

프리스트레스트 콘크리트 실린더의 균열거동 연구

정철현[†] · 김종석 · 송나영

단국대학교 토목환경공학과

(2008. 8. 5. 접수 / 2008. 12. 14. 채택)

Cracking Behavior of Prestressed Concrete Cylinder Pipe

Chul-Hun Chung[†] · Jong-Suk Kim · Na-Young Song

Civil & Environmental Engineering, Dankook University

(Received August 5, 2008 / Accepted December 14, 2008)

Abstract : The cracking behavior of prestressed concrete members is important for the rational evaluation of PCC pipes. However, the test data on the cracking behavior of PCC pipes are very limited. The purpose of the present study is to investigate the cracking behavior of PCC pipes under different settlement conditions. In this paper, experimental test on the full scale model of PCC pipe was conducted and observed in order to study cracking load in PCC pipes. Based test and FEM analysis results, this paper also presents the cracking load prediction in PCC pipe. Based on the numerical analysis results performed in this research, the cracking behaviors of PCC pipe with the variation of the settlement conditions were evaluated.

Key Words : PPC(Prestressed Concrete Cylinder) pipe, cracking behavior, cracking load, settlement conditions

1. 서론

콘크리트 관은 상하수도, 송배수구조물, 터빈 냉각용 파이프 등의 관로 구조물에 널리 활용되고 있다. 이들 구조물은 목적에 따라 지정된 위치에 설치되기 때문에 구조특성상 외부로부터 여러 가지 형태의 압력을 받으며, 특히 설치되는 지점의 토질 및 노면하중상태 등에 따라서 안정도에 영향을 받게 된다. 이와 같은 자연적인 조건과 하중조건에 의해서 발생하는 내력에 비해서 관 자체의 저항능력이 충분하지 않으면 균열이 발생되거나 파괴가 발생하게 된다¹⁾. 이와 같은 하중조건에 대한 저항능력이 충분하지 않으면 관 자체의 균열 및 파괴가 발생할 수 있기 때문에 설계단계에서 하중조건을 충분히 고려하여야 한다. 콘크리트구조설계기준²⁾에서는 설계단계에서 합리적으로 균열을 제어할 수 있도록 관련 내용을 포함하고 있으며, 수밀성이 요구되거나 미관이 중요한 구조물의 균열 검토와, 시공 중 혹은 완공 후에 균열이 발생한 구조물에 대하여 균열 발생의 원인 및 그 유해성에 관한 검토가 이루어지도록 하고 있다. 콘크리트에 발생하는 균열에

대한 발생기준은 응력, 변형률, 에너지에 근거하여 기준을 삼고 있다. 응력에 근거한 기준은 콘크리트 구조물에 외력이 가해지거나 또는 재료 자체의 부피 변화에 의해 다양한 응력이 유발되며, 그 응력들의 주응력이 재료 자체의 인장강도를 초과하는 순간 균열이 발생하는 것으로 판단한다³⁾.

외압에 의하여 PCC pipe 관에 발생하는 응력은 지반상태에 따라 크게 달라지고 동일 연직하중의 경우 한 점 지지일 때가 가장 크고 지지면적이 넓을수록 작아진다. 따라서 관 단면에 발생하는 응력을 작게 하기 위해서는 연직하중을 관의 기초지반에 넓게 분포시키는 것이 유리하다. 따라서 관 설계시 관에 작용하는 내압과 외압을 충분히 받을 수 있어야 하므로 이들이 설계조건이 되나 관매설 설계시 베딩조건과 되메움 작업의 다짐도도 중요시 된다^{4,5)}. 도로 하부 연약지반에 매설된 관 구조물의 시공법 등에 대한 연구⁶⁾는 일부 수행되었으나, 베딩층이나 흙의 안정화 여부 등의 변수 등은 고려되지 못했다.

본 연구에서는 관로 구조물 중에서 터빈구조의 냉각용으로 사용되는 PCC pipe(Prestressed Concrete Cylinder Pipe)에서 발생된 내부 균열을 평가하기 위하여 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 먼저, 유

[†] To whom correspondence should be addressed.
chchung5@dankook.ac.kr

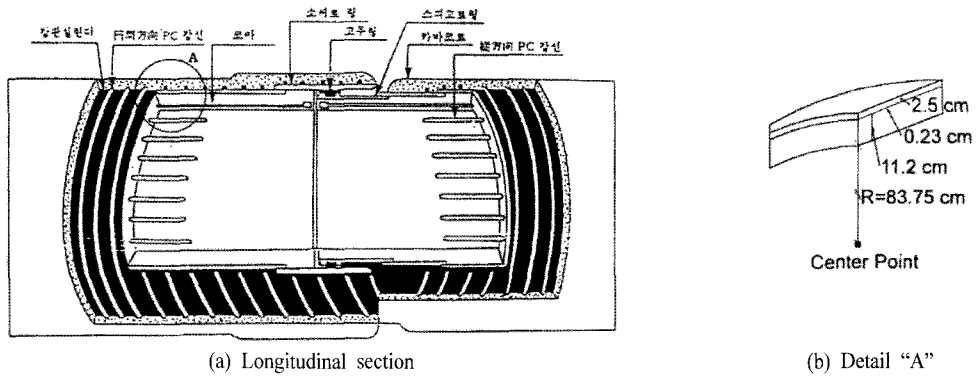


Fig. 1. Section of PCC pipe.

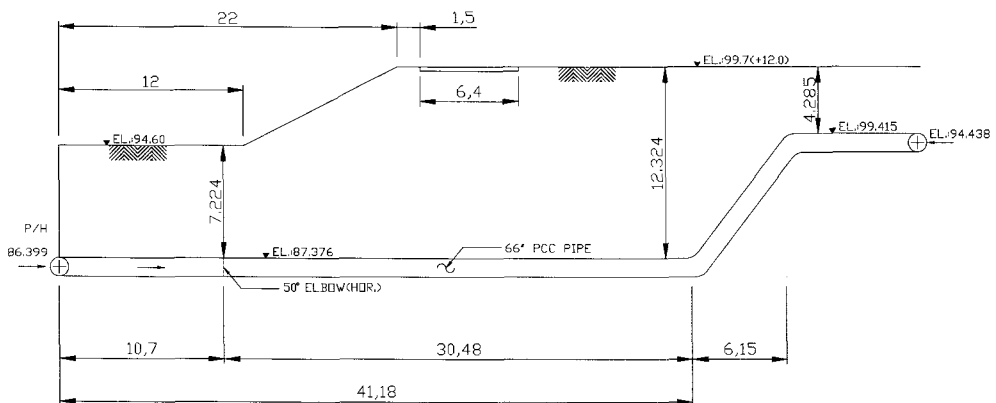


Fig. 2. Plan of PCC pipe.

한요소해석시 모델 방법의 타당성을 검증하기 위하여 종방향 길이가 4m인 PCC pipe 시험체를 제작하여 균열거동 및 파괴거동을 평가하기 위한 외압 시험을 실시하여 실험 및 해석결과를 비교분석하였다. 다음 단계에서, 앞에서 결정된 유한요소모델 방법을 현장에 매설된 실제 PCC pipe 구조에 적용하여 균열거동 및 균열의 향후 진전여부를 평가하였다. 해석시 현장에서 발생 가능한 다양한 지반 침하조건을 포함하는 하중조건을 고려하여 실제 매설되어 많은 균열이 발생된 PCC pipe에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 통해서 설계 및 시공시 등침하면의 높이, 베딩층과 이루는 각도, 토압산정시 흙의 안정화 여부가 균열에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 균열발생 현황

PCC pipe의 구조는 종방향 PC wire로 인장된 내부 콘크리트 실린더 관과 그 위를 덮고 있는 강판관, 강판관 위를 원주방향 PC wire로 인장하고 덮게

역할을 하는 외부 콘크리트 실린더 관으로 구성되어 있으며, 자세한 형상은 Fig. 1과 같다. 또한, 현장에서 PCC pipe의 매설현황은 Fig. 2와 같으며, PCC pipe의 설치조건을 자세히 나타내면 Fig. 3과 같다.

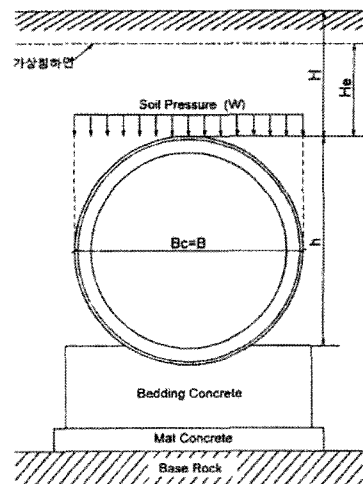


Fig. 3. Construction conditions of PCC pipe.

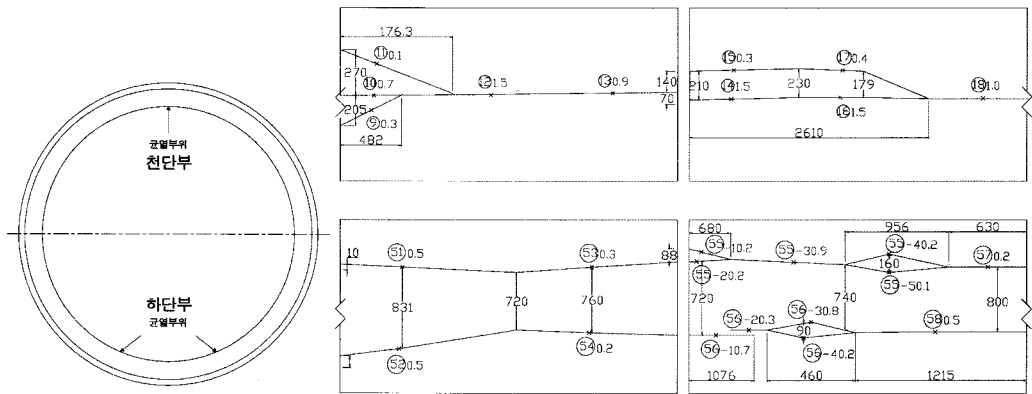


Fig. 4. Crack pattern.

Fig. 2와 같이 매설된 PCC pipe에서는 관의 천단부와 하단부에서 전 길이에 걸쳐서 종방향 균열이 발생되었으며, 대표적인 균열발생 현황은 Fig. 4와 같다. 현장에서 조사된 자료를 참고로 균열의 위치와 균열폭을 확인하고 초음파탐지기(Ulcon 3)를 사용하여 균열깊이를 측정하였다. 균열은 천단부와 하단부에 종방향으로 발생하였고, 특히, 하부에서는 72~94cm 간격으로 균열이 발생되었다.

3. PPC pipe의 외압실험

외압시험이 실시된 시험체는 종방향으로 4m이며, 단면형상 및 시험조건은 Fig. 5와 같다.

PPC pipe 시험체의 파괴실험시 500~502kN의 하중범위에서 하중작용점 아래 내면 천공부에서 최초 균열이 시작되어 715~750kN의 하중범위에서 최대내력을 보인 후에 파괴가 발생되었다. 지점부 바로 위 내면에서는 약 502kN 하중에서 최초 균열이 발생되었다. 또 다른 인장영역인 바깥쪽 측면에서

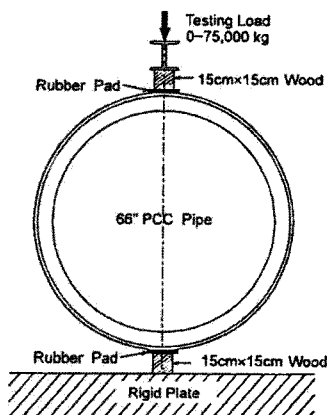


Fig. 5. Test arrangement.

Table 1. Test results

시험체	균열하중(kN)	최대내력(kN)
1번	502	715
2번	500	750

는 균열이 발생되지 않았다. 균열하중에서 측정된 천공부의 균열폭은 0.05~0.10mm 사이이며, 최대내력 발생시의 균열폭은 1.70~1.80mm로 측정되었다. 외압시험에 사용된 PPC pipe 시험체는 2개이며, 구조실험에서 측정된 균열하중 및 최대내력은 Table 1과 같다.

4. 유한요소해석

PCC pipe는 종방향으로 단면이 일정하다는 가정 하에 2차원 평면변형(plane strain) 요소로 모델링하였다. 단면의 대칭성을 이용하여 1/2 단면만을 모델링하였으며, 내측 콘크리트 실린더 관, 베딩용 콘크리트, 매트 콘크리트 등을 포함하였다. 강관을 싸고 있는 PC wire의 프리스트레스힘은 Fig. 6에서와 같이 PCC pipe의 원주방향으로 작용하는 Radial Pressure로 적용하였다. 구조해석에 이용된 프로그램은 SAP90이며, 구조해석시 사용된 재료상수값은 다음과 같다.

- PCC pipe의 콘크리트 설계강도 : $f_{ck} = 20\text{MPa}$
- 베딩용 콘크리트 설계강도 : $f_{ck} = 180\text{MPa}$
- 매트 콘크리트 설계강도 : $f_{ck} = 10\text{MPa}$
- 강관의 탄성계수 : $E_s = 1.97 \times 10^5 \text{N/mm}^2$
- 흙의 단위중량 : $\gamma = 2 \times 10^5 \text{N/mm}^3$
- PC wire의 응력 : $f_{sg} = 11,62.5 \text{N/mm}^2$
- 콘크리트 휨인장강도(파괴계수) : 4.472N/mm^2
- 콘크리트 허용휨압축응력 : 20N/mm^2

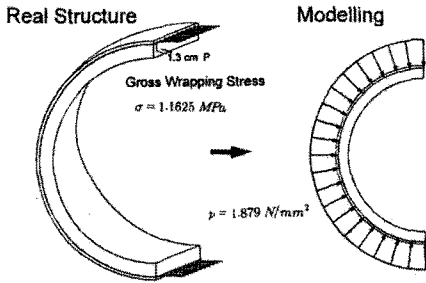


Fig. 6. Model of prestress force.

PCC pipe의 종방향 PC Wire의 극한강도는 $f_{su} = 1,500\text{MPa}$ 이며, 원주방향 PC wire의 Gross wrapping 응력은 $f_{sg} = 1,162.5\text{MPa}$ 이다. Gross wrapping 응력은 종방향 PC wire 극한강도의 0.7%이며, Fig. 6과 아래의 식 (2)⁷⁾를 이용하여 Radial pressure를 계산하여 구조해석 모델에 적용하였다.

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

$$P = \frac{A \times f_{sg} \times n}{L \times R} = \frac{20 \times 1162.5 \times 76.92}{1000 \times 951.8} = 1.88\text{N/mm}^2 \quad (2)$$

P : Radial pressure(kgf/cm²)

$$A : \frac{\pi r^2}{4} = \frac{\pi \times 5.0^2}{4} = 20\text{mm}^2$$

f_{sg} : Gross wrapping stress(MPa)

n : 100cm 안의 PC wire의 개수

R : 원주 중심에서 PC wire까지 반지름(mm)

L : PCC pipe 종방향 길이(1,000mm)

강성관에 작용하는 연직토압은 관의 매설조건에 따라 결정되어야 한다. 매설조건은 크게 돌출형과 흠형으로 구분되며, 본 현장에 매설된 PCC pipe는 Fig. 3에서와 같이 성토부에 매설한 경우로서 돌출형에 해당한다. 돌출형의 경우 작용하는 연직토압은 Marston의 토압공식⁸⁾에 의해 식 (3)과 같이 계산되며, Fig. 3에서 등침하면의 높이 H_e 는 식 (4)에 의해 계산하였다.

$$Q_d = C_c \times \gamma \times B_c^2 \quad (3)$$

$$\exp\left(K \times \frac{H_e}{B_c}\right) - K \times \frac{H_e}{B_c} = K \times \gamma_{sd} \times P + 1 \quad (4)$$

식 (4)에서 산정되는 H_e 와 흠의 피복인 H 를 비교하여 다음 조건에 따라 C_c 를 결정하였다.

· $H < H_e$ 인 경우

$$C_c = \frac{\exp\left(K \times \frac{H}{B_c}\right) - 1}{K} \quad (5)$$

· $H \geq H_e$ 인 경우

$$C_c = \frac{\exp\left(K \times \frac{H}{B_c}\right) - 1}{K} + \left(\frac{H - H_e}{B_c}\right) \exp\left(K \times \frac{H_e}{B_c}\right) \quad (6)$$

γ : 흠의 단위체적중량(N/mm²)

B_c : 관의 외경(mm)

C_c : 토압계수

K : 정수(사질토 : 0.4, 점성토 : 0.8)

H : 흠의 피복(mm)

H_e : 등침하면의 높이(mm)

γ_{sd} : 침하비에서 경질비반 이상에서는 1.0, 보통지반에서는 0.7, 연약지반에서는 0~0.5 적용

P : 침하비($P = h/B_c$)

다짐이 다 끝나고 흠이 안정화에 들어가면 일반적으로 사용하는 토압공식을 적용하는데, 이때의 토압분포는 Fig. 7과 같으며, PCC pipe 상단까지의 연직토압과 측벽에 작용하는 수평토압은 다음 식으로 계산한다⁶⁾.

$$W = \gamma H \quad (7)$$

$$P_1 = K_o \times \gamma \times H \quad (8)$$

$$P_2 = K_o \times \gamma \times (H + h) \quad (9)$$

K_o : 정지토압계수

h : PCC pipe 상단에서 매트 콘크리트 하단면까지의 거리

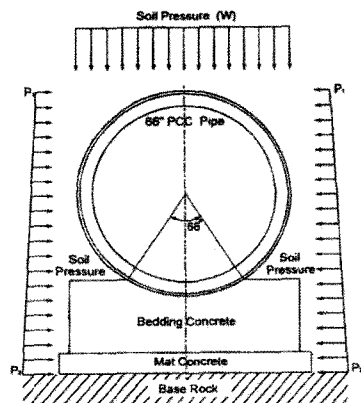


Fig. 7. Earth pressure distribution after stabilization.

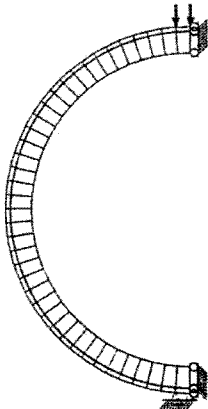


Fig. 8. Finite element mesh for PCC pipe specimen.

4.1. PPC pipe 시험체에 대한 구조해석

외압시험이 실시된 PCC pipe에 대한 구조해석 모델시 대칭조건을 이용하여 1/2만 모델하였으며, 유한요소모델의 형상은 Fig. 8과 같다.

PCC pipe 시험에 대한 구조해석 결과 얻어진 변형 및 응력분포 형상은 Fig. 9와 같으며, 시험시 최초 균열발생 지점인 천공부에서 콘크리트의 허용인장강도를 초과하는 인장응력이 발생하는 시점에서의 작용하중은 455kN로 나타났다. 이는 실험결과와 비교하면, 실험결과가 해석결과보다 균열하중이 약 10% 정도 큰 수준이다.

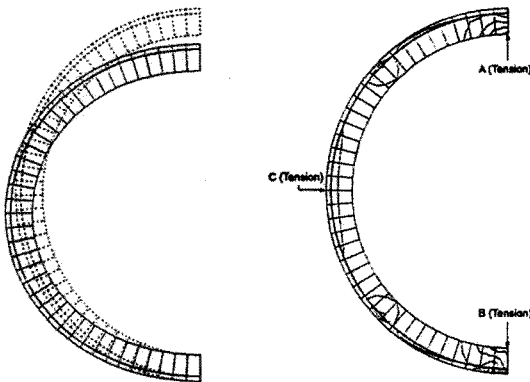


Fig. 9. Displacement and stresses distribution.

4.2. 하중조건별 구조해석

현장에 매설된 PCC pipe는 뒷채움의 높이를 5가지 CASE로 분류할 수 있고, PCC pipe와 베딩층이 접촉하는 면의 각도는 2가지 CASE로 분류된다. 이를 토대로 유한요소해석시 Table 2와 같이 CASE별로 하중조건을 결정하였다. Table 2에서 연직토압과 수평토압은 Fig. 2에 나타난 토압분포의 크기이다.

Table 2. Load Case

하중조건	등침하면의 높이	접촉면 사이 각도	연직토압 (N/mm)	수평토압 (N/mm)	
				p_1	p_2
CASE I	7.6m	120°	12.648	1.24	12.648
CASE II	12.324m	120°	21.318	2.09	21.318
CASE III-1	7.6m	66°	13.107	1.285	13.107
CASE III-2	9.175m	66°	16.167	1.585	16.167
CASE III-3	10.749m	66°	19.227	1.885	19.227
CASE IV	12.324m	66°(불안경상태)	22.287	2.185	22.287
CASE V	12.324m	66°(안정상태)	12.570	1.233	13.565

Table 2에서 CASE I~CASE IV는 Marston 토압공식을 적용한 경우로 Marston의 토압공식은 강성관을 매설할 경우에 사용하는 공식으로 흙이 침하할 때 강성관 주위의 흙이 강성관보다 상대적으로 더 많이 침하한다는 데 착안한 공식이다. 이 공식은 PCC pipe 구조계산서에 사용된 공식으로 CASE I에 해당한다. 흙의 침하가 모두 이루어지면 등침하면의 높이만으로 일반 토압공식을 이용하여 연직토압과 수평토압을 계산하여 적용하였다.

CASE I~CASE IV는 안정화되지 않은 상태로 Marston 토압공식을 적용하여 연직토압을 계산하였다. CASE V는 안정화된 상태로 일반적인 토압공식을 적용하였다.

구조해석시 유한요소모델은 PCC pipe와 베딩층 접촉면의 각도에 따라 Fig. 10과 같이 2가지로 구성하였다.

유한요소해석을 통해서 얻어진 각 CASE별로 응력이 집중되는 구역의 인장 및 압축응력의 발생현황을 Fig. 11에 변형된 형상은 Fig. 12에 나타내었다.

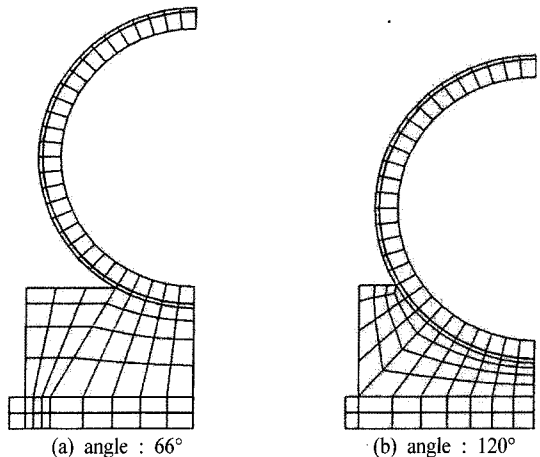


Fig. 10. Finite element mesh.

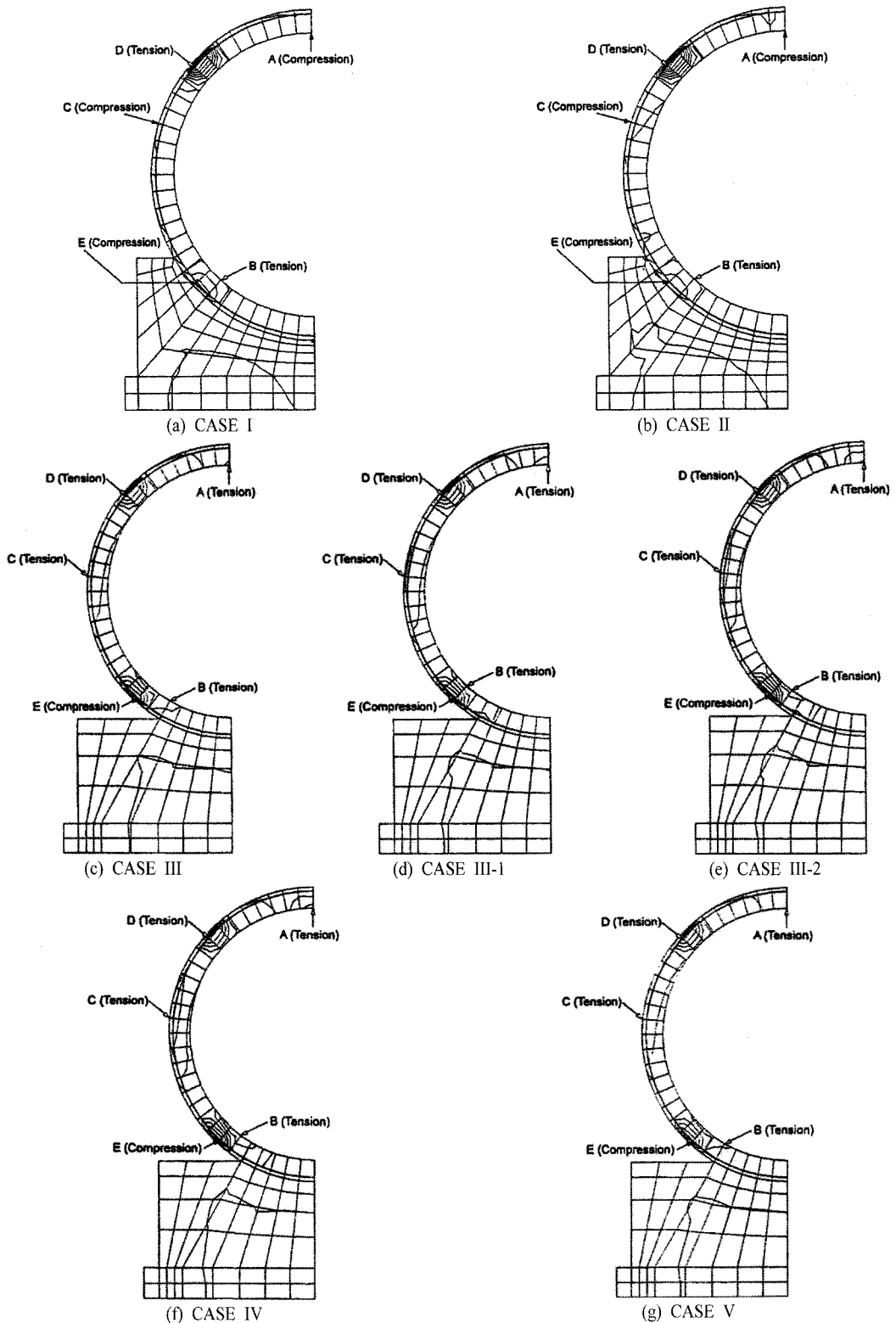


Fig. 11. Stresses distribution.

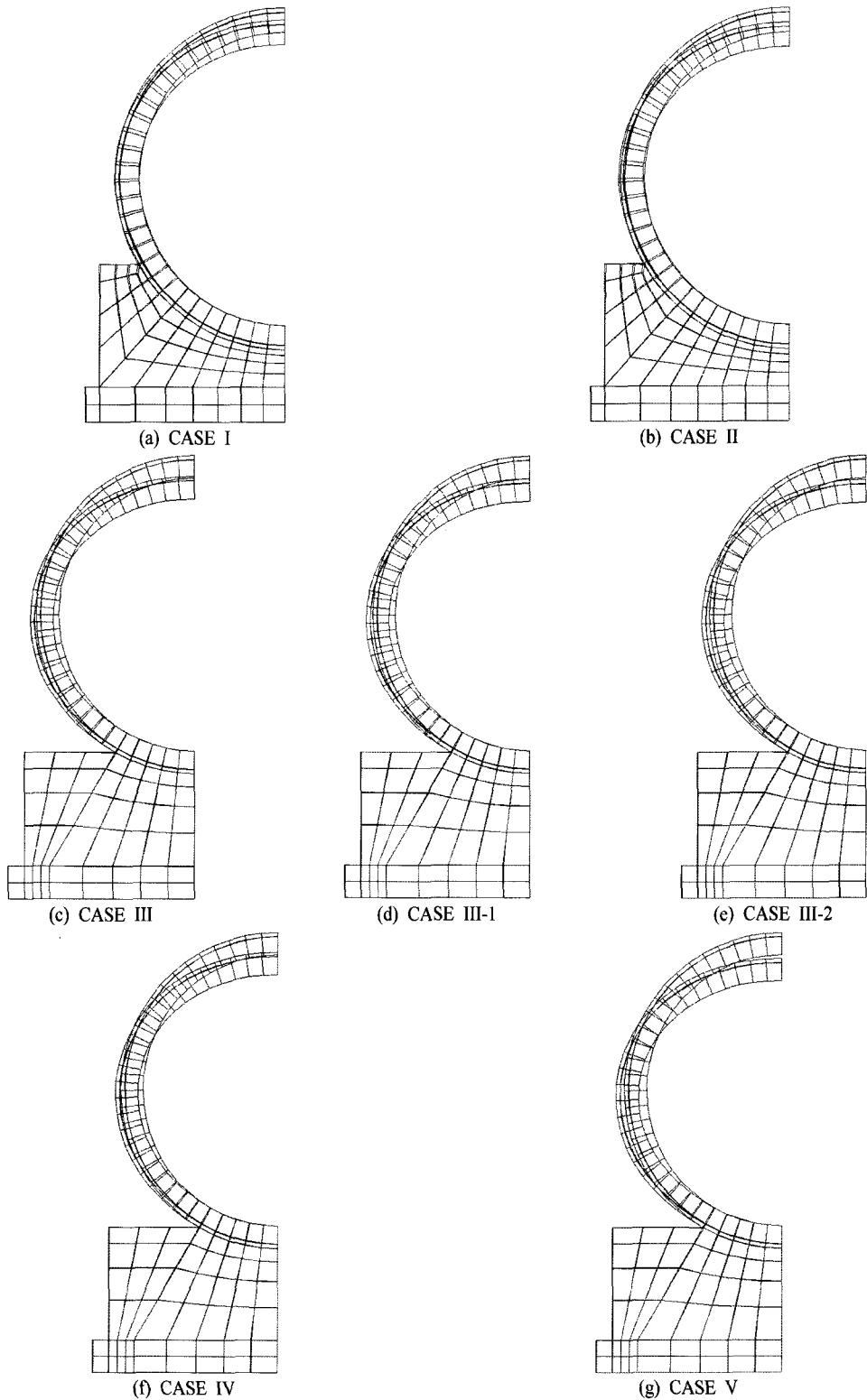


Fig. 12. Deformation mode.

Table 3. Results of analysis

CASE	응력 발생위치 (+ : 인장, - : 압축, MPa)					비 고
	A	B	C	D	E	
CASE I	-1.419	+0.307	-0.126	+3.014	-8.620	
CASE II	-0.448	+0.188	-0.075	+3.381	-9.181	
CASE III-1	+2.670	+1.211	+1.046	+2.428	-17.427	
CASE III-2	+3.771	+2.482	+1.533	+2.468	-18.322	
CASE III-3	+4.851	+2.741	+2.055	+2.528	-18.937	A : 균열
CASE IV	+5.975	+5.027	+2.634	+2.589	-19.950	A, B : 균열
CASE V	+2.110	+0.047	+0.666	+2.400	-17.227	

Fig. 11에서 나타난 각 CASE별 집중응력이 발생하는 부분에서의 발생응력을 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 응력 발생위치 A, B, C, D, E는 Fig. 11의 각 CASE별 응력 분포현황에 표기된 기호이다. 해석 CASE별로 발생하는 압축응력은 모두 허용압축응력 이내이고, PCC pipe 콘크리트의 휨인장강도는 4.472MPa으로서 일부 구간에서 발생응력이 휨인장강도를 초과하였으며, 이는 실제 현장에서 균열이 발생된 지점과 일치하였다.

해석결과, 베딩층과 이루는 각도가 120°이며, 등침하면의 높이가 7.6m와 12.324m인 CASE I과 CASE II는 모든 부분에 대해서 안전측의 응력값을 보였는데 이는 관의 지지면이 상대적으로 넓게 분포하여 베딩층 블록이 크게 되고 이로 인해 구조체의 하단부 강성이 커지게 된다. 따라서 이 부분에 작용하는 토압이 상대적으로 구조체에 미치는 영향이 작기 때문인 것으로 판단된다. CASE III은 베딩층과 이루는 각도가 현장과 동일한 66°이며 등침하면 높이는 7.6m로서 안전측의 응력값을 보였다. CASE III-1, 2에서는 초과응력이 발생하지 않았지만 CASE III-3에서는 관의 내부 천단부에서 허용휨강도를 초과하는 응력이 발생되었다. 또한 CASE IV의 A와 B지역으로 이 구간에서 균열발생이 예측된다. 이는 Fig. 4에 나타난 실제 현장에서 발생된 균열발생 현황과도 일치하는 결과를 보이는 것으로 판단된다. CASE V는 모든 다짐이 끝나는 안정화된 상태로서 강성판과 주변 흙 사이에 상대침하가 없는 상태로 이때는 균열이 발생되지 않는 것으로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 실험 및 해석적 방법에 의해서 터빈 냉각용 프리스트레스트 콘크리트 실린더 관(PCC pipe)에서 발생된 균열의 원인분석과 설계 및

시공시 등침하면의 높이, 베딩층과 이루는 각도, 토압산정시 흙의 안정화 여부가 균열에 미치는 영향을 분석하였다. PCC pipe 시험체에 대한 외압시험으로부터 균열하중을 측정하여 유한요소해석에서 얻어진 균열하중과 비교분석한 결과, 해석값이 시험값과 비교적 잘 예측함을 확인하였다. 따라서 유한요소해석방법을 현장에 매설된 실제 PCC pipe 구조에 적용하여 하중조건에 따른 균열거동 및 균열의 향후 진전여부를 평가하였다.

해석결과, 베딩층과 이루는 각도가 120°인 경우에는 관의 지지면이 상대적으로 넓게 분포하여 베딩층 블록이 크게 되고 이로 인해 구조체의 하단부 강성이 커지게 된다. 따라서 이 부분에 작용하는 토압이 상대적으로 구조체에 미치는 영향이 작기 때문에 발생응력이 작은 것으로 판단된다. 따라서 PCC pipe 설계 시 베딩층과 이루는 각도를 크게 하는 것이 안전측의 설계를 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 베딩층의 각도가 66°인 경우에는 등침하면의 높이에 따라 균열응력을 초과하는 응력이 발생되는데 이는 현장조사결과와도 일치하는 결과이다. 따라서 시공시 보다 효율적으로 균열을 억제하기 위해서는 설계단계에서 베딩층의 각도와 등침하면의 높이를 정확하게 반영하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 유한요소해석시 토압하중은 흙이 침하에 의해 안정화되지 않은 상태와 안정화 된 상태로 구분하여 적용하였다. 해석결과, 안정화 되지 않은 상태에서 결정된 토압하중을 적용하는 경우, 해석에서 얻어진 균열하중을 초과하는 인장응력의 발생구간과 실제 현장에서 균열이 발생된 구간이 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 PPC Pipe 설계시 시공 초기단계에서는 흙이 안정화되지 않은 상태의 조건에서 균열이 억제될 수 있도록 배려하여야 하며, 베딩층과 이루는 각도와 등침하면의 높이가 균열하중에 미치는 영향이 크기 때문에 설계시 이들 조건들이 명확하게 구분되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2008년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 홍종백, “외압을 받는 콘크리트관의 설계”, 농공기술, No. 56, pp. 126~146, 1997.
- 2) 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준 해설”,

- 2007.
- 3) 대우건설기술연구소, “콘크리트 구조물의 시공 시 발생하는 균열 저감대책”, DEG, 008-1998.
 - 4) 정원기, 김종흡, “P.C.C관의 구조설계”, 콘크리트 학회지, 제6권, 제5호, pp. 56~64, 1994.
 - 5) Robert E. Bald, “Standardization of Design Procedures for Prestressed-Concrete Pipe”, Journal of the American Water Works Association, Vol. 52, No. 11, Nov., 1960.
 - 6) 서영태, 박춘석, 장정욱, “연약지반에 매설된 지하 구조물 보호를 위한 보강공법에 관한 연구”, 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2144~2147, 2007.
 - 7) Edward G. Nawy, “Prestressed Concrete, A Fundamental Approach”, Prentice Hall, Fifth Edition, 2006.
 - 8) Merlin G. Spangler, Richard L. Handy, “Soil Engineering”, Intext Press, Inc., 1973.