

외부구속 콘크리트 부재의 초기균열 예측을 위해 온도해석 결과를 이용한 자기변형 및 구속응력 측정 실험의 제안

변종관* · 강원호** · 강정길*** · 배성재****

Byun, Jong-Kwan*, Kang, Won Ho**, Kang, Jeong-Kil***, Bae, Seong-Jae****

A Proposal of Autogenous Deformation and Self-induced Restrained Stress Test Using Thermal Analysis Results to Predict Early-Age Cracks of Externally Restrained Concrete Members

ABSTRACT

It is difficult to predict the early-age cracks of strain restrained concrete members due to environmentally sensitive parameters. A new method is proposed to predict the cracks by test of autogenous deformation and self-induced restrained stress of specimens which simulates early-age crack state by hydration heat of the 'Wall-On-Foundation' members. For this purpose, thermal analysis of entire structure considering the environmental condition is performed at first, and the specimens are set up where hydration heat was electronically controlled according to the analysis results. By measuring free deformation and force to compensate the autogenous strain including relaxation, feasibility of cracks can be estimated. The proposed method can predict the occurrence of cracks better than the material test of the early age concrete which has large variance. The method of this study is particularly useful when it is used as a preliminary experiments to predict the crack more precisely before full-scale concrete placement in construction of large structures.

Key words : Autogenous deformation, Self-induced restrained stress, External restraint, Hydration heat analysis, Early-Age cracks

초록

변형구속부재에서 발생하는 콘크리트 부재의 초기균열은 환경에 민감한 변수가 많아서 예측하기 힘들다. 본 연구에서는 벽체-기초부재에서 수화열에 의한 초기균열 발생 조건을 모사한 시편을 제작하고 자기변형과 자체유발응력을 측정하여 재료시험으로 예측하기 힘든 균열발생 가능성을 판단하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 먼저 전체 구조계의 환경조건을 고려한 부재의 수화열 해석으로 초기재령 콘크리트의 온도분포를 예측하고, 해석 결과와 같이 수화열이 전자제어되는 시편을 제작하였다. 초기재령 콘크리트의 자유변형을 측정하고 이를 보상하는 인장력을 가하여 균열을 유발하는 구속응력의 크기를 구하였다. 본 연구에서 제안한 실험적 방법은 측정값의 분산이 큰 초기재령 콘크리트의 재료시험에 의존하지 않고, 초기재령 콘크리트의 수화열에 의한 온도변화, 자기수축과 릴렉세이션에 의한 자유변형량 및 구속응력을 측정할 수 있으므로 초기 균열의 발생 여부를 보다 정확하게 예측할 수 있다. 본 연구의 방법은 대형 구조물의 시공에서 본격적인 콘크리트 타설 이전에 예비실험으로 적용하면 균열예측의 정도를 높일 수 있으므로 특히 유용하다.

검색어 : 자기변형, 자체유발구속응력, 외부구속, 수화열 해석, 초기균열

* 정회원 · (주)서영엔지니어링 부장 (Seoyeong Engineering Co., LTD · hatch1009@naver.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 동아대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Dong-A University · whkang@dau.ac.kr)

*** DM엔지니어링 대리 (DMEngineering · designare58@naver.com)

**** 정회원 · 인터컨스텍 기술연구소 사원 (Interconstech R&D center · bsj0127@naver.com)

Received May 20, 2016/ revised August 15, 2016/ accepted December 22, 2017

1. 서론

부재를 나누어서 타설하는 콘크리트 구조는 이미 굳은 콘크리트가 새로 타설되는 콘크리트의 변형을 구속하는 외부 구속 상태에 있는 경우가 많다. 외부구속의 콘크리트 부재는 타설 후 2~7일 사이의 초기재령에서 주로 수화열의 차이에 의한 변형의 구속으로 구속응력이 발생하고 그 값이 인장강도를 초과하면 균열이 발생한다. 그런데 구속을 유발하는 변형은 자기수축변형과 팽창수축을 모두 포함하여 상호작용하므로 구속응력을 구하기 쉽지 않다. 또한 초기 콘크리트는 온도 및 습도와 경계조건에 민감하며 재료시험이 어려우므로 인장강도를 측정하기 쉽지 않다. 이와 같이 구속응력의 예측과 인장강도의 측정이 어려운 경우에는 초기균열가능성을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 주로 수화열에 의해 외부구속이 발생하는 콘크리트 부재에서 온도해석을 수행하고 그 결과에 따라 온도를 제어한 부재시험으로 초기 균열 여부를 예측하는 방법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 먼저 실제 부재에서 발생하는 자유변형과 구속변형을 모사하기 위하여 부재의 수화열 해석을 수행하며, 수화열 해석에 따른 온도분포에서 균열발생 가능성이 큰 위치의 온도이력을 구한다. 다음에 해석 결과와 같이 모사한 온도이력이 가능하게 온도를 전자적으로 제어하여 한 쌍의 무근 콘크리트시편을 제작한다. 하나의 시편에서는 초기재령의 자유변형을 측정하고, 또 하나의 시편에서는 변형을 구속하여 균열을 유발하는 구속변형을 측정한다. 본 연구에서 제안한 방법은 초기재령의 콘크리트에서 발생하는 수화열에 의한 온도변화에 따른 자기수축과 팽창수축 및 구속응력을 측정할 수 있으므로 대규모의 시공에서 본격적인 부재 타설 이전에 예비실험을 통하여 균열가능성을 예측할 수 있을 것으로 생각한다. 시공 현장에서 쓰이는 대표적인 콘크리트 배합에 대하여 시험을 수행하여 본 연구에서 제안하는 방법이 다양한 경우에 적용이 가능한 것을 보였으며 현 설계기준에서 제시한 균열제어방법과 비교하였다.

2. 연구 대상 구조의 수화열 해석

2.1 연구 대상 구조의 개요

본 연구에서 제안하는 방법을 적용하는 대표적인 구조로 기초콘크리트를 먼저 타설한 뒤 충분한 시간이 지난 후 벽체를 타설하는 벽체-기초 구조(Wall on Foundation)를 선택하였다. 벽체-기초 구조는 널리 쓰이며 벽체에 발생하는 관통 균열이 누수를 동반할 경우 사용성에 문제가 되므로 많은 연구가 수행된 바 있다(Schlech, 1962; Staffa, 1993; Rostásy, 2001; Röhlting, 2005). 초기 균열의 주원인은 수화열로 이를 낮추기 위해 재료 개선 뿐 만 아니라 구속도를 감소시키기 위한 구조적 조치 등이 대안으로 제시된

바 있으나, 아직도 관통 균열이 발생하는 사례가 많다. 최근에는 콘크리트 배합에 따른 수화열 발생의 크기를 상당한 정밀도로 측정할 수 있으며, 온도해석을 통하여 부재의 온도 분포를 구하는 것도 어려운 일은 아니나 설계기준에서 제시하는 균열지수를 적용하여 예측하는 균열발생 확률의 정확도는 낮다. 이는 몇 가지 문제점에 기인한다. 첫째로 온도해석의 정도는 높으나 응력해석의 정도가 낮은 문제를 들 수 있다. 응력해석에 필요한 초기 콘크리트의 주요물성은 온도와 경계조건에 예민하며 이를 재료시험하는 것은 어렵다(Gutsch, 1999). 초기 균열이 주로 발생하는 2~5일 사이의 콘크리트에 대해서는 굳은 콘크리트에 대한 표준 시험법이 적용되지 않으며, 압축강도를 기준으로 초기 물성을 보간하는 것 또한 적절하지 않다. 둘째로 초기 환경조건과 물성이 상호 연관되어 있으므로 정해진 온도와 압력의 시험으로 재료의 초기상태를 잘 모사할 수 없다. 수화열에 따른 부재 내 온도는 시간에 따라 변하는 온도이력을 가지며 단면 내 분포도 다르다. 각 온도 이력에 따라 다른 재료 시험은 불가능하며 표준적인 시험 결과를 보장하는 것은 아직 검증되지 않았다. 그럼에도 불구하고 수화열에 의한 균열이 발생하는 대략 2일 이후의 콘크리트는 비교적 일정한 간격의 균열이 발생하고, 응력해석의 결과가 정성적으로 유효하여 고체역학이 적용되는 것으로 판단할 수 있다.

2.2 벽체-기초 구조(Wall on Foundation)의 수화열 해석

대표적인 벽체-기초 구조(Wall on Foundation)로 Fig. 1의 부재에 대해 온도해석을 수행하였다. 부재의 기하적 제원은 다른 연구에서 사용한 예제(Rostásy, 2001)와 같이하여 결과를 검증하기 쉽게 하였다. Table 1은 해석을 수행하기 위한 물성값과 경계조건을 보인 것이다. 온도해석은 비선형 해석 프로그램인 DIANA

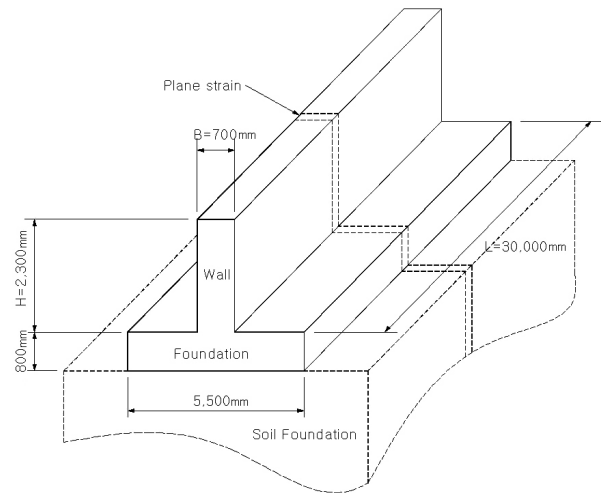


Fig. 1. Wall on Foundation Structure Model

Table 1. Analysis Condition of Wall on Foundation Structural Model

Thermo-mechanical Properties of Concrete	Thermal expansion coefficient :	10-5 1 / °C
	Adiabatic temp. rise :	$Q^{\infty}(1 - e^{-rt})$ °C
	Thermal conductivity :	238 kJ/(K·m·day)
	Thermal capacity :	2359 kJ/(K·m ³)
	Convection coefficient, cast :	700 kJ/(K·m ² ·day)
	Convection coefficient, no cast :	1500 kJ/(K·m ² ·day)
2D Model Boundary Condition		

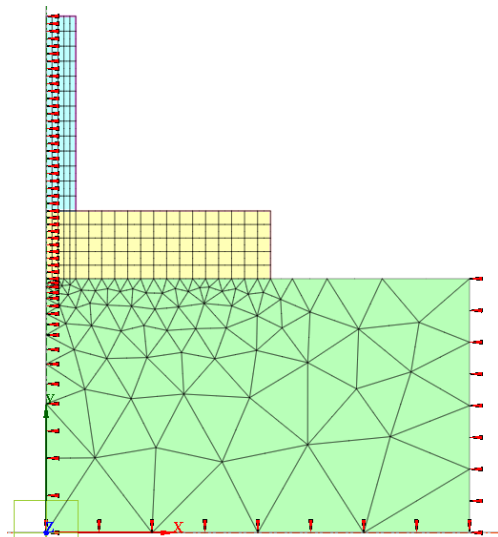


Fig. 2. Thermal Analysis Model (Wall Thickness = 700mm)

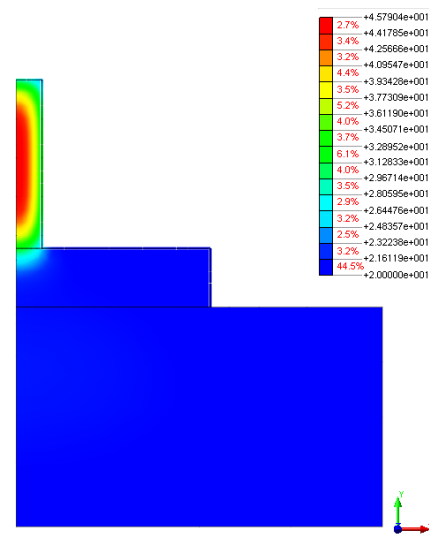


Fig. 3. Contour Plot of Temperature (Concrete Mixture PC-30)

9.6 (TNO, 2014)을 사용하였다. 해석을 위해 Fig. 2와 같이 벽체를 모델화하고 본 실험에서 사용된 시멘트 및 혼화재료의 화학적 특성 및 규격별 콘크리트의 단열온도상승곡선을 적용하였다. 초기 양생온도, 외부기온과 습도 등의 영향요소들을 예제의 조건과 동일한 조건을 적용하여 해석을 실시하였다. 해석결과의 한 예로 PC-30 배합에 대한 최고 수화열 발생 시 온도 분포도는 Fig. 3과 같다.

3. 자기변형 및 자체유발응력 측정 실험

3.1 재료의 준비

본 연구에서는 벽체-기초 구조에서 일반적으로 쓰이는 목표강도 24~30MPa의 콘크리트를 대상으로 시험체를 제작하였다. 품질관리를 위하여 같은 종류의 시멘트를 사용하였으며 시멘트제조사 연구소(동양시멘트 연구소)의 자문에 따라 3개의 서로 다른 강도에

Table 2. Concrete Mix Proportions

Model	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					Target $f_{c,target}$ (MPa)	Measured $f_{c,28days}$ (MPa)
				W	C	S	G	AD		
PC-30 SC-30*	180	40	47	168	420	823	939	2.94	30	32.9
PC-27 SC-27*	180	45	48	170	378	855	937	2.64	27	29.2
PC-24	180	48	49	170	354	883	929	1.77	24	23.3

*blast-furnace slag cement replaced 40%

대한 배합을 결정하고 각 재료모델에 따른 단열온도 상승곡선의 측정결과를 받아 사용하였다. 배합은 굵은 골재 최대치수 25mm, 슬럼프 180±2mm이며 각 부재별 재료배합표는 Table 1과 같다. 목표강도 30MPa과 27MPa에 대해서는 고로슬래그시멘트를 40% 치환하여 수화열을 저감한 경우에 대해서도 시험하였다.

3.2 시험체의 제작

구속응력을 모사한 실험은 일단의 연구자들에 의해 시도된 바 있다(Springenschmidt et al., 1994; Schöppel et al., 1994; Lura 2003). 시험체는 이들 연구와 유사한 150×150×700mm의 인장부재로, 하중재하부의 확대단면은 길이 200mm, 폭 300mm, 경사 0.325 : 1로 제작하였다. 시편의 크기가 작으면 콘크리트의 균질성을 보장하기 힘들며, 크기가 크면 시편 내부와 외부의 온도차이와 같은 추가적인 변수들이 발생할 우려가 있으므로 앞선 연구의 시편크기와 비슷하게 하였다. 인장을 받는 콘크리트 부재의 실험에서 기술적으로 가장 어려운 부분은 인장력의 전달로 초기재령의 무근 콘크리트 부재는 강도와 강성이 모두 부족하여 힘의 전달이 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 힘의 전달을 위해 부재확대부분에 추가의 스티드를 삽입하여 몇 번의 시행착오를 거쳐 문제를 해결하였다(Fig. 4). 적절하게 힘이 전달되지 않은 시편에서는 단면 크기가 변하는 부분에 발생하는 집중응력으로 균열이 발생하거나 스티드의 이완이 발생하였다. 하중의 재하는 부재길이 방향의 중심인장이 보장되게 Actuator를 하중프레임에 swivel head로 고정하고 부재 밑면과 옆면에 roller guide를 설치하고 양쪽의 변위를 측정하여 편심여부를 검증하였다. 실험결과는 우려한 것과 같은 큰 편심이 발생하지는 않았는데, 이는 편심이 0 인 상태라기보다는 초기 콘크리트의 점·소성의 효과가 작용했기 때문일 수도 있다.

시험체의 온도와 습도를 조절하기 위해 비닐로 실험장치를 둘러싼 chamber를 만들고, 거푸집 하부에는 온열매트를 부착하였으며, 난로와 가습기의 자동 온도/습도 조절을 위하여 micro-controller (Arduino)를 이용하여 조절하였다. 실험 chamber 내에는 같은 크기와 모양의 시편을 두고 변형을 측정하여 구속응력이 발생하지

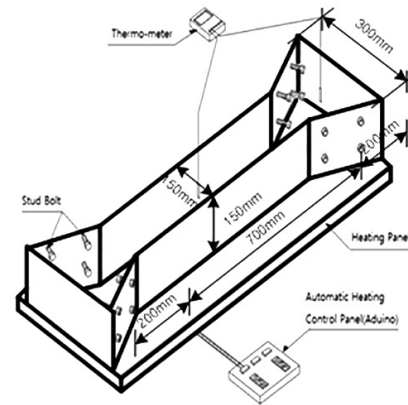


Fig. 4. Details of the Test Device Setting

않는 상태(free state)의 변형을 측정하였으며, 이를 자가변형시험 시편(autogeneous deformation test specimen)이라 한다. 한편, 구속응력은 부재의 변형을 억제하는 고정지점을 설치하여 유발할 수 있으나, 실제로 이 경우에 구속력을 측정할 수 없다. 왜냐하면 하중을 측정하는 load cell 자체가 탄성지점으로 작용하기 때문이다. 또한 수축변형으로 지점과 콘크리트 부재가 분리되면 인장력을 측정할 수 없다. 따라서 자체유발 구속응력시험시편(self-induced restraint stress test specimen)에서는 시험체와 재하점 사이의 간격을 0으로 설정하고 시간이 지나면서 발생하는 간격을 0으로 유지하기 위해 Actuator를 가동하여 이때 작용하는 하중을 측정하였다. 두 개의 시험체(자가변형시험시편과 자가구속응력 시험)는 1 set로 강도에 따라 배합을 달리하고, 시멘트의 종류를 달리한 5개의 재료에 대해 실험하였다. 각 시험체에는 Fig. 4와 같이 내부에 온도측정 센서를 매입하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

3.3 실험 장치와 측정

외부구속을 위한 Actuator는 정격하중 500kN의 hydraulic actuator (MTS, model 244.41)를 사용하였으며, 500kN 범위의 인장 및 압축력 측정용 Load-Cell을 사용하였다. 콘크리트 부재의

수화반응에 의한 수화열을 자동 조절하기 위하여 단열 거푸집 및 자동온도 조절장치를 사용하였다. 일정한 외부기온과 습도 유지를 위해 항온, 항습 장치를 사용하였으며, 실험 결과 측정을 위한 장비로는 변위측정용 LVDT 5대, 콘크리트 온도측정용 Thermometer를 사용하였다. 부재 종방향 변형의 완전한 구속을 위하여 거푸집 양단부에 stud bolt를 설치하여 콘크리트 부재와 단부 거푸집(claw)이 일체로 거동하도록 하였다.

3.4 시험체의 온도제어

실험에서 각 시편에 발생하는 온도와 수화열해석 결과의 비교 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과와 해석치가 거의 일치하여 벽체-기초 구조 모델의 콘크리트에 발생하는 수화열에 의한 온도상승 하강이 시험체에 적절히 상사되었음을 알 수 있다.

3.5 실험 과정

본 실험연구에서는 자가변형시험(Autogenous Deformation Test: 이하 ADT)시편과 자가유발구속응력(Restrained Stress Test: 이하 RST)시편을 1쌍으로 제작하여 실험하였다. RST시험의 배치는 Figs. 5 and 6과 같으며, ADT시험은 같은 배치에 하중재하가

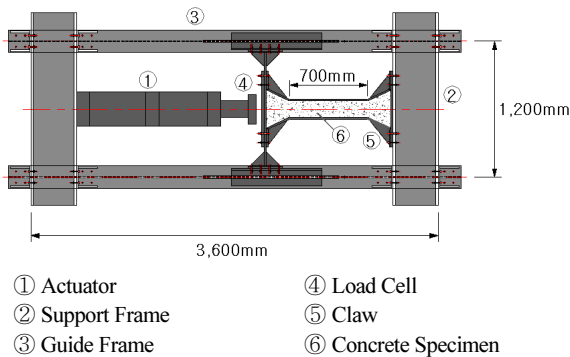


Fig. 5. Top View of Test Set Up

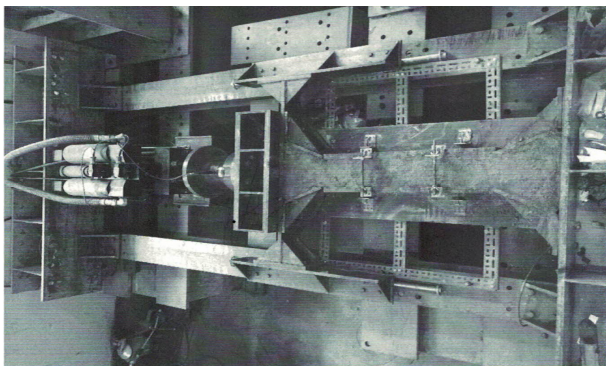
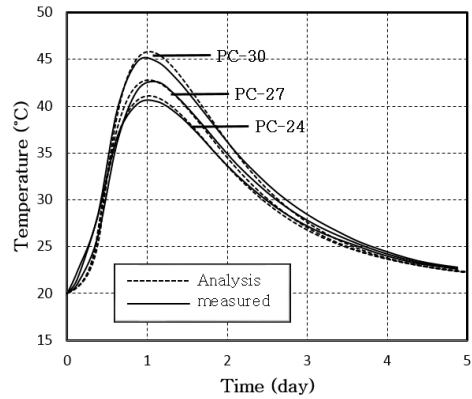
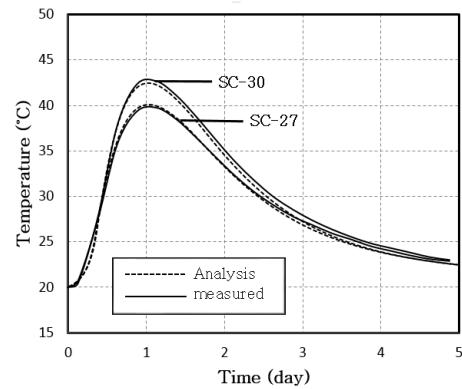


Fig. 6. Test Set Up for Restrained Stress Test

없는 것이다. 각 배합모델에 대해 동일배치의 콘크리트를 ADT시편과 RST시편에 동시 타설하였으며, 동일한 조건하에서 실험을 실시하였다. 콘크리트 시편의 실험 중 양생은 항온($T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$), 항습($H_u=50\%$) 조건을 유지하였으며, 각 시편별로 5일 양생기간 동안 실험을 실시하였다. 시험체는 기초판 위에 타설된 벽체 콘크리트 구조의 일부로 가상하여, Table 1과 같은 조건의 Fig. 1의 벽체-기초 콘크리트 구조 모델에 대해서 검토하였다. 벽체-기초 콘크리트구조



(a)



(b)

Fig. 7. Development of Temperature (a) Portland Cement, (b) Slag Cement

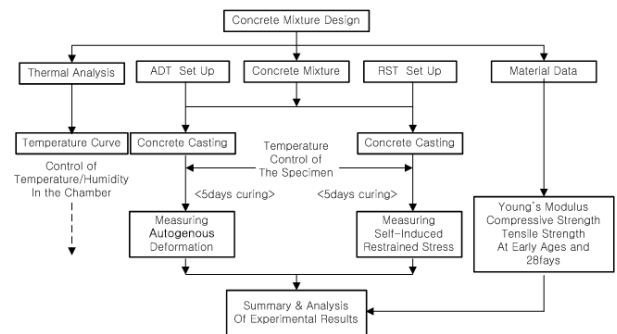


Fig. 8. Test Procedure

의 벽체에서 발생하는 수화열에 의한 온도상승량을 비선형 열응력 해석(비선형 구조해석 프로그램 DIANA 9.6 (TNO, 2014) 사용)을 통하여 구하였고, 시험체의 온도를 실시간 측정하여 해석치와 시험체의 수화반응온도가 동일하도록 자동온도제어장치를 통해서 온도 제어를 실시하였다. 실험수행의 자세한 과정과 결과는 참고문헌 (Byun, 2015)에 수록하였다. 실험의 진행순서는 Fig. 8과 같다.

3.6 실험 결과

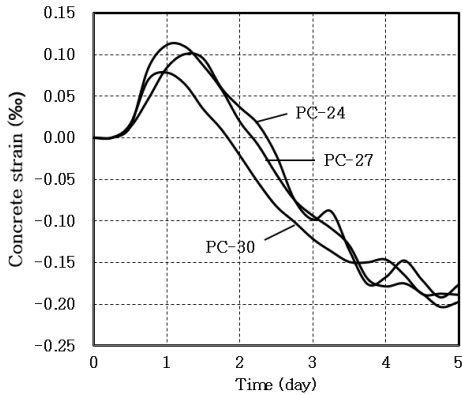
변형을 구속하지 않은 시편의 자가변형율의 배합 별 실험 결과는 Fig. 9에 보였다.

Fig. 9의 자가변형 실험결과에서 알 수 있듯이 자가변형량은 콘크리트 강도의 차이보다는 시멘트의 종류에 따른 영향이 크다. 포틀랜드 시멘트 배합의 경우 타설 후 약 8시간 후부터 팽창변형이 발생하는데 반해 슬래그 시멘트 배합의 경우 약 16시간부터 팽창변형이 시작되며 그 크기는 0.02% 정도로 아주 작다. 또한 포틀랜드 시멘트 배합은 약 2일 정도 팽창변형이 지속되는데 반하여 슬래그 시멘트 배합은 약 12시간 정도 팽창이 지속된 후 수축변형이 발생한다.

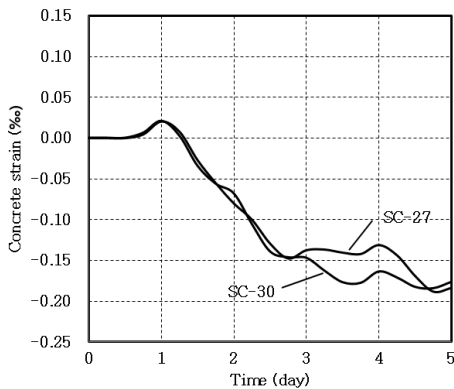
다. 이는 팽창을 일으키는 초기수화물(예를 들어 *ettringite* 등)의 형성량이 슬래그 시멘트가 포틀랜드 시멘트에 비해 적기 때문으로, 초기 수화물은 수축량의 크기에는 영향을 미치지 않으나 팽창상태의 지속시간을 결정한다. 수축변형은 타설 후 약 5일 경과 시 0.15~0.20%으로서 시멘트 종류와 콘크리트의 강도의 영향은 크지 않다.

외부구속에 의한 자가유발구속응력 측정결과는 Fig. 10과 같다.

시험체의 자가변형에 의해 유발된 응력은 Fig. 10과 같이 팽창상태와 수축상태 모두 비슷한 경로곡선을 보인다. 자가유발구속응력은 압축과 인장 모두 포틀랜드 시멘트 배합이 슬래그 시멘트 배합보다 약간 큰 값을 보인다. 슬래그 시멘트 배합의 경우 타설 후 약 1일 이내에 압축에서 인장으로 전환되지만 포틀랜드 시멘트의 경우에는 약 2일의 양생기간 동안 압축응력 상태가 지속된다. 그러나 압축응력의 크기는 0.4MPa 이하로 매우 작다. 인장응력 발생은 포틀랜드 시멘트 배합에서 빠른 속도의 증가를 보이며 강도가 큰 배합일수록 인장응력의 값은 크다. 부재 PC-30은 타설 후 약 2.2일 경과 시 인장응력이 약 1.2MPa에 이르러 균열이 발생한다.

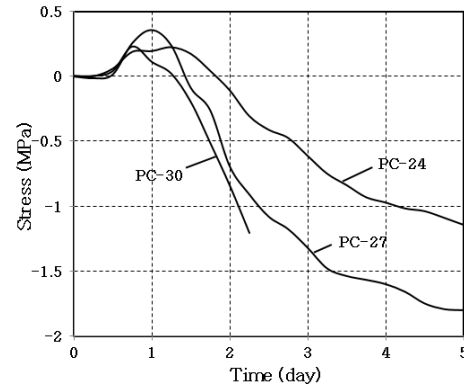


(a)

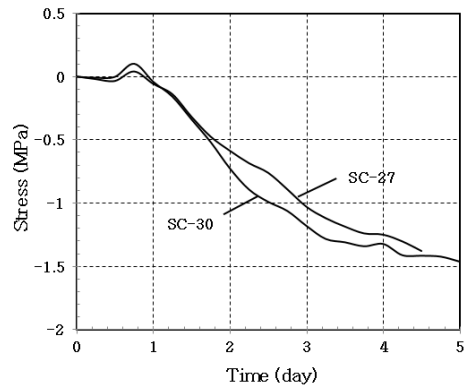


(b)

Fig. 9. Autogenous Deformation (a) Portland Cement, (b) Slag Cement



(a)



(b)

Fig. 10. Self-induced Restrained Stress (a) Portland Cement, (b) Slag Cement

이는 자가수축에 의한 인장응력의 발생이 콘크리트 인장강도의 발현속도 보다 빠른 것을 뜻한다. 이에 반해 PC-24, PC-27, SC-27 및 SC-30의 경우 최대 발생 인장응력이 1.2~1.8MPa이나 양생기간 5일 이내에 콘크리트의 인장강도를 초과하지 않아 균열이 발생하지 않았다.

4. 구속응력의 계산 및 실험결과와의 비교

4.1 구속응력의 계산

온도변화에 따른 콘크리트 부재의 탄성변형량은 다음 Eq. (1)로 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{cT} = \Delta T_m \cdot \alpha_{cT} \quad (1)$$

여기서, ΔT_m 은 부재의 평균 온도 변화량, α_{cT} 는 콘크리트의 열팽창계수를 나타낸다.

콘크리트 부재의 온도에 의한 변형량 차이는 구속응력을 유발시키며 구속의 형태는 내부구속과 외부구속으로 구분할 수 있는데, 본 연구논문에서는 벽체와 같은 구조물에서 관통균열 등의 심각한 손상을 유발시키는 외부구속을 주 고려 대상으로 한다. 자가변형의 구속에 의해 부재에 발생하는 응력의 크기는 자가변형의 크기(ε_{cT}), 구조물의 구속의 정도(R_a) 그리고 콘크리트의 탄성계수값(E_c)에 의해 다음 Eq. (2)로 구할 수 있다.

$$\sigma_R = R_a \cdot \Delta T_m \cdot \alpha_{cT} \cdot \Psi \cdot E_c \quad (2)$$

여기서, Ψ 는 크리프-릴렉세이션 계수이며, 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트의 팽창(압축응력)시와 수축(인장응력)시에 각각 압축탄성계수와 인장탄성계수를 따로 적용하여야 하지만, 초기 콘크리트의 경우 그 값의 차이가 크지 않아서(Gutsch, 1999) 본 연구에서는 압축탄성계수를 사용하여 응력 변화량을 계산한다. 벽체구조물에서의 구속은 높이방향의 구속($R_{a,H}$)과 길이방향의 구속($R_{a,L}$)으로 구분되고 벽체구조물의 제원과 부재의 강성에 따라 Figs. 11 and 12로부터 구할 수 있다(Schleeh, 1962).

또한, 벽체 구조물의 특정위치에서의 구속도(R_a)는 높이방향의 구속도($R_{a,H}$)와 길이방향의 구속도($R_{a,L}$)의 곱으로 다음의 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다(Staffa, 1993).

$$\sigma_R = R_{a,H} \times R_{a,L} \quad (3)$$

콘크리트 재료는 경화반응이 완료되기 전까지 시간의 경과에 따라 재료의 성질이 지속적으로 변화하므로 양생초기의 구속응력

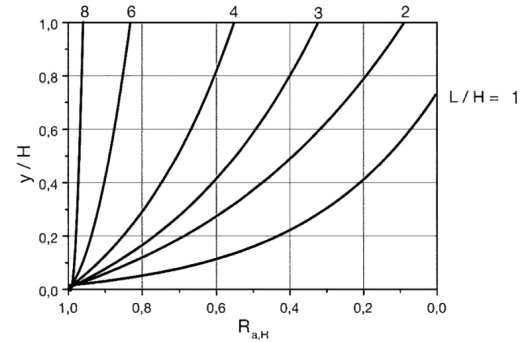


Fig. 11. Restraint Degree over the Wall Height

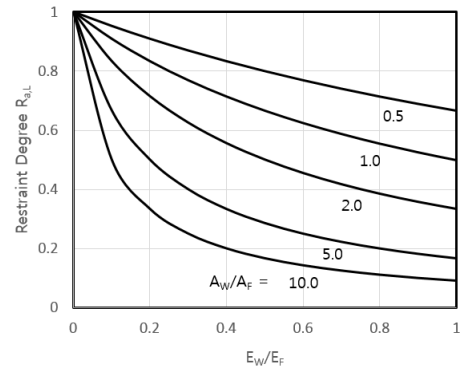


Fig. 12. Restraint Degree of the Wall at the Joint between Wall and Foundation

은 다음의 Eq. (4)과 같이 시간단계별로 산정할 수 있다(Röhling, 2005).

$$\begin{aligned} \sigma_{Rc}(t_{max}) &= \alpha_T \cdot (T_{max} - T_0) \cdot E_c(t_{max}) \cdot \Psi(t_{max}) \cdot R_u(t_{max}) \\ \sigma_{Rt}(t_1) &= \sigma_{Rc}(t_{max}) + \alpha_T \cdot (T_{max} - T_1) \cdot E_c(t_1) \cdot \Psi(t_1) \cdot R_u(t_1) \\ \sigma_{Rt}(t_2) &= \sigma_{Rt}(t_1) + \alpha_T \cdot (T_1 - T_2) \cdot E_c(t_2) \cdot \Psi(t_2) \cdot R_u(t_2) \\ &\vdots \\ \sigma_{Rt}(t_n) &= \sigma_{Rt}(t_{n-1}) + \alpha_T \cdot (T_{n-1} - T_n) \cdot E_c(t_n) \cdot \Psi(t_n) \cdot R_u(t_n) \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 계산 구속응력과 실험결과와의 비교

본 논문의 연구대상구조물인 벽체구조물에 대해 비선형 수화열 해석을 실시하고 해석결과와 각 시간단계별 발현온도를 Eq. (4)에 적용하여 벽체에 발생하는 구속응력을 산정하였다. 수화발열량이 상대적으로 큰 포트랜드 시멘트 시편에 대하여 실험치와 계산치를 비교한 그림을 Fig. 13에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트의 강도가 클수록 계산에 의한 구속응력이 저평가 되어 있다. 이로써 콘크리트 재료의 점 소성에 의한 초기 응력발현의 지연과 구속의

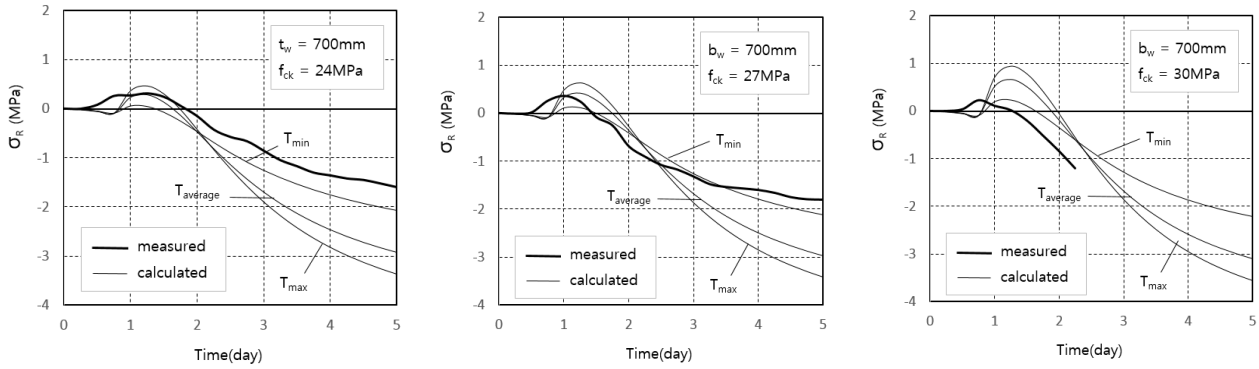


Fig. 13. Comparison of the Restrained Stress between the Measured and Calculated Results

정도에 의한 차이를 고려한 구속응력의 계산이 정도가 높지 않음을 알 수 있다. 즉 4.1절과 같이 재료의 물성을 각각 탄성계수, 크리프-렐렉세이션에 대해서 따로 구하여 적용한 계산은 콘크리트의 경화 작용 시 재료 물성의 변화와 구조물의 구속도가 복합적으로 작용하므로 잘 맞지 않는 것을 보인다. 따라서 본 논문에서 제안하는 바와 같이 자가변형을 직접 측정하고, 구속응력을 유발하는 실험으로 양생초기 콘크리트의 자가변형 구속에 의한 응력과 균열가능성을 보다 정확하게 평가할 수 있을 것으로 생각한다. 즉 본 연구에서 제안한 실험적 평가로 크리프, 렐렉세이션, 초기탄성계수, 초기인장강도와 같이 계측이 어려운 재료물성을 따로 구하지 않고도 균열가능성을 높은 정도로 예측할 수 있다.

5. 실험결과와 적용

5.1 온도균열지수에 의한 균열여부 평가

콘크리트표준시방서(MLTMA, 2009)에 의하면 온도에 의한 균열발생 가능성을 온도균열지수에 의해 평가하도록 규정하고 있으며 온도균열지수는 다음의 Eq. (5)로 산정할 수 있다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (5)$$

여기서, $f_{sp}(t)$ 는 재령 t 일에서의 콘크리트의 인장강도이며, $f_t(t)$ 는 수화열에 의한 최대발생응력이다. 일반적인 철근콘크리트 구조물에 대해 구조물의 중요도, 기능과 환경적인 조건 등을 고려하여 온도균열지수를 고려하도록 다음과 같이 규정하고 있다.

- (1) 균열의 발생을 방지할 경우 : 1.5 이상
- (2) 균열의 발생을 제한한 경우 : 1.2~1.5
- (3) 유해한 균열의 발생을 제한한 경우 : 0.7~1.2

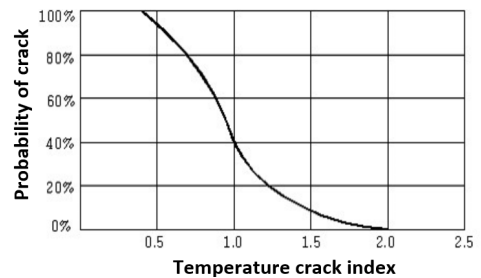


Fig. 14. Probability of Crack Occurrence as Function of Temperature Crack Index

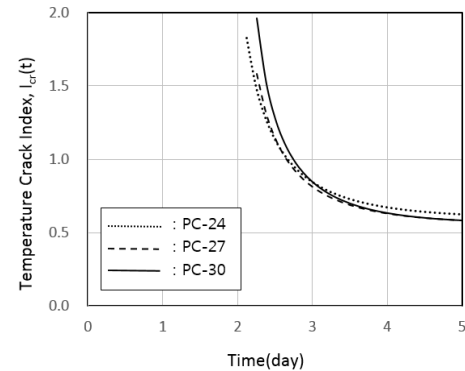


Fig. 15. Temperature Crack Index for the Wall Structure as Function of Curing Time (day)

본 논문의 시험체에 대해 온도균열지수를 평가하기 위하여 4.1절에서 구한 벽체구조물의 구속응력으로 온도균열지수를 산정하여 Fig. 15에 나타내었다.

그림에서 보는바와 같이 콘크리트 타설후 약 3일 정도까지 온도균열지수는 1.0 이상, 이후 양생 5일까지 1.0 이하의 값을 나타내며, Fig. 14에 의하면 균열의 가능성은 콘크리트의 강도차이에 상관없이 모든 경우에서 40% 이상이다. 그러나 실험에서 PC-24 및 PC-27시편에서는 균열이 발생하지 않았으며 PC-30 시편에서는

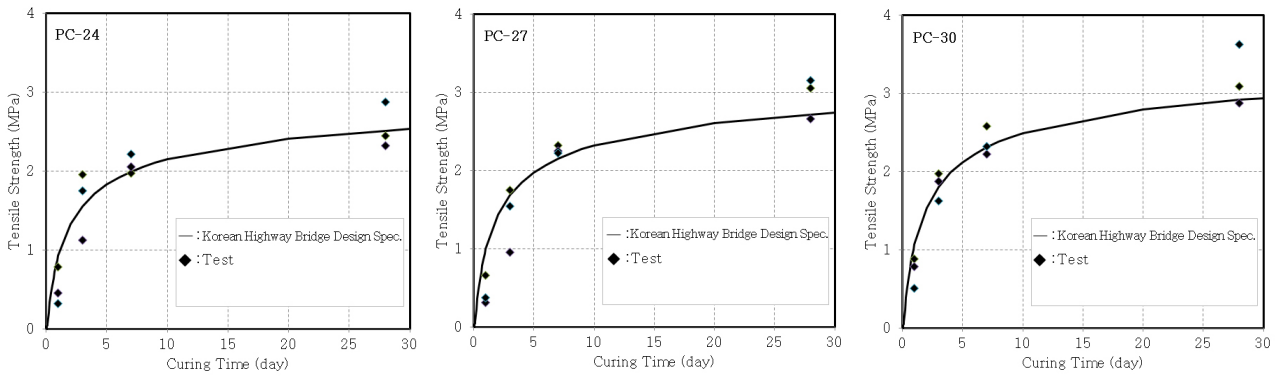


Fig. 16. Split Tensile Strength Test Results according to the Curing Time (day)

균열이 발생하였다. Fig. 16은 각 배합의 할열인장시험 결과를 보인 것이다. 초기 인장강도는 설계기준값과 차이가 있으며 상대적인 분산이 크다.

5.2 실험결과와 적용

5.1절에서 계산한 바와 같이 현재의 설계기준은 균열가능성을 예측하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 이는 설계기준이 비교적 단순한 재료성질 및 기하조건과 균열 여부를 변수로 하는 외국의 사례로부터 확률분포를 계산하였기 때문인 것으로 생각된다. 같은 설계기준 강도를 갖더라도 배합이 다른 경우에는 초기 강도 발현과 수화열 반응이 다르므로 각 시점에서의 재료변수가 큰 영향을 미친다. 특히 우리 시멘트 품질과 이에 따른 배합의 차이, 특히 단위시멘트양이 다르므로 외국 자료를 우리 실정에 그대로 적용하는 것은 어렵다.

본 실험은 이런 문제를 극복하고 벽체-기초 구조의 외부구속 부재의 초기 균열 가능성을 예측하기 위하여 고안된 것이다. 본 연구와 유사한 시험체의 제작과 구속응력실험은 기존의 연구에서 시도된 바 있다(Schöppel et al., 1994; Springenschmidt et al., 1994; Lura, 2003). 본 연구에서는 이에 더하여 온도해석과 결합하여 그 결과를 모사하여 실험하고 이를 실무에 적용하는 방법을 제안한 것이다. 본 실험을 포함하여 균열 가능성을 예측하고 이에 따른 조치를 취하는 과정을 Fig. 17에 보였다. 4.1절에서 해석을 수행한 기초벽체 구조의 경우 주어진 조건(Table 2)에서 PC-30의 배합은 균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 판명되었다. 이 경우 Fig. 17에서 보인 바와 같이 타설방법을 바꾸거나 배합을 달리하여 문제를 해결할 수 있다. 즉 4.1절의 구속도는 벽체 콘크리트의 타설 길이를 30m로 하여 시공하는 경우에 대한 것으로 이를 짧게 하여 시공하거나(이 경우 시공 이음이 증가하므로 시공, 특히 방수 조치의 어려움이 있다), 타설 높이를 줄여서(적용 예의 타설 높이는 2.3m인데 타설 높이를 1.15m로 하여 두 번에 나누어 타설할 수

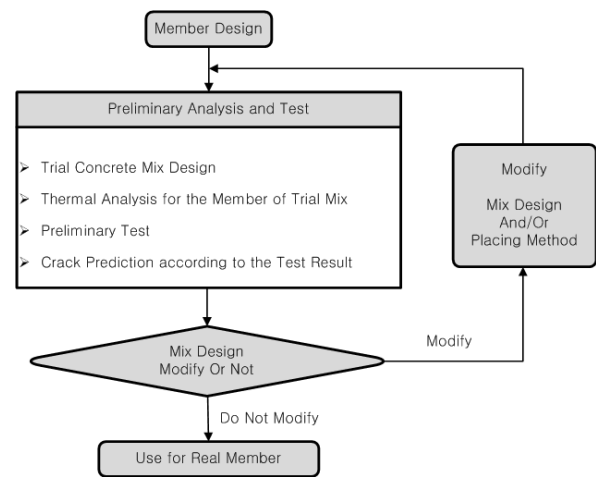


Fig. 17. Procedure to Confirm Mix Design including Preliminary Analysis and Test

있다) 수화열을 낮추는 타설 방법의 변경이 가능하다. 혹은 본 연구에서와 같이 서로 다른 배합설계를 시험하여 균열 가능성이 낮은 배합을 선택할 수 있다. 본 예제에서는 3.1절의 SC-30의 배합이 이런 조건을 만족할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 방법은 실제 부재의 타설 이전에 예비실험을 수행하는 것인데, 새로운 과정의 추가에 따른 공사지연과 비용 추가 등의 부담이 있을 수 있다. 그러나 예비실험은 3일 이내에 실험을 수행하고 결과를 판정할 수 있으므로 부재 타설 이전의 소요시간이 공사지연의 원인이 될 가능성은 크지 않으며 표준화된 실험과정을 이용하면 실험에 따른 비용도 크지 않을 것으로 예상된다. 또한 실험결과가 축적되면 우리나라 콘크리트에 대한 신뢰성 높은 자료가 만들어지므로 이전보다 높은 확률로 균열 가능성을 예측할 수 있어서 통상적인 크기와 형태의 부재에 대해서는 실험을 생략할 수도 있을 것으로 생각한다.

6. 결론

본 연구에서는 콘크리트 타설 초기에 소성수축 및 건조수축, 수화반응열에 의한 팽창 및 수축 등으로 발생하는 콘크리트의 자가변형 거동과 외부구속에 의한 자체유발구속응력을 실험을 통하여 측정하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 자가변형의 측정과 구속응력의 모사로 초기균열여부를 직접 관찰할 수 있었다. 대표적인 배합의 시편 중에서 단위 시멘트양이 많은 시편에서는 초기재령 2~3일 정도에서 구속변형에 의해 발생한 응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하여 균열이 발생하였다.
- (2) 본 실험에서 비교한 시편들은 콘크리트 표준시방서에 따라 계산한 균열지수는 큰 차이가 없으나 실험에서는 균열 발생 여부가 나뉘어서 시방서 방법의 예측 정도가 높지 않은 것으로 나타났다.
- (3) 같은 배합에서 슬래그시멘트를 혼입하여 수화열을 저감한 시편은 균열이 발생하지 않았다. 이를 통하여 배합설계의 대안을 비교하여 균열가능성이 낮은 배합을 선택하는 것이 가능함을 보였다.

본 연구는 벽체-기초 구조에서 외부구속 부재의 초기 균열 가능성을 예측하기 위하여 고안된 것이다. 본 실험을 실제 부재의 타설 이전에 예비실험으로 수행하여 균열 가능성을 예측하고 이에 따른 조치를 취하면 초기 균열을 예방하여 사용성과 내구성을 높일 수 있을 것이다. 또한 레미콘 업계에서 사용하는 표준적인 배합에 대하여 실험 결과를 축적하면 향후에는 표준적인 벽체-기초 구조에 대해서는 실험 없이도 높은 확률로 균열가능성을 평가할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 수행된 산학협력선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- Byun, J. K. (2015). "Restrained stress and cracking behaviour in early age concrete-Test and engineering approach." Ph.D. Dissertation, Dong-A University.
- Gutsch, A.W. (1999). "Stoffeigenschaften jungen betons - Versuche und modellle." *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Heft 495, Beuth Verlag (in German).
- Korea Road and Transportation Association (2012). "Korean highway bridge design code (Limit States Design Method)." (in Korean).
- Lura, P. (2003). "Autogenous deformation and internal curing of concrete." *Delft University Press*, pp. 80-82.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). *Standard Specification for Concrete* (in Korean).
- Röhling, S. (2005). "Zwangsspannungen infolge hydratationswärme." *Verlag+Technik GmbH, Düsseldorf*, pp. 5-10 and pp. 188-190 (in German).
- Rostásy, F. S. (2001). "Frühe risse in massigen betonbauteilen ingenieurmodelle für die planung von gegenmaßnahmen." *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Heft 520, Beuth Verlag (in German).
- Schleeh, W. (1962). "Die zwängspannungen in einseitig festgehaltenen wandscheiben." *Beton- und Stahlbetonbau* 57 H.3, 1962, pp. 64-72 (in German).
- Schöppel, K., Planer, M. and Springenschmidt, R. (1994). "Determination of restraint stresses and of material properties during hydration of concrete with the temperature stress testing machine." *Proceeding of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, pp. 153-160.
- Springenschmidt, R., Breitenbücher, R. and Mangold, M. (1994). "Development of the cracking frame and the temperature stress testing machine." *Proceeding of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, pp. 137-144.
- Staffa, M. (1993). "Vermeidung von hydratationsrissen in stahlbetonwänden." *Dissertation, Technische Universität Berlin* (in German).
- TNO (2014). *DIANA user's manual*, TNO DIANA Bv.