

자기충전 콘크리트의 거푸집 측압 예측 모델 개발

Development of a Prediction Model for Formwork Pressure Exerted by Self-Compacting Concrete

권 승 희*

Kwon, Seung Hee

ABSTRACT

This study is underway to develop a prediction model for formwork pressure exerted by self-compacting concrete(SCC). Three major mechanisms related to formwork evolution over time were found, and mathematical modelling of each mechanism was made. A calculation method for real formwork pressure by using the mathematical formulae was also established. To verify predictive capability of the prediction model, a parametric study on parameters used in the model was performed. It was confirmed that the proposed model include the essential parameters that can simulate the real formwork pressure evolution over time.

요 약

자기충전 콘크리트의 거푸집 측압에 대한 예측 모델 개발을 목표로 연구를 진행 중에 있다. 현재까지 거푸집 측압의 발현과 시간에 따른 변화를 일으키는 세 가지 메커니즘으로 고체입자의 재배열, 자유수의 이동 제한, 거푸집 변형의 회복지연을 제안하였고, 이들 각각에 대한 수학적 모델링이 이루어졌다. 이를 바탕으로 실제 거푸집 측압의 계산 방법을 개발하고, 모델에 사용된 변수에 대한 parametric study를 통해 예측모델의 성능(predictive capability)을 검증하였다. 그 결과 예측 모델이 포함하고 있는 변수들을 통해 실제의 측압 거동을 충분히 반영할 수 있다는 것을 확인하였다.

* 정희원, 명지대학교, 토목환경공학과, 조교수

1. 서론

타설 시간 단축, 타설고 증가, 필요노동력의 감소로 인한 공사비 절감효과가 확인되면서 자기충전 콘크리트의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 고유동성으로 인해 거푸집 측압의 크기가 일반 콘크리트에 비해 크고 측압의 소멸기간이 길어, 거푸집 붕괴에 대한 위험이 높고 공사기간에 직접적으로 연관되는 거푸집의 존치기간이 길어질 수 있다는 단점이 최근 대두되고 있다.

이러한 문제 인식 하에 거푸집 측압의 크기와 소멸기간을 저감시키는 연구의 일환으로, 자기충전 콘크리트의 거푸집 측압에 대한 예측 모델을 개발 중에 있다. 이 논문에서는 현재까지의 연구결과를 간략히 정리하고자 한다.

2. 거푸집 측압의 메커니즘과 모델링

2.1 고체 입자의 재배열(Rearrangement of Solid Particles)

콘크리트 타설 직후 거푸집에 작용하는 횡방향 압력(σ_l)의 크기는 자중에 의한 수직응력(σ_v)과 거의 같다. 시간이 지남에 따라 시멘트 페이스트 내부의 고체 입자들 사이에 재배열이 일어나고, 입자들 사이가 서로 연결되면서 외부에서 가해지는 응력에 대한 지내력이 증가하게 된다. 따라서 타설 직후 수직응력이 가해지면 이에 의한 거푸집 측압은 수직응력과 같으나, 시간이 지남에 따라 수직응력의 증가에 대해 측압이 반응하는 크기가 점점 줄어들게 된다. 그림 1은 초기 콘크리트에 시간을 달리하여 수직 응력이 가해졌을 때 측압의 반응을 보여주고 있으며, $\beta(t)$ 는 시간에 따른 수직 응력과 측압의 비를 나타내는 함수이다.

2.2 자유수의 이동 제한(Restriction of Free Water Movement)

타설 후 입자들 사이를 자유롭게 이동할 수 있는 자유수(free water)는 시멘트 입자에 의해 포획되고 이후 수화반응으로 줄어들게 된다. 따라서 재료 내 수분이 지탱하고 있던 수직응력이 점진적으로 고체에 전달되어, 고체가 받는 응력은 증가하게 된다. 이로 인해 측압 또한 시간에 따라 서서히 감소하게 된다. 그림 2는 이러한 측압의 거동과 점진적 변화를 나타내는 함수 $U_p(t, t')$ 를 나타낸 것이다. $U_p(t, t')$ 는 하중이 가해지는 시점의 측압에 대한 시간에 따라 감소하는 측압의 비로 $U_p = 1$ 은 측압이 소멸한다는 것을 의미한다.

2.3 거푸집 변형의 회복 지연(Delayed Recovery of Formwork)

거푸집 자체의 변형 또한 거푸집 측압에 영향을 미친다(그림 3). 타설 직후 측압이 최고점에 이르며, 거푸집 또한 변형이 발생한다. 이후 측압이 시간에 따라 감소하면서 거푸집의 변형도 원래의 위치로 돌아가게 되는데, 시간이 지남에 따라 내부의 콘크리트가 경화되어 가기 때문에 거푸집 변형의 회복이 내부 콘크리트의 점성(viscosity)으로 인해 지연될 수 있다.

3. 거푸집 측압의 계산

거푸집 내 임의의 위치에 작용하는 수직응력은 타설이 진행되면서 증가하게 되고, 이 수직응력의 증가는 그림 4(a)와 같이 단계별 응력 증가로 묘사할 수 있다. 수직응력이 가해지는 시점에 따라 이에 대응하는 횡방향 응력, 즉 거푸집 측압이 변화하며 이는 고체 입자의 재배열에 대한 함수 $\beta(t)$ 로 설명할 수 있다. 또 점진적인 측압의 변화는 자유수 이동의 제한을 표현한 함수 $U_p(t, t')$ 로 계산된다. 이 두 개의 함수로 그림 4(b)와 같이 거푸집 측압을 계산할 수 있으며, 거푸집 변형의 회복 지연 현상은 거푸집의 형상과 재질에 따라 달라지는 것으로 그림 4에는 나타내지 않았다.

4. 모델의 예측 성능(Predictive Capability)

위에서 제시된 예측 모델이 실제의 측압 거동을 정확히 반영할 수 있는가에 대해 평가해 보기 위해 함수 $\beta(t)$ 와 $U_p(t, t')$ 에 사용된 변수들에 대해 parametric study를 수행하였다. 기존의 실험결과¹를 최적의 모사하는 변수를 찾고, 이 값들을 변화시키면서 각 변수들이 일정 범위에서 변동할 때 측압의 거동이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 그림 5는 기존의 실험결과와 이를 최적적으로 모사하는 계산결과이다. 표 1은 parametric study에 사용된 각 변수의 변동 값이고, 굵게 나타낸 값이 그림 5의 최적화로부터 얻은 값이다. γ 는 타설속도를 의미한다.

parametric study 결과 각각의 변수가 일정 범위 내에서 변화할 때 시간에 따른 측압 변화 곡선

의 특정 부분이 수직 또는 수평방향으로 움직인다는 것을 알 수 있었다. 그림 6은 각 변수가 측압 곡선에 어떻게 영향을 미치는지를 나타낸 것이다. 검정색 실선이 전형적인 측압의 시간에 따른 변화 곡선으로, 각 변수가 곡선의 모양을 결정하는 주요 부분에서 곡선을 수직 또는 수평방향으로 움직이게 한다는 것을 알 수 있다. 또한 변수들 사이에 중첩되는 효과는 없는 것으로 나타났다. 따라서 이들 변수를 제어하여 임의의 모양을 갖는 측압 곡선을 만들 수 있으며, 이것은 각 변수가 측압에 미치는 여러 영향 인자들을 고려해 정확히 결정된다면 이를 통해 실제의 측압을 정확히 예측할 수 있음을 의미한다. 또한 이 연구에서 고려하지 않은 거꾸집 변형의 회복 지연(viscosity, $\eta(t)$)에 따라서는 전체적인 측압 곡선이 횡방향으로 움직일 것으로 예상된다.

5. 결론

이 연구를 통해 예측 모델이 포함하고 있는 변수들로서 실제의 측압 거동을 충분히 반영할 수 있다는 것을 확인하였다. 앞으로 자기충진 콘크리트에 대해 여러 영향인자들을 고려한 실험을 실시하고 이를 통해 현재 개발된 모델의 교정(calibration)과 정확성에 대한 검증이 이루어질 것이다.

참고문헌

1. Amedeo Gregori, Raissa P. Ferron, Zihui Sun, and Surendra P. Shah, Experimental simulation of self-consolidating concrete formwork pressure, ACI Materials Journal, Vol. 105, No.1, 2008, pp. 97-104.
2. Seung Hee Kwon, Raissa P. Ferron, and Surendra P. Shah, Development of a Prediction Model for SCC Formwork pressure, Concrete Technology 2007, Dallas, Texas, U.S.A., 2007.

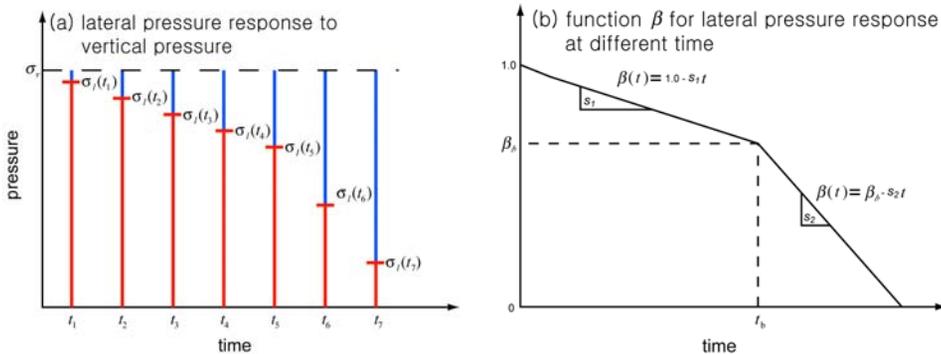


그림1 고체입자의 재배열(Rearrangement of Solid Particles)

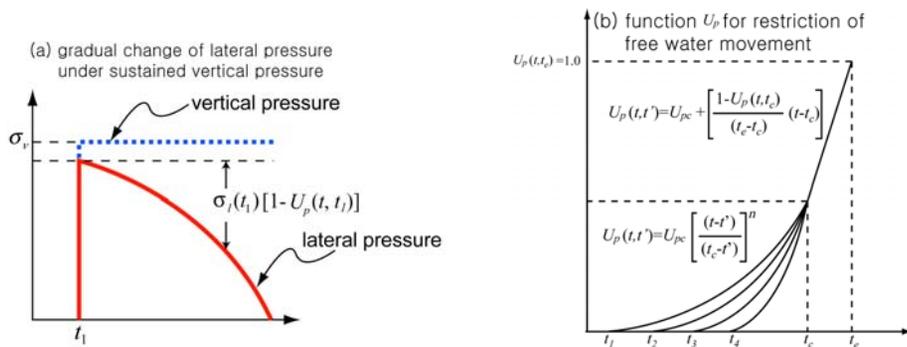


그림2 자유수의 이동 제한(Restriction of Free Water Movement)

(a) delayed recovery of deformable formwork

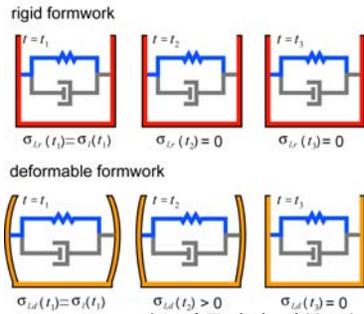
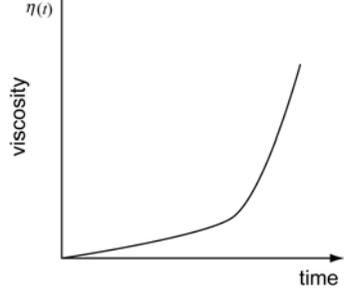
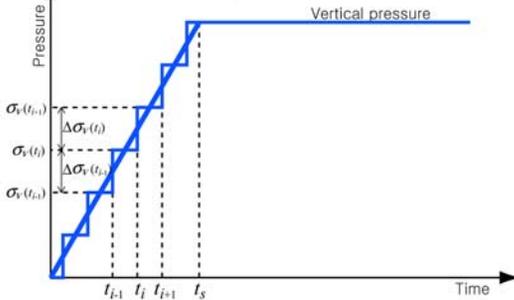


그림3 거푸집의 회복 지연(Delayed Recovery of Formwork)

(b) variation of viscosity over time



(a) stepwise loading for vertical pressure



(b) calculation method of lateral pressure

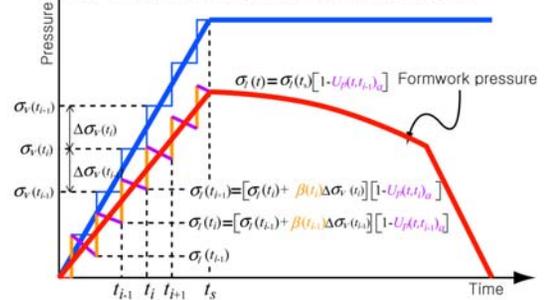


그림4 거푸집 측압의 계산 방법

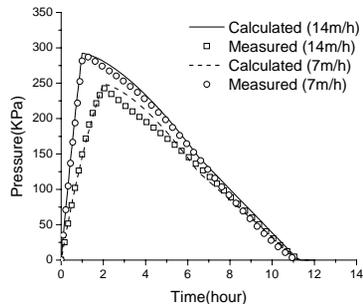


그림5 측압의 측정값과 계산값 비교

표1. Parametric study에 사용된 변수값

$U_p(t, t')$				β	γ
U_{pc}	t_c	t_e	n		
0.3	4.0	8.25	1.0	0.10	3.5
0.5	6.5	11.25	1.5	0.25	7.0
0.8	8.0	14.25	2.0	0.40	14.0

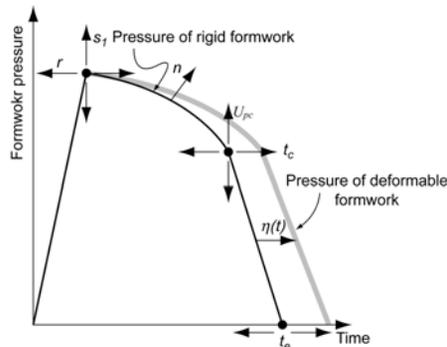


그림6 각 변수가 거푸집 측압의 시간에 따른 변화에 미치는 영향