

토피가 큰 콘크리트 지하구조물의 기둥에 대한 시간의존적해석

Time dependent Analysis of RC Column in Subway Structure having high Filled Soil Layer

정재평*
Jeong, Jae Pyoung

이상희**
Lee, Sang Hee

김생빈***
Kim, Saeng Bin

김우****
Kim, Woo

ABSTRACT

This study was performed to examine the effect of time dependent properties on RC columns in subway structures subjected to high filled soil layer. By using Program TCC which is a modified version of CPF for the present purpose, a typical column in subway structure was analyzed. Four different model equations for predicted time dependent concrete properties(ACI, CEB-FIP, Bazant & Panula and Korea Bridge Specification) was employed, and the results were compared. It was found that a relevant creep coefficient is recommended to be 1.0 for designing columns in subway structure, and the soil filling work would be performed at least 3 months later after the concrete casting in order to ensure durability by reducing the negative effect of concrete time dependent properties.

1.개요

기둥 부재의 경우 콘크리트의 크리프(creep)로 인해 시간의 경과와 함께 콘크리트의 응력은 점차로 감소하는 반면 철근의 응력은 상당한 크기로 증가한다. 특히, 토피가 큰 도시 지하철구조물의 경우는 철근의 시간 의존적 응력 변화 예측이 매우 중요하다. 지금까지의 해석은 극한하중을 산정하여 간단하게 단면 평가를 하였으나 균열이나 처짐제어를 위한 사용성 요구조건을 평가하기 위해서는 사용하중하에서의 구조물의 응력과 변형을 정확하게 예측할 모델과 해석법이 필요한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 토피가 큰 지하 RC 구조물의 기둥에 대한 시간의존적 해석방법을 제시하고 그에 대한 결과분석을 수행하고자 한다. 해석 프로그램은 TCC(CPF수정, Ghali)를 사용하여 시간의존적해석을 수행하였다. 지하구조물은 양생조건, 복토시점, 상대습도등으로 크리프계수 산출에 있어 어려운 점이 많았다. 이러한 제약조건하에서 실제거동에 유사한 환경조건과 크리프 예측식에 의한 해석으로 크리프 계수, 적정 복토시점, 크리프 영향을 분석하고자 한 것이다.

- * 정회원, 금호엔지니어링(주) 구조팀 대리
- ** 정회원, 하이콘엔지니어링(주) 전무
- *** 정회원, 동국대학교 토목공학과 명예교수
- **** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 콘크리트 재료성질의 시간의존적 변화

그림 1과 같이 콘크리트 구조물의 시간의존거동을 해석하는 데 있어서 가장 중요한 가정은 콘크리트의 총변형도는 여러 요인들에 기인하는 개별 변형도들의 합이라고 간주하는 중첩의 원리이다.

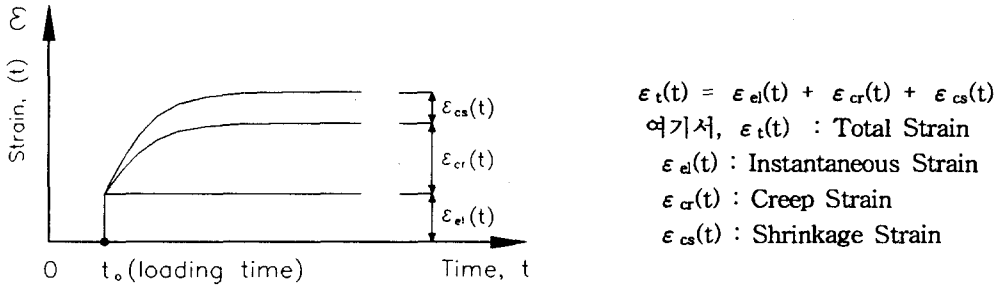


그림 1 Strain of Concrete

시간에 따라 변화하는 콘크리트의 특성변화는 실제적인 실험에 의한 결과를 분석하여 예측할 수 있다. 그러나 실험은 많은 시간을 요하므로 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 이러한 경우에 콘크리트의 배합구성, 부재형상 및 주변환경 변수에 따라 표시된 예측식으로 그 값들을 예상할 수 있다. 그러한 예측식은 세계적으로 다양하게 제안되고 있는데, 본 연구에서는 표 1과 같이 ACI 209모델, CEB-FIP 모델, BP모델 및 국내 도로교표준시방서 모델등을 적용하여 비교하였다. 콘크리트 구조물의 크리프 변형도를 계산하기 위한 방법으로는 선형 크리프법칙에 기초한 중첩의 원리와 재령계수 및 재령 보정 탄성계수를 이용하여 크리프로 인한 콘크리트 구조물의 시간에 따른 변형도를 계산하였다.

표 1 콘크리트 재료 특성 예측 모델

I. ACI 모델(ACI 209R-92)	II. CEB 모델(CEB-FIP MODEL CODE 90)
$E_c(t) = 1,337 W^{1.5} \sqrt{\sigma_c(t)} \quad (MPa)$ $\phi(t, \tau) = K_s K_{RH} K_{th} K_r \frac{(t-\tau)^{0.6}}{10 + (t-\tau)^{0.6}} \phi_u$ $\epsilon_{cr}(t) = K_s K_{th} K_{RH} \frac{(t-\tau)^e}{f + (t-\tau)^e} \epsilon_{csu}$	$\phi(t, \tau) = \phi_o \cdot \beta_c(t-\tau)$ $= \phi_{RH} \cdot \beta(\sigma_{cm}) \cdot \beta(\tau) \left[\frac{(t-\tau)}{\beta_H + (t-\tau)} \right]^{0.3}$ $\epsilon_{cr}(t, \tau) = \epsilon_{csu} \cdot \beta(t, \tau)$ $\epsilon_{cr}(t, \tau) = \frac{\sigma_c(\tau)}{E_c(28)} \phi(t, \tau)$
III. BP 모델(Bazant and Panula, 1978)	IV. KBS 모델(도로교 표준시방서, 건교부, 1996)
$\epsilon_{cr}(t, t_0) = \epsilon_{csu} \cdot k_A \left[\frac{t'}{\tau_{cr} + t'} \right]^{1/2} \quad t' = t - t_0$ $\tau_{cr} = \frac{(k_s D)^2}{C_1(t_0)} \quad D = 2 \frac{y}{s}$	$\phi(t, \tau) = \phi_d \beta(t-\tau) + \beta_o(\tau) + \phi_f [\beta_f(t) - \beta_f(\tau)]$ $\epsilon_{cr}(t, \tau) = \epsilon_{csu} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(\tau)]$

3. 지하철 BOX 구조물의 기둥해석

지하철 구조물 중 본선 개착구간에 일반적으로 적용되고 있는 2연 BOX 본선구조물을 예제로 채택하였으며, 두꺼운 토피(15m)로 인해 사하중 비율이 높은 지하철 구조물의 기둥에 대해 하중 재하시점의 변화와 다양한 크리프 예측식을 적용하여 시간경과에 따른 중간기둥의 단면 응력 변화를 검토하고자 한다.

3.1 해석 개요

가. 콘크리트(Concrete)

· 28일 일축압축강도:

$$\sigma_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2 (=2.646\text{E}7 \text{ N/m}^2)$$

· 철근콘크리트단위중량 :

$$w = 2.5 \text{ t/m}^3 (=24500 \text{ N/m}^3)$$

나. 철근(Steel)

· $\sigma_y = 4000 \text{ kg/cm}^2 (=3.924\text{E}8 \text{ N/m}^2)$

· $E = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 (=2.0\text{E}11 \text{ N/m}^2)$

그림 2에 검토단면 및 해석모델을 나타내었다. 장기적인 응력변화를 파악하기 위해 KBS(도로교표준시방서), ACI, CEB, BP Creep 예측모del 식을 사용하여 30일, 60일, 90일, 180일, 365일, 730일, 1825일 및 3650일(10년)에 대해 해석을 수행하였다. 하중은 토피 15m 및 지하수위 GL(-)1.0m 인 경우의 토압과 수압을 작용시켰으며, 단면은 일반적인 지하철단면을 적용하였고, 기둥의 철근비는 2%를 적용하였다. 그 하중도는 그림 3과 같다.

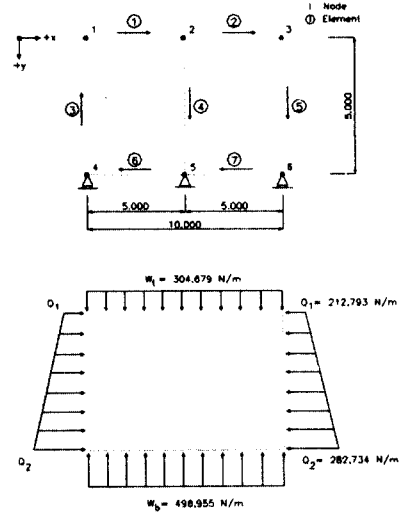


그림 2 Subway 2-Cell Box Structure.

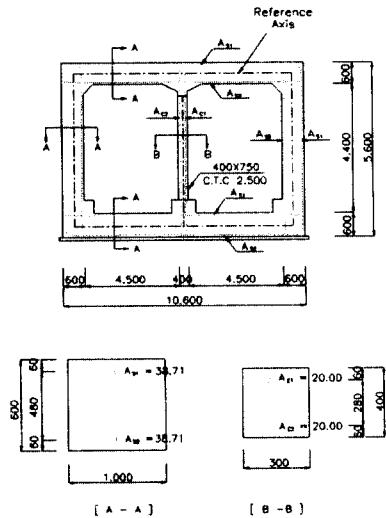


그림 3 Geometry model and Loading Diagram

3.2 해석결과

가. 기둥의 응력(σ_c, σ_s) 변화

프로그램 TCC를 사용하여 지하철 BOX 구조물의 시간의존적 거동에 대해 해석한 결과, 표 2와 그림 4에서 보듯이 지속적으로 작용하는 사하중으로 인해 Creep의 영향을 가장 크게 받는 중간부 기둥에 있어서의 콘크리트와 철근의 응력변화가 시간 경과에 따라 심하게 나타남을 알수 있다.

표 2 지하철 중간기둥에서의 응력변화표(KBS Model)

시간(Time) Day	콘크리트응력 σ_c (MPa)	철근응력 σ_s (MPa)
30	10.29	74.95
60	9.30	104.21
90	9.13	109.24
180	8.85	117.78
365	8.57	126.03
730	8.33	133.26
1825	8.07	140.77
3650	7.96	144.19

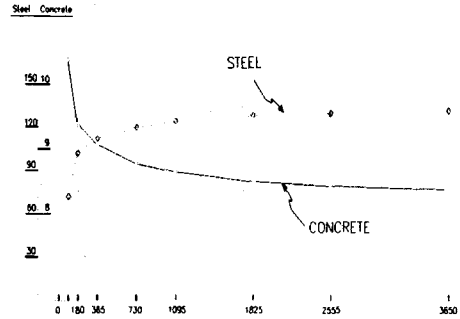


그림 4 지하철중간기둥에서의 응력변화도

본 해석 결과로부터, 콘크리트의 응력은 하중재하 직후에 10.29 MPa에서 10년 후 7.96 MPa로 22.6% 감소 함에 비해, 철근의 응력은 74.95 MPa에서 144.19 MPa로 92.4%(약 2배) 가까이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 지하철 BOX 구조물의 설계에서 중간 기둥의 철근량 산정시 크리프로 인한 장기적인 철근응력이 증가함을 알 수 있다.

나. 하중재하시점에 따른 크리프영향

지하구조물의 시공은 현장상황에 따라 다소의 차이는 있지만 콘크리트 타설 직후 약 3개월 후에 복토를 하므로 하중재하시점을 잡을수 있다. 따라서, 본 연구에서는 하중재하시점에 따른 크리프계수 변화를 각 시방서(KBS, ACI, CEB-FIP, BP CODE) 별로 하중재하시점을 콘크리트 타설후, 30일, 90일, 180일로 구분하여 시간 별로 정리한 결과 표 3과 그림5와 같은 결과를 얻었다.

1. 하중재하 (30일)	σ_c (MPa)				σ_s (MPa)			
	ACI	KBS	CEB	BP	ACI	KBS	CEB	BP
30일	10.3	10.28	10.45	10.38	74.1	74.9	70.0	72.1
180일	9.24	8.85	9.02	9.13	106	117.8	112.8	109.4
365일	9.09	8.57	8.66	8.88	111	126.0	123.4	117.2
730일	8.98	8.33	8.31	8.65	114	133.3	134.0	124.2
2555일	8.87	8.01	7.59	8.23	117	142.7	155.7	136.5
3650일	8.85	7.96	7.36	8.11	118	144.2	162.5	140.1

2. 하중재하 (90일)	σ_c (MPa)				σ_s (MPa)			
	ACI	KBS	CEB	BP	ACI	KBS	CEB	BP
90일	10.4	10.38	10.5	10.4	71.32	72.1	67.1	69.2
180일	9.60	9.38	9.53	9.70	95.33	102.0	97.4	96.3
365일	9.41	9.04	9.16	9.31	100.9	112.0	108.6	104.7
730일	9.31	8.77	8.82	9.08	104.2	120.1	118.6	111.1
2555일	9.20	8.43	8.35	8.75	107.4	130.1	132.8	120.5
3650일	9.18	8.38	8.16	8.67	107.9	131.7	145.1	126.3

3. 하중재하 (180일)	σ_c (MPa)				σ_s (MPa)			
	ACI	KBS	CEB	BP	ACI	KBS	CEB	BP
180일	10.4	10.4	10.6	10.5	70.59	71.4	66.0	68.31
270일	9.70	9.55	9.69	9.68	92.35	96.9	92.7	92.53
365일	9.59	9.36	7.47	8.52	95.78	102.4	99.3	97.52
730일	9.45	9.05	9.10	9.24	99.91	111.6	110.3	105.2
2555일	9.34	8.69	8.45	8.82	103.2	122.4	130.1	116.7
3650일	9.32	8.64	8.24	8.75	103.8	124.1	136.4	120.8

표 3 하중재하시점에 따른 중간기둥 단면응력변화

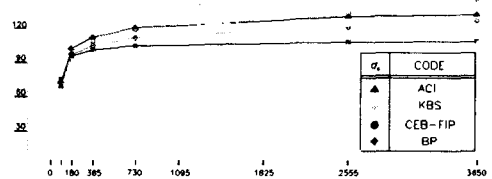


그림 5 90일 하중재하에 따른 철근응력변화도

4. 기동설계시 시간에 따른 영향 고려 방법 제안

크리프의 영향을 고려하여 철근 콘크리트 구조물을 해석하는 방법에는 단계별 재하과정을 반영하여 중첩원리에 의해 계산하는 정밀해법과 유효탄성계수를 이용하는 간략해법이 있는데, 여기서는 보다 계산이 간편하고 실용상 충분히 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있는 간략해법을 제안하고자 한다.

4.1 유효탄성계수 및 크리프계수(C_t) 적용

지속 압축응력 σ_c 하에서 발생하는 크리프 변형량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{cr} = C_t \sigma_c / E_c$$

$$\epsilon_t = \epsilon_{el} + \epsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{E_c} + C_t \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_c}{E_c} (1 + C_t)$$

$$\therefore E_{eff} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_t} = \frac{E_c}{1 + C_t}$$

콘크리트의 크리프계수는 재하시 콘크리트의 재령, 하중지속기간, 온도습도조건, 콘크리트의 배합비율, 부재두께, 압축철근비등에 따라서 달라지며, 일반적으로 조기 재령에 재하되지 않을 경우 크리프계수를 1.0~2.0을 적용하고 있는데, 지하철 구조물의 경우 콘크리트 타설 후 최소한 수개월 경과된 후에 복토하게 되어 재하시 재령이 충분히 길며, 특히 기둥의 경우 압축철근이 상당량(2%이상) 배근되어 압축철근이 크리프 변형량을 상당히 억제시키는 효과를 표 3과 같이 볼 수 있다. 따라서 국내 시공상황에서의 크리프계수는 대략 1.0이 타당하다고 판단된다.

4.2 단주인 경우 크리프 영향 고려 방안

단주인 기둥의 철근응력을 검토할 때에는 탄성상태에 근거를 두고 있으며, 작은 축력은 사용하중에 대한 것을 적용해야 하며, 철근응력은 허용응력과 비교해야 한다.

표 4 단주인 경우 철근응력검토 방법

가. 단주인 기둥에 축력 P가 작용될 경우	나. 축력이 편심 e를 가지고 작용될 경우
$P = A_c \cdot \sigma_c + A_s \cdot \sigma_s$ $\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_c} (1 + C_t) \quad (\because \epsilon_s = \epsilon_c)$ $\sigma_s = n \cdot \sigma_c \quad , \quad n = \frac{E_s}{E_c} (1 + C_t)$ $\sigma_s = n \cdot \sigma_c = \frac{nP}{A_c + nA_s} = \frac{nP}{A_t}$ <p>여기서, A_t : 환산단면적</p>	$\sigma_s = n \cdot \left(\frac{P}{A_t} \pm \frac{P \cdot e}{I_t} y \right) \quad , \quad n = \frac{E_s}{E_c} (1 + C_t)$ <p>여기서, I_t : 환산단면적 y : 중립축에서 철근까지의 거리</p>

4.3 장주인 경우 크리프 영향 고려 방안

기둥이 장주인 경우에 대해서는 콘크리트 표준시방서에 장주해석시 크리프의 영향을 근사적으로 고려할 수 있는 방법이 제시되어 있다. 이는 기둥의 임계하중 $P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl_u)^2}$ 를 산정하는 과정에 크리프의 영향을 고려할 수 있도록 총극한 모멘트에 대한 사하중 극한모멘트비인 β_d 을 적용하는 방법이다. 즉, 지속하중으로 인한 크리프가 기둥의 휨강성을 감소시키는 경향이 있으므로, EI를 $(1 + \beta_d)$ 로 나눔으로서 이 영향을 고려한다.

5. 결론

현재 국내 대부분의 RC 도시철도 기둥은 토피에 비례하여 지속하중이 장기적으로 받고 있는 실정이다. 또한 기둥부재는 구조물에 기여도가 가장 큰 부위이기 때문에 장기적인 사용성검토가 중요지만 이를 반영하지 못하는 경우가 많았다. 이는 국내 도시철도의 시공환경에 타당한 기둥부재의 크리프계수 산정이 산출이 쉽지 않기 때문이었다. 따라서, 본 연구는 실험을 수행하기 힘든 상황에서 실제 거동에 유사한 환경조건과 크리프 예측식에 의한 해석만으로 크리프계수를 추론하는 방법을 택했으며 다음과 같은 결과를 정리하였다.

- 1) 본 해석 결과로부터, 도로교표준시방서의 규정을 적용한 결과, 콘크리트의 응력은 하중재하 직후 10.29 MPa에서 10년 후 7.96 MPa로 22.6% 감소 힘에 비해, 철근의 응력은 74.95 MPa에서 144.19 MPa로 92.4%(약 2배) 증가되었다. 이로부터 일반적인 지하철 구조물의 시공환경하에서 크리프계수는 대략 1.0 이하로 판단된다.
- 2) 도시철도 구조물의 복토 시점에 있어 경제성을 확보하면서 장기적으로 내구성을 확보하는 시점은 약 3개월 이후로 판단된다.
- 3) 다소 제한적인 환경에서 수행되었으며, 지간이 큰 정거장 기둥과 슬래브 및 벽체의 장기변형을 고려한 해석이 필요하다고 판단된다.

본 연구는 광주도시철도 1호선 1구간 실시설계 과정에서 검토된 것으로 도움을 주신 분들께 고마움을 전한다.

참 고 문 헌

1. Bazant, Z.P. & Panula, L., "Creep And Shrinkage Characterization for Analyzing Prestressed Concrete Structures", PCI Journal, May-June 1980.
2. Gilbert, R.I. & Warner, R.F., "Tension-Stiffening in Reinforced Concrete Slabs", J. Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST12, 1885-1900, 1978.
3. Tadros, M.K., Ghali, A. and Dilger, W.H., "Time-Dependent Analysis of Composite Frames", ASCE, Vol. 103, No. ST4, 871-884, April 1977.
4. Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J., "Creep of Plain and Structural Concrete", Construction Press, 1983.
5. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", 209R-92, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1996.
6. Comité Euro International du Béton, "CEB-FIP Model Code - Design Code", Thomas Telford, London, 1993.
7. 이상희, "철근 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동해석", 동국대학교 토목공학과, 박사학위 논문, 1998. 2.
8. 건교부, "도로교표준시방서", 1996.