

해외 기술논문 번역 자료

생형의 수분응축층 압밀시험에서 수분 증가 방법의 차이에 따른 응력 - 변형 관계 비교

이마무라 레이 *, 오키무라 야스히코 *, 시모 코헤이 *², 마키노 히로야스 *³, 하시모토 쿠니히로 *³
가토 유스케 *³, 마츠우라 마코토 *⁴, 마에다 야스히로 *⁵, 오카네 토시미즈 *⁶
미야시타 토모유키 *⁷, 요시다 마코토 *⁷

*와세다대학 대학원 창조이공학연구과, *²와세다대학 대학원 창조이공학연구과(현:닛산자동차㈜)
*³신도공업㈜, *⁴쥬타지마경금속, *⁵다이도대학, *⁶모노즈쿠리대학, *⁷와세다대학

1. 서 언

생형 구조물 제조시 발생하는 잔류응력이나 변형이 문제가 되고 있다. 이러한 결함의 원인 중 하나로는 생형에 의한 주물 열수축의 구속이 아닐까 하는 의견이 있다. 최근에는 FEM 열 응력 분석을 사용해 결함의 발생을 예측하고 설계 단계에서 회피하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 예전부터 주형이 주물 변형에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험이 실시되어 왔다. Parkins 등은 양쪽 끝에 플랜지가 달린 막대 모양의 주물을 주조하여, 주물의 수축이 생형에 의해 방해되고 있음을 밝혔다. 이는 생형이 주물 변형에 영향을 미치고 있음을 시사하며, 변형 예측을 하기 위해서는 적절한 주형의 구성식을 이용해 형 구속을 고려할 필요가 있다고 생각된다. 그리고, 생형의 역학 특성을 조사하는 실험도 실시되어 왔다. 기존의 지반 공학 분야에서는 모래, 점토, 물로 구성된 복합 재료에 대하여 정수압 의존형 모델이 사용되어 왔으며, 생형에서도 이러한 모델이 구축되어 왔다. Katajima 등은 생형에 가하는 수직 가압력을 변량하여 침단 시험을 직접 실시해 Mohr-Coulomb 이론에서의 내부 마찰각 및 벽면 마찰각을 구했다. Saada 등은 정수압 의존형 모델 중 하나인 modified Cam Clay 구성식을 구축하기 위해 삼축압축시험과 압밀시험을 실시해 역학적 특성을 밝혔다. 한편, 생형을 이용한 주조 과정에서 금형 온도 변화에 따라 주형 내에 수분 응축층이 발생하고, 주탕 전 금형에 비해 현저하게 연약한 층이 발생한다는 사실이 알려져 있다. 따라서 Katajima 등은 수분응축층의 기본적인 역학특성을 밝히기 위해, 벤토나이트를 배합한 합성 모래를 사용하여 수분 응축층을 모방한 시험편을 제작해 일축 압축시험을 실시했다. 그 결과, Katajima 등은 수분 응축층은 주탕 전 주물 모래와 비교했을 때, 압축 강도가 약 1/10 정도가 된다고 말했다. 그리고 Schiebel 등은 인장시험을 통해 주조 과정에서 수분응축층 강도를 조사한

결과, 수분응축층에서 파단(破斷)이 발생하고, 주조 과정에서 변화되는 수분 분포 중에서 수분응축층이 가장 부드럽다는 사실을 밝혀냈다. 이상으로부터 생형의 수분응축층 역학 특성을 구성식에 포함시킬 필요가 있다고 생각된다. 그러나, 생형의 구성식을 구축한 상술한 Saada 등은 수분응축층의 역학 특성을 얻지 아니했고, Katajima 등, Schiebel 등은 수분응축층의 역학 특성만 얻고 수분응축층을 고려한 생형의 구성식은 구축하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 상술한 modified Cam Clay 구성식을 채택, 수분응축층을 고려한 역학 특성치를 얻음으로써 주조에서의 열 응력 분석을 통한 생형 모델 구성식으로서 사용하는 것을 목표로 삼았다. 모델 구축에 필요한 재료 특성치 중 일부는 압밀시험을 통해 얻을 수 있다. 이에 수분응축층의 특성값을 얻기 위해, 성형한 시험편에 포화 수증기를 유입시키는 수증기 유입 장치를 제작하였다. 이 장치를 통해 수분응축층을 재현한 시험편을 제작해 압밀시험을 실시함으로써, 압축 상태에서의 수직 방향의 응력 - 변형 관계를 얻는다. 그리고 수분응축층을 재현하는 방법으로는 상기 방법과 혼련 전 생형에 수분응축층에 상당하는 물을 미리 첨가하여 조형하는 두 가지 방법을 비교한다. 그리고 수분응축층을 재현한 방법에 따른 응력 - 변형 관계의 차이를 조사해 어느 쪽이 수분응축층의 특성값을 얻는 데 적합한 지를 검토한다.

2. 실험 방법

2.1 시험편 제작 방법

시험에 사용된 생모래의 조건은 Table 1과 같다. 벤토나이트를 배합한 규사에 물을 더해 충분히 혼련한 후, 컴팩터빌리티(CB value)를 38%로 했다. 이후, CB값이라고 하겠다. 압밀시험에 사용되는 시험편 제작 방법의 차이에 따라 취득되는 역학 특성 차이를 조사하기 위해, Fig. 1의 두 가지 플로우에 따라 시험편을 제작했다. Katajima 등은 수증기를 투과시킨

¹일본주조공학회지 95권 1호 (2023) page 30-33에 게재된 자료임.

Table 1. Properties of green sand mold test piece.
생형 시험편의 모래 특성.

Height (mm)	Diameter (mm)	Moisture (mass%)	Total bentonite (mass%)	Active bentonite (mass%)	Compactability (%)	Compressive strength (N/cm ²)
50	50	3.2	10.8	7.6	38	25

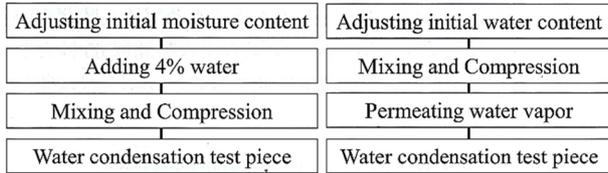


Fig. 1. Flowchart for test piece preparation method.
시험편 제조 방법의 흐름도.

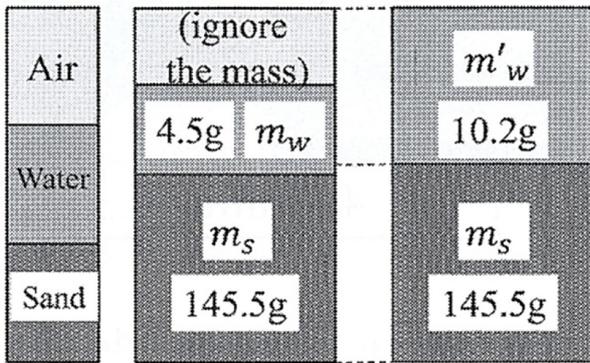


Fig. 2. Components in green sand mold and water condensation zone.
생형 및 수분응축층에 포함된 성분 분포.

시험편은 초기 수분량에 대하여 약 4% 수분량이 증가한다고 했다. 본 연구에 사용되는 CB값 38%의 생모래에는 약 3%의 수분이 포함되어 있어, 이 생모래로 주조를 실시할 경우, 수분 응축층의 수분량은 약 7%가 될 것으로 보인다. 따라서, 어느 방법을 사용해도 수분량 7%가 되도록 수분응축층을 재현한 시험편을 제작했다.

Fig. 2는 생형에 포함된 성분을 나타낸 그림이다. (a)는 주탕 전의 생형을 나타내며, 주탕 후 수분이 이동하여 공기가 물로 대체됨으로써 수분응축층의 상태인 (b)로 변화한다. 그러나 주조 과정에서 모래 골격은 변동이 없고 간극에 포함되는 공기 및 물 만이 주형 내에서 이동하기 때문에, 모래(벤토나이트 포함)의 부피와 그 외의 것들의 부피를 비교한 간극비는 변하지 않는다. 따라서 두 종류의 시험 제작에 있어 간극비를 통일시켰다.

$$m'_w = w(\%) * m'_s$$

$$M = m'_w + m'_s$$

$$\Delta m_w = m'_w - m_w$$

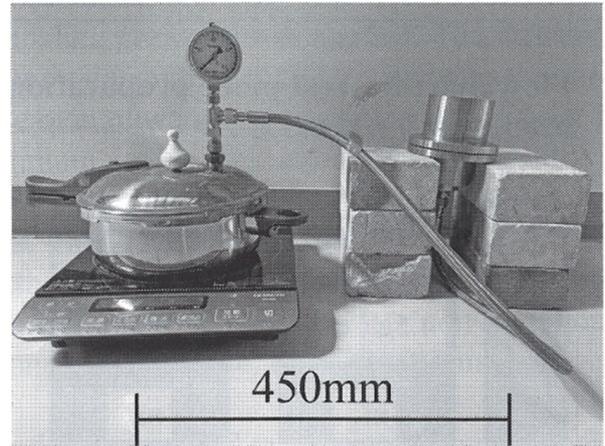


Fig. 3. Photograph of fabricated device that can permeate water vapor.
수증기 유입 장치 사진.

수분응축층을 재현한 시험편 질량은 M , m_s 는 분말의 질량 (145g), Δm_w 는 수분 증가량의 질량, m_w 는 주탕 전 시험편에서의 수분 질량(4.5g), m'_w 는 수분응축층을 재현한 시험편의 수분 질량이다. 그리고 $w(\%)$ 는 수분(7.0%)을 나타낸다. 이를 통해 두 방법 모두 수분 증가량의 질량 Δm_w 을 생형 시험편에 첨가하여 질량을 측정함으로써 수분량을 통일시켰다.

2.1.1 수증기를 투과시켜 시험편을 제작하는 방법

상술한 혼련 후 모래 150g에 대해 압밀 금속틀에 채워 넣고 가압력 1.2 MPa를 30초간 가하여 예비 압착한 후, Ø 50 × 50 mm의 원기둥 형상으로 성형했다. 이 시험편 치수는 주물 모래의 시험 방법을 규정한 JIS 규격(JISZ2601)에 준거했다. Katajima 등의 실험을 참고하여 개발한 수증기 유입장치(Fig. 3)를 통해 상술한 시험편을 압밀 금속틀 채로 수증기 유입장치에 장착시켜 수증기를 통과시킨다. 수증기 유입 전 모래 질량(150g)에 대하여 유입후 수분량이 7%가 되도록 수증기 유입 시간을 결정할 예비 시험을 실시하여, 수증기 유입시간을 65초로 했다. 또한, 금속틀 벽면이 응축되지 않도록, 압밀 금속틀은 단열재로 덮었다.

2.1.2 혼련 시 물을 첨가해 시험편을 제작하는 방법

CB값 38%인 모래에 부족분인 4%의 물을 첨가해 충분히 혼련시켰다. 그 후, 압밀 금속틀에 채워 넣고 가압력을 변량하

는 예비 시험을 실시했다. 시험편 높이가 50 ± 1 mm가 되도록 적절한 가압력을 확인한 후, 0.17 MPa로 결정했다. 이는 통상적인 생형의 2배를 넘는 수분을 첨가함으로써 벤토나이트가 점결력을 잃고 유동성이 높은 상태가 되었기 때문으로 보인다. 그리고 이 가압력은 2.1절에 기재한 바와 같이 간극비를 통일시키기 위해 설정한 가압력으로, 실제 생형 조형에서 실시되는 압축과는 무관하다. 따라서 이 0.17 MPa를 앞으로 “편의적인 가압력”이라고 표현하겠다. 그 후, 수증기를 유입시킨 시험편과 마찬가지로, 30초간 예비 압밀을 실시해 시험편을 제작했다.

2.2 압밀시험 방법

압밀시험은 제작한 모래 시험편을 압밀 금속틀에 채운 상태로 Fig. 4의 압축 시험 장치에 설치하여 실시했다. 시험 조건은 Ueno 등에 의한 주물 변형에 생형이 미치는 영향을 조사한 주조 실험을 참고하여, 사형(모래 형) 안에서 발생하는 수직 응력을 고려하여 결정했다. 주조 실험에 있어 주물의 플랜지부에 대해 사형이 미치는 반력은 최대 약 0.3 MPa이므로, 0.3 MPa 부근에서 특성값을 얻을 수 있게끔 했다. 기존 연구에서 Cam-Clay 구성식 구축을 위한 다양한 응력 설정으로 압축 시험을 실시된 바 있다. Dai 등은 해양 점토를 대상으로 압밀시험을 ①재하(0→0.6MPa), ②제하(0.6→0MPa), ③재재하(0→0.9MPa)의 과정으로 실시하여 특성값을 얻었다. 위 시험 조건으로는 0.3MPa를 포함하는 범위에서 특성값을 구할 수 있기 때문에, 본 연구에서도 Dai 등의 시험 조건에 따라 압밀시험을 실시했다. 그리고, 지반 공학에서는 「압밀 항복 응력은 그 분체가 과거에 받은 최대의 응력이다」라는 지견이 있는데, 수증기를 유입시킨 시험편은 위 응력 범위에 시험편 성형시 응력(1.2 MPa)이 포함되지 않기 때문에, Dai들의 응력 범위에 추가적으로 2.0 MPa로 2회차 재하를 실시하고, 2.5 MPa까지 재재하를 실시한다.



Fig. 4. Photo of consolidation testing machine. 압밀시험기기 사진.

3. 압밀시험 결과

Fig. 5는 압밀시험으로 얻은 응력 - 변형률 선도를 나타낸다. 혼련 시 물을 첨가한 경우에 명확한 항복이 관찰되었다. 이는 상술한 지반공학의 지견에 따라 과거에 받은 최대의 응력(시험편 성형시의 가압력)이 0.17 MPa이었기 때문에 해당 부근에서 항복한 것으로 추찰된다. 그러나 상술한 바와 같이, 0.17 MPa는 시험편의 간극비를 통일하기 위해 마련한 편의적인 값으로, 생형에 있어 수분 응축층은 0.17 MPa로 압착(squeeze)되는 경우는 없으며, 실제 생형 조형과는 무관한 응력이다. 따라서 혼련 전에 물을 첨가하는 시험편 제작 방법은 실제 수분응축층의 역학 거동을 재현할 수 없다고 볼 수 있다. 그리고, 수증기를 유입시킨 경우에서는 1.2 MPa로 성형하였는데, 그렇게까지 가압을 해도 항복점은 보이지 않았다. 이러한 점으로부터, 수분응축층은 상술한 지반공학의 지견에 따르지 않는 역학 거동을 나타낼 가능성이 있다고 생각된다. 또, 혼련 시 물을 첨가한 경우보다도 성형 후 수증기를 유입시킨 쪽이 동일한 압축응력을 부여했을 때 발생하는 변형량이 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 점으로부터, 혼련 시 물을 첨가한 경우에 보이는 항복 응력분만큼 수증기를 유입시킨 경우 쪽이 더 부드러워진다고 생각된다.

두개의 시험편 제작에 있어 가압력이 서로 다른데, 이는 상술한 간극비를 통일시켰기 때문에 발생한 현상이다. 모래 중량이 같고 가압력을 통일하면 제작되는 간극비 및 시험편의 높이가 달라진다. 그리고, 시험편 높이와 가압력을 통일하면 모래 중량을 변량할 필요가 있고 매개변수가 중복되어 버린다. 본 연구에서는 주조 과정에 있어 생형의 간극비는 불변한다는 관점으

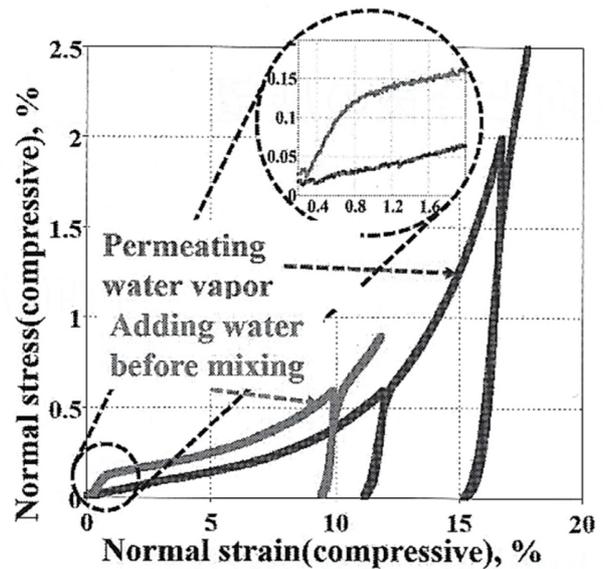


Fig. 5. Stress-strain curve of consolidation test. 압밀시험의 시험결과.

로, 상술한 조건에서 비교를 실시했다. 결과적으로, 압밀시험에서 수분응축층의 역학 특성을 얻을 때에는, 혼련 전에 물을 첨가시키는 방법은 성형시 간극비를 통일시키기 위해 편의적으로 설정한 가압력이라고 하는, 실제 주조 과정과 무관한 응력에서 항복 거동을 볼 수 있기 때문에, 적합하지 않은 것으로 생각되었다. 따라서, 수분응축층의 역학 거동을 얻기 위해서는 수증기를 유입시키는 후자의 방법을 사용해야 한다는 것을 알게 되었다. 또한 반드시 항복을 나타내는 Cam Clay 모델을 사용하여 수분응축층을 표현하는 것은 어렵다는 점이 시사되었다.

4. 결 언

생형 주조 과정에서 발생하는 수분응축층의 역학적 거동을 조사하기 위해 압밀시험을 실시했다. 그리고 수분응축층의 재현 방법의 차이에 따른 역학 거동 차이를 확인한 결과, 수증기를 유입시키는 방법이 혼련 전에 물을 첨가하는 방법보다 더 부드러운 거동을 알게 되었다. 물을 첨가한 경우는 실제 생형 조형과는 무관계한 응력인 시험편 성형시 가압력 부근에서 항복 거동이

관찰되었고, 수증기를 유입시킨 경우는 해당 부근에서 항복 거동이 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 수분응축층의 압밀 거동을 얻기 위해서는 혼련 전에 미리 수분 증기분의 물을 첨가한 후 성형하는 방법이 아니라, 성형된 시험편에 수증기를 투과시켜 시험하는 방법이 적절하다는 것을 알게 있었다.

참고문헌

- 1) R. N. Parkins and A. Cowan: Proc. Inst. British Found., no. **1062** (1953), A101-109
- 2) Y. Motoyama, H. Takahashi, Y. Inoue, K. Shinji, and M. Yoshida: J. Mater. Process. Technol., **213** (2013) 238-244
- 3) S. Katashima and M. Matsuura: IMONO **49** (1997) 665-670
- 4) R. A. Saada, G. Bonnet, and D. Bouvard: Inst. J. Plast., **12** (1996) 273-294
- 5) S. Katashima and M. Matsuura: IMONO **47** (1975) 260-265
- 6) K. Schiebel, G. Jordan, A. Kaestner, B. Schilinger, S. Boehnke, and W. Schmahl: Transp. Porous Media, **121** (2018) 369-387
- 7) Z. Dai and Z. Qin: J. Cent. South Univ., **20** (2013) 3305-3313