 않고, 다짐작업을 생략할 수 있으며, 관련 작업의 효율화와 구조물 품질의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 고유동 콘크리트를 사용하게 된다.

이러한 고유동 콘크리트는 현대개념에 부응하는 양호한 시공성을 확보할 수 있다는 점 이외에 많은 단위시멘트량 등 분체량의 증가에 따라 수화열, 건조수축 및 자기수축 등에 의한 균열이 문제로 대두되기도 한다.

한편, 본 연구에서 다루는 균열은 콘크리트구조설계기준 (2007)중 사용성 및 내구성편에 명시된 구조균열 폭인 0.3 mm 이하의 미세균열로 구조적인 문제점은 없으며, 콘크리트의 구조물에서는 균열의 발생은 불가피한 현상이라는 측면에서는 큰 문제가 없으나, PSC 거더의 정착구 부근에는 큰 응력을 받게 되므로, 강선의 긴장 이전에 발생한 균열에 대해서는 그 유해성을 검토할 필요가 있고, 발주자 및 사용자가 심리적 불안을 느낄 수 있기 때문에 이에 대한 관리가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 PSC Box 거더의 단부 균열을 방지하기 위하여 균열 원인을 규명하고자 한다.

1) 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

2) 정회원, 상지대학교 토목공학과 박사과정, (주) 동호 부사장

3) 정회원, 상지대학교 토목공학과 석사과정, 교신저자

* Corresponding author : cbrsp@hanmail.net

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 고유동 콘크리트를 적용한 매스 콘크리트의 배합

2.1 수화열

수화열에 의한 온도균열의 문제는 콘크리트 댐 또는 부재 치수가 특별히 큰 콘크리트 구조물에만 발생하는 것으로 생각하여 왔지만, 사용재료나 시공조건에 따라서는 비교적 치수가 작은 구조물에서도 유해한 균열이 생기는 사례가 적지 않다.

매스콘크리트로 다루어야 하는 구조물의 부재치수는 일반적인 표준으로서 넓이가 넓은 평판구조의 경우 두께 0.8 m 이상, 하단이 구속된 벽조의 경우 두께 0.5 m 이상으로 한다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트 구조물 등 부배합의 콘크리트가 쓰이는 경우에는 더 얇은 부재라도 구속조건에 따라 적용 대상이 된다.

단면치수가 큰 콘크리트 부재는 경화 중에 시멘트의 수화열이 축적되어 콘크리트의 내부온도가 상승한다. 이때 콘크리트 부재 표면과 내부와의 온도차나 부재 전체의 온도가 강하할 때 수축변형의 구속 등에 의해 응력이 유발되고 균열이 발생할 수 있다. 이 온도균열은 구조부재의 형태에 따라 발생빈도가 다르다는 것이 조사 및 연구결과 밝혀지고 있다. 콘크리트 타설 후 수화반응으로 인한 발열과정에서 콘크리트 내부는 온도가 높아져 팽창하지만 표면은 외기와 접해있어 변형이 크지 않다. 즉, 중앙부와 표면부의 변형률이 다르기 때문에 (내부구속) 응력 및 표면균열이 발생할 수 있다. 또한, 타설 후 1~3일 경과 후의 냉각과정에서 콘크리트의 체적은 수축하지만 이러한 현상이 기초에 구속되어 (외부구속) 콘크리트의 하부에 응력 및 균열이 발생할 수 있다. 일반적으로 외부구속에 의한 균열은 구조물을 관통하는 경우도 있기 때문에 매스콘크리트에서의 온도균열은 신중히 검토되어야 한다 (Park, 2010).

2.2 고유동 콘크리트의 자기수축

고유동 콘크리트는 콘크리트표준시방서 (2009)에 명시된 슬럼프 플로 600 mm 이상으로 관리되며, 재료분리 저항성을 확보하기 위하여 분체량을 증가시키거나, 증점제를 다량 사용하거나 이 둘을 동시에 사용하게 된다.

고유동 콘크리트는 분체계 고유동 콘크리트와 증점제계 고유동 콘크리트, 또 병용계 고유동 콘크리트로 구분하며, 분체계 고유동 콘크리트는 다량의 분체사용 및 물-분체비를

작게 하여 적절한 재료분리 저항성을 확보하고, 고성능 감수제로 고유동성을 부여하여 자기 충전성을 확보한 콘크리트이다. 이러한 분체계 고유동 콘크리트는 대부분 물-결합재비 30% 정도로 작기 때문에 압축강도 40 MPa 이상의 고강도를 나타내는 경우가 많으며, 분체량이 많기 때문에 적용하는 구조물에 따라 시멘트만으로 제조할 경우에는 수화열에 의한 온도균열이 발생할 우려가 있다.

증점제계 고유동 콘크리트는 셀룰로오스계나 아크릴계 증점제를 비교적 다량으로 사용하여 재료분리 저항성을 확보한 고유동 콘크리트이다. 분체량과 잔골재율은 일반 콘크리트와 큰 차이가 없지만 사용한 증점제의 종류에 따라 콘크리트 온도 변화에 민감한 문제가 있다.

병용계 고유동 콘크리트는 다량의 분체를 사용하고 물-결합재비를 작게 하는 동시에 다량류 천연 고분자계 증점제 또는 소량의 셀룰로오스계 증점제를 첨가함으로써 적절한 재료 분리 저항성을 부여하고, 고성능 감수제로 고유동성을 부여하여 자기 충전성을 확보한 고유동 콘크리트이다. 병용계의 경우 분체계 및 증점제계의 문제점을 보완한 방법으로 배합측면에서 분체계 고유동 콘크리트와 유사하나, 잔골재의 표면수율 및 입도분포의 변화 등 사용재료의 품질 변동에 대해 굳지 않은 콘크리트의 품질 변동을 완화시키고 안정한 자기 충전성을 용이하게 확보할 목적으로 소량의 증점제를 사용한다는 점에서 증점제계와 별도로 분류된다 (Namgung, 2001).

보통 포틀랜드 시멘트의 자기수축 형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 콘크리트 타설 후 약 5시간까지 수축이 급격히 증가하다가 일정하게 수렴하는 형태를 보이고 있다. 이와 같이 자기수축 발현곡선 중 급격하게 변화하는 변환점이 나타나는

Fig. 1 Autogenous Shrinkage in High Flowing Concrete

현상, 즉 타설 후 자기수축이 일차적으로 종료되는 것은 시멘트 수화반응에 의해 견고한 골격이 형성되고 에트링가이트에 의한 팽창에 기인한 것으로 사료되며, 다시 자기수축이 증가하는 것은 시멘트 내 석고가 변환점 시기에 모두 소비되어 시멘트 수화물의 구조형성에 중요한 역할을 담당하는 에트링가이트가 형태변화를 일으키기 때문이다 (Koo, 2009).

2.3 부등 건조수축

건조수축으로 인한 응력의 해석에서 기존의 연구는 건조수축량을 계산함에 있어 단면에 따라 건조수축의 양을 평균적인 값으로 계산함으로써 외부 구조에 의한 응력의 해석만을 수행하게 되고, 노출표면부의 내부구조에 의한 인장응력의 생성을 무시하게 된다. 그러나, 실제 건조수축 현상을 살펴보면 대기와 접한 구조물의 표면에서 건조 수축량이 구조물 내부의 양보다 크게 되므로 노출표면에서의 인장응력이 생성된다. 따라서 단면의 내·외부에 따라 건조수축량이 다르게 되어, 부등건조수축을 고려할 필요성이 요구된다. 이런 부등건조수축으로 인하여 발생하는 균열은 구조물의 안정성, 내구성 및 방수성 등에 영향을 미치게 된다. 콘크리트내의 수분 분포는 건조수축에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 수분이동에 의한 부등 건조수축현상을 이해하는데 있어서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다 (Kim and Kim et al., 1994).

3. 대상구조물의 현장검사 및 수치해석

Table 1은 PSC 거더의 현장배합표를 나타낸 것으로, 표현

Table 1 Mix Design of PSC Girders

fck (MPa)	Gmax (mm)	slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m ³)									Etc
						W	C1	C2	C3	S1	S2	S3	G	AD	
45.0	19	600	3.5	30.3	48.5	166	329	164	55	615	0	155	845	5.48	2.329

C1 : Ordinary Portland Cement. (OPC)

C2 : Ground Granulated Blast Furnace Slag. (GGBFS)

C3 : Fly Ash. (FA)

Fig. 2 Drawings of Girder Cracks

방법에는 다소 이상한 점이 있으나, 시방배합의 분석결과 보통포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬와 같은 분체를 다량 사용한 고강도 분체계 고유동 콘크리트가 적용된 것으로 판단된다.

3.1 현장검사

시공이 완료된 거더 중 균열이 가장 심한 거더의 균열을 육안으로 검토하여 균열도를 Fig. 2와 같이 작성하였다.

작성 시기는 시공이 완료된 후 25일이 경과한 시점이다. 균열은 단부의 중심에서 수평방향으로 발생하여 중공단면으로 진행된 것으로 보여지며, 0.1 mm 이하로 발생되었다. 중공부 단면에서는 중심 균열에서 약 600~700mm 간격으로 수직균열이 추가 진행되었다.

3.1.1 균열폭 측정

icamscope 전자 현미경을 이용하여 40배율로 균열폭을 측정하였다. 측정위치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 단부의 균열이 집중된 곳인 a, e, f, g이며, 균열 현미경을 이용하여 촬영한 사진을 Fig. 4에, 조사내용은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

3.1.2 균열깊이 측정

균열의 깊이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 Pundit plus를 이용하여 Fig. 6의 위치에서 초음파 전달속도법에 의하여 측정하였다. Table 3은 균열깊이와 폭을 측정한 결과로 가장 심각한 균열의 경우 72 mm까지 발생한 것으로 나타났다.

Fig. 3 Crack width measurement locations

(a) a section

(b) e section

(c) f section

(d) g section

Fig. 4 Cracks under the Electron Microscope

Table 2 Crack Width Measurement Data

ID		Crack Width (mm)
a [*]	[1]	0.071
	[2]	0.042
e [*]	[1]	0.055
	[2]	0.036
f [*]	[1]	0.083
	[2]	0.083
	[3]	0.065
	[4]	0.125
	[5]	0.059
g [*]	[1]	0.083
	[2]	0.024
	[3]	0.042
	[4]	0.012
	[5]	0.042
	[6]	0.042

3.1.3 철근 배근 측정

PSC 거더 정착구 부근의 철근 배근 측정을 위해 철근레이더 NJJ-85A를 이용하였으며, Fig. 7에 나타난 1구역과 2구

Fig. 5 Photos for Crack Depth Measurement using Punditplus

Fig. 6 Locations of Crack Depth Measurement

역에서 수직, 수평방향으로 철근을 측정하였다. 측정결과와 배근도를 비교한 결과는 Table 4와 Fig. 8에 나타내었으며, 전반적으로 배근간격 및 피복두께가 설계도서와 일치하는 것으로 나타났다.

Table 3 Results from Crack Depth Measurement

Measurement location	Crack Depth (mm)	Crack Width (mm)
No.1	72	0.048
No.2	48.02	0.046
No.3	33.62	0.045

Fig. 7 Arrangement of bar Measurement location

Table 4 Bar Arrangement and Cover Depth

Remarks		Spaces of Bar Arrangement (mm)		Cover Depth (mm)	
		Designed	Measured	Designed	Measured
Section 1	Perpendicular	150	150	50	50
	Horizontality	150	155	50	50
Section 2	Perpendicular	150	140	50	50
	Horizontality	150	150	50	50

(a) Horizontality Reinforcement (b) Perpendicular Reinforcement

Fig. 8 Measurement Results of Bars

3.2 수화열 측정

거더의 수화열 측정을 위해 Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 수화열이 가장 높을 것으로 예측되는 단부 중앙부와 온도변화가 가장 심할 것으로 예측되는 벽체 외측부에 온도계이자를 설치하였다. 측정 장비는 K社의 UCAM20PC를 사용하였으며, 측정시간은 1시간 단위로 측정하였으며, 총 72시간을 측정하였다. 거더의 증기양생 온도는 1시간까지 24℃까지 올렸으며, 3시간 동안 약 26℃를 유지하였다. 그 이후 1시간 동안 18℃로 감소시켜 자연 상태로 유지하였다. 그러나 낮은

Fig. 9 Measurement Locations for Heat of Hydration

Fig. 10 Temperature Difference between the Center and the Outer Part of the Girder

외기온도로 인하여 타설 13시간 후에 32℃까지 증가시킨 것으로 조사되었다.

Fig. 10은 거더 단부의 중심부와 벽체부 그리고 증기양생 온도와 외기 온도를 나타낸 것이다. 타설 완료 후부터 약 10시간까지는 수화열이 서서히 증가하다가 10시간 후부터 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

이는 일반적인 수화반응의 온도이력으로 볼 때 본격적인 수화반응은 타설 후 10시간이후에 나타난 것으로 판단되며, 10시간 이전의 수화반응이 늦어진 이유는 낮은 외기온도에 의한 것으로 판단된다. 한편, 중심부의 최고 온도는 타설 후 42시간에 64.3℃이었고, 벽체의 온도는 타설 후 29시간에 44.8℃이었다.

3.3 수화열에 대한 수치해석

3.3.1 해석 방법 및 조건

대상 거더의 수화열 해석은 범용 구조해석 프로그램인 Midas Civil을 이용하였으며, 콘크리트의 재료특성과 해석조건은 Table 6에 나타낸 바와 같다.

Table 5 Analysis Conditions and the Material Properties

Material Properties		Input Values
fck (MPa)		45
Elasticity		31928.4
Poisson Ratio		0.18
Heat of Hydration Analysis	Maximize adiabatic temp (°C)	47.9
	Thermal Conductivity (J/m ² · hr · [°C])	9627.8
	Specific heat (J/N · [°C])	110.71
	Convection Coefficient - steel (J/m ² · hr · [°C])	58604
	Convection Coefficient - plywood (J/m ² · hr · [°C])	33488
Concrete Compressive Strength Factor	a	16.2
	b	0.82

Fig. 11 PSC Girder Modeling for Heat Analysis

Fig. 12 Location for Stresses Review (Outer Part)

3.3.2 해석 모델링

수치해석은 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 7596개의 절점과 5710개의 3차원 솔리드 요소로 모델링하여 수행하였다. 시간에 따른 응력이력 검토 위치는 Fig. 12~Fig. 13에 나타낸 바와 같이 외부의 경우 절점 6102는 단부 표면에서 1 m, 절점 1418은 3 m 떨어진 2곳을 선정하였고, 내부의 경우 단부 중심에서 절점 6048은 1 m, 절점 189는 2 m 떨어진 2곳을 선정하였다.

3.3.3 해석 결과

수화열에 대한 수치해석결과는 Fig. 14에 나타낸 바와 같

Fig. 13 Location for Stresses Review (Inner Part)

Fig. 14 Temperature by Numerical Analysis

이 타설 후 48시간에 최고에 도달한 이후 감소하였다. 한편, Fig. 14에 나타낸 바와 같이 40시간 이후 양생막을 제거할 경우, 거더는 외기온도에 노출되게 되어 거더의 표면 온도가 낮아지기 때문에 수축이 발생된다. 즉, 콘크리트의 경화 과정에서 수화반응이 진행되어 최고온도에 도달하는 동안 콘크리트는 팽창하고, 최고온도 도달 이후, 온도가 저하되면서 수축이 발생하게 된다. 이러한 팽창과 수축이 반복되는 과정에서 콘크리트의 내외부의 온도차에 의한 변형률 차이로 내부구속이 발생하는 것으로 판단된다.

Table 7은 온도변화에 대한 PSC거더 내·외부 온도변화 이력을 도시한 것으로 48시간에 최고온도 69.33°C에 도달하였다. Table 8은 시간별 종방향 (xx) 응력이력을 나타낸 것이고, 타설후 12시간 경과 후 0.407 MPa 발생하였고 48시간 후 최대 3.958 MPa, 에 이르는 것으로 나타 나왔다. Table 9는 시간별 연직방향 (zz) 응력이력을 나타낸 것으로 타설 후 12시간 경과 후 0.23 MPa 발생하였고, 48시간 후 최대 2.574 MPa에 이르는 것으로 나타 나왔다.

거더 내부와 외부의 각 위치에 대한 발생응력과 균열지수는 Fig. 15~Fig. 19에 나타낸 바와 같으며, 단부 벽체면 절점

Table 6 Internal and External Temperature with Time

6,102 절점, 1,418 절점은 각각 0.595, 0.579로 균열발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한 단부중양부의 189, 6,048 절점의 균열지수는 20과 정착구면 6,356 절점의 균열지수는 1.13으로 균열발생은 없을 것으로 예상된다.

4. 균열발생 원인 분석 및 방지대책

대상 거더의 균열은 고유동 콘크리트의 품질관리, 수화열, 건조수축 및 자기수축 등에 의한 것으로 판단되며, 각각의 원인별 내용은 다음과 같다.

4.1 고유동 콘크리트 현장배합

대상 부재에 사용한 콘크리트는 분체계 고유동 콘크리트를 적용한 것으로 판단되지만, Table 10에 제시한 바와 같은 문제점이 있는 것으로 판단된다. 즉, 유동성 평가 항목에서

Table 7 Internal and External Stress (F_{xx}) with Time

콘크리트 표준시방서 (2009 개정) 고유동 콘크리트에서 제시하고 있는 슬럼프 플로우 600 mm 이상이라는 규정 범위와 달리 현장에서 슬럼프 플로우 범위를 600±100 mm로 결정하여 시방서의 기준값과는 차이가 있다.

한편, 고유동 콘크리트는 유동성 및 재료분리 저항성 (점성) 평가를 모두 수행하도록 콘크리트 표준 시방서에 제시하고 있다. 그러나, 현장에서 슬럼프 플로우를 측정시 재료분리 저항성을 측정할 수 있는 500 mm 도달 시간에 대한 기준 미수립 및 측정이 이루어지지 않아 재료분리에 대한 저항 및 다짐의 필요성에 대한 구분이 불분명하였다.

또한 고유동 콘크리트에 사용된 분체량이 일본토목학회 규정에는 만족하는 것으로 나타났다. 일반적으로 분체계 고유동 콘크리트는 소요의 점성을 확보하기 위하여 최소한의 분체량이 필요하지만, 소요 점성을 만족하는 분체량 이상을 사용함으로써 과도한 강도 발현 및 이에 따른 수화열이 증가되었다. 특히, 매시브한 구조물에 적용할 경우 더 큰 문제점

Table 8 Internal and External Stress (F_z) with Time

(a) Stress and Allowable Tensile stress

(b) Crack Ratio

Fig. 16 Stresses and Crack Ratio for Node 1418

(a) Stress and Allowable Tensile stress

(b) Crack Ratio

Fig. 17 Stresses and Crack Ratio for Node 6048

(a) Stress and Allowable Tensile stress

(b) Crack Ratio

Fig. 18 Stresses and Crack Ratio for Node 6356

(a) Stress and Allowable Tensile stress

(b) Crack Ratio

Fig. 15 Stresses and Crack Ratio for Node 189

(a) Stress and Allowable Tensile stress

(b) Crack Ratio

Fig. 19 Stresses and Crack Ratio for Node 6102

을 발생시킬 수 있으므로, 이점을 고려할 경우, 다소 많이 혼입된 것으로 판단된다.

4.2 고유동 콘크리트의 자기수축

콘크리트 타설 후 15간까지 고유동 콘크리트에 발생하는

자기수축량은 약 -240×10^{-6} 정도였다. 그 후 다시 자기수축이 급속히 증가하며 약 25시간 후에는 그 차이가 크지 않은

Table 9 Mix Design Review of PSC Girders

Performance Evaluation	Standard	Mix Design	Remarks
Slump flow (mm)	over the 600	600 ± 100	N.G
Segregation Resistance (sec)	5 ~ 20	—	N.G
Powder amount (m ³ /m ³)	0.16 ~ 0.19	0.19	O.K
water content per unit volume of concrete (kg/m ³)	155 ~ 175	166	O.K
Air (%)	4.5	3.5 ± 1.5	O.K
W/P	0.28 ~ 0.37	0.3	O.K

(Standard Specifications for Concrete and JSCE Provision)

것으로 나타내었다.

고로슬래그 미분말을 혼입한 경우, 자기수축이 지연되는 현상은 고로슬래그 미분말을 대량 치환하여 시멘트량이 크게 감소하였기 때문으로 사료된다. 한편, 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우의 자기수축의 지연이 발생하는 이유는 낮은 외기온도에 의해 수화온도가 약 10시간 지연되어 나타나기 때문이라 판단된다. 따라서 증기양생하는 매스 콘크리트의 수화열에 의한 구속응력과 고유동 콘크리트의 자기수축 및 부등 건조수축에 의한 인장응력이 균열발생을 가속화한 것으로 판단된다.

4.3 수화열에 의한 내부구속 응력

균열발생 가능성을 평가하는 균열지수 (I_{cr} =인장응력/콘크리트인장강도)는 콘크리트의 인장강도의 평가기준에 따라 다소 상이하게 평가되며, 구조물에 배근되는 철근량에 따라 동일한 구조물이라도 균열 갯수, 폭 등이 차이가 있을 수 있으나, 콘크리트 표준시방서에서 제안하는 인장강도 평가기준에 따라 균열지수를 평가한 결과, Table 11에 나타난 바와 같이 단부 측벽면의 균열지수가 0.57로 나타나 균열발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한 단부 중앙부와 정착구 면의 균열지수는 각각 20과 1.13으로 나타났다.

거더 단부의 중앙부와 벽체부의 해석값과 계측값은 Fig. 20에 도시하였으며, 중앙부와 벽체에서 계측한 최대온도차는 35.3℃로 나타났으며, 수치해석을 통하여 35.7℃로 유사한 결과를 얻어, 수치해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이로 부터 내외부 온도 차를 20℃ 이하로 유지할 경우 균열지수는 1.0이상으로 나타나, 양생시 온도는 내외부 온도차의 관리가 주요 사항이며, 이를 20℃ 이내로 관리하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

Table 10 Maximum Stress and Crack Index

Division	Stress direction	Maximum Stress (MPa)		Crack Index
		48 Hr	72 Hr	
6,102 NODE	Sig-xx	2.20	1.83	0.595
	Sig-zz	2.14	1.74	
1,418 NODE	Sig-xx	2.25	1.96	0.579
	Sig-zz	1.69	1.36	
189 NODE	Sig-xx	-2.16	-2.50	20
	Sig-zz	-1.89	-2.18	
6,048 NODE	Sig-xx	-1.74	-2.01	20
	Sig-zz	-1.49	-1.78	
6,356 NODE	Sig-xx	0.85	0.69	1.13
	Sig-zz	-0.13	-0.10

Fig. 20 Measured and Estimated Temperature

5. 결 론

- (1) 균열이 발생된 거더는 구조적 원인에 의한 것은 아니며, 비구조적인 원인에 의한 것으로 판단된다.
- (2) 고유동 콘크리트를 사용한 매스콘크리트의 경우 부재의 크기와 단위 분체량에 의한 수화열 및 건조수축의 증가로 단부 측벽면의 균열지수가 0.57로 나타나, 균열발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 단부 중앙부와 정착구 면의 균열지수는 각각 20과 1.13으로 나타나 균열발생은 없을 것으로 예상된다.
- (3) 고유동 콘크리트를 사용하는 PSC거더의 배합설계 시 슬럼프 플로우는 600±50 mm 이상으로 조정하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 슬럼프 플로우 조절은 적절한 방법을 통하여 실시하여야 하며, 배합설계 된 단위수량 이상을 첨가할 경우 건조수축 등을 유발할 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다.
- (4) 증기양생에 의한 보온성 확보와 습윤상태 유지를 유지

함으로써 대단면에서 주로 발생하는 부등 건조수축, 표
면부 건조수축 및 자기수축에 의한 균열 발생을 억제
할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 상지대학교 교내연구비 지원에 의한 것으로 관
계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

References

1. ACI Committee 207, "Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice 207.1, part 1, 1994, p.21.
2. Choi, Y. W., Jung, J. G., "Development and Utilization of High Fluidity Concrete", Korea Concrete Institute annual conference, vol. 20, No. 1, 2008, pp.1109-1112. (in Korean)
3. Kim, G. Y., Koo, G. M., Lee, H. G., Lee, U. B., "The Analysis of Early Age Properties of Hydration Heat and Autogenous Shrinkage according to Specimen Size and Retardation of Hydration", Korea Concrete Institute annual conference, vol. 21, No. 4, 2009, pp.481-488. (in Korean)
4. Kim, J. G., Noh, J. H., Park, Y. D., Han, J. H., Kim, H., "Hydration Heat Characteristics of Cement and Concrete", Korea Concrete Institute annual conference, vol. 7, No. 3, 1995, pp.211-219. (in Korean)
5. Kim, S. G., Choi, S., Lee, G. M., Park, J. J., "Autogenous Shrinkage Characteristics of Ultra High Performance Concrete", Korea Concrete Institute annual conference, vol. 23, No. 3, 2011, pp.295-301. (in Korean)
6. Kim, J. G., Kim, H. B., "Stress Analysis for Differential Drying Shrinkage of Concrete", Computational Structural Engineering Institute Korea annual conference, 1994, pp.155-162. (in Korean)
7. Koo, G. M., "A Fundamental Study on the Correlationship between Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete at an Early Age", Master Thesis, 2009. (in Korean)
8. Namgung, G. A., "Study on the Development of Segregation Reducing Type Superplasticizer for High Fluidity Concrete", Master Thesis, 2001. (in Korean)
9. Park, S. W., "A Study on Properties of Hydration Heat of High-Strength Concrete and Reduction Strategy for Heat Production", Master Thesis, 2010. (in Korean)

Received : 12/18/2012

Revised : 03/25/2013

Accepted : 04/08/2013

요 지

교량의 장대화로 고품질과 양호한 시공성을 갖는 고유동성 매스콘크리트가 프리스트레스 콘크리트 거더에 광범위하게 사용되고 있으나, 수화열과 자기수축에 의한 비구조균열을 종종 발생하고 있다. 대상부재의 콘크리트응력에 대한 다양한 실험과 수치해석을 통하여 평가로부터 매스콘크리트의 수화열 증가에 따라 인장응력 및 균열지수를 예측하였다. 또한 분체계 혼화재료에 의한 자기수축 증가는 정착부 부근 매스콘크리트의 인장응력을 가중시킨다. 수화열과 자기수축 및 건조수축에 의한 인장응력은 PSC 거더의 대부분에서 약간의 응력증가를 나타내나, 정착부 근처의 인장응력은 콘크리트의 재령초기에 인장강도를 초과하게 되어 균열을 유발하게 됨을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 균열, 고유동 콘크리트, 수화열, 매스콘크리트, 건조수축