

원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법

Method of Test for Restrained Expansion of Expansive Concrete using a Cylindrical Mold



최형길^{1)*}

Choi, Hyeong Gil

1. 개요

콘크리트의 수축에 의한 균열문제를 해결하기 위해, 팽창재나 수축저감제 등의 재료 개발이나 균열억제 효과의 검증이 진행되고 있다. 재료적인 관점으로부터의 수축균열 대책은 크게 석회암 골재의 사용, 팽창재의 사용 및 수축저감제의 사용이 일반적인 대책으로서 인지되고 있지만, 그 중에서도 지리적 조건에 좌우되지 않고, 비교적 염가의 팽창재의 사용량은 근년 점차 증가하는 경향에 있다.

한편, 팽창재를 사용하는데 있어서 역학특성에 영향을 미치는 초기의 팽창량을 파악하는 것은 무엇보다 중요하며, 그 측정에 관해서는 Fig. 1과 같은 측정기를 이용한 JIS A 6202 부속서 2(참고) 「팽창 콘크리트의 구속팽창 및 수축 시험방법」이 규격화되고 있지만, 간편한 방법이라고 할 수 없다. 게다가, 측정 장소에 대해서도 온·습도가 관리된 실험실 등이 필요하기 때문에, 재료개발이나 시험반죽 등의 한정된 평가의 이용에 머무르고 있다. 이러한 배경하에서, 일본의 시미즈건설(주) 기술연구소의 TSUJINO 등은 평가자나 측정장소에 의하지 않고, 폭넓게 성능평가나 품질관리에 이용할 수 있으며, 더욱이 팽창재의 재료개발에도 활용할 수 있는 「원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법」을 개발해, 적용하고 있다. 여기

에서는 그 시험방법의 개요, 변형의 특징이나 활용사례에 대해 기술하고자 한다.

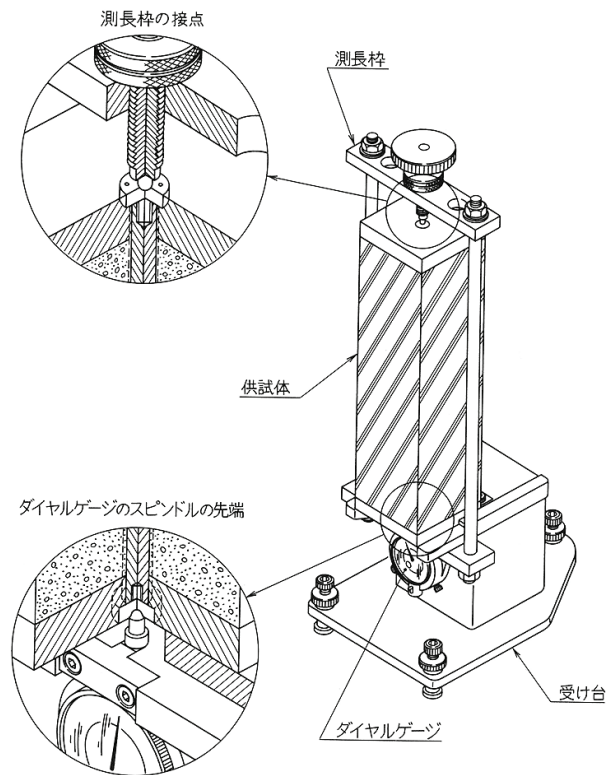


Fig. 1 JIS A 6202 부속서 2의 시험방법의 개요

1) 동경대학교 공학계연구과 건축학전공, 특임연구원, 공학박사

* E-mail : chg810@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp

2. 원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법

2.1 개요

원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법 (이하, 원통거푸집법)에서는, Fig. 2와 같이 콘크리트의 강도시험용으로 이용되고 있는 $\Phi 100 \times 200$ (mm)의 양철제의 원통거푸집과 변위측정기를 이용한다. 원통거푸집의 중앙부에는 변위게이지(게이지장 10 mm, 자기온도 보상형)를 에폭시수지 접착제(상온경화 후 70°C 환경하에서 쿨링)로 붙이고, Fig. 3과 같은 SG(Strain Gauge)몰드의 거푸집에 생기는 변위를 측정하는 것으로 팽창량을 평가한다.

원통거푸집법에서는 봉합양생으로 실험을 실시하기 때문에, 실무재에서도 생기는 자기수축을 포함한 형태로의

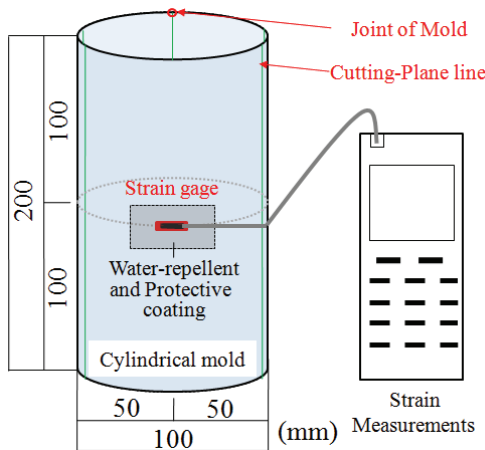


Fig. 2 원통거푸집을 이용한 구속팽창 시험방법의 개요



Fig. 3 SG(Strain Gauge)몰드

팽창량을 측정할 수 있으며, 게다가, 측정후의 콘크리트 공시체는 강도시험에 전용할 수 있는 이점이 있다. 한편, 팽창량의 측정은 전문성이나 숙련도를 필요로 하는 일 없이 간단하고, 용이하게 측정할 수 있으며, 후술 하는 온도변화에 의한 변위의 보정도 가능하기 때문에 생콘크리트 플랜트나 실제의 현장에 있어서의 적용성이나 팽창콘크리트의 성능평가 및 품질관리에 용이할 것으로 생각된다. 이러한, 원통거푸집법은 2012년 8월 28일에 JCI 규준에 「원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법 : JCI-S-009-2012」으로서 채용되어, 적용되고 있다.

2.2 공시체의 제작방법

공시체의 제작방법은 JIS A 1132(콘크리트 강도시험용 공시체를 만드는 방법)에 의하지만, 이하의 점에 주의해야 한다.

- 1) 거푸집내의 콘크리트는 원주방향이나 축선방향을 거푸집의 측판에 의해서 구속되므로 측판과의 부착력을 저감해 일정한 구속상태를 얻을 수 없게 하는 박리제 등은 거푸집의 안쪽에 바르지 않는 것으로 한다.
- 2) 콘크리트의 타설시 고무망치 또는 그와 유사한 기구를 이용하는 경우, 거푸집이 변형하거나 변위 게이지가 손상되지 않도록 수납케이스에 거푸집을 넣은 상태로 다짐한다.
- 3) 각 층의 콘크리트를 타설한 후, 시멘트 나이프 또는 그와 유사한 기구로 거푸집의 측면을 따라서 스페이징 하여, 수납 케이스를 가볍게 쳐서 거푸집의 측면의 공기거품을 없앤다. 이것은 변위 게이지 주위 측면의 공기거품을 없애는 것을 목적으로 하고 있다.
- 4) 콘크리트 타설 후, 표면의 정리가 끝나면, 콘크리트로부터의 수분증발을 막기 위해서 수밀성이 있는 뚜껑 또는 플라스틱 필름에 의해 콘크리트의 표면을 밀폐한다.

2.3 측정방법

공시체의 제작이 완료되고, 콘크리트의 경화가 시작될 때까지(대체로 3시간 이내를 기준) 공시체를 보존장소에 정지해, 제 1회째의 거푸집의 변위를 측정하고 이를 초기치로 한다. 그 후, 소정의 재령(표준으로서 재령 1일, 2일, 7일 및 14일)으로 거푸집의 변위를 측정해, 이를 각 재령

에 있어서의 팽창변위로 한다.

2.4 변형의 계산

각 재령으로의 팽창변위는 식 (1)에 의해서 산출하고, 사사오입에 의해서 유효숫자 3자리수까지 산출한 결과로 한다.

$$\epsilon = \chi_t - \chi_0 \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 팽창변위($\times 10^{-6}$), χ_t 는 각 재령에서의 거푸집의 변위($\times 10^{-6}$), χ_0 는 제 1회째의 거푸집의 변위($\times 10^{-6}$)를 나타낸다.

2.5 원통거푸집에 생기는 변위의 측정 예

2.5.1 개요

전술한 것과 같이 공시체를 제작하고, 물결합재비와 팽창재 혼입량이 다른 경우, 원통거푸집에 생기는 변위측정 결과의 일례를 소개한다.

2.5.2 실험개요

물결합재비는 55%, 45% 및 35%의 3 수준으로 하고, 팽창재에 대해서는 무혼입 및 혼입량을 각각 10kg/m^3 , 20kg/m^3 및 30kg/m^3 의 4수준을 기본으로서, 물결합재비

45%에 대해서는 40kg/m^3 및 50kg/m^3 도 추가해 실험했다. 콘크리트에 사용한 재료를 Table 1, 각 실험 수준에 있어서의 콘크리트의 배합과 각 특성의 결과를 Table 2에 나타낸다. 변위는 콘크리트의 타설 후, 정치 하고 나서 변위측정기에 의해서 연속 측정했다. 덧붙여, 실험은 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온실에서 실시하고, 공시체 갯수는 각 수준에 대해 3개로 했다. 공시체는 재령 28일까지 변위를 측정할 후에 압축강도시험을 행했다.

2.5.3 실험결과 및 고찰

각 물결합재비에 있어서의 재령과 변위의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 팽창변위(+측)는 팽창재를 50kg/m^3 혼입했을 경우를 제외하고, 재령 1일에 대체로 일정하게 되었다. 또한, 팽창재의 혼입량이 증가함에 따라 변위도 증가해 팽

Table 1 사용재료

Material	Symbol	Type
Cement	OPC	Ordinary portland cement, Density : 3.16g/cm^3
Expansive Admixture	EX	Gypsum type, Density : 3.16g/cm^3 , Standard amount : 20kg/m^3
Fine Aggregate	S	Pit sand, Density : 2.62g/cm^3 , Absorption : 1.90%
Coarse Aggregate	G	Crushed sand stone, Density : 2.71g/cm^3 , Absorption : 0.47%
Chemical Admixture	AD	W/B=55%(AE water reducing agent), W/B=45%(AE water reducing agent : High performance type), W/B=35%(Superplasticizer)

Table 2 콘크리트 배합 및 각 특성의 결과

W/B (%)	Slump (cm)	Air Content (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m^3)					Chemical Admixture AD	Fresh Properties			Compressive strength (28Days) Sealed curing 20°C (N/mm^2)
				W	OPC	EX	S	G		Slump (cm)	Air (%)	Tem ($^\circ\text{C}$)	
55	21.0 ± 1.5	4.5 \pm 1.5	50	180	327	0	880	909	250ml/B=100kg	21.0	4.9	20	37.4
					317	10			250ml/B=100kg	21.5	4.6	21	38.1
					307	20			250ml/B=100kg	22.0	4.6	21	35.9
					297	30			250ml/B=90kg	22.5	4.6	21	34.0
45	21.0 ± 1.5	4.5 \pm 1.5	48.9	175	389	0	842	909	B \times 1.0%	22.0	4.9	21	48.0
					379	10			B \times 0.95%	21.5	4.1	21	44.5
					369	20			B \times 0.90%	22.0	4.3	21	46.8
					359	30			B \times 0.85%	21.5	5.2	21	43.6
					349	40			B \times 0.85%	22.0	4.8	21	43.5
					339	50			B \times 0.85%	22.0	5.1	21	43.9
35	21.0 ± 2.0	46.9	170	486	0	775	909	B \times 0.725%	21.5	4.2	21	61.1	
				476	10			B \times 0.725%	20.5	4.5	21	55.8	
				466	20			B \times 0.75%	22.5	4.6	21	56.2	
				456	30			B \times 0.725%	22.5	5.0	21	56.2	

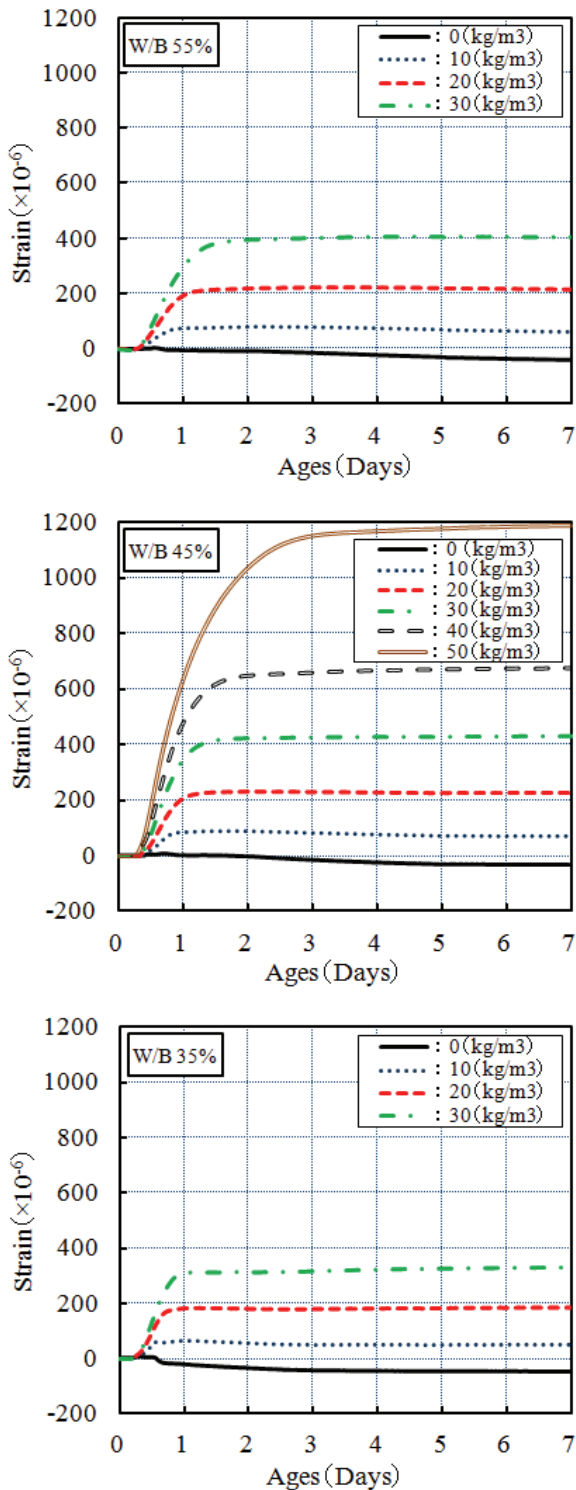


Fig. 4 재령과 변위의 관계

장재의 혼입량에 의해서 명확한 차이를 확인할 수 있었다. 팽창재를 표준사용량(20kg/m³)을 혼입했을 경우, 재령 7일에 있어서의 변위는 200×10⁻⁶ 정도가 되었다. 한편, 팽창재를 혼입하지 않은 경우에 측정되는 변위는 작고, 재령

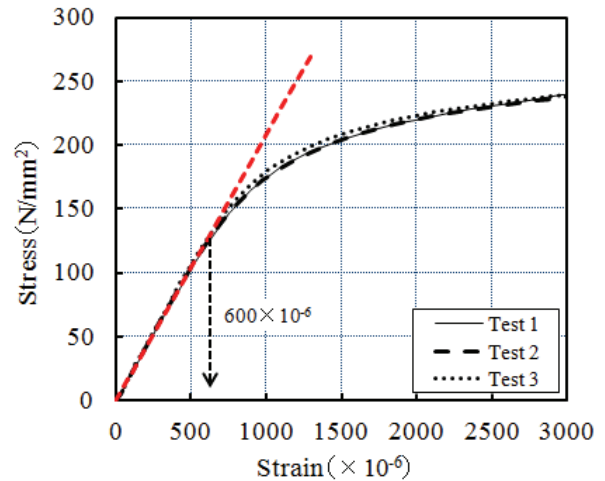


Fig. 5 양철제의 측판의 응력-변형 곡선

7일의 시점에서 -30×10⁻⁶에서 -50×10⁻⁶으로, 수축측의 변위가 측정되어 붕합상태에서의 자기수축에 의한 결과라고 생각되어진다. 물결합재비가 35%의 경우는 자기수축의 영향을 받아 팽창변위가 다른 수준에 비해 작아지는 경향이 인정되었다. 또한, 팽창재를 40kg/m³나 50kg/m³로 늘렸을 경우에는 단위팽창재당 팽창변위는 커져, 팽창재를 50kg/m³를 혼입했을 경우, 약 1200×10⁻⁶의 큰 팽창변위가 발생했다.

한편, 원통거푸집법으로 이용되고 있는 양철제의 측판의 응력-변위 곡선을 Fig. 5에 나타낸다. 양철제의 측판에는 명확한 항복점은 없고, 선형성을 유지할 수 있는 변위는 600×10⁻⁶ 정도이며, 이로부터 JCI 기준에서는 600×10⁻⁶까지를 적용범위로 하고 있다. 따라서, 현단계에서는 선형탄성범위를 넘는 변위의 경우에는 참고치로 취급하게 된다.

3. JIS A 6202 부속서 2A법의 1축 구속 팽창시험과의 관계

3.1 개요

여기에서는 원통거푸집법과 기존의 시험방법인 JIS A 6202 부속서 2A법의 1축 구속 팽창시험과의 관계에 대해 소개한다. 실험결과는 JCI 기준에 나타난 일본 콘크리트 공학회의 「고성능 팽창콘크리트의 성능평가와 균열제어 시스템」에 관한 연구 위원회의 공통실험 및 시미즈건설(주) 기술연구소의 TSUJINO 등이 성능 평가실험으로 실시한 것이다.

3.2 실험개요

원통거푸집법에 대해서는 전술한 것과 같이 공시체를 제작했다. 공통시험은 2회 실시하고 있어, 합계 5개소의 시험기관으로 실시했다. 콘크리트는 시멘트 종류(보통, 조강, 저열 및 용광로 B종), 팽창재 종류(3종) 및 골재종류(각 시험소 보유)의 각 재료를 실험요인으로 했다. 또한, 콘크리트의 배합은 물결합재비 50%를 기본으로서(일부 35%), 저침가형의 팽창재(표준 사용량 : 20kg/m³)의 혼입량을 변화(10kg/m³로부터 40kg/m³)해 검토했다. 게다가, 측정 환경의 온도에 대해서는 20℃ 일정을 기본으로 5℃ 일정 및 35℃ 일정에 대해서도 일부 검토를 행했다.

한편, 성능평가 실험은 공통실험의 보간을 염두해 물결합재비는 55%, 45% 및 35%로 하여 저침가형의 팽창재를 10kg/m³로부터 50kg/m³까지 변화시켜 검토했다. 사용 재료는 전장과 같고, 측정 환경의 온도는 20℃ 일정으로 했다. 공통실험 및 성능평가실험으로 검토한 데이터수는 총 52개이다.

3.3 실험결과 및 고찰

재령 7일에 있어서의 원통거푸집법과 JIS A 6202 부속서 2A법의 변위의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 6에는 팽창재를 혼입하고 있지 않는 결과와 원통거푸집법으로 600×10⁻⁶ 이상의 변위가 생긴 결과를 제외하고, 원점 회귀한 식을 나타내고 있다. 재령 7일로의 변위는 비례관계에 있어 동일한 정도가 되는 것을 알 수 있었다. 원통거푸

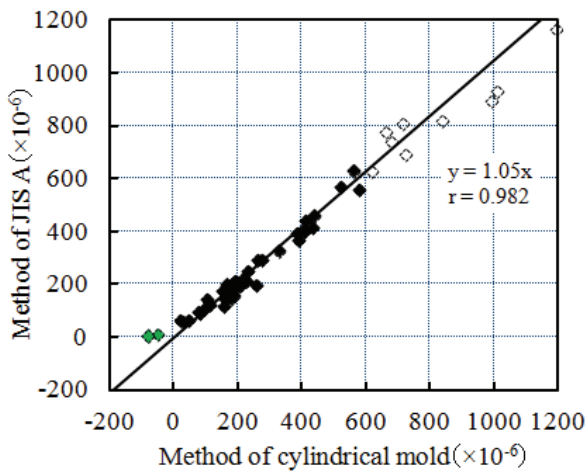


Fig. 6 재령 7일에 있어서의 원통거푸집법과 JIS A법의 변형의 관계

집법에서는 1축구속으로 환산한 구속 강재비는 A법에 비해 약간 작고, 팽창변위는 커지는 한편, 봉합양생이기 때문에 수중양생과 비교하면 재령에 수반하는 변위의 성장이 저하하여 그것들이 상쇄되는 결과로서, 재령 7일에 A법으로 가까운 팽창 변위를 얻을 수 있게 된다. 그렇지만, 팽창재의 혼입량이 적은 경우나 고강도 콘크리트의 경우에는 자기수축의 영향이 커지기 때문에 원통거푸집법의 변위가 A법의 실험 결과보다 작아지는 것을 생각할 수 있어, Fig. 6의 결과에서도 그러한 경향이 인정되었다.

따라서, 엄밀한 관계성을 요구하는 경우에는 자기수축이나 양생의 영향을 정밀하게 조사한 다음 추정할 필요가 있다고 생각된다. 또한, 원통거푸집법으로 발생한 변위가 800×10⁻⁶을 넘는 경우에는, A법에 비해 원통거푸집법의 변위는 커져 원통거푸집법으로 이용되고 있는 양철제의 측판의 변형특성이 관계하고 있다고 생각할 수 있다. 이상의 결과로부터, 일반적으로는 원통거푸집법은 A법으로 대체할 수 있을 것이라고 생각되지만, A법의 결과를 보증하는 방법은 아니며, 어디까지나 봉합상태의 팽창콘크리트의 팽창량을 측정하는 방법으로, 각각의 실험목적이나 실험방법에 대응하는 실험치로서 취급할 필요가 있다고 판단된다.

4. 온도가 원통거푸집법에 미치는 영향의 검토 예

4.1 개요

팽창콘크리트의 구속팽창 특성에 미치는 온도의 영향에 관한 연구는 많이 되어 왔다. 최근에는 봉합양생하에서, 각 양생온도마다의 구속 강재비를 변화시켰을 경우의 팽창변위의 특성이 밝혀지고 있어, 구속팽창 변위는 자유팽창 변위와 비교해 상대적으로 양생온도의 영향이 적은 것이 나타나고 있다. 그러나, 20℃의 환경 이외의 봉합양생하에서의 구속팽창에 대해 검토한 결과는 적은 상황이다. 또한, 원통거푸집법은 팽창콘크리트의 포텐셜을 평가하고 있는 JIS A 6202 부속서 2의 A법과는 달라, 실부재에서도 생기는 자기수축을 포함한 형태로의 팽창변위를 평가하고 있는 것으로부터 실구조물에 있어서의 팽창효과를 평가하는데 있어서 다양한 온도 환경하에서의 변위거동을 파악하는 것에 유용하다고 생각된다. 여기에서는 일정한 온도조건하나 온도변화가 발생하는 경우의 원통거푸집법에 의해 검토한 결과에 대해 소개한다.

4.2 일정 온도 환경하에서의 변위 거동

4.2.1 실험 개요

양생온도를 5°C, 10°C 및 20°C로 설정해 경질사암 쇄석을 사용한 콘크리트 (기호:S)와 양생온도를 20°C 및 30°C로 설정해 석회암 쇄석을 사용한 콘크리트 (기호:L)의 합계 5 종류로 했다. 물결합재비는 50%로 하고, 팽창재는 에트린가이트·석회 복합계를 표준사용량으로서 20kg/m³을 적용했다. 사용재료를 Table 3에, 콘크리트 배합과 각 특성의 결과를 Table 4에 나타낸다.

경질사암 쇄석을 사용한 경우, 타설온도가 10°C, 석회암 쇄석을 사용한 경우, 타설온도가 30°C 정도가 되도록 조정하여, 각각의 시험체를 제작한 후, 소정의 양생온도로 설정한 항온조에 정치해 측정을 실시했다. 한편, 팽창재를 혼입하지 않는 보통콘크리트(S-N 및 L-N)에 대해서는 양생조건을 20°C 환경으로만 했다.

4.2.2 실험 결과 및 고찰

저온환경하 및 30°C 환경하에 있어서의 재령과 변위의

관계를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타낸다. 덧붙여, 각 기호의 숫자는 양생온도를 나타낸다. 20°C 환경하에서는 재령 7일 까지, 10°C 환경하에 서는 재령 10일까지, 30°C 환경하에는 재령 7일까지 최대 팽창 변위를 확인했기 때문에 그후로의 계측은 종료했다.

팽창재를 혼입하고 있지 않는 S-N-20에 대해서는 재령 1일까지 작은 팽창 피크가 관찰되었다. 이것은 콘크리트 온도가 타설시의 10°C에서 20°C의 항온실에서 양생되었던 것이나 수화반응에 수반한 온도상승에 의해 팽창한 것에 기인한 것으로 판단된다. 그 후에는 자기수축의 영향으로 보여지는 수축변위가 70×10⁻⁶ 정도 생기고 있다. 한편, L-N-20에 대해서는 타설시의 31°C에서 20°C의 항온실에서 양생된 것에 의한 온도저하에 의해서 수축변위가 발생한 후에 자기수축으로 보여지는 수축변위가 30×10⁻⁶ 정도 확인되었다.

한편, 팽창재를 혼입한 S-CSA-20은 재령 1일 정도에 팽창변위의 피크가 발생해, 그 후에는 완만하게 수축하고 있다. S-CSA-10에 대해서는 20°C 환경하에 비해 팽창속도가 늦고, 재령 2일에 걸쳐 팽창이 진행되어 최대팽창 변위는 재령 6일에 확인할 수 있었다. 팽창변위는 200×10⁻⁶ 정도이며, S-CSA-20과 으 거의 동등했다. S-CSA-5는 한층 더 팽창속도가 늦고, 재령 3일에 걸쳐 팽창이 진행되어 최대팽창 변위는 재령 7일에 확인할 수 있었다. 양생온도가 5°C의 팽창 변위가 작아진 원인은 기존의 연구로 나타나고 있듯이 에트린가이트의 생성량이 적게 되었던 것을 원인으로 생각할 수 있다. 한편, L-CSA-30은 팽창속도가 가장 빠르고, 재령 0.5일의 단계에서 팽창 피크를 보이고 있어, L-CSA-20에 비해 최대팽창 변위도 커졌다. 이는 20°C 환경하에서 최대팽창 변위가 발생하는 기존의 연구와는 다른 결과이며, 원통거푸집법에 있어서의 구속상황의 차이나 수중양생과 봉합양생의 차이에 의한 영향이라고 판단된다.

Table 3 사용재료

Material	Symbol	Type
Cement	OPC	Ordinary portland cement, Density : 3.16g/cm ³
Expansive Admixture	CSA	Ettringite-gypsum type, Density : 3.08g/cm ³ , Standard amount : 20kg/m ³
Fine Aggregate	S1	Pit sand, Density : 2.62g/cm ³ , Absorption : 1.90%
	S2	Pit sand, Density : 2.59g/cm ³ , Absorption : 2.35%
	S3	Limestone fine aggregate, Density : 2.65g/cm ³ , Absorption : 0.83%
Coarse Aggregate	G1	Crushed sand stone, Density : 2.65g/cm ³ , Absorption : 0.63%
	G2	Limestone coarse aggregate, Density : 2.70g/cm ³ , Absorption : 0.96%
Chemical Admixture	AD	AE water reducing agent (High performance type)

Table 4 콘크리트 배합 및 각 특성의 결과

Symbol	W/B (%)	Slump (cm)	Air Content (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)								Chemical Admixture	Fresh Properties			Compressive strength(28Days)				
					W	OPC	CSA	S1	S2	S3	G1	G2		AD	Slump (cm)	Air (%)	Tem (°C)	20°C Water	5°C Sealed	10°C Sealed	20°C Sealed
S-N	50	21.0±1.5	4.5±1.5	47.5	170	340	-	843	-	-	942	-	B×0.90%	21.0	3.7	9	45.5	34.1	38.9	43.9	-
S-CSA					320	20	-	-	-	-	-	19.5	4.4	11	42.0	35.1	37.6	41.0	-		
L-N				45.5	165	330	-	-	258	602	-	972	B×0.75%	20.0	4.5	31	44.6	-	-	41.3	39.7
L-CSA				310	20	-	-	-	-	-	-	-	-	19.5	3.4	30	43.2	-	-	40.3	39.2

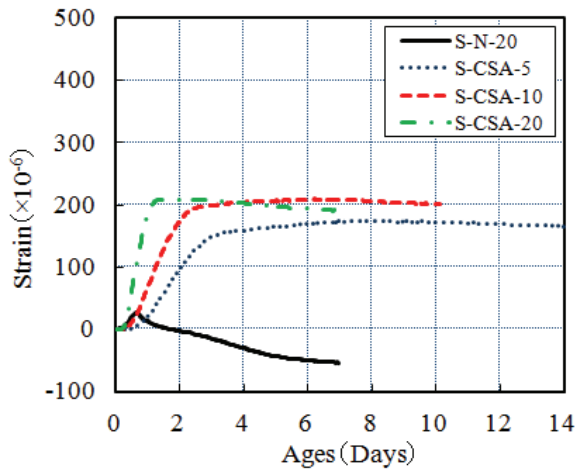


Fig. 7 저온환경하에 있어서의 변위

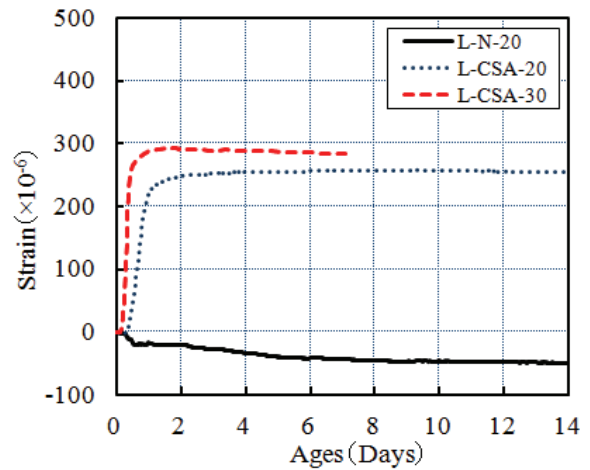


Fig. 8 30°C 환경하에 있어서의 변위

4.3 온도변화가 있는 환경하에서의 변위거동

4.3.1 실험 개요

콘크리트의 물결합재비는 45%로 하고, 굵은골재는 석회암 쇄석을 사용했다. 또한 팽창재는, 에트링가이트·석회복합계의 저침가형 팽창재를 표준 사용량(20kg/m³)을 혼합했다. 사용재료를 Table 5에, 콘크리트의 배합과 각 특성의 결과를 Table 6에 나타낸다. 한편, 변위의 측정에는 연강에 일반적으로 사용되는 11.8×10⁻⁶/°C의 보상 선펡창계수를 가지는 변위게이지를 사용하고 정치 후부터 연속 측정 했다. 덧붙여, 온도변화는 Fig. 9에 나타내는 것과 같이 비교적 일교차가 큰 날(15°C에서 30°C)을 상정하여

Table 5 사용재료

Material	Symbol	Type
Cement	OPC	Ordinary portland cement, Density : 3.16g/cm ³
Expansive Admixture	CSA	Ettringite-gypsum type, Density : 3.08g/cm ³ , Standard amount : 20kg/m ³
Fine Aggregate	S	Pit sand, Density : 2.62g/cm ³ , Absorption : 1.68%
Coarse Aggregate	G	Limestone coarse aggregate, Density : 2.70g/cm ³ , Absorption : 0.96%
Chemical Admixture	AD	AE water reducing agent(High performance type)

Table 6 콘크리트 배합 및 각 특성의 결과

W/B (%)	Slump (cm)	Air Content (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					Chemical Admixture	Fresh Properties			Compressive strength(28Days) Sealed curing 20°C (N/mm ²)
				W	OPC	CSA	S	G		AD	Slump (cm)	Air (%)	
45	21.0±1.5	4.5±1.5	48.9	175	369	20	842	905	B×0.90%	21.0	4.5	23	43.1

양생조를 제어했다. 온도의 측정은 원통거푸집내의 콘크리트 온도와 양생조내의 온도를 열전대에 의해서 측정했다.

한편, 온도변화에 따른 재령 t일에 있어서의 보정변위는 식 (2)로부터 산출했다.

$$\epsilon'(t) = \epsilon(t) + (\alpha_s - \alpha_c)(T(t) - T(0)) \quad (2)$$

여기서, $\epsilon'(t)$ 는 재령 t일에 있어서의 보정변위(×10⁻⁶), $\epsilon(t)$ 는 재령 t일에 있어서의 변위(×10⁻⁶), α_c 는 콘크리트의 선펡창계수(×10⁻⁶/°C), α_s 는 변위게이지의 보상 선펡창계수(×10⁻⁶/°C), $T(t)$ 는 재령 t일에 있어서 콘크리트 또는 외기온도(°C), $T(0)$ 는 재령 0일에 있어서 콘크리트 또는 외기온도(°C)를 나타낸다.

4.3.2 실험 결과 및 고찰

측정 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 그림 중에는 ① 측정변위, ② 콘크리트 온도를 이용하고, 식 (2)로부터 산출한 보정 변위와 ③ 양생조내의 온도를 이용한 보정변위의 결과를 나타낸다. 측정변위(①)은 온도 변화에 의해서 변동하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은, 콘크리트의 선펡창 계수가 석회암 쇄석을 적용한 것으로부터 변위 게이지의 보

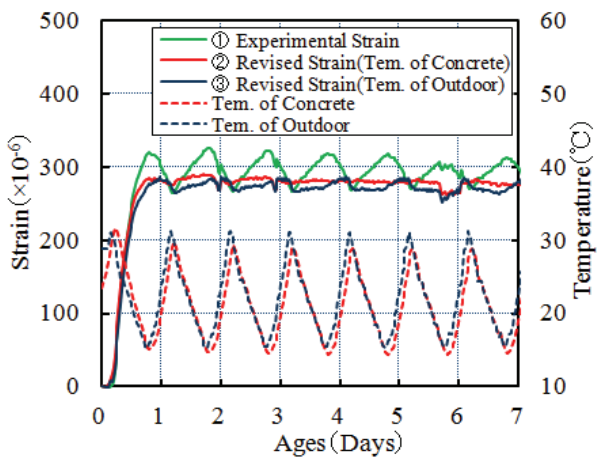


Fig. 9 30°C 환경하에 있어서의 변위

상 선폽창계수 $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 보다 작고 양생조내 온도의 하강에 수반하여, 원통거푸집의 변위가 외관상 증가하기 때문에 판단된다. 여기서, 콘크리트의 선폽창계수는 재령 2일부터 3일에 있어서 온도변화와 측정변위의 변화의 관계로부터 요구하면 $8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 였다. 또한, 콘크리트 온도를 이용해 보정한 변위(②)에 대해서는 측정변위로부터 콘크리트의 선폽창계수, 변위계이지의 보상 선폽창계수나 각 측정재령으로의 온도의 영향을 고려한 식 (2)에 의해서 요구했다. 이 결과 온도변화에 의한 영향을 충분히 줄일 수 있어, 식 (2)에 의한 보정이 유효한 것을 확인할 수 있었다. 다만, 콘크리트 온도를 측정하는 것은 공시체에 열전대를 매입하기 때문에 압축강도 공시체로의 전용할 수 없는 단점도 있는 것으로부터, 외기온도(기온) 변화에 대한 보정이 차선지책이라고 생각할 수 있다. 따라서, 식 (2)에 외기온도를 대입해 보정 변위(③)를 요구했다. 콘크리트 온도에 의한 보정변위와 비교하면, 변위의 변동은 커지고 있지만, 이것은, 콘크리트에 열전도 하는 시간만큼 온도에 타임로그가 생기고 있는 것이 원인이라고 생각할 수 있다. 다만, 보정하고 있지 않는 측정변위와 비교하면, 온도변화에 의한 변위의 변동을 작게할 수 있어 외기온도를 이용한 식 (2)에 의한 평가도 충분히 유효하다고 판단할 수 있다.

이상의 결과로부터, 기온변화가 있는 측정환경에 있어서도 콘크리트 온도를 이용한 식 (2)을 이용해 변위를 보정하는 것으로 팽창변위를 보다 적절히 평가할 수 있다고 판단된다.

5. 팽창재와 혼화재를 병용한 콘크리트의 구속팽창 변위

5.1 개요

최근에는 수화열 저감과 함께, 환경배려의 관점으로부터 혼화재의 적극적인 사용이 진행되고 있다. 게다가, 균열억제의 관점으로부터 팽창재를 병용하는 일도 증가하고 있다. 팽창재에 의한 팽창변위는 응결이나 경화속도에 영향을 받기 때문에 혼화재와 팽창재를 병용한 콘크리트의 팽창거동을 파악하는 것은 중요하다고 생각할 수 있다. 따라서, 여기에서는 플라이애쉬나 저발열형 고로시멘트와 팽창재를 병용한 콘크리트의 압축강도나 팽창거동을 분명히 하고, 원통거푸집법을 활용하여 검토한 결과에 대해 소개한다.

5.2 실험개요

사용재료를 Table 7에 나타낸다. 시멘트는 보통 포르틀랜드세멘트(OPC) 및 저발열형 고로시멘트를 이용했으며, 플라이애쉬는 II 종류를 사용했다. 팽창재는 저점가형 에트링가이트·석회 복합계를 표준사용량으로서 20 kg/m^3 을 사용했다. 실험수준과 콘크리트의 배합 및 후레쉬 성상의 결과를 Table 8에 나타낸다. 물결합재비는 50%로 하고 플라이애쉬는 OPC에 대해서 30% 내할로 치환했다. 압축강도 공시체는 원통거푸집법과 같은 경량 철제거푸집으로 제작해 수중양생의 경우는 재령 1일에 탈형해, $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 수중에서, 봉합양생의 경우는 경량철제 거푸집으로부터 탈

Table 7 사용재료

Material	Symbol	Type
Cement	OPC	Ordinary portland cement, Density : 3.16g/cm^3 , Specific surface area : $3330\text{cm}^2/\text{g}$
	LB	Low heat type Blast-Furnace Slag Cement, Density : 2.98g/cm^3 , Specific surface area : $3260\text{cm}^2/\text{g}$
Fly Ash	FA	II type, Density : 2.40g/cm^3 , Specific surface area : $3950\text{cm}^2/\text{g}$
Expansive Admixture	CSA	Ettringite-gypsum type, Density : 3.08g/cm^3 , Standard amount : 20kg/m^3
Fine Aggregate	S1	Density : 2.59g/cm^3 , Absorption : 2.35%
	S2	Density : 2.66g/cm^3 , Absorption : 0.96%
Coarse Aggregate	G	Density : 2.70g/cm^3 , Absorption : 0.96%
Chemical Admixture	AD	AE water reducing agent

Table 8 콘크리트 배합 및 후레쉬 성상의 결과

Symbol	Slump (cm)	Air Content (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)								Chemical Admixture	Fresh Properties		
					W	OPC	LB	FA	CSA	S1	S2	G		AD	Slump (cm)	Air (%)
N50	18.0±2.5	4.5±1.5	50	45.5	167	334	-	-	-	487	325	1004	B×0.80%	18.0	4.5	21
FA50				46.0	158	221	-	95	-	498	332			19.0	4.9	21
LB50				45.4	164	-	328	-	-	486	324			19.5	4.2	21
N50-CSA20				45.5	167	314	-	-	20	487	325			18.0	4.3	22
FA50-CAS20				46.0	158	207	-	89	-	498	332			18.5	5.0	22
LB50-CSA20				45.4	164	-	308	-	-	486	324			18.5	4.2	22

형하지 않고, 20±2°C의 항온실에서 측정재령까지 보관했다. 또한, 팽창변위는 원통거푸집법에 의해, 봉합양생의 압축강도 공시체와 같은 장소에서 변위를 연속 측정했다.

5.3 실험결과 및 고찰

각 요양 조건으로의 재령과 압축강도의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. 우선, 20°C의 수중양생에 있어서의 N50와 N50-CSA20에 주목하면, 팽창재의 혼입에 의해서 약간의 강도저하를 확인할 수 있었다. 또한, FA50-CSA20나 LB50-CSA20에서는 모든 재령에서 강도의 저하가 보여, 특히 LB50-CSA20의 강도저하가 현저했다. 한편, 20°C의 봉합양생으로는 모든 수준에 대해 팽창재의 혼입에 의한 강도저하는 인정받지 못했다.

각 수준의 원통거푸집법에 따른 구속팽창 변위의 결과를 Fig. 11에 나타낸다. 우선, 팽창재를 혼입하고 있지 않는 N50나 FA50에는 자기수축에 기인하는 수축변위가 조금 발생했다. 한편, LB50에는 석고에 의한 팽창변위가 생기고 있어 자기수축 변위를 완화하고 있다고 생각할 수 있다. 팽창재를 혼입한 N50-CSA20에서는 재령 1일까지 대부분의 팽창이 진행되어 변위는 수습했다. 한편, FA50-CSA20나 LB50-CSA20에서는 재령 1일 이후에도 팽창변위는 증가해 최대 팽창변위는 N50-CSA20에 비해 커진 것을 확인할 수 있었다. LB50-CSA20의 최대 팽창변위는 재령 1일의 팽창변위와 비교해 2배 이상 커진 값을 확인할 수 있었다. 여기서, 100×100×400mm의 강제거푸집으로 성형한 LB50-CSA20의 공시체를 재령 1일에 탈형해 6일간 20±2°C에서 수중양생 후 타설면의 모습을 Fig. 12에 나타낸다. 공시체 표면에는 다수의 미세균열을 확인할 수 있었으나, N50-CSA20나 FA50-CSA20에 대해서는 균열은 발생하지 않았다. LB50-CSA20의 재령 1일 이후에 생기는 팽창변위는 수중양생에 의해서 더욱커졌다

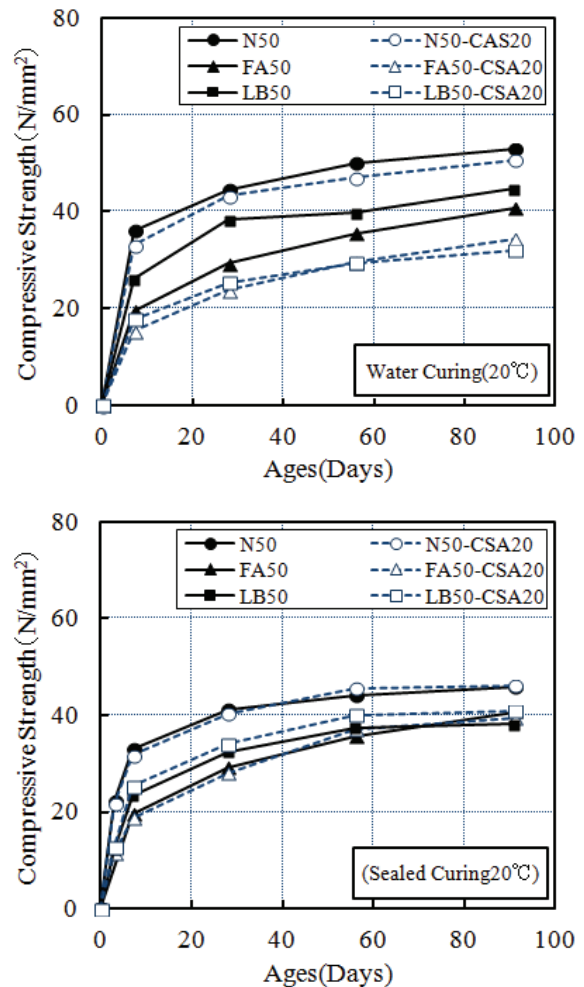


Fig. 10 재령과 압축강도의 관계

고 생각할 수 있어, 미세균열의 발생이나 압축강도의 저하의 요인이 되었다고 생각할 수 있다. 이상의 검토 결과로부터 팽창재를 사용한 콘크리트에 대해서는, 팽창속도나 최대 팽창변위 등의 팽창특성을 파악할 필요가 있으며, 간편하게 측정할 수 있는 원통거푸집법은 팽창콘크리트의 성능평가나 품질관리에 활용가능 할 것으로 기대된다.

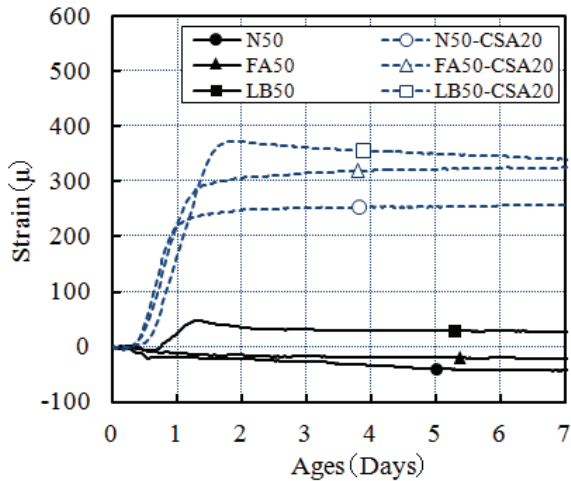


Fig. 11 구속팽창 변위

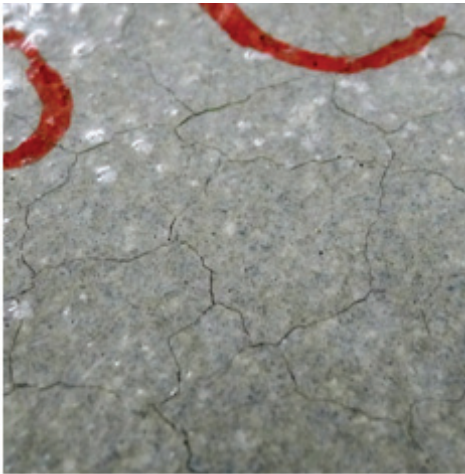


Fig. 12 공시체의 균열발생 상황

6. 결론

원통거푸집을 이용한 팽창콘크리트의 구속팽창 시험방법에 있어서의 측정변위의 특징, 기존의 시험방법과의 관계나 온도변화가 발생하는 환경하에서의 보정식 등을 소개했다. 또한, 플라이애쉬나 저발열형 고로시멘트와 팽창재를 병용한 콘크리트의 성능평가나 품질관리에 활용한 예를 소개했다. 콘크리트에의 환경배려나 고기능화 및 고성능화가 요구되는 시점에서, 팽창재를 적용한 콘크리트의 성능평가나 품질관리에 있어서, 간편하고 용이하게 적용 가능

한 본 원통거푸집법이 적극 활용할 수 있기를 기대한다.

사 사

본 특집기사의 작성에 임해서, 일련의 실험결과는 일본 시미즈건설 기술연구소(清水建設(株) 技術研究所)의 Tsujino Masato박사(辻埜真人 博士) 가 제공한 자료를 바탕으로 작성했습니다. 이에 감사의 뜻을 밝힙니다.

참고문헌

1. 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状：(財)日本建築学会, 2013.7.
2. 辻埜真人, 橋田浩, 菊地俊文, 田中博一：膨張材と石灰石骨材を併用した低収縮コンクリートに関する検討 (その2 膨張コンクリートの品質管理方法), 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, 2010, pp.925-926.
3. 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴, 高橋圭一：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法, コンクリート工学年次論文集, vol. 33, No. 1, 2011, pp.437-442.
4. 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴, 菊地俊文：軽量型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験による品質管理, コンクリート工学年次論文集, vol. 34, No. 1, 2012, pp.520-525.
5. 半井健一郎, 栗原勇典, 橋田浩, 辻埜真人：鋼製軽量型枠を用いた膨張コンクリートの簡易性能評価に関する仕事量による考察, セメント・コンクリート論文集, vol. 65, 2011, pp.209-216.
6. 「高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システム」に関するシンポジウム：(財)日本コンクリート工学協会, 2011.9.
7. 長瀧重義, 米山紘一, 飯田一彦：化学的プレストレスの導入に関する基礎研究, セメント技術年報, XXII, 1968, pp.457-461.
8. 岡村甫, 古沢孝男, 辻幸和：膨張コンクリートの膨張性状に及ぼす温度の影響, 第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1979, pp.82-92.
9. 鶴田昌宏, 谷村充, 三谷裕二, 佐久間隆司, 佐竹紳也：種々の温度下で養生した膨張コンクリートの膨張特性, 土木学会第58回学術講演会, 2003, pp.339-340.
10. 戸川一夫, 中本純次, 中野錦一：膨張コンクリートの拘束膨張特性におよぼす温度の影響, セメント技術年報, Vol. 35, 1981, pp.277-281.
11. 辻幸和, 横田紀男, 鈴木康範, 森本宏：膨張コンクリートの強度および膨張性状に及ぼす養生温度の影響, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1981, pp.5-8.

담당 편집위원: 오상훈
(부산대학교 건축공학과 부교수)
osh@pusan.ac.kr