



수축보상형 콘크리트의 균열억제 효과에 관한 연구

최형길¹⁾ · 김규용^{2)*} · 노구치 타카후미³⁾

¹⁾무로란공업대학 대학원 공학연구과 ²⁾충남대학교 대학원 건축공학과 ³⁾동경대학 대학원 공학계연구과

A Study on the Cracking Control Effects of Shrinkage Reduction Concrete

Hyeong-Gil Choi,¹⁾ Gyu-Yong Kim,^{2)*} and Takafumi Noguchi³⁾

¹⁾Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Hokkaido, 050-8585, Japan

²⁾Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

³⁾Department of Architecture, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656, Japan

ABSTRACT The aim of this study is to qualitatively evaluate the cracking control effects of expansive concrete used in reinforced concrete building. The result of experiments in laboratory shows that autogenous shrinkage and drying shrinkage are suppressed by using expansive additive. The tensile stress-strength ratio is lower in expansive concrete than normal concrete under fully restrained condition. Compression stress could be effectively generated in early age in the walls in buildings by the use of expansive additive, and tensile stress due to drying shrinkage at later age eventually decreased. Additionally, visual observation at long-term ages shows that the cracking area of expansive concrete was approximately 35% of normal concrete, which confirms that the use of expansive additive reduces concrete cracking in reinforced concrete buildings.

Keywords : expansive additive, expansion-shrinkage, cracking, complete restraint test, restraint stress

1. 서 론

콘크리트의 변형은 내·외부의 구속에 의해서 응력을 발생시켜 이것이 콘크리트의 허용응력 이상이 되었을 경우 균열이 발생하게 된다. 이러한 콘크리트의 균열은 구조물의 안전성, 사용성, 내구성이나 미관에 영향을 미치기 때문에 구조물에 있어서 유해한 균열을 방지하는 것은 콘크리트 구조물의 장수명화나 고성능화 관점으로부터 중요하다.^{1,2)} 이러한 상황에서 콘크리트의 수축저감 및 균열저항성을 높이기 위해 팽창재나 수축저감제 등 수축보상형 콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 이 중에서 팽창재는 초기의 팽창효과를 유효하게 이용하는 것으로 최근에 건설현장에 있어서 그 적용실적이 증가하고 있지만, 실부재 레벨에 있어서의 수축 저감효과나 균열 억제효과를 정량적으로 검토한 예^{3,4)}는 적은 것이 현실이다.

본 연구에서는 팽창재를 적용한 콘크리트의 기본특성을 파악하는 한편, 실부재에 있어서의 팽창 수축 거동을 측정하여 측정된 결과에 근거한 발생응력의 평가 및 장

기재령에 있어서의 균열조사를 실시하여 팽창재의 균열 억제 효과에 대해 정량적으로 검토했다.

2. 실험개요

2.1 실험계획 및 방법

사용재료 및 콘크리트 배합을 Table 1 및 2에 나타내었다. 콘크리트는 에트링가이트·석회 복합계의 저침가형 팽창재를 20 kg/m³를 혼입한 설계기준강도 39 MPa의 팽창콘크리트와 팽창제 무혼입의 설계기준강도 36 MPa의 보통 콘크리트를 사용했다. 잔골재는 산사와 수축저감에 효과가 있다고 알려져 있는⁵⁾ 석회암 쇄사를 각각 65 : 35의 비율로 혼합 사용했으며, 굵은 골재는 석회암 쇄석을, 화학 혼화제는 고성능 AE 감수제를 사용했다.

먼저, 콘크리트의 기본특성으로서 적용한 콘크리트의 균지 않은 정상과 강도특성, 건조수축, 자기수축 및 구속수축실험을 실시했다. 강도 시험용 시험체는 재령 1일에 탈형하여 수중양생(20°C)을 실시한 후 재령 7일 및 28일에 있어 압축강도를 측정했다. 건조수축은 재령 7일까지 수중양생(20°C)을 실시한 후 항온·항습실 (20±2°C, 60±5%) 내에서 소정의 재령에서 콘택트 게이지법⁶⁾에 의해 측정했다. 한편, 자기수축은 거푸집 안쪽에 테프론시트 및 비

*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.jp

Received May 18, 2015, Revised June 19, 2015,

Accepted June 23, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

Table 1 Materials Used

Type	
C	Ordinary portland cement, Density: 3.16 g/cm ³
S	Pit sand, Density: 2.60 g/cm ³ , Absorption ratio: 2.18%
	Limestone, Density: 2.66 g/cm ³ , Absorption ratio: 1.06%
G	Limestone, Density: 2.71 g/cm ³ , Absorption ratio: 0.55%
EXP	Ettringite-gypsum type, Density: 3.05 g/cm ³

Table 2 Mix Designs

Type	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)						Ad (B×%)
				W	C	EXP	S		G	
							P	L		
EX	39	41.5	48.0	170	390	20	533	293	921	1.15
N	36	45.5	49.5	170	374	0	556	309	910	1.15

※ EX: Expansive concrete, N: Normal concrete, EXP: Expansive additive, P: Pit sand, L: Limestone, Ad: Superplasticizer

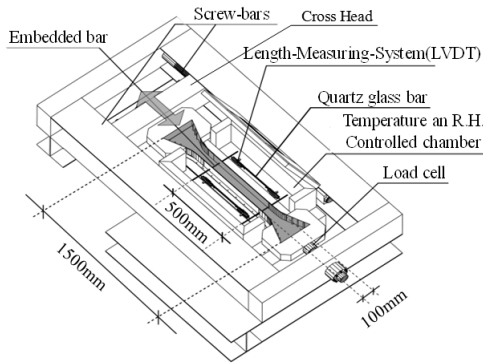


Fig. 1 Variable restraint testing machine (VRTM)⁷⁾

닐시트에 의해 구속이나 건조에 의한 수분의 증발이 생기지 않도록 제작했다. 재령 1일에 탈형한 후, 알루미늄 테이프에 의해서 전면을 봉합하여 매입형 변위계에 의해 측정했다. 자기수축의 측정 개시점은 변위계이치를 붙인 ØD6 (길이: 340 mm)의 철근을 중앙에 배치한 시험체를 제작해 철근의 변위가 단조롭게 변화하기 시작하는 시점을 기준으로 했다.

2.2 구속수축실험

구속수축실험은 완전 구속상태 하에서 팽창재를 적용한 콘크리트의 응력발현 성상과 크리프의 영향을 파악하는 것을 목적으로 실시했다. 구속 수축실험은 Fig. 1에 나타내는 가변형 구속응력 시험기 VRTM (Variable Restraint Testing Machine)를 이용해 완전 구속상태를 재현했다. VRTM은 TSTM (Temperature Stress Testing Machine)¹³⁾의 원리를 바탕으로 도쿄대학의 노구치, 마루야마 등에 의해 개발⁷⁾되었다. 실험은 거푸집에 타설한 콘크리트의 수축 및 팽창에 의해 발생하는 변위 및 응력의 변화를 LVDT 및

로드셀에 의해 모니터링하여 콘크리트가 설정한 변위 및 응력에 다다르면 크로스 헤드를 강제 제어해 원점의 위치로 되돌리는 것으로 완전 구속상태를 재현했다. 본 실험에서는 기존의 연구⁸⁾를 참고로 측정구간 (길이 500 mm, 단면 100×100 mm)에 있어서의 변위 트리거를 ±4×10⁻⁶, 응력 트리거를 ±0.01 MPa로 설정했다. 크로스 헤드 제어는 재령 1일까지는 0.005 mm/min, 그 이후는 0.003 mm/min로 했다. 실험은 팽창재의 효과가 발휘되는 초기재령 및 실 구조물에 있어서의 탈형 시기(3일), 살수양생 기간(7일)을 고려하여 시험체를 봉합한 상태로 재령 7일까지 측정했다. 측정종료 후에는 크로스 헤드를 0.003 mm/min의 속도로 강제 이동시켜 VRTM에 의한 직접 인장실험을 실시하였다. 동시에 Ø10×20 cm의 봉합공시체를 이용해 재령 1, 3, 7일에 할렬 인장실험을 실시했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 기본특성

콘크리트의 굳지 않은 성상 및 압축강도의 측정결과를 Table 3에 나타내었다. 각각의 특성 모두 요구 성능을 만족했으며, 재령 7일에 이미 설계기준강도를 만족하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2에 건조수축의 측정결과를 나타내었다. 재령 26주의 건조수축은 보통 콘크리트는 580×10⁻⁶, 팽창 콘크리

Table 3 Fresh properties and compressive strength

Type	Fresh properties			Compressive strength	
	Slump (cm)	Air content (%)	Temperature (°C)	7 days (MPa)	28 days (MPa)
EX	22.0	5.2	31.5	42.0	53.9
N	22.5	4.4	30.5	36.7	51.3

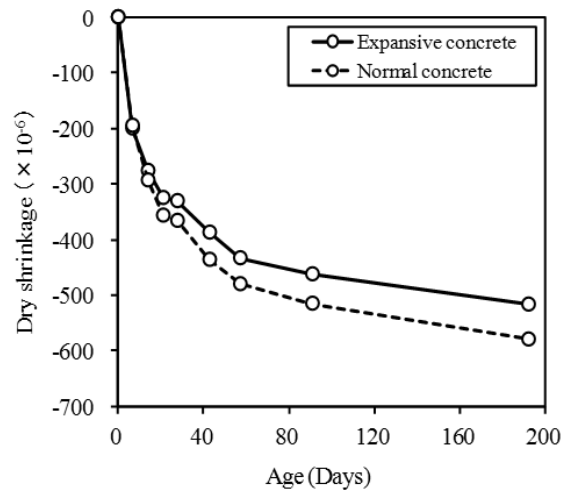


Fig. 2 Drying shrinkage

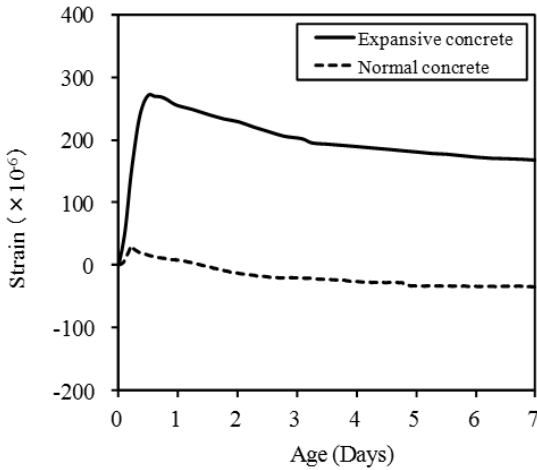


Fig. 3 Autogenous shrinkage

트는 520×10^{-6} 로 팽창 콘크리트의 경우 보통 콘크리트에 비해 60×10^{-6} 정도 작은 결과였다. 이는 팽창 콘크리트의 물시멘트비가 조금 작은 것이나 부재에 의한 구속도, 건조정도에 의해서 다소의 차이는 있지만, 기존연구^{1,9,10)}에서 일반적으로 제시되고 있는 팽창재의 초기팽창에 의한 건조수축의 저감효과 100×10^{-6} 를 고려하면, 팽창재를 적용하는 것으로 약 28%의 건조수축을 저감할 수 있다고 판단된다.

한편, 자기수축의 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 팽창 콘크리트, 보통 콘크리트 모두 철근의 변위가 단조롭게 변화하기 시작한 측정 개시점은 물 투입으로부터 약 4시간 (타설 후 약 3시간)이 경과했을 때로 팽창 콘크리트와 보통 콘크리트의 응결시간은 큰 차이가 없었다고 판단된다. 한편, 팽창 콘크리트의 경우는 측정 개시로부터 재령 0.5일의 시점에서 약 265×10^{-6} 정도의 최대팽창을 확인할 수 있었으며, 이후에 수축해 재령 7일에 170×10^{-6} 의 팽창변위를 확인할 수 있었다. 한편, 보통 콘크리트의 경우는 재령 7일에 자기수축은 36×10^{-6} 로 초기재령에 있어서의 팽창재의 팽창효과를 확인할 수 있었다.

3.2 완전구속조건하에 있어서의 거동

보통 콘크리트 및 팽창 콘크리트의 완전 구속조건 하에 있어서의 변위의 변화를 Fig. 4 및 5에 나타내었다. 팽창콘크리트 및 보통콘크리트 모두 수축측 (+) 및 팽창측 (-)에서 변위 트리거가 $\pm 4 \times 10^{-6}$ 에 이르면 원점으로 돌아오는 사이클로 제어되어, 설정한 변위 트리거 내에서 완전 구속의 제어가 실시되고 있는 것을 알 수 있었다. 특히, 팽창 콘크리트의 경우는 초기재령에 있어서 수축보다 팽창 변위가 크기 때문에 재령 0.7일까지 팽창측의 제어가 빈번하게 반복 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, 팽창재에 의한 초기 팽창력의 발생을 확인할 수 있었다.

Fig. 6에 완전 구속조건 하에서의 구속응력의 측정결과를 나타내었다. 보통 콘크리트 및 팽창 콘크리트 모두 초

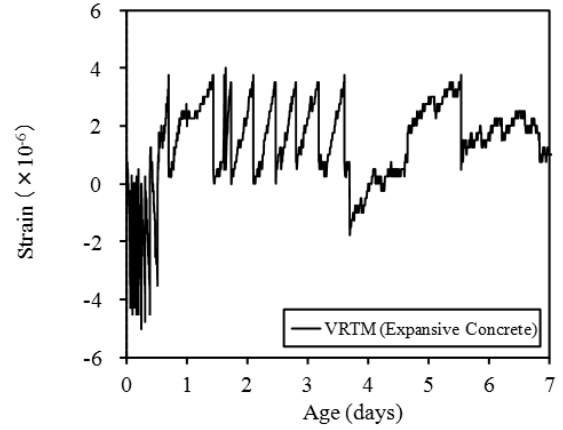


Fig. 4 Strain development by VRTM (EX)

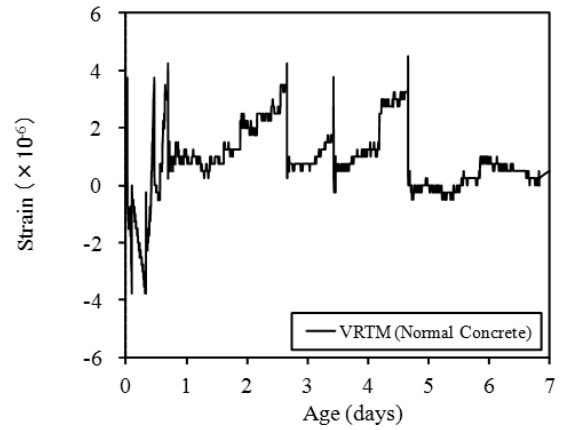


Fig. 5 Strain development by VRTM (N)

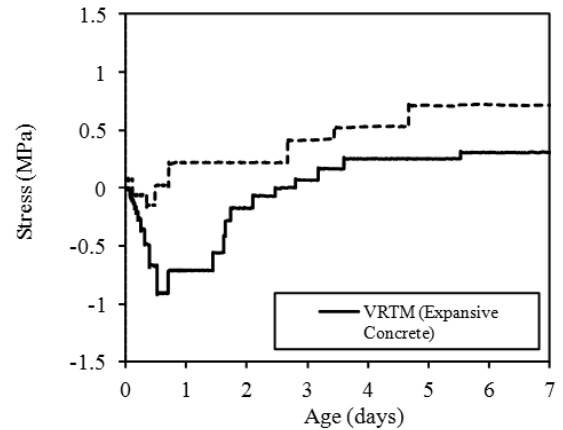


Fig. 6 Stress development

기재령에 있어서 변위의 변화가 큰 것에 따라 응력의 변화도 커지지만, 콘크리트가 경화되어 강성을 확보해 나가는 재령 후반에 있어서는 구속응력의 변화가 작은 것을 알 수 있다. 팽창 콘크리트의 경우 완전 구속조건 하에서 초기재령으로부터 팽창에 의한 압축응력이 도입되어 재령 0.6일에 약 0.92 MPa의 최대 압축응력이 도입되었다. 그 후, 콘크리트의 수축에 의해서 인장측으로 바뀌어 재령 7일의 시점에서 0.31 MPa의 인장응력을 확인할

수 있어, 이는 보통콘크리트의 0.72 MPa 보다 작은 값이며, 팽창제에 의한 인장응력의 저감효과를 확인할 수 있었다.

3.3 강도특성 및 균열저감 효과

VRTM 실험 후 크로스 헤드의 강제이동에 의해서 측정된 직접 인장강도와 Ø10×20 cm의 봉합 공시체로부터 측정된 할렬 인장강도의 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. 보통 콘크리트와 팽창 콘크리트의 인장강도에의 큰 차이는 볼 수 없었다. 한편, 기존의 연구에서는 할렬 인장강도와 직접 인장강도는 거의 동일한 결과를 얻을 수 있다는 것과 실험에 있어서 편심 등이 발생하지 않으면 본질적으로 동일하다고 보고하고 있다.^{11,12)} 본 연구에서의 다른 점은 시험체가 VRTM의 완전 구속조건 하에서 응력의 이력을 받고 있는 점이다. 이에 따라 팽창 콘크리트의 경우는 재령 7일에 있어서 직접 인장강도가 할렬 인장강도보다 약 9.7%정도 큰 결과이지만, 이는 완전 구속조건 하에서의 팽창제의 케미컬프레스효과에 의한 조직의 치밀화 효과가 인장강도 증진으로 연결되었다고 생각할 수 있다.

한편, VRTM 실험으로 측정된 시험체가 할렬 인장강

도의 실험결과와 같은 인장강도의 성상을 발현한다고 가정^{11,12)}하고 할렬 인장강도의 측정결과와 VRTM 실험으로부터 얻은 구속응력 측정결과를 바탕으로 응력-강도비를 산출하여 균열발생 가능성을 평가했다. 재령 1, 3, 7일에 있어서의 응력-강도비의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 전 재령에 있어서 팽창 콘크리트의 응력-강도비는 보통 콘크리트에 비해 14~55% 정도 낮은 결과로 팽창 콘크리트의 균열발생 가능성은 보통 콘크리트에 비해 매우 작다고 판단된다.

한편, VRTM 실험에 완전 구속 조건하에서의 크리프

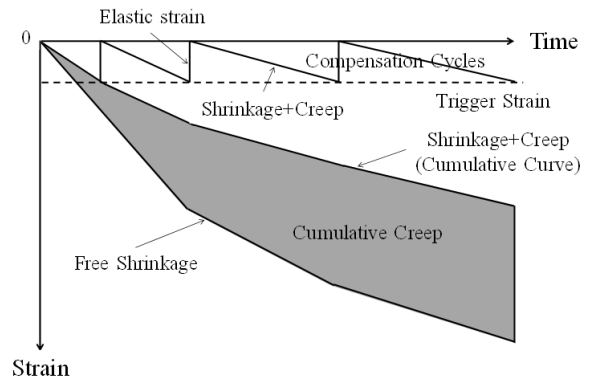


Fig. 9 Schematic illustration of strain under fully restrained condition¹³⁾

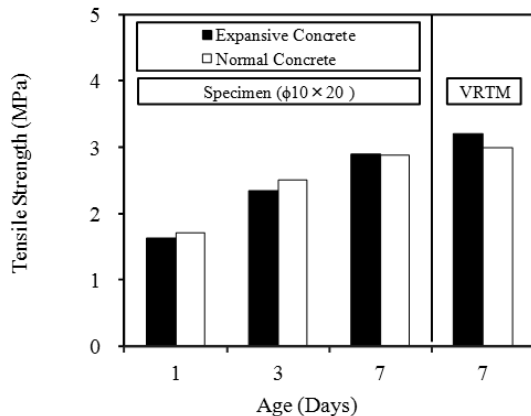


Fig. 7 Splitting and direct tensile strength

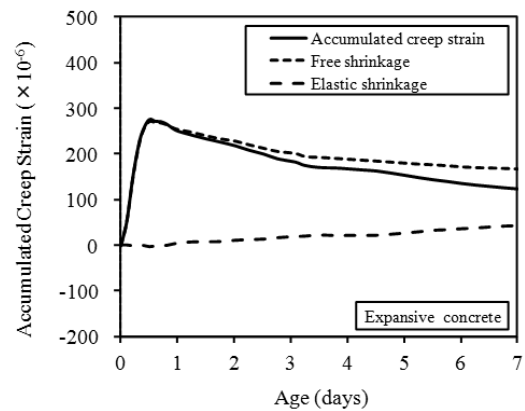


Fig. 10 Accumulated creep strain (EX)

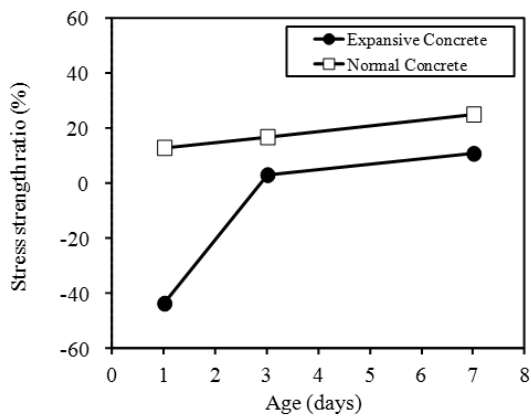


Fig. 8 Stress-Strength ratio development

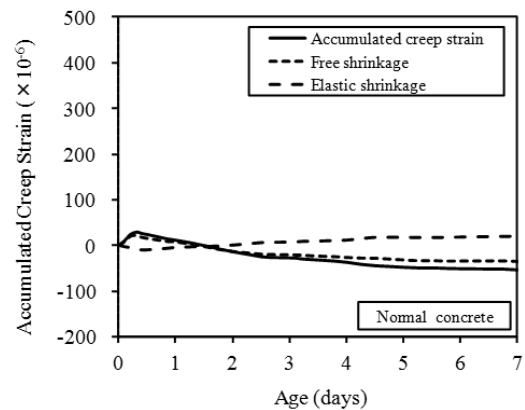


Fig. 11 Accumulated creep strain (N)

의 영향을 검토하기 위해, Fig. 9와 같이 Kovler¹³⁾가 제안한 완전 구속조건 하에서의 변위의 개념을 이용했다. 완전 구속 조건하에 있어서의 변위는 비교적 장기간에 걸쳐서 발생하는 수축변위와 크리프 변위가 포함되어, 이것의 합과 완전구속 제어시의 탄성변형이 변형 트리거의 제어가 종료될 때에 동일하게 된다. 그 때문에 이 변형을 누적해 계산하면 크리프 변형량과 수축 변형량의 합을 구할 수 있다. 여기서, 크리프는 자유 수축실험에 의해서 측정된 변형곡선으로부터 VRTM으로부터 완전 구속된 시험체의 탄성변형의 차분에 의해 구할 수 있다. 즉, 자유 수축변형 및 VRTM 실험의 미소 변형 시에 하중이 변화할 때의 변형을 그래프로부터 읽어내 그 값을 같은 시간대의 자유 수축량으로부터 차감하는 것으로 누적 크리프 변형량을 요구할 수 있다. 다만, 여기서 말하는 크리프 변위는 일반적인 크리프 실험의 일정 응력하에서의 변형이 아니고 콘크리트의 수축에 의해서 축적되는 변동 응력하에 있어서의 크리프 변위의 총합을 의미한다.⁸⁾

VRTM의 완전 구속실험으로부터의 탄성변형과 자유 팽창수축변위 및 산출한 누적크리프 변위를 Fig. 10 및 11에 나타내었다. 초기재령에 있어서의 보통 콘크리트 및 팽창 콘크리트는 자유 팽창수축에 대해서 누적 크리프 변위 차지하는 비율이 크고 자유 팽창수축의 증가에 따라 누적 크리프 변위는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 팽창 콘크리트의 누적 크리프 변위는 재령초기에 급격하게 증가해 재령 7일에 있어서 124×10^{-6} 정도로 자유 팽창수축 변위의 약 73.9% 정도를 차지했다. 이는 기존의 연구¹⁴⁾와 같은 경향으로 본 실험과 같이 변위가 완전 구속된 조건에서 팽창 콘크리트의 경우는 상당한 응력이 완화되며 특히, 팽창재는 공극을 만들어 나가면서 팽창하기 때문에 누적 크리프 변위가 커진다고 판단된다. 이 때문에 구속 조건하에서 팽창콘크리트의 경우는 응력완화에 따른 변형 능력이 커지게 되어 인장응력이나 휨 인장응력 하에서 균열 저항성의 향상을 기대할 수 있다고 생각할 수 있다.

4. 실무재로의 검토

4.1 측정개요

적용대상 실무재는 지상 7층의 RC조 건축물로 팽창 콘크리트 및 보통 콘크리트를 적용한 3층 및 4층 외벽이다. 1층에서 3층까지는 팽창 콘크리트를 4층부터 상부층까지는 보통 콘크리트를 적용했다. 덧붙여, 실무재에 있어서의 사용재료 및 콘크리트 배합은 2절의 Table 1 및 Table 2와 같다.

측정부의 평면도를 Fig. 12에 나타내었다. 측정대상 외벽 좌우에는 기둥이 없고 위·아래 빔에 의해 지지되고 있으며, 외벽 중앙부에는 유발줄눈이 설치되어 있다. 매입형 변위계에 의해 각 측정부의 변위 및 온도를 측정했

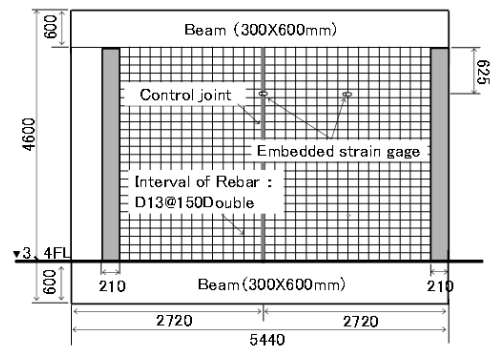


Fig. 12 Diagram of measurement area

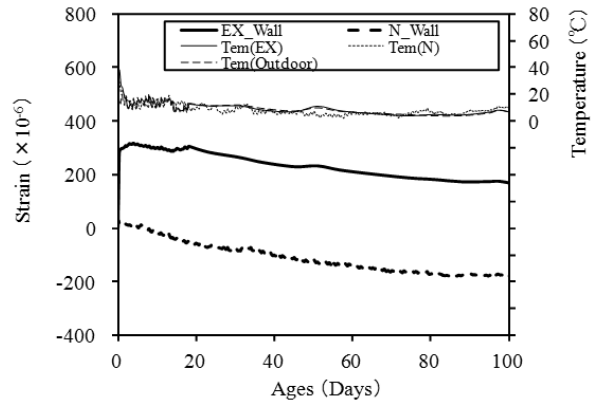


Fig. 13 Free expansion-contraction deformation

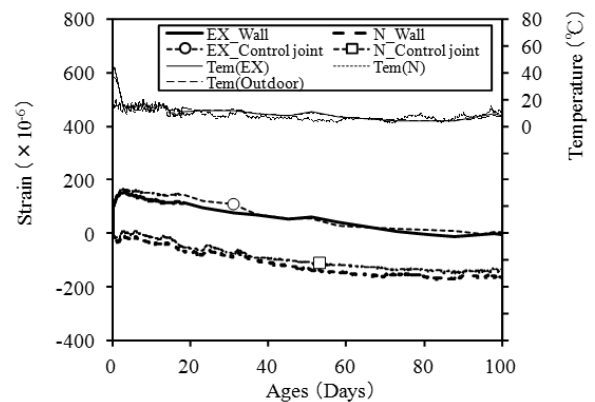


Fig. 14 Actual deformation of walls

다. 또한, 실무재와 동일한 콘크리트를 채취하여 무구속 상태의 기준 폭로 시험체를 제작하여 팽창 수축변위 및 온도를 계측했다. 한편, 기준 폭로 시험체는 실무재와 같은 시기에 탈형하여 외벽과 같은 건조상황을 모의하기 위해서 양 측면 이외의 4면을 알루미늄 테이프로 봉합했다. 그 후 실무재와 동일기간 살수양생을 실시해 측정을 계속했다.

4.2 측정결과

Fig. 13 및 14에 무구속 상태의 기준 폭로 시험체의 자유 팽창수축 변위(온도변위 제외) 및 외벽의 실무재 변위

(온도변위 제외)를 나타내었다. 온도의 보정은 초기치 설정시(유효재령 0.3일)의 실온도로부터 각 재령에 있어서 측정된 온도와 온도차를 요구하여, 콘크리트의 선팽창계수는 기존연구¹⁵⁾를 참고로 $7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 하여 콘크리트의 온도변위를 보정했다. 자유 팽창수축 변위는 재령 100일의 시점에서 팽창 콘크리트의 경우, 팽창 피크로부터 143×10^{-6} , 보통 콘크리트의 경우, 201×10^{-6} 수축하고 있어 팽창 콘크리트에 비해 보통 콘크리트의 수축량이 큰 것을 확인할 수 있었다. 한편, 실부재 변위는 주변부재나 철근의 구속 등에 의해 자유 팽창수축 변위보다 팽창량이나 수축량이 조금 감소한 결과를 확인할 수 있었다. 실부재에 있어서의 팽창 콘크리트의 최대 팽창변위는 재령 2.08일에 152×10^{-6} 였으며, 보통 콘크리트는 살수양생 이후에 수축해 재령 100일의 시점에서 약 164×10^{-6} 정도의 수축량을 확인할 수 있었다.

4.3 각 측정부의 구속도 및 발생응력의 산정

팽창 콘크리트의 발생응력의 평가는 기존문헌³⁾에서 제안하고 있는 식 (1)의 구속압에 의한 자유 팽창수축 변위의 증분을 저감하는 방법을 이용했다.

$$\gamma_e = \text{Exp}(-\alpha \cdot \sigma_c) \quad (1)$$

여기서, γ_e 는 자유 팽창변위 증분 저감율, α 는 구속응력 (MPa), σ_c 는 구속응력의 저감특성을 표시하는 계수로서 1.5를 나타낸다.

발생응력은 순차계산(Step-by-Step)법^{1,3)}을 이용하여, 자유 팽창수축 변위가 실부재 변위와 일치하도록 식 (2)에 의해 적당한 간격마다 구속도를 0에서 1까지 분류하여 자유 팽창수축 변위가 구속을 받는 것에 의해 생기는 힘을 발생응력으로 산정했다.

$$\lambda = (\epsilon_f - \epsilon_r) / \epsilon_f \quad (2)$$

여기서, λ 는 구속도, ϵ_f 는 자유 팽창수축 변위, ϵ_r 는 구속 팽창수축 변위(실부재 변위)를 나타낸다.

한편, 순차계산(Step-by-Step)법에 있어서 필요한 각각의 파라메타인 압축강도 및 영계수의 산정에는 CEB-FIP 1990의 식 (3) 및 (4)를 이용하였으며, 식 중의 s 치는 보통강도 콘크리트의 대표적인 값인 0.3으로 했다. 덧붙여, 재령 28일의 영계수는 압축강도의 결과를 이용해 JASS 5 식에 의해 계산했다.

$$f(t) = f_{28} \cdot \text{Exp}\{s[1 - 28/t]^{0.5}\} \quad (3)$$

$$E(t) = E_{28} \cdot \text{Exp}\{0.5s[1 - 28/t]^{0.5}\} \quad (4)$$

여기서, f_{28} 은 재령 28일의 압축강도(MPa), E_{28} 은 재령 28일의 영계수(MPa), t 는 유효재령(일)을 나타낸다.

크리프 계수에 대해서는 식 (5)의 ACI-209형 모델을 채용했으며, 중국 크리프계수 및 크리프 발현속도 계수는 식 (6) 및 (7)에 의해서 요구했다.

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot (t - t_0)^{0.6} / [\beta + (t - t_0)^{0.6}] \quad (5)$$

$$\phi_0 = 3 - 1.7 \cdot E(t_0) / E_{28} \quad (6)$$

$$\beta = 0.05 \cdot \text{Exp}[5 \cdot E(t_0) / E_{28}] \quad (7)$$

여기서, ϕ 는 중국크리프 계수, β 는 크리프 발현속도 계수, t_0 는 재하재령 (일)을 나타낸다.

4.4 발생응력의 산정결과

입력한 자유 팽창수축 변위, 외벽의 실부재 변위 및 분류한 구속도의 결과를 Fig. 15 및 16에 나타내었다. 팽창 콘크리트의 경우, 응결로부터 팽창 및 온도 상승시까지의 구속도는 0.42였으며, 온도 강하로부터 구속도는 크게 저하한 결과를 확인할 수 있었다. 보통의 경우보다 구속도가 꽤 작게 산정된 것은 본 검토로의 측정대상이 양단에 기둥이 없는 벽부재로, 외부 구속의 영향이 작았던 것이 원인으로 생각할 수 있다. 한편, 보통 콘크리트에 있어서도 온도 상승시까지의 구속도는 0.31이었지만, 온도

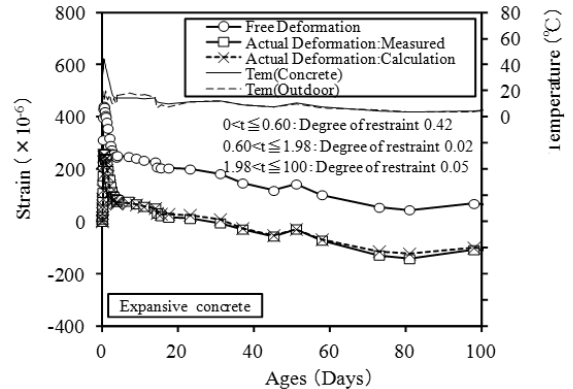


Fig. 15 Calculation results of 3F walls (EX)

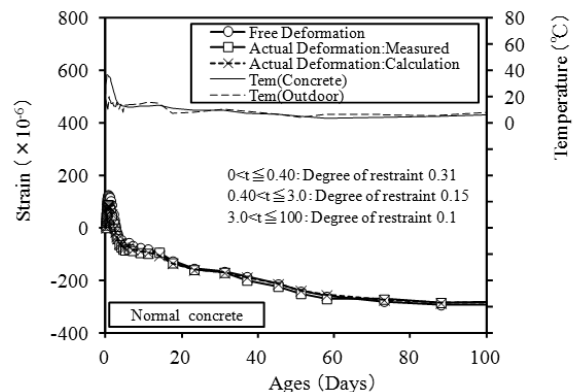


Fig. 16 Calculation results of 4F walls (N)

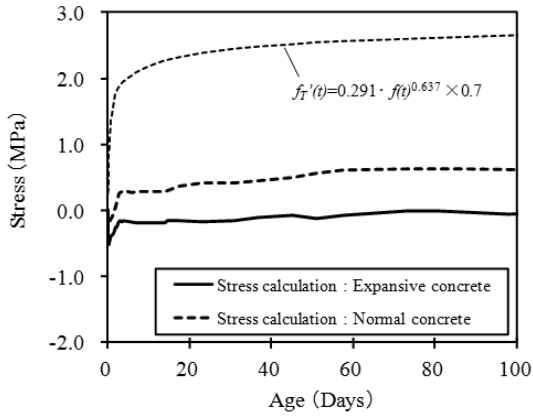


Fig. 17 Results of stress calculations

강하시는 0.15이며 온도 강하 후는 0.1로 작아졌다. 팽창 콘크리트 및 보통 콘크리트 모두 구속도는 재령초기에 큰 경향을 나타내고 부재의 온도가 외기온과 평형이 된 이후는 거의 일정치에 수렴했다. 장기재령에 있어서는 구속도는 팽창 콘크리트보다 보통 콘크리트가 약간 큰 경향이지만, 이것은 하층의 팽창 콘크리트의 건조수축이 작은 것이 원인으로 생각할 수 있다.

실부재 외벽에 발생한 응력의 계산결과를 Fig. 17에 나타내었다. 팽창 콘크리트의 경우, 초기 팽창시에 0.51 MPa의 압축응력이 도입되어, 이후의 온도강하에 의한 수축 및 건조수축의 진행에 의해 도입된 압축응력은 상쇄되어 재령 100일에 있어서 인장응력이 거의 발생하지 않았다. 한편, 보통 콘크리트의 경우는 재령초기에 약간의 압축응력이 도입되지만, 이후의 온도강하 및 건조수축에 의해서 인장응력이 발생해 재령 100일에 있어서 약 0.61 MPa 정도의 인장응력을 확인할 수 있어, 구속체의 영향이 작은 외벽에 있어서도 팽창재의 적용은 인장응력의 저감에 유효한 효과를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 17에는 균열발생 기준이 되는 활렬 인장강도의 70%의 곡선($f'_T(t)$)도 더불어 나타내 보이고 있다. 전체적으로 본 검토에서 대상으로 한 외벽에서는 발생한 인장응력이 활렬인장 강도의 70%를 밑돌고 있는 것을 확인할 수 있으며, 특히, 팽창 콘크리트의 경우, 보통 콘크리트에 비해 인장응력은 저감되어 있는 것을 알 수 있어 균열발생은 크게 억제되고 있다고 생각할 수 있다.

4.5 균열조사

균열의 조사 장소를 Fig. 18에 나타내었다. 균열의 조사는 3층의 팽창 콘크리트 및 4층의 보통 콘크리트의 외벽의 A 및 B구역이며, Fig. 12의 측정 장소와는 다른 장소이다. 재령 약 2년이 경과한 시점에서 목시에 의해 균열을 조사하고 발생한 균열의 길이와 폭을 측정하여 균열 면적을 산출하였다.

균열의 조사결과, 팽창 콘크리트의 경우는 균열 폭 0.2 mm를 초과하는 유해한 레벨의 균열은 확인할 수 없었

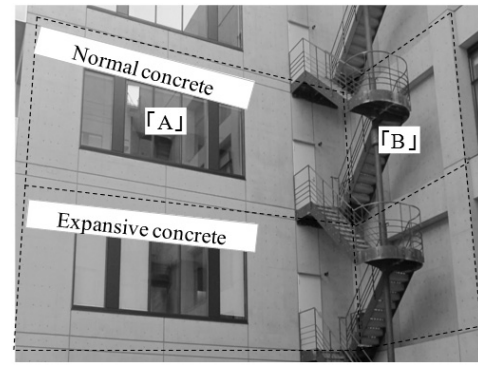


Fig. 18 Results of stress calculations

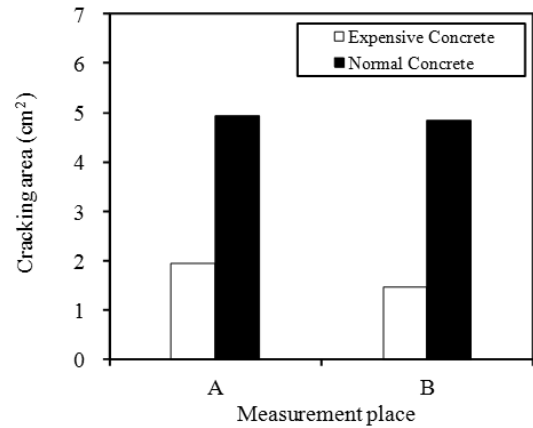


Fig. 19 Results of stress calculations

며, 0.05~0.20 mm 정도의 비교적 미세한 표면균열이 총 6군데(A : 1군데, B : 5군데) 발생한 것을 확인할 수 있었다. 한편, 보통 콘크리트의 경우는 최대 0.3 mm 이상의 균열을 포함해 총 29군데(A : 5군데, B : 24군데)의 균열이 확인되었다. Fig. 19에 균열 폭과 균열 길이로부터 요구한 균열면적의 산정결과를 나타내었다. A와 B구역의 균열면적의 합은 팽창 콘크리트의 3.42 cm²에 비해 보통 콘크리트의 균열면적의 합은 9.76 cm²이며, 팽창 콘크리트는 보통 콘크리트의 약 35%의 균열면적으로 팽창재의 균열억제 효과를 확인할 수 있었다.

한편, 4.4절로 검토한 외벽과 같이 구속조건이 완만한 개소에 있어서는 균열이 발생하지 않았지만, 특히, 문이나 창과 같은 개구부의 모서리나 단면적이 급격하게 변화하는 위치에서 주로 균열이 확인되었다. 이것은 응력 집중을 받고 있는 것이 원인으로 판단되며 이 부분에 대해서는 본 논문에서는 미 검토의 범위이며, 향후 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

수축보상형 콘크리트로서 팽창재를 적용한 콘크리트의 기본특성과 실부재에 있어서의 팽창수축거동 및 발생응력을 평가하고 균열조사를 실시해 팽창재의 균열억제 효과에 대해 검토했다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

- 1) 적용한 콘크리트의 굳지 않은 성상 및 압축강도는 요구 성능을 만족하였으며, 팽창 콘크리트의 건조수축 및 자기수축의 저감효과를 확인할 수 있었다.
- 2) 완전 구속조건 하에서 팽창 콘크리트의 응력-강도비는 보통 콘크리트에 비해 약 14~55% 정도 낮은 값으로 팽창재에 의한 인장응력의 저감효과를 확인할 수 있었다. 한편, 구속조건하에서 팽창 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교해 응력완화에 따른 변형 능력이 향상되어, 균열저항성의 향상을 기대할 수 있다고 판단된다.
- 3) 실부재로의 검토에 있어서, 구속체의 영향이 작은 외벽에 있어서도 팽창 콘크리트는 초기재령에 압축응력이 유효하게 도입되어 인장응력을 저감할 수 있다.
- 4) 장기재령에 있어서의 실부재의 균열을 평가한 결과, 팽창 콘크리트의 균열면적은 보통 콘크리트의 약 35%로 팽창재의 균열저감 효과를 확인할 수 있었다.

References

1. Architectural Institute of Japan, “Recommendations for Practice of Crack Control in Reinforced Concrete Buildings (Design and Construction)”, *AIJ*, 2006.
2. Japan Concrete Institute, “Research committee report on shrinkage of concrete”, 2010.
3. Hashida, H., Kikuchi, T., Mochida, Y., and Hirai, Y., “Evaluation for strain behaviour and stress of reinforced concrete member with expansive concrete”, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2011, Vol.33, No.1, pp.557-562.
4. Choi, H. G., Tsujino, M., Kitagaki, R., and Noguchi, T., “Expansion-Contraction Behaviors and Cracking Control Effects of Expansion Concrete in Buildings”, *The 5th International Conference of Asian Concrete Federation*, 2012, ACF2012-0096, Session3-2.
5. Hyodo, H., Tanimura, M., Fujita, H., and Banchi, S., “Influence of limestone aggregate on shrinkage properties of concrete”, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2009, Vol.31, No.1, pp.571-576.
6. JIS A 1129-2, “Methods of measurement for length change of mortar and concrete : Part 2:Method with contact-type strain gauge”, 2010.
7. Maruyama, I., Park, S. G., and Noguchi, T., “Properties of high performance concrete in early age under quasi-complete restraint condition”, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2003, Vol.25, No.1, pp.485-490.
8. Hayano, H., Maruyama, I., and Noguchi, T., “Evaluation of cracking potential of high-strength concrete induced by autogenous shrinkage under the quasi-complete restraint condition”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2008, Vol.73, No.623, pp.19-26.
9. Hashida, H., Kikuchi, T., Tsujino, M., and Tanaka, H., “Low Shrinkage Concrete with both Expansive additive and Limestone aggregates (Part3 Initial expansion force and Shrinkage Reducing Effect)”, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, 2010, pp.927-928.
10. Momose, H., and Kanda, T., “Quantitative Estimation of Drying Shrinkage Reduction Effects due to an Expansive Additive”, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, 2011, pp.1367-1373
11. Hayano, H., Maruyama, I., and Noguchi, T., “Evaluation of Cracking Potential of High-Strength Concrete due to Autogenous Shrinkage Under the Quasi-comolete Restraint Condition and Verification Using Micropore Volume”, *Taiheiyō cement kenkyū hokoku*, 2010, No.158, pp.13-21.
12. Yoneda, S., Takeda, N., Song, S., and Haga, T., “Tensile properties of concrete with low-heat cements”, *Proceedings of Annual conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 1992, Vol.47, No.5, pp.904-905.
13. Kovler, K., “Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage”, *Materials and Structures*, 1994, Vol.27, No.6, pp.324-330.
14. Park, S. G., Maruyama, I., Noguchi, T., and Gomi, H., “Stress property of expansive concrete under simulated-complete restraint test at early age”, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 2003, Vol.25, No.1, pp.191-196.
15. Shiraishi, R., Nakayama, H., Takao, N., and Gotoh, T., “Effects of type of cement, admixture and aggregate on the thermal expansion coefficient of hardened cement pastes and concretes”, *Research paper of Mitsubishi Materials Corporation Cement Research Institute*, 2010, No.11, pp.33-40.

요약 콘크리트의 균열억제 대책으로서 이용되고 있는 팽창 콘크리트를 대상으로 그 기본 특성의 파악 및 실부재료의 팽창재의 효과에 대해서 검토했다. 실내실험으로서 기본특성에 대해 검토한 결과, 팽창재의 적용에 의해 콘크리트의 건조수축 및 자기수축의 저감효과를 확인할 수 있었다. 또한, 팽창 콘크리트의 완전 구속조건 하에서의 응력-강도비는 보통 콘크리트에 비해 낮은 결과로 팽창재에 의한 인장응력의 저감효과를 확인할 수 있었다. 한편, 구속 조건하에서 팽창 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교해 응력완화에 따른 변형능력이 향상되어 균열저항성의 향상을 기대할 수 있다고 판단된다. 실부재료의 검토에 있어서, 구속체의 영향이 작은 외벽에 있어서도 팽창 콘크리트는 초기재령에 있어 팽창에 수반하는 압축응력이 유효하게 도입되어 인장응력을 저감할 수 있다. 더욱이, 장기재령에 있어서의 균열을 평가한 결과, 팽창 콘크리트의 균열면적은 보통 콘크리트의 약 35%로 팽창재의 균열저감 효과를 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 팽창재, 팽창수축거동, 균열, 완전구속실험, 구속응력