

매스콘크리트 구조물의 균열 및 온도응력 측정을 위한 실험장치의 개발 및 응용

Use of Cracking Frame and Temperature-Stress Testing Machine
for Cracking and Stress Measurements of Mass Concrete Structures



오병환*



전세진**

1. 서론

최근들어 국가기반시설 확충의 일환으로 초대형 매스콘크리트 구조물의 건설이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 그러나 매스콘크리트 시공시 수화열로 인해 발생하는 균열이 자주 보고되고 있으며 이처럼 시공 초기에 발생하는 균열은 구조물의 내력, 수밀성 및 미관 뿐만 아니라 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래할 수 있으므로 설계, 시공 및 유지관리 단계에서 면밀한 검토를 하여야 한다.

매스콘크리트의 수화열과 온도응력에 대한 검토를 위하여 기존 시방서상의 간략식을 사용하거나 전산구조해석을 수행하는 경우가 많다.

시방서상의 간략식을 사용할 경우 비교적 간편하게 수화열에 의한 거동을 추정해 볼 수 있다는

장점이 있으나 많은 단순화된 가정이 포함되어 있으므로 실제의 현장시공조건과는 다른 경우가 많다. 따라서 참고자료 정도로 활용하는 것이 바람직하다. 한편 전산구조해석에 기초한 유한요소법의 눈부신 발전으로 인하여 수화열에 의한 온도 및 응력 거동을 상당부분 정확히 예측할 수 있는 단계에 이르렀다. 이러한 해석적인 방법은 해석조건을 임의로 쉽게 변경하여 다양한 조건에 대하여 해석할 수 있기 때문에 매우 효율적인 수단으로 볼 수 있다. 그러나 전산구조해석은 그 자체의 한계점을 가지고 있다. 즉, 구조해석 프로그램은 해석자가 입력하는 입력자료에 철저하게 그대로 의존하여 해석결과를 보이기 때문에 재료성질 및 시공조건 등을 실제에 가깝게 입력하지 않았을 경우 실제거동과 차이를 보이는 결과를 주게 된다. 그러나 수화열 및 온도응력해석과 관계

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

된 제반 재료성질 및 시공조건을 정확하게 입력한다는 것은 실질적으로 불가능하며 많은 부분을 기존 연구자들에 의하여 제안된 이상화된 수학적 모델이나 물성치에 의존하는 경우가 많다. 따라서 전산구조해석 자체에만 의존하기보다는 기존의 비슷한 구조물의 시공실적을 참조한다거나 또는 온도 및 응력의 계측을 통하여 보완하는 것이 바람직하다.

온도 및 응력의 계측은 실제 시공중에 있는 매스콘크리트 구조물에 대하여 실시할 수도 있겠으나 시공전에 모의시험체를 제작하여 실시하는 것이 비용과 시행착오를 줄일 수 있는 장점이 있다. 물론 가장 바람직한 모의시험체는 실구조물과 같은 조건을 가진 것이지만 현실적으로 어려운 경우가 많다.

따라서 본 기사에서는 실내에서 실제구조물의 시공전에 해당 콘크리트의 온도응력특성을 규명하고 균열발생특성을 규명하기 위하여 실험적으로 균열발생과정을 측정할 수 있는 실험장치를 설명하고 온도응력 측정장치의 구성 및 측정원리에 대하여 연구내용을 토의하고자 한다. 이러한 균열 및 온도응력 측정장치는 매스콘크리트 구조물의 수화열 영향을 평가할 수 있는 좋은 방안이 되고 있음을 본 소고에서 설명하고자 한다.

2. 균열발생실험장치(Cracking Frame)

2.1 개요

수화열과 관련된 대표적인 시험으로 단열온도 상승시험을 들 수 있으며 이 때 사용하는 것이

단열온도상승시험기(Calorimeter ; RILEM TC-119-TCE1 참조)이다. 여기에서 얻어진 단열온도상승곡선은 매스콘크리트 배합의 특성을 결정짓는 중요한 정보가 되며 실제의 물성을 해석시 사용하려는 노력의 일환으로 전산구조해석의 입력자료로 활용되기도 한다. 그러나 궁극적으로 볼 때 균열발생여부를 결정짓는 것은 온도응력이므로 단열온도상승시험은 상대비교 내지 기본되는 정보로서의 의미만을 갖는다고 볼 수 있다.

한편 온도응력측정과 관련하여 이미 현장에서 많이 활용하고 있는 것이 유효응력계(Stress meter ; RILEM TC-119-TCE2 참조)이다. 그러나 유효응력계는 매립형이며 고가이므로 예비적인 실내시험보다는 실제의 매스콘크리트 시공시 유용한 정보를 얻기 위하여 주로 활용되어져 왔다.

실내시험용 온도응력 측정장치는 일회용인 매립형보다는 시험장치 내부에 들어가는 콘크리트 시편을 바꾸어가면서 여러 가지 배합에 대하여 반복적으로 측정할 수 있도록 하는 것이 경제적인 측면과 실험의 일관적인 상호비교 측면에서 바람직하다.

본 기사에서는 이러한 목적에 매우 적합하다고 사료되는 콘크리트 균열발생실험장치(Cracking Frame) 및 이의 개선된 형태인 온도응력측정장치(TSTM ; Temperature-Stress Testing Machine)에 대하여 서술하고자 한다. 균열발생실험장치에 대해서는 RILEM(The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures)의 Technical

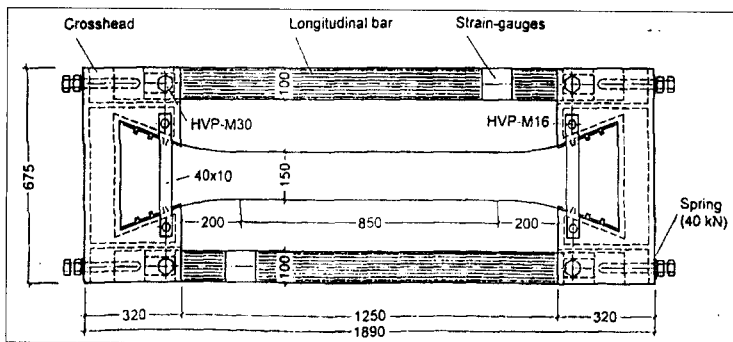


Fig. 1 Cracking Frame

Committee인 "RILEM TC 119-TCE : Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages"에도 서술되어 있다.

2.2 균열발생실험장치의 구성

Cracking Frame(Fig. 1 참조)은 현장계측용보다는 실내실험용으로 균열발생경향 및 온도응력을 파악하기 위하여 사용된다.

Cracking Frame은 두 개의 cross-head와 두 개의 종방향 철봉(steel bar)을 가진 프레임으로 이루어지며 이러한 조건하에서 콘크리트 시편은 일축거동을 보인다. 철봉은 열에 의한 변형이 최소화되어야 시편의 길이가 일정하게 유지되므로 구속에 의한 시편의 온도응력을 정확히 측정할 수 있다. 따라서 약 36%의 니켈을 함유한 철을 사용하여 열팽창계수를 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (일반 철근의 1/10 이하) 정도로 매우 작게 만들어야 한다.

시편의 변형을 구속하는 과정에서 철봉과 cross-head사이에 변위가 발생하지 않도록 철봉과 cross-head에는 나사와 스프링을 사용하여 적절하게 기압축력(prestrressing force)을 가했으며 그 크기는 적어도 40kN이상이어야 한다.

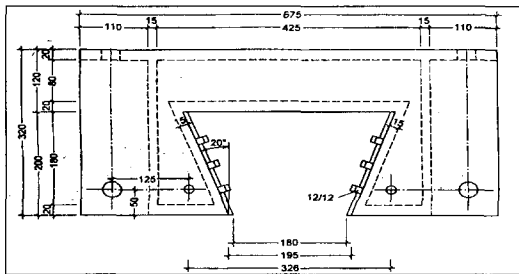


Fig. 2 Cross-head : Detail plan

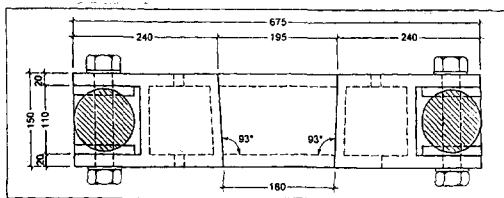


Fig. 3 Cross-head : Cross-section

한편 cross-head는 일반적인 철로 만들어지며 인장응력이 발현될 때 시편을 고정할 수 있도록 끝부분이 확장되는 모양을 가진다.(Fig. 2) 또한 시편을 제거하기 편리하도록 위쪽으로 약간 경사져 있다.(Fig. 3)

거푸집은 Fig. 4와 같이 소정의 두께를 가진 폴리스티렌과 나무로 이루어져서 어느정도의 단열효과를 거둘 수 있다. 또한 거푸집에는 인공적으로 가열 또는 냉각할 수 있도록 6mm직경의 구리 파이프가 매설되어 있으며 필요시 소정의 온도를 가진 물이 파이프를 통과한다.

0.2mm두께의 구리판은 가열 또는 냉각효과를 극대화하기 위한 것이며 구리 파이프와 맞닿아 있다. 또한 0.3mm의 폴리에틸렌판은 필요시 시편의 건조수축을 최소화하기 위해 설치되었다.

시편의 길이는 1.65m이나 cross-head부분의 응력집중을 막기 위하여 cross-head로부터 일정 구간은 포물선형으로 시편의 크기가 변하므로 실제 단면적이 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 으로 일정한 구간은 시편 중앙의 0.85m구간이다.

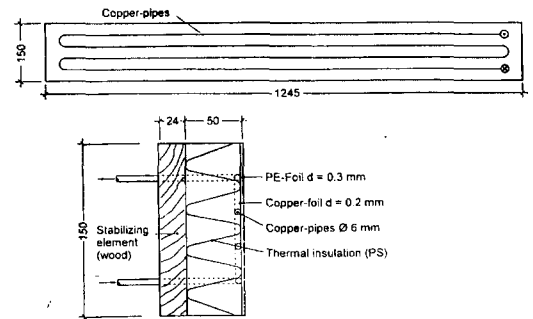


Fig. 4 Formwork

2.3 측정 및 측정결과의 분석

(1) 시편의 제작

콘크리트 타설전에 바닥과 측면의 거푸집이 먼저 설치되어야 한다. 타설후 내부의 진동기를 사용하여 다짐을 실시한다. 다짐후 표면을 마감하고 표면에 폴리에틸렌판을 붙인다. 시편 중앙에 온도계를 설치한 후 거푸집을 덮으면 시편의 제작이 완료된다. 타설시의 온도 및 주변온도는 20°C내외로 유지하여 타설온도와 주변온도의 차이로 인

한 온도응력의 발현은 가능한한 배제시키는 것이 실험의 표준화를 위하여 바람직하다.

일반적인 실험에서는 타설후 약 96시간동안 파이프를 통한 인위적인 온도조절 없이 시편을 둔다. 보통 이 시점에서는 시편의 온도가 외기온도 수준으로 저하된다. 이 때 아직 시편에 균열이 발생하지 않았다면 거푸집내의 파이프에 냉각수를 통하게 하여 1±0.1 K/h 정도의 비율로 온도를 하강시킨다. 시편에 균열이 발생하는 시점은 측정되는 응력이 갑자기 0으로 떨어지는 시점으로 볼 수 있으며 이때 실험을 종료한다.

(2) 온도 및 응력의 측정

Cracking Frame에 타설된 시편이 수화반응을 일으키는 동안 시편중심부의 온도와 축방향 온도응력이 계속적으로 측정된다. 온도는 시편이 타설되고 마감된 후 온도계를 시편에 꽂아넣어 측정할 수 있다. 또한 온도응력의 측정을 위하여 변형도계(스트레인게이지)가 종방향 철봉에 설치된다.(Fig. 1 참조)

변형이 완전히 구속된 상태라면 콘크리트 시편의 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{c, res} = -E_c \epsilon_{c, res} \quad (1)$$

여기에서, $\sigma_{c, res}$: 완전구속시 콘크리트의 온도응력

E_c : 콘크리트의 탄성계수

$\epsilon_{c, res}$: 구속이 없었을 때 발생했을 콘크리트의 변형도

엄밀히 말하여 완전히 구속된 상황이란 없으며 이때에는 다음과 같이 응력을 산정할 수 있다. 여기에서 ϵ_c 는 실제 콘크리트에 발생한 변형도이다.

$$\sigma_c = -E_c(\epsilon_{c, res} - \epsilon_c) \quad (2)$$

Cracking Frame에 의한 실험에 있어 온도응력값은 다음과 같이 철봉에 발생하는 힘과 콘크리트 시편에 발생하는 힘이 크기는 같고 방향은 반대라는 사실에서 구할 수 있다.

$$A_{st} E_{st} \epsilon_{st} = A_c E_c (\epsilon_{c, res} - \epsilon_c) \quad (3)$$

여기에서, A_{st} : 철봉의 단면적

E_{st} : 철봉의 탄성계수

ϵ_{st} : 철봉의 변형도

A_c : 콘크리트 시편의 단면적

그 외의 기호의 정의는 앞과 같다. 이때 $\epsilon_c = \epsilon_{st}$ 라는 사실과 궁극적으로 구하고자 하는 것이 완전한 구속상태에서의 온도응력이라는 사실에 주목하여 식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{온도응력 } \sigma_{c, res} = -\epsilon_{st} \left(E_{st} \frac{A_{st}}{A_c} + E_c \right) \quad (4)$$

윗식에서 E_c 는 시간에 따라 변하는 값이므로 변형도증분에 해당하는 E_c 를 적용하여 응력증분을 구한후 합산하는 방식으로 온도응력을 산정해야 한다.

$\epsilon_c (= \epsilon_{st})$ 가 $\epsilon_{c, res}$ 에 비해 미소할 경우 식 (3)의 우변에서 ϵ_c 를 무시한다면 온도응력은 식 (5)와 같이 산정된다. 이 식은 시간적으로 변하는 E_c 에 의존하지 않고, 측정되는 철봉의 변형도 ϵ_{st} 만으로 응력을 간편하게 계산할 수 있어 Cracking Frame의 응력이력은 주로 식 (5)에 의한다. 반면 완전구속이 아닌데 대한 오차를 보정하지 않았으므로 이렇게 산정한 응력값은 완전구속상태의 응력값과 약간의 차이를 보인다.

$$\text{온도응력 } \sigma_c = -\epsilon_{st} E_{st} \frac{A_{st}}{A_c} \quad (5)$$

Cracking Frame에서 철봉의 단면적은 콘크리트 시편의 단면적과 거의 비슷하게 제작하였으므로, 식 (4) 및 식 (5)에서 $A_{st}/A_c \approx 1$ 로 볼 수 있다.

(3) 실험결과와 분석

Fig. 5는 Cracking Frame을 사용한 전형적인 실험결과를 보여주고 있다. 실험결과 분석시 다음과 같은 사항들을 검토해 보아야 한다.

- 콘크리트의 타설온도
- 응력이 발현되기 시작하는 온도($T_{z,1}$)
- $T_{z,1}$ 이 발생하는 재령
- 최대 압축응력($\sigma_{c,max}$)
- 최대 압축응력이 발생하는 재령
- 최대 온도(T_{max})
- 최대 온도가 발생하는 재령
- 압축응력이 인장응력으로 전환되면서 응력이 0이 되는 온도($T_{z,2}$)
- $T_{z,2}$ 가 발생하는 재령
- 96시간 후의 온도
- 96시간 후의 응력
- 균열이 발생할 때의 인장응력(=인장강도)
- 균열이 발생할 때의 온도(T_c)
- 균열이 발생하는 재령

각 항목에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

- ① $T_{z,1}$: 타설후 탄성계수가 증가하면서 구속 조건하에서 최초로 압축응력이 발현되는 시점이다. 콘크리트가 소성상태에서 점탄성상태로 전환됨을 의미한다.
- ② $\sigma_{c,max}$: 높은 압축응력하에서는 릴락세이션(크리이프) 또한 크기 때문에 일반적으로 $\sigma_{c,max}$ 는 T_{max} 가 발생하기 이전에 발생한다.
- ③ T_{max} : 최대온도를 의미하지만 Cracking Frame의 거푸집 구성상 완전단열이 아닌 반단열조건(semi-adiabatic condition) 하에서의 최대온도이다.
- ④ $T_{z,2}$: 압축응력이 인장응력으로 전환되면서 응력이 0이 되는 온도 즉, 인장응력이 발현되기 시작하는 온도이다. 릴락세이션 현상과 탄성계수의 발현을 고려할 때 $T_{z,2}$ 는 일반적으로 $T_{z,1}$ 보다 매우 크며 T_{max} 보다 조금 낮은 정도이다.
- ⑤ T_c : 인장응력이 인장강도를 초과하여 균열이 발생하는 온도이며 배합의 균열에 대한 경향을 알려주는 지표가 된다. T_c 가 높을수록 균열이 발생하려는 경향도 크다고 볼 수 있다.

이러한 분석을 통하여 여러 가지 배합에 대한

온도 및 응력의 경향 그리고 균열발생경향을 상호비교할 수 있으며 현장시공에 앞서 배합을 선정하는데 있어 유용한 자료로 활용될 수 있다. 또한 수화열관련 영향인자분석에도 유용하다.

그러나 표준화된 환경하에서의 실험을 통한 상호비교의 의미가 크며 실제의 매스콘크리트 시공시의 온도 및 응력값을 예측하는데 직접적으로 본 실내실험의 결과값을 사용할 수 있는 것은 아니다. 부재의 단면크기 및 구속조건, 타설온도, 외기온도, 경계조건 등의 시공조건들이 모두 다르기 때문이다. 즉, 실내실험의 결과를 어떤 식으로 현장시공시 활용하고 적용할 것인가는 또다른 문제이며 차후의 연구가 필요한 분야이기도 하다.

(4) 인위적인 온도조절 시험

위에서 언급한 방법은 시편의 수화열이 발현된 후 외기온도로 하강될 때 까지는 인위적으로 온도를 조절하지 않았다. 그러나 특별한 경우에는 실제의 매스콘크리트가 실험시편보다 단면이 크므로 인하여 온도가 더 높게 상승하는 효과를 모사하기 위하여 처음부터 인위적으로 온도를 조절할 수도 있다. 이때에는 예비적으로 단열온도상승 시험을 실시하여 그 결과값을 분석한 후 파이프의 물의 온도를 시간에 따라 어떤 식으로 조절할 것인지 결정하도록 한다.

3. 온도응력측정장치(TSTM)

Cracking Frame의 기능을 좀 더 보완하고 개선한 형태로서 온도응력측정장치(TSTM; Tem-

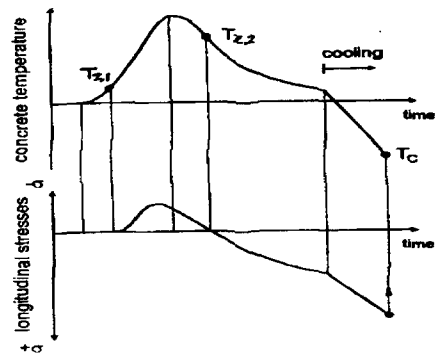


Fig. 5 Typical measurement using Cracking Frame

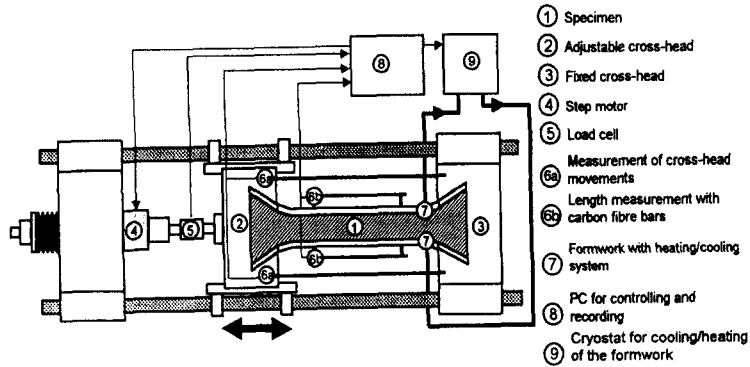


Fig. 6 Temperature-Stress Testing Machine(TSTM)

Table 1 Material properties, stresses and strains which can be determined by TSTM depending on the test conditions

temperature condition during hardening	restraining conditions	
	0%	0~100%
semi-adiabatic : simulation of structural members with different thickness	<ul style="list-style-type: none"> thermal and non-thermal unrestrained deformations 	<ul style="list-style-type: none"> thermal and non-thermal restrained stresses development of Young's modulus tensile strength and failure strain
constant temperature (isothermal)	<ul style="list-style-type: none"> non-thermal unrestrained deformations 	<ul style="list-style-type: none"> non-thermal restrained stresses relaxation of tensile/compressive stresses development of Young's modulus tensile strength and failure strain

perature-Stress Testing Machine)가 있다. 이는 Cracking Frame의 한쪽 cross-head의 움직임을 제어할 수 있도록 만들고 또한 로드셀(load cell)을 부착하여 균열의 양상 뿐 아니라 온도응력도 비교적 정확하게 측정할 수 있도록 한 것이다.(Fig. 6)

신축가능한 cross-head의 변위를 0.001mm 까지 감지한후 모터를 가동시켜 다시 원래의 위치대로 cross-head를 이동시키는 과정에서 로드셀에 의하여 응력이 측정된다. 이러한 과정을 통하여 Cracking Frame에서 철봉에 의하여 완전 구속을 실현하지 못하여 미소한 오차가 발생하는 단점을 보완하여 이상적인 완전구속상태를 구현한 것이다. 그러나 구속도는 실험의 목적에 따라 0~100%까지 조절가능하다. 또한 Cracking Frame과 마찬가지로 거푸집 안의 파이프를 통하여 인위적인 온도조절이 가능하다.

같은 배합에 대하여 Cracking Frame과

TSTM으로 균열이 발생하는 온도 T_c 를 측정하면 일반적으로 TSTM에서 높게 나타나며 이는 구속도의 차이에 의한 것이다. 시험의 표준화를 위해서는 비록 cross-head의 움직임을 콘트롤하는 장비의 가격이 추가되어 제작비가 늘어나지만 완전구속상태를 구현할 수 있는 온도응력측정장치(TSTM)를 사용하는 것이 좀 더 바람직하다고 볼 수 있다.

Table 1에는 TSTM에서 온도 및 구속도를 조절하여 수행가능한 실험항목을 보여주고 있다. 온도응력외에도 릴랙세이션, 탄성계수 등의 재료물성 및 건조수축응력과 같이 온도에 관련되지 않은 응력 등도 측정가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 소고에서는 매스콘크리트 구조물의 균열발생과 온도응력을 실내에서 측정하여 그 특성을

평가할 수 있는 시험장치인 Cracking Frame 및 TSTM(Temperature-Stress Testing Machine)에 대하여 그 개념과 장치 및 측정방법 등을 기술하였다.

이러한 측정기기들을 구성하는 각 요소의 재료 물성(탄성계수, 열팽창특성 등) 및 단면치수 등은 측정되는 콘크리트 시편과의 상대적인 값들과 적절한 조화를 이루고 있어야 하며 온도응력을 정확히 측정할 수 있는 측정기기의 최적의 단면 및 물성은 수많은 검증실험을 통해서 이루어진다.

본 소고에서 기술한 실내실험용 온도응력측정 기기들은 매스콘크리트 구조물의 현장시공에 앞서 적절한 배합을 결정하고 합리적인 타설계획을 세우는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. RILEM TC 119-TCE : Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages
2. R. Springenschmid, R. Breitenbucher, M. Mangold, "Development of the Cracking Frame and the Temperature-Stress Testing Machine". Proceeding of the International Symposium "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages". 1994
3. G. Thielen, W. Hintzen, "Investigation of Concrete Behaviour under Restraint with a Temperature-Stress Test Machine". Proceeding of the International Symposium "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages". 1994
4. K. Schoppel, M. Plannerer, R. Springenschmid, "Determination of Restraint Stresses and of Material Properties during Hydration of Concrete with the Temperature-Stress Testing Machine". Proceeding of the International Symposium "Thermal Cracking in Concrete at Early Ages". 1994
5. 오병환, 전세진, "구조실험동 반력벽 및 반력상의 수화열제어 및 합리적인 시공기법 연구", 서울대학교, 1998
6. 오병환, 전세진, "매스 콘크리트 구조물의 연속분할 타설시 타설블록의 크기 및 타설순서를 고려한 합리적인 수화열 해석", 한국콘크리트학회논문집, Vol.11, No.3, 1999, 6
7. 오 병환, 백 신원, 장 봉석, "매스콘크리트 구조물의 온도분포 예측을 위한 실험적 연구", 1993년도 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp.311~314, 1993, 10
8. 오병환, 백신원, 엄주용, 임동환, "현장조건을 고려한 콘크리트 기초 및 교각구조의 온도 및 열응력에 관한 실험적 연구", 1994년도 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제6권 1호, pp.233~237, 1994, 5

해외학술기사번역에 관심이 있거나 의견이 있으신 분은 콘크리트학회
혹은 국제정보위원회(성균관대학교 이광명 교수 Tel: (0331)290-7516
E-mail:leekm@yurim.skku.ac.kr)로 연락하여 주십시오.