

균열손상을 입은 프리스트레스트 콘크리트관의 안전도분석

Safety Assessment of Cracked Prestressed Concrete Cylinder Pipes

김영진¹⁾

Kim, Young Jin

이상민²⁾

Lee, Sang Min

이기성³⁾

Lee, Ki Seong

Abstract

This study investigated the structural performance of the precast prestressed cylinder pipe having cracked under construction. The finite element formulation of PPC pipe incorporates Asoild elements using SAP90 program and the radial prestress force was transformed into the equivalent external pressure. The analytical results were compared with the experimental results of full scale tests on PPC pipes subjected to static load. It is shown that the proposed modelling gives a realistic representation of the actual behavior. The analytical procedure is used to calculate the stresses in the PPC pipes and to check the crack opening under various situations such as bedding angle, earth pressure, and earth cover. Finally, the proposed modelling and analytical procedure should be especially useful for the safety assessment of the PPC pipes under general loading conditions.

Key words : PPC pipe, bedding angle, B/F ratio

1. 서 론

매설관은 대량의 유체를 연속적으로 원거리수송하기 위한 시설이고 일단 지중에 부설후에는 육안관찰 등이 곤란한 특성이 있다. 이러한 매설

관 구조물은 목적에 따라 지정된 위치에 설치되며 때문에 구조의 특성상 외부로 부터 여러 가지 형태의 압력을 받고 특히 설치되는 지점에서 흙을 매개로 토압, 차량하중 등 각종 하중의 영향을 받아 적절한 설계, 시공이 이루어지지 못할 경우

1) 대우건설 기술연구소, 책임연구원, 공박

2) 정회원, B&T엔지니어링, 대표이사, 공박

3) B&T엔지니어링, 이사, 공박

● 본 논문에 대한 토의를 11월 30일까지 학회로 보내주시면
1999년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

매설관의 안전도에 영향을 줄 수도 있다⁽¹⁾.

현재 국내에서 수도용관으로 주로 사용되는 것은 주철관, ductile 강관 및 PCC관(prestress concrete cylinder pipe : 이하 PCC관이라 함) 등으로 대별될 수 있으나, 이중 PCC관은 주로 발전시설의 냉각수용으로 사용되고 있다⁽²⁾.

한편 W현장에도 터빈냉각용 관로로 프리스트레스트 콘크리트 실린더(Prestressed Concrete Cylinder:PPC)관을 사용하여 시공하던 중 내부에 균열이 발생하여 그 안전도에 관한 점검을 통하여 기 시공된 관의 계속 사용여부 등에 관한 판단이 필요한 상황이 발생하였다. Fig.1은 W현장에 시공된 PPC관의 종방향단면도이다.

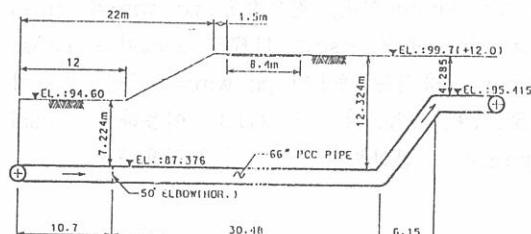


Fig. 1. PPC관의 종방향단면도

Fig.2는 PPC관의 횡방향단면 및 균열발생위치를 나타낸 것이다. 먼저 육안에 의한 현장균열조사를 시행하고, 이 자료를 참고로 균열의 위치와 균열폭을 확인하고 초음파탐지기를 사용하여 균열깊이를 측정하였다. 그림에서와 같이, 균열은 관의 천단부와 하부에 종방향으로 발생하였고, 특히 하부는 72 cm ~ 94 cm의 간격으로 두군데에

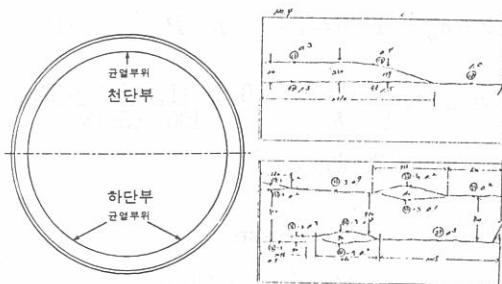


Fig. 2. PPC관의 횡방향단면도 및 균열도

균열이 발생되어 있는 상태였다. 균열의 깊이는 종방향 PC Wire까지 진전된 것으로 판단되며, 균열폭이 제일 넓은 지점에서는 육안으로도 종방향 PC Wire를 관측할 수 있을 정도였다.

따라서 본 연구에서는 시공중 균열이 발생한 PPC관의 구조안전도를 평가하기 위해 PPC관의 거동을 합리적으로 표현할 수 있는 구조와 하중모델링을 구성하고 이를 PPC관의 실물규모 시험체에 대한 파괴시험결과와 비교하여 구조 및 하중모델링의 타당성을 확인한 후, 검증된 모델을 이용하여 bedding각, 시공단계별 토압과 피토고 등에 따른 구조해석을 통하여 균열발생원인을 추정하고 PPC관의 안전도를 판단하고자 한다.

2. PPC관의 구조모델링

Fig.3은 PPC관의 구조도이다. 그림에서와 같이, PCC관은 종방향 pc wire로 인장된 내부 콘크리트 실린더 관과 그 위를 덮고 있는 강판관, 강판관 위를 원주방향 pc wire를 이용하여 인장력을 도입하고 있으며, 그 위에 덮개역할을 하는 외부 콘크리트가 타설되어 있다.

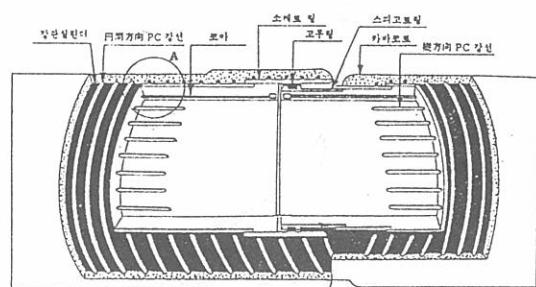


Fig. 3. PPC관의 구조

PCC관의 내측에 발생된 균열에 대해 범용구조해석프로그램인 SAP90을 사용하여 외부하중을 시공단계별로 모형화한 후 각 하중에 대한 구조해석을 통하여 구조거동을 해석적으로 검토하였다. PCC관은 원주방향응력이 구조거동을 지배하고 있으므로, 종방향으로 단면이 일정하다는

가정하여 평면변형률상태로 모델링하였다. 현재 관찰되고 있는 균열은 주로 PPC관의 종방향으로 발생되고 있고, 비록 종방향 프리스트레스가 도입되어 있으나 균열폐쇄에 포아슨효과이상의 영향을 주지 못할 것으로 판단되어, 종방향 pc wire의 효과는 구조해석모델링에 고려하지 않았다.

Fig.4는 구조해석모델이다. 구조물이 대칭이므로 구조물의 절반만을 모델링하였다. 내측 콘크리트 실린더 관, 강판관, 외측 콘크리트 실린더 관, bedding콘크리트 및 매트콘크리트 등은 Asolid요소를 사용하여 이산화하였고, 강판을 싸고 있는 pc wire의 프리스트레스힘은 PPC관의 원주방향으로 작용하는 등가의 radial pressure로 환산한후 외력으로 작용시켰다. Bedding각은 Fig.7에 표시하였다. 한편 Table 1은 구조해석에 사용된 재료상수값이다.

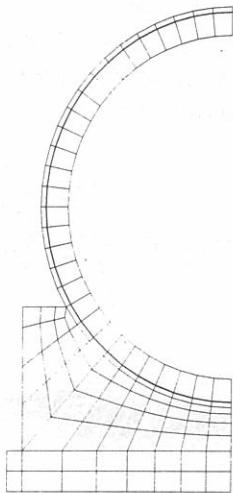


Fig. 4 구조해석모델

3. PPC관의 하중모델링

3.1 원주방향 pc wire의 프리스트레스힘 계산

PCC관의 종방향 pc wire의 극한강도 σ_{su} 는

Table 1. 구조해석에 사용한 재료상수

PCC관 설계기준강도	$\sigma_{ck} = 500 \text{ kg/cm}^2$
Bedding콘크리트 설계기준강도	$\sigma_{ck(Bedding)} = 180 \text{ kg/cm}^2$
매트콘크리트 설계기준강도	$\sigma_{ck(Mat Con'c)} = 100 \text{ kg/cm}^2$
PCC관 탄성계수	$E_c = 335,410 \text{ kg/cm}^2$
Bedding콘크리트 탄성계수	$E_c(Bedding Con'c) = 201,246 \text{ kg/cm}^2$
매트콘크리트 탄성계수	$E_c(Mat Con'c) = 150,000 \text{ kg/cm}^2$
강판관탄성계수	$E_s = 1,970,000 \text{ kg/cm}^2$
흙의 단위중량	$\gamma = 2.0 \text{ g/cm}^3$

15,500 kg/cm²이며, 원주방향 pc wire의 gross wrapping 응력 σ_{sg} 는 11,625 kg/cm²이다. Gross wrapping 응력은 종방향 pc wire의 극한강도값의 75%이며, Fig.5와 식 (1)을 이용하여 radial pressure로 환산하여 구조해석에 적용하였다.

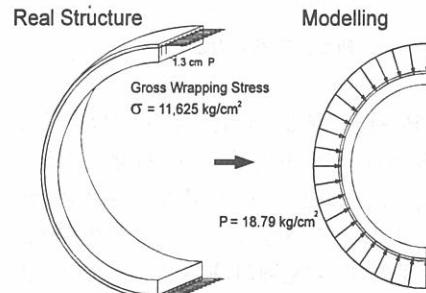


Fig. 5 PC wire의 프리스트레스힘 모델링

$$2 \cdot \sigma_{sg} \cdot A \cdot n = 2 \cdot L \cdot R \cdot P \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{A \cdot \sigma_{sg} \cdot n}{L \cdot R} = \frac{0.2 \times 11,625 \times 76.92}{100 \times 95.18} \\ &= 18.79 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

여기서 P : radial pressure

$$A : \frac{\pi \cdot r^2}{4} = \frac{\pi \times 0.5^2}{4} = 0.2 \text{ cm}^2$$

σ_{sg} : gross wrapping stress (kg/cm^2)
n : 100cm안의 pc wire의 개수
R : 원주중심에서 pc wire까지 반지름(cm)
L : PCC관 종방향으로 100cm

3.2 토압계산

3.2.1 토사다짐시기

Fig.6은 PPC관의 설치조건이다. 강성관에 작용하는 연직토압은 관의 매설조건에 따라 다르므로 주의할 필요가 있다. 매설상태는 돌출형과 흙형이 있는데, W현장은 성토부에 매설한 경우로써 돌출형에 해당된다⁽³⁾.

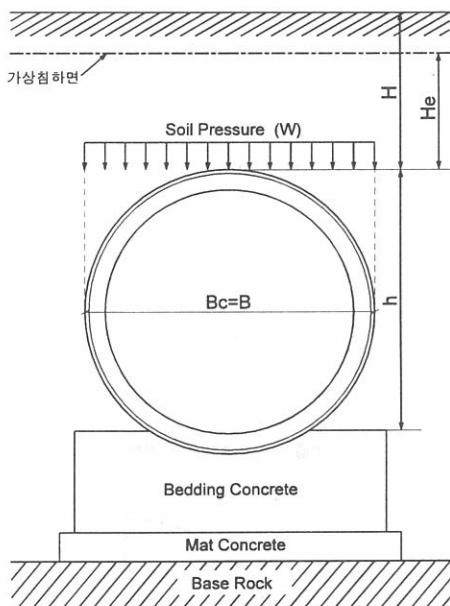


Fig. 6 PPC관의 설치조건

돌출형의 경우, 작용하는 연직토압은 식 (2)에 의해 산출하고 등침하면의 높이 H_e 는 식 (3)으로 구한다^(3,4).

$$Q_d = C_c \cdot \gamma \cdot B_c^2 \quad (2)$$

$$\exp\left(K \cdot \frac{H_e}{B_c}\right) - K \cdot \frac{H_e}{B_c} = K \cdot \gamma_{sd} \cdot P + 1 \quad (3)$$

만약 P를 1로 하면, 식 (3)에 의하여 사질토의 경우 $H_e=1.66B_c$, 점성토의 경우 $H_e=1.12B_c$ 가 된다. 식 (3)에서 구한 H_e 를 H와 비교하여 식 (4), (5)에서 C_c 를 구한 다음, 식 (2)에 대입하여 토압을 구한다.

$$H < H_e \text{ 일 때} \quad (4)$$

$$C_c = \frac{\exp\left(K \cdot \frac{H}{B_c}\right) - 1}{K}$$

$$H \geq H_e \text{ 일 때} \quad (5)$$

$$C_c = \frac{\exp\left(K \cdot \frac{H_e}{B_c}\right) - 1}{K} + \left(\frac{H - H_e}{B_c}\right) \exp\left(K \cdot \frac{H}{B_c}\right)$$

여기서 γ : 흙의 단위체적중량 (kg/cm^3)

B_c : 관의 외경 (m)

C_c : 토압계수

K : 정수 (사질토 0.4, 점성토 0.8)

H : 토피높이(m)

H_e : 등침하선면의 높이 (m)

γ_{sd} : 경질지반(1.0), 보통지반(0.7), 연약지반(0~0.5)

P : 침하비($=h/B_c$)

3.2.2 토사의 안정화시기

다짐이 끝나고 토사가 안정화 단계에 들어가면 일반적으로 사용하는 토압공식을 사용할 수 있다. Fig.7은 PPC관에 작용하는 토압분포이다.

PCC관의 상단까지의 연직토압은 $W=\gamma \cdot H$ 로 계산할 수 있다. 지표는 수평이고 측벽에 걸리는 수평토압은 정지토압계수를 사용한다. 이 때 내부 마찰각은 30° 로 가정하여 구한 정지토압계수

$K_o=0.5$ 를 사용하였다. 따라서 측벽상단에 작용하는 수평토압 P_1 은 $K_o \cdot H \cdot \gamma$, 측벽하단에 작용하는 수평토압 P_2 는 $K_o \cdot (H+h) \cdot \gamma$ 과 같다. 여기서 h 는 PCC관 상단에서 매트콘크리트 하단면까지의 거리이다.

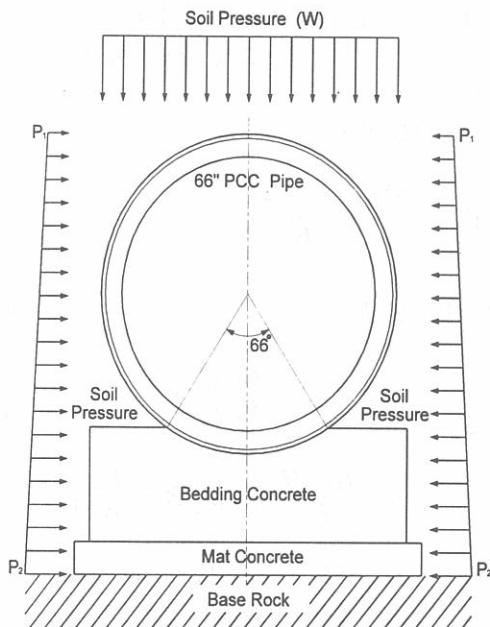


Fig. 7. 안정화이후에 작용하는 토압분포

4. PPC관의 실험 및 분석

시공현장에 사용된 것과 동일한 PCC관 A, B에 대한 외압시험을 통하여 구조거동을 실측하였다. Fig.8은 외압시험방법을 나타낸 것인데, 시험방법은 KS F 4405에 따랐다⁽⁵⁾. Fig.9는 시험체를 해석하기 위한 구조해석모델이며, Fig.10은 해석결과이다. 한편 Table 2는 외압강도 시험결과와 구조해석결과를 비교한 것이다.

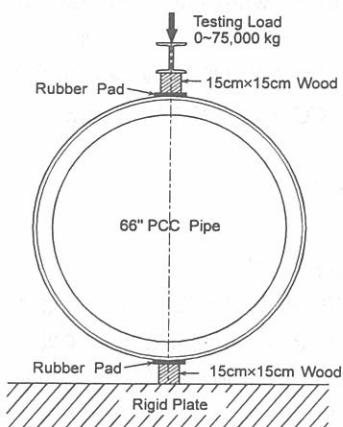


Fig. 8 PPC관의 외압시험

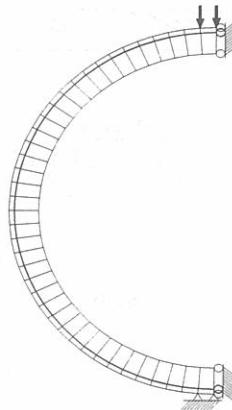


Fig. 9. 구조해석모델링

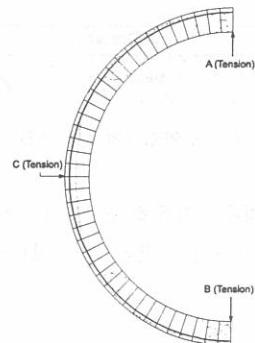


Fig.10 PPC관의 응력분포

Table 2. 외압강도 시험값과 해석값의 비교

재하 하중 (ton)	시험값-균열폭 (mm)		해석값-응력 (kg/cm ²)			비 고
	공시체 A	공시체 B	Point "A"	Point "B"	Point "C"	
45.45			44.68	29.76	5.43	휩인장강도이하
45.48			44.72	29.79	5.45	휩인장강도도달
45.50			44.75	29.82	5.46	균열시작(해석값)
50.00		0.10	50.96	35.14	6.66	균열시작(실험값)
50.20	0.05		51.23	35.38	6.72	균열시작(실험값)
71.50	1.80		80.63	61.12	14.27	파괴도달(실험값)
75.00		1.70	85.46	65.38	15.77	파괴도달(실험값)

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이, 공시체 외 압강도시험결과 50~50.2 ton의 하중에서 0.05m m~0.10mm 균열폭의 균열이 발생되기 시작하였으며, 71.5~75 ton의 하중에서 1.70mm~1.80mm의 균열폭을 나타내며 파괴에 도달하였다. 해석에서는 PPC관의 단면에 발생하는 응력이 휨인장응력을 초과하면 균열이 발생하는 것으로 가정하여 균열발생여부를 평가하였는데, 휨인장강도은 할렬 계수인 $\sigma_{nu} = 2.0\sqrt{500} = 44.72 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다⁽⁶⁾. 해석하중 45.5 ton의 수준에서 "A"부분의 응력이 휨인장강도를 초과하여 균열이 발생되는 것으로 분석되었고, 시험에서는 50.0 ton의 하중수준에서 균열이 최초시작함을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 해석값은 비교적 시험값과 근사한 값을 보이고 있어, 구성된 해석모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

5. PPC관의 해석 및 분석

검증된 구조해석 모델을 활용하여 단계 I에서 단계 V까지 다양한 시공조건하에서 PPC관의 구조해석을 실시하였다. Table 3은 시공단계별 해석 조건이다.

Table 3. 시공단계별 해석조건

해석단계	B/F비 (m)	Bedding각	비 고
단계 I	7.6	120°	원시공조건
단계 II	12.324	120°	
단계 III	7.6	66°	실시공상황
단계 III-1	9.175	66°	
단계 III-2	10.749	66°	
단계 IV	12.324	66°	토사불안정상태
단계 V	12.324	66°	토사안정상태

Fig.11은 해석조건중 가장 불리한 응력상태를 나타내는 해석단계 IV의 응력상태를 도시한 것이다. Table 4는 해석조건별 응력계산결과를 휨인장강도와 허용휨압축응력과 비교하여 평가한 것이며, 허용휨압축응력은 콘크리트표준시방서규정에 따라 200 kg/cm²로 하였다.

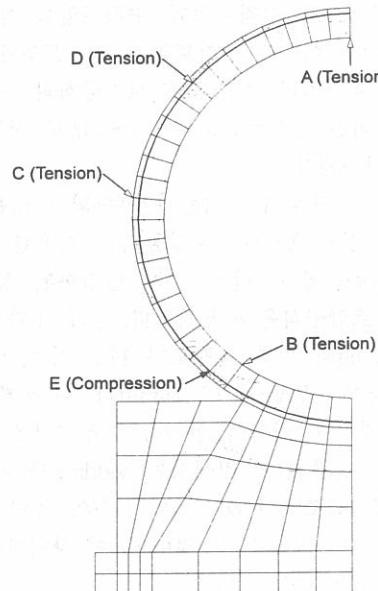


Fig.11 해석단계IV의 응력분포

Table 4. 각 해석조건별 응력계산결과

해석단계	평가위치					평가
	A	B	C	D	E	
단계 I	-14.2	+3.1	-1.3	+30.1	-86.2	OK
단계 II	-4.5	+1.9	-0.8	+33.8	-91.8	OK
단계III	+26.7	+12.1	+10.5	+24.3	-174.3	OK
단계III-1	+37.7	+24.8	+15.3	+24.7	-183.2	OK
단계III-2	+48.5	+27.4	+20.6	+25.3	-189.4	NG
단계IV	+59.8	+50.3	+26.3	+25.9	-199.5	NG
단계V	+21.1	+0.5	+6.7	+24.0	-172.3	OK

단 : + : 인장응력, -: 압축응력

단계 I에서 단계 IV까지는 Martson 토압공식을 적용하였다. Martson 토압공식은 강성관을 매설할 경우에 사용하는 공식으로 보통 토사가 침하할 때 강성관 주위의 흙이 강성관보다 상대적으로 더 많이 침하한다는 데 착안한 공식이다. 토사의 침하가 모두 이루지면, B/F의 높이만으로 일반적인 토압공식으로 연직토압과 수평토압을 계산하여 적용한다. 이 때 수평토압은 정지토압계수를 이용하여 계산한다. Martson 토압공식의 연직토압은 일반적인 연직토압공식에 1~1.66배 정도 더 큰 값을 나타낸다.

단계 I ~ 단계 IV까지는 안정화되지 않은 상태이기 때문에, Martson 토압공식을 사용한 연직토압을 적용하였다. 단계 V는 안정화된 상태로 일반적인 토압공식을 사용하였다. 단계 I과 단계 II는 bedding과 이루는 각도가 120°이며, 이 때의 B/F 높이는 7.6m와 12.324m이다. 이 상태에서는 모든 부분에 대하여 안전측의 응력값을 나타내고 있다. 한편 단계 III에서는 bedding과 이루는 각도가 실시공조건인 66°이며 B/F의 높이는 당초 시공조건인 7.6m로 한 것이다, 이 상태에서 발생응력은 허용값이내이다.

안정화되기 전 상태인 단계 IV에서는 "A", "B" 및 "C" 부분에서 휨인장강도와 허용휨압축응력을 초과하는 응력이 발생한다. 단계 III ~ 단계 IV 까지의 구간 중 어느 구간에서 허용응력을 초과

하는지 알아보기 위하여 단계 III ~ 단계 IV 까지를 3등분하여, 각각 단계 III-1(9.175m)와 단계 III-2(10.749m)로 구분하였다. 단계 III-1에서는 허용응력을 초과하지 않지만 단계 III-2에서는 "A" 부분에 휨인장강도를 넘어서는 응력이 발생하였다. 이 결과를 통해 PCC관의 균열은 단계 III-1과 단계 III-2 사이에서 발생되었을 것으로 추측할 수 있다. 특히, 단계 IV의 "B" 부분의 균열은 현장 균열조사자료와 유사한 균열양상을 나타내고 있으며, 결국 PPC관 내부에 발생한 균열은 주로 토압으로 발생된 균열로 판단된다.

모든 다짐이 끝나고 토사가 안정화에 들어가는 단계 V의 상태는 강성관과 주변 흙 사이에 상대침하가 없는 안정된 상태로, 균열발생이하의 응력이 작용됨으로 기존에 발생한 균열은 더 이상 진행되지 않을 것으로 분석된다.

6. 결 론

본 연구에서는 균열이 발생한 프리스트레스트 콘크리트 실린더관의 안전성을 실험 및 해석적 기법을 이용하여 검토한 것이다. PPC관에 작용되는 하중을 모형화하기 위하여 원주방향 프리스트레스팅을 등가하중으로 환산하여 외부하중으로 작용시켰고, PPC관에 대한 실험결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 검증하였다.

검증된 구조해석모델을 이용하여 각 변수에 대한 해석결과를 휨인장강도와 비교하여 시공상황에 따른 균열발생여부를 판단하였다.

따라서 본 연구를 통하여 실제 균열이 발생한 PPC관의 균열발생을 해석적으로 평가할 수 있는 구조해석모델과 시공상황을 모사하였고, 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였으므로, 향후 일반적인 시공조건에서도 본 해석절차와 구조해석모델을 적용하면 사전에 균열에 대한 PPC관의 안전여부를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- | | |
|--|--|
| <p>참 고 문 헌</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 홍종백, “외압을 받는 콘크리트관의 설계,” 농공기술, No.56, 1997, pp.126~146. 2. 정원기, 김종흡, “P.C.C관의 구조설계,” 콘크리트학회지, 제6권, 5호, 1994, pp.56~64. 3. 日本土木學會, 土木工學핸드북, 1988, pp.1225~1229. | <ol style="list-style-type: none"> 4. 한국지반공학회, 지반조사결과의 해석 및 이용(지반공학시리즈1), 1994, pp.14~19. 5. 한국공업표준, KS F 4405(코어식 프리스트레스트 콘크리트 관), 1991. 6. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, pp.135~145. <p>(접수일자 : 1998. 4. 2)</p> |
|--|--|

(접수일자 : 1998. 4. 2)