

# 연속철근 콘크리트 궤도의 슬래브 응력 예측식 개발

## Development of Slab Stress Prediction Equation for Continuously Reinforced Concrete Track

조영교\*, 김성민\*<sup>†</sup>, 이영훈\*, 문수환\*, 박범근\*

Young Kyo Cho\*, Seong-Min Kim\*<sup>†</sup>, Young Hoon Lee\*, Soo Hwan Moon\*, Beom Keun Park\*

**Abstract** In this study, a stress prediction equation for continuously reinforced concrete track (CRCT) under environmental and train loads was developed. Independent variables for the equation were determined by performing sensitivity analyses of CRCT. A number of analyses were conducted by changing the values of the determined independent variables. Six stress prediction models were used to determine the stress prediction equation. The stress prediction equation was finally determined and verified by performing multiple regression analyses of the stresses obtained from the numerical analyses of CRCT.

**Keywords** : Continuously reinforced concrete track, Stress prediction equation, Regression analysis, Finite element analysis

**초 록** 본 연구에서는 열차하중과 환경하중을 받는 연속철근 콘크리트 궤도(CRCT) 응력에 예측식을 개발하였다. 3차원 CRCT 구조해석을 통한 인자별 영향 분석으로 응력예측식에 사용되는 독립변수를 결정하였고, 결정된 독립변수의 변화에 따른 수많은 경우의 구조해석을 수행하였다. 응력예측식 결정을 위하여 사용된 예측 모델은 다항식의 합, 다항식의 곱 그리고 로그형태의 모델로 총 6개의 예측 모델에 대한 분석이 수행되었으며, 구조해석을 통해 도출된 응력에 대한 다중회귀분석을 통하여 응력예측식의 결정 및 검증을 수행하였다.

**주요어** : 연속철근 콘크리트 궤도, 응력예측식, 회귀분석, 유한요소해석

### 1. 서 론

연속철근 콘크리트 궤도(CRCT: Continuously Reinforced Concrete Track)는 별도의 줄눈 없이 연속적으로 슬래브가 설치되며, 자연적으로 발생하는 횡방향 균열을 허용하는 궤도 형식이다. 본 연구에서는 이러한 CRCT의 응력예측식을 개발하기 위하여 구조해석을 통해 도출된 환경 및 열차하중에 의한 CRCT의 응력을 통계적 방법을 통하여 CRCT의 환경 및 열차하중에 의한 응력예측식을 개발하고자 하였으며, 이를 통해 CRCT의 분석 및 설계 시 쉽고 간편하게 CRCT의 응력을 산출할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

<sup>†</sup> 교신저자: 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과(seongmin@khu.ac.kr)

\* 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과

## 2. CRCT 구조해석 모델 개발

응력예측식의 개발은 다양한 설계조건 별 3차원 CRCT 구조해석을 통하여 설계값 변화에 따른 각 응력을 산출하고 이러한 응력에 대한 회귀분석을 통하여 응력예측식을 개발하고자 하였다. CRCT의 환경하중 및 열차하중에 따른 응력예측식 개발을 위한 3차원 해석 모델을 유한요소해석 프로그램을 사용하여 구성하였다. 콘크리트 슬래브, 철근, HSB(Hydraulically Stabilized Basecourse)의 요소는 고체요소(Solid Element)가 사용되었으며, 철근과 콘크리트는 완전 부착으로 가정하여 모사하였다. HSB의 하부지지층은 탄성지반으로 모델링하였고 슬래브와 HSB 간의 마찰저항도 고려하여 모델링하였다. 종방향 길이는 9.1m로 종방향, 횡방향 대칭모델을 사용하였으며, 철근은 1단 철근배근으로 철근비는 0.89%이다. 균열부는 접촉(Contact) 조건으로 모사하였고, 수직 방향(Normal Behavior)으로는 Hard Contact, 골재맞물림 효과는 고려되지 않았다. 이러한 해석 모형에 대한 개념을 Fig. 1에 나타내었다.

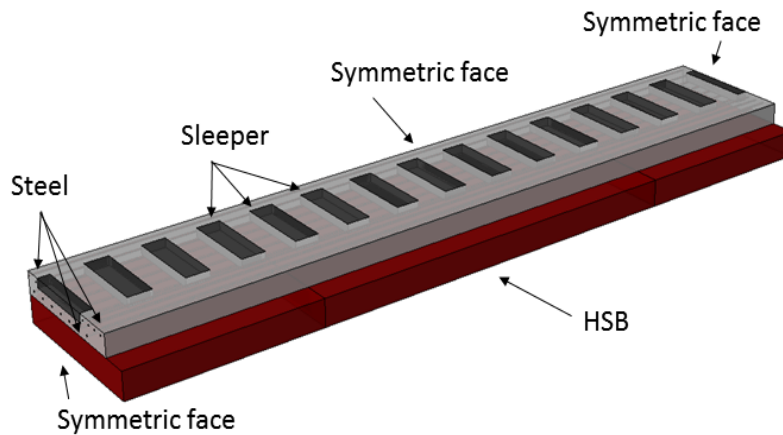


Fig. 1 Configuration of CRCT Model

CRCT의 거동을 위한 해석 입력값을 Table 1에 나타내었으며, 열차하중은 KRL-2012 표준열차하중을 사용하였다.

Table 1 Material properties

Elastic modulus of CRCT (GPa)	33.6
Elastic modulus of HSB (GPa)	28.4
Elastic modulus of steel bar (GPa)	200
Thermal expansion coefficient ( $1/^\circ\text{C}$ )	0.00001
Steel bar diameter	D22
Steel ratio (%)	0.89
Temperature drop ( $^\circ\text{C}$ )	20
Temperature gradient ( $^\circ\text{C}/\text{cm}$ )	0.4

Fig. 2와 Fig. 3은 기본 모델에 대한 분석을 나타낸 것으로, Fig. 2는 슬래브 종방향 위치에 따른 주응력을 나타내었다. 주응력은 최대 약 0.91MPa로 그림에는 나타나지 않았지만 주응력은 횡방향응력과 유사하며, 이는 차량하중에 의한 응력은 종방향응력보다 횡방향응력이 지배적임을 의미한다. Fig. 3은 종방향 위치에 따른 슬래브 처짐을 나타내었다. 최대 처짐은 하중이 작용하는 위치가 아닌 2축 집중하중의 중앙부인 대칭부에서 최대 처짐이 발생하는 것을 알 수 있다. 집중하중에 의한 처짐은 약 6m까지 영향을 미치며, 6m 이후의 위치에서도 분포하중과 자중에 의하여 처짐이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

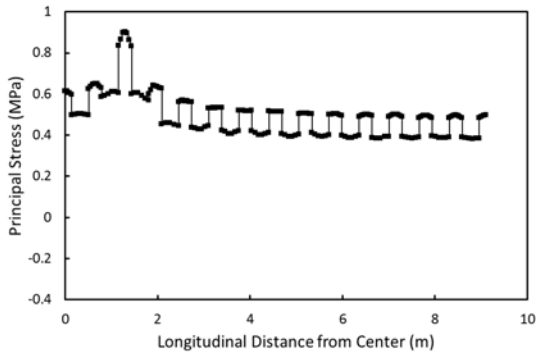


Fig. 2 Principal Stress

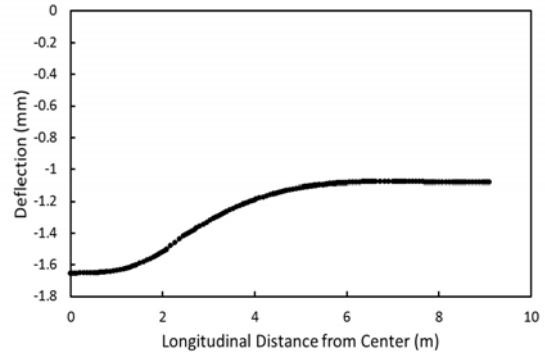


Fig. 3 Deflection

### 3. 응력예측식 개발

3차원 CRCT 구조해석 모델을 통한 인자별 영향 분석으로 응력예측식에 사용되는 독립변수를 결정하였고, CRCT의 응력은 열차하중에 의한 영향이 지배적으로 나타났기 때문에, 응력 예측식에서는 환경하중과 관련된 열팽창계수, 온도하강에 대한 영향은 고려하지 않았다. Table 2는 응력 예측식 개발에 사용된 해석 인자 및 범위를 나타내었다.

Table 2 Design variables

	-20%	-10%	Default	+10%	+20%
<b>Modulus of elasticity (GPa)</b>	26.88	30.24	33.6	36.96	40.32
<b>Steel ratio (%)</b>	0.0071	0.0080	0.0089	0.0098	0.0107
<b>Slab thickness (m)</b>	0.192	0.216	0.24	0.264	0.288
<b>HSB thickness (m)</b>	0.24	0.27	0.3	0.33	0.36
<b>Stiffness of underlying layer (N/mm)</b>	16000000	18000000	20000000	22000000	24000000

응력 예측에 사용된 모델은 다음과 같은 비선형 회귀분석인 다항식의 합, 다항식의 곱, 로그 형태의 모델을 사용하였으며 그 내용은 다음과 같다.

Table 3 Prediction models

Model - 1	$\sigma = a1 + a2 \cdot E + a3 \cdot SR + a4 \cdot ST + a5 \cdot HT + a6 \cdot F$
Model - 2	$\sigma = a1 + a2 \cdot E^{a3} + a4 \cdot SR^{a5} + a6 \cdot ST^{a7} + a8 \cdot HT^{a9} + a10 \cdot F^{a11}$
Model - 3	$\sigma = a1 + a2 \cdot E^{a3} \cdot SR^{a4} \cdot ST^{a5} \cdot HT^{a6} \cdot F^{a7}$
Model - 4	$\ln(\sigma) = a1 + a2 \cdot \ln(E) + a3 \cdot \ln(SR) + a4 \cdot \ln(ST) + a5 \cdot \ln(HT) + a6 \cdot \ln(F)$
Model - 5	$\ln(\sigma) = a1 + a2 \cdot E + a3 \cdot SR + a4 \cdot ST + a5 \cdot HT + a6 \cdot F$
Model - 6	$\ln(\sigma) = a1 + a2 \cdot E^{a3} + a4 \cdot SR^{a5} + a6 \cdot ST^{a7} + a8 \cdot HT^{a9} + a10 \cdot F^{a11}$

여기서,

- $\sigma$  : 슬래브 응력 (MPa)
- $E$  : 탄성계수 (GPa)
- $SR$  : 철근비 (%)
- $ST$  : 슬래브 두께 (m)
- $HT$  : HSB 두께 (m)
- $F$  : 지반지지력 (N/mm)
- $a1, a2, a3, a4, a5, a6...$  : 계수

인자별 영향 분석을 통해 결정된 독립변수의 변화에 따른 수많은 경우의 구조해석을 수행하였다. 이를 통해 산출된 콘크리트의 최대응력을 종속변수로 각 독립변수에 대한 회귀분석을 수행하였다. Table 3는 회귀분석을 통해 도출된 응력 예측 모델의 상수를 나타내었다. Model-3의 수정된 결정계수(R2)가 0.988로 가장 높으며, Model-1이 가장 낮은 것을 알 수 있다.

Table 3 Coefficient of stress prediction models

	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4	Model-5	Model-6
a1	2.208	-40.389	.151	-4.403	-3.115	1.280
a2	.016	-311.655	.005	.565	.545	.017
a3	-.054	-2.027	.670	-.041	-.046	-.049
a4	-3.220	14.882	-.045	-.820	-.766	-3.464
a5	-3.215	-.003	-.980	-1.032	-.961	-3.469
a6	-.002	.943	-1.235	-.039	-.049	-.002
a7		-.434	-.060			
a8		.054				
a9		-1.839				
a10		24.557				
a11		-.002				

adj - R <sup>2</sup>	0.955	0.971	0.988	0.987	0.964	0.985
----------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fig. 4는 모델 별 해석값과 예측식의 오차에 대한 히스토그램과 정규분포를 나타내었다. Model-2는 해석값과 가장 유사한 예측값의 분포는 가장 많지만  $\pm 100\text{kPa}$  이상의 오차 또한 존재하여 Model-3, Model-4와 비교하여 표준오차가 크음을 알 수 있다.

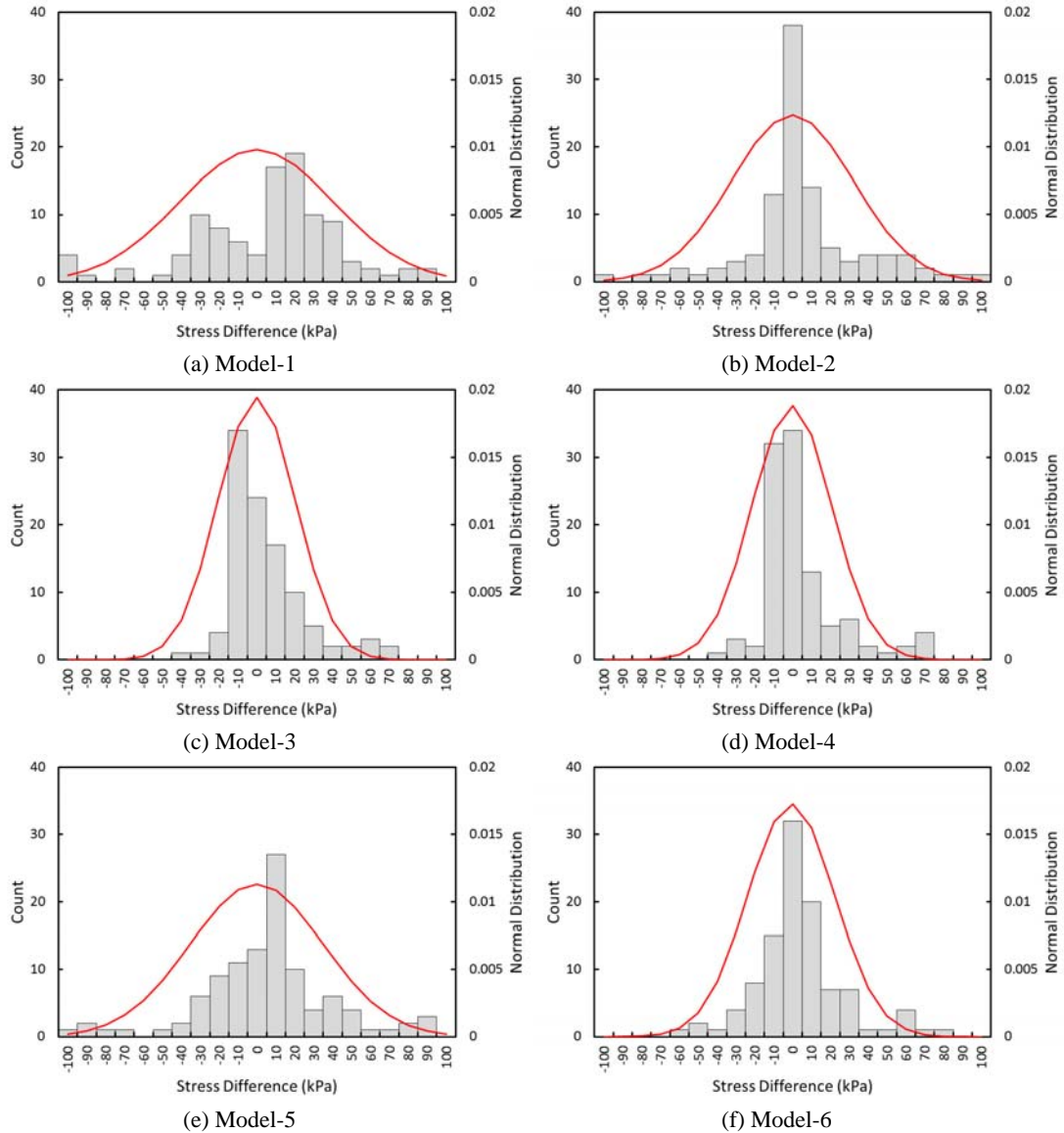


Fig. 4 Prediction model error analysis

6개의 응력예측식의 분석 결과 Model-4가 가장 정확한 해석값과 가장 유사한 값을 도출하였으며, 가장 극단적인 상태에서도 예측이 비교적 정확한 것으로 나타났다. 또한 정규분포에서도 오차가 작은 것으로 나타남에 따라 CRCT 응력 예측식은 Model-4를 사용하는 것으로 결정하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\ln(\sigma) = -4.4032 + 0.56551 \cdot \ln(E) - 0.0409 \cdot \ln(SR) - 0.8197 \cdot \ln(ST) - 1.0316 \cdot \ln(HT) - 0.0387 \cdot \ln(F)$$
$$R^2 = 0.987$$

#### 4. 결 론

본 연구에서는 열차하중 및 환경하중을 받는 연속철근 콘크리트 궤도의 거동을 분석하여 콘크리트 궤도 응력예측식을 제안하였다. 본 연구를 통하여 도출된 연구내용은 다음과 같다.

- 열차 및 환경하중에 의한 인자 영향 분석으로 CRCT 응력예측식의 독립변수를 결정하였으며, 분석 결과 환경하중과 관련된 철근비, 열팽창계수, 온도하강은 인자 변화에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 철근비의 경우 열팽창계수와 온도하강과 비교하여 인자 변화에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다.
- 열차 및 환경하중에 의한 인자 영향 분석을 통하여 CRCT 응력예측식의 독립변수를 결정하였으며, 이는 탄성계수, 철근비, 슬래브두께, HSB두께, 지반지지력이다.
- 응력예측식 결정을 위하여 사용된 예측 모델은 다항식의 합, 다항식의 곱 그리고 로그형태의 모델로 총 6개의 예측 모델에 대한 분석을 수행하였다.
- 구조해석을 통해 도출된 응력에 대한 다중회귀분석을 통하여 예측식의 결정 및 검증을 수행하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호: 17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.