

요철형 PE-PANEL과 콘크리트 합성구조물의 구조해석

김두환 · 박태인* · 박우영** · 한석규

서울산업대학교 구조공학과 · *경호기술단 감리단 · **경호기술단 구조부
(2001. 2. 23. 접수 / 2001. 6. 18. 채택)

The Structural Analysis of Corrugated Polyethylene-Plastic Form Panel and Concrete of Composite System

Doo-Hwan Kim · Tae-In Park* · Woo-Young Park** · Sok-Kyu Han

Department of Structural Engineering, Seoul National University of Technology

*Kong-Ho Engineering and Architects Co. LTD.

**Kong-Ho Engineering and Architects Co. LTD.

(Received February 23, 2001/ Accepted June 18, 2001)

Abstract : Theoretical definitions of mixed behavior of PE panel and concrete should have preceded to cause a mixed behavior of concrete and polyethylene which have different elastic module, one-line expansion coefficients, poisson ratios, compressive strengths and tensile strengths. Consequently, changes are analyzed through experiment process to identify the effects on interpretation of mixed behavior on the basis of temperature change of structures, temperature rise of concrete other than PE panel due to hydration heat, temperature rise of concrete other than PE panel due to drying and contraction, working of hydrostatic pressure by storage and temperature gradient. From the results of interpretation of the analysis, it is concluded that PE panel have slight influences on the change of stress of structures and maintains structural stability compared with concrete structures without PE panel.

Key Words : PE panel, waterproofing, anti-corrosion, concrete structure, mixed behavior

1. 서 론

공사현장에서 사용하고 있는 거푸집의 대체를 오랫동안 연구 끝에 가로(60cm) 세로(120cm)의 규격의 PE¹⁾-FORM을 개발하여 사용하고 있으며, 국내에서 사용되고 있는 합판은 전량 수입에 의존하고 있어 외화낭비가 심할 뿐 아니라 평균 2~3회 정도밖에 사용하지 못해 자원 낭비를 초래하고 있다. 합판 거푸집을 사용할 경우, 목공이 구조물의 형태에 맞춰 FORM을 일일이 제작해야 하므로 시간과 비용의 소모가 크고 FRP-FORM, EURO-FORM, STEEL-FORM GANG-FORM, SYSTEM-FORM 등 구조물의 성격 형태에 따라 각종 개발된 거푸집을 사용한다고 해도 그것은 단순한 구조물의 형상을 만들어 내기 위한 형틀로써만이 이용되고 있을 뿐, 그 이상의 목적

으로는 활용할 수 없다. 따라서 구조물의 특성상 방수·방식의 기능이 요구될 경우, 거푸집 해체 후 벽체의 내부 또는 외부에 액체, 모르타, 에폭시, 쉬트 방수등 별도의 후속 공정이 추가되어 번거로울 뿐만 아니라, 그 효과도 기대에 크게 미치지 못하고 있다.

따라서 콘크리트 구조체의 방수·방식 문제를 해결 할 수 있는 PE-PANEL의 요철형 거푸집 및 방수·방식공법이 개발²⁾되어 목재거푸집의 대체 자재 개발과 거푸집 겸 콘크리트 표면의 마감 처리를 동시에 해결하였으나 아직까지 PE-PANEL에 대한 연구는 미비한 실정이며, 특히 요철형 PE-PANEL과 콘크리트 복합체와의 상호작용에 관한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구는 PE-PANEL과 콘크리트 합성구조물이 서로 어떠한 영향을 미치는지 규명하여 PE-PANEL에 대한 거푸집 및 방수·방식재료로서의 신뢰성을 높이고자 한다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
KDH6504@duck.snut.ac.kr

2. 구조 해석

2.1. 해석 방법

본 연구의 대상구조물은 PE-PANEL과 콘크리트로 구성되는 복합재료구조물이다. 따라서 구성물인 PE-PANEL의 탄성계수($6.86 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 \sim 1.37 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$)와 콘크리트의 탄성계수($15000 \sqrt{\sigma_{ck}}$ (kg/cm²), $\sigma_{ck} = 240 \text{kg/cm}^2$) 열팽창계수 등이 차이가 있으면 온도하중에 의하여 부등 변형률이 유발된다.^{3,4)}

이 부등 변형률이 각 구성물에게 미치는 영향은 향후 PE-PANEL과 콘크리트의 합성구조가 각종 철근콘크리트 저수시설의 방수·방식재료로 사용되기 위하여 꼭 규명되어야 할 부분이다. 따라서 본 연구에서는 PE PANEL과 복합된 콘크리트 저수구조물에 야기될 수 있는 각종 온도 응력에 대하여 3차원 유한요소해석(해석 프로그램 F.V.S. v2.3)을 통하여 PE-PANEL과 콘크리트 상호간의 영향을 분석하였다. PE가 있는 해석구조의 모델링은 다음의 Fig. 1과 같은 제원의 PE 요철부 두 개를 포함한 영역으로 설정하였다. 또한, 원통형구조의 대칭성을 고려하여 저수구조의 구조체 일부분을 모델링하여 해석한 결과를 PE가 없는 콘크리트 동일구조의 해석결과와 비교·분석하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 모델링하였다.

2.2. 구조해석 범위

요철형 PE-PANEL과 콘크리트의 합성구조에 대한 구조해석은 아래와 같은 조건에 따라 구조물의 거동을 해석하였다.

2.2.1. 구조물의 온도변화에 따른 합성거동 해석
건설교통부 제정 도로교 설계기준에서는 콘크리트 구조물의 설계시 온도변화의 영향을 고려할 것

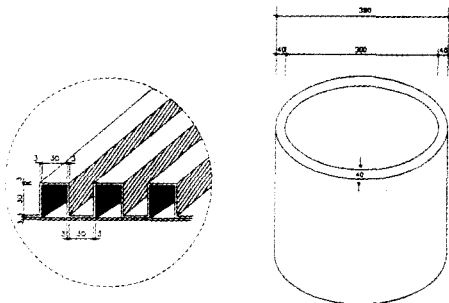
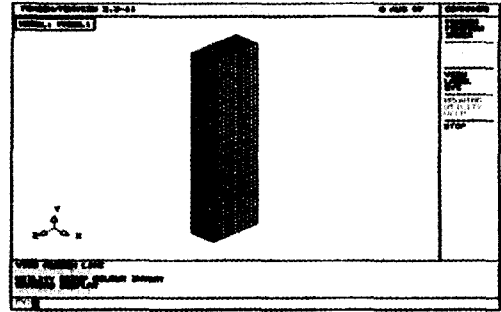
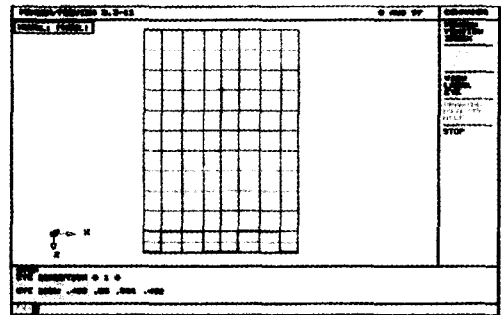


Fig. 1. Dimension of PE-PANEL and model structure

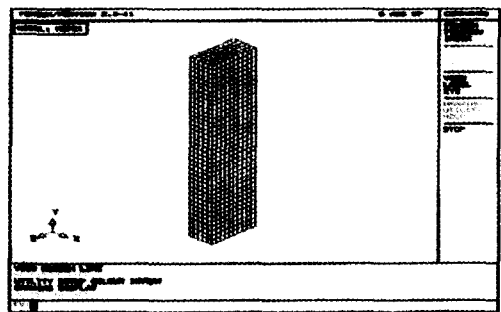


(a) Mesh of model with PE-PANEL

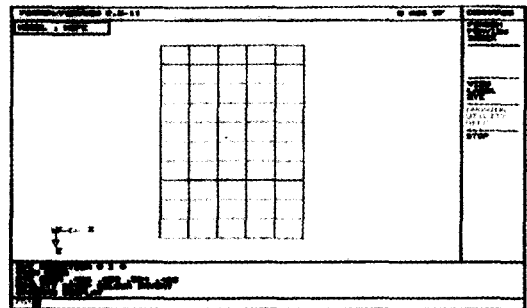


(b) The top side model with PE-PANEL

Fig. 2. Considering PE-PANEL modeling



(a) Mesh of model without PE-PANEL



(b) The top side model without PE-PANEL

Fig. 3. Modeling without PE-PANEL

을 규정하고 있는데, 이때 온도변화는 구조물에 균일한 온도(20℃)를 표준으로 하고 단면의 최소치수가 70cm 이상일 경우에는 상기 표준을 15℃로 하도록 규정하고 있다⁹⁾. 본 연구 대상 구조물의 경우는 단면의 치수가 40cm이므로 온도의 승강이 20℃인 것으로 가정되는 구조물이므로 콘크리트와 PE의 온도를 동시에 ±20℃ 변화시켜 해석을 실시하였다.

2.2.2. 수화열 등에 의한 콘크리트만의 온도상승이 일어나는 경우

대상 구조물은 콘크리트표준시방서의 제7장 매스 콘크리트 편에서 규정⁹⁾하는 매스콘크리트의 범주에 속하지는 않지만 콘크리트의 국부적인 온도상승으로 인하여 벽체에 불리한 응력을 유발할 수 있으므로 이에 대한 해석을 실시해 보았다. 이때 국부적인 콘크리트의 온도 상승량은 20℃로 본다.

2.2.3. 건조수축에 의한 콘크리트만의 수축이 일어나는 경우

콘크리트 구조물의 건조 수축량은 콘크리트의 배합비, 주변환경, 시편의 형상등의 영향을 받는다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 건조수축변형률은 (200~600)×10⁻⁶정도로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 재료적인 건조수축변형률이 (200~600)×10⁻⁶이 생기는 상황에서 콘크리트와 PE-PANEL의 재료적인 차이로 인한 응력의 변화를 관찰하였다.

2.2.4. 저수에 의해 정수압이 작용하는 경우

저수시에 발생하는 정수압에 의한 PE-PANEL과 콘크리트의 응력을 검토하기 위하여 만수위 2m에 대한 정수압의 영향을 고려한 구조해석을 실시하였다. 또한 저수 도중 구조물의 온도가 변화하여 두 가지 경우가 복합적으로 작용하는 경우도 고려하였다. 이때 PE-PANEL과 콘크리트 면에 가장 불리한 하중 조합이 될 수 있도록 정수압과 온도변화가 동시에 일어나는 경우에 대하여 구조해석을 실시하였다.

2.2.5. 온도 구배가 생기는 경우

대상구조물은 외기 환경과 접하는 조건에 위치하므로 환절기 등의 온도변화가 큰 경우나 기타 안쪽과 바깥쪽의 온도경사가 커지는 경우에 대해서도 콘크리트와 PE-PANEL의 응력 검토를 할 필요가 있다. 본 연구에서는 구조물에 최대한 불리한 하중을

가하기 위하여 동절기에는 내부온도를 10℃, 외부온도를 -20℃로 하여 온도 구배가 30℃가 되도록 하였고, 하절기에는 내부온도를 10℃, 외부온도를 40℃로 하여 역시 온도 구배가 30℃가 되도록 하였다.

3. 구조해석 결과 및 고찰

3.1. 구조물의 온도변화에 따른 합성거동의 영향

본 연구에서 얻어진 구조물의 온도변화에 의한 해석결과를 고찰하면 PE PANEL의 경우 X, Y, Z 방향 응력의 전면에 걸쳐 ±10~11kgf/cm² 정도의 응력이 발생하였고 콘크리트에서는 X 하단 방향에서 국부적인 응력을 제외하고 전체적으로 ±47~53kgf/cm²의 응력이 발생하였다. Y, Z 하단부 방향에서는 국부적인 높은 응력이 발생하지만 상부로 갈수록 구속력이 없어지면서 ±1~3kgf/cm² 정도의 응력이 발생하였다. 따라서 세 방향 모두 PE PANEL의 영향이 경미함을 알 수 있다. 구조물의 온도변화에 의한 구조해석 결과는 Table 1과 같이 나타내었다.

콘크리트와 PE-PANEL이 20℃의 온도승강을 거치는 경우, 이론적인 변형량은 콘크리트(열팽창계수 1.0×10⁻⁵)는 ±200×10⁻⁶의 변형이 생기고, PE-PANEL(열팽창계수 1.1×10⁻⁴)는 ±2200×10⁻⁶ 변형이 생긴

Table 1. Analysis result with temperature transformation in structure

| 구분 | 해석 결과 | |
|-----------|-------|--|
| X방향 응력 | PE P. | · PE-PANEL의 전면에 걸쳐 ±10~11kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 하단부에서 국부적인 높은 응력이 발생하는 것을 제외하고는 전체적으로 이론치에 근접한 ±47~53kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. 따라서 PE-PANEL의 영향이 경미함을 알 수 있다. |
| Y방향 응력 | PE P. | · PE-PANEL의 전면에 걸쳐 ±10~11kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. |
| | CONC. | · 콘크리트 하단부에서 국부적인 높은 응력이 발생하지만 상부로 갈수록 구속력이 없어지면서 ±1~3kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. 따라서 PE-PANEL의 영향이 경미함을 알 수 있다. |
| Z방향 응력 | PE P. | · PE-PANEL의 전면에 걸쳐 ±10~11kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. |
| | CONC. | · 콘크리트 하단부에서 국부적인 높은 응력이 발생하지만 상부로 갈수록 구속력이 없어지면서 ±1~3kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하였다. 따라서 PE-PANEL의 영향이 경미함을 알 수 있다. |

다. 따라서 각 재료의 변형량의 차이에 상응하는 $\pm 2200 \times 10^{-6}$ 이 양쪽의 재료에 영향을 미치게 된다.

이때, 콘크리트의 강성이 PE-PANEL의 강성에 비하여 거의 100배에 가깝게 크므로 대부분의 영향은 PE-PANEL에 미치게 된다. 실제로 PE-PANEL의 변형은 외부적인 구속조건과 내부적인 콘크리트의 구속으로 인하여 이론적인 응력인 $\pm 6.6 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 두배에 가까운 응력이 발생하였다. 그러나 PE-PANEL은 탄성계수가 매우 적으므로 PE-PANEL를 손상시키는 정도에는 이르지 않는다.

3.2. 수화열에 의한 콘크리트 온도상승의 영향

3차원 유한 요소 모델링을 통한 구조해석 결과, PE-PANEL의 경우 X 방향 응력에서는 콘크리트 변형률이 거의 구속됨으로 전이되는 변형이 경미하여 인장 응력이 거의 발생하지 않으나 Y, Z 방향의 응력에서는 콘크리트 변형이 전이되어 $0.8 \sim 1.3 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 인장응력이 발생하였다. 그러나 콘크리트의 경우에는 X, Y, Z 방향응력 모두 콘크리트 벽체에 발생하는 응력은 온도를 20°C 상승하는 경우와 비교 압축응력의 증가가 거의 없는 것으로 나타났다. 콘크리트의 20°C 의 온도상승으로 인하여 유발되는 팽창변형률은 구조물 내에서 약 240×10^{-6} 정도이고 두

재료의 강성의 차이가 크므로 이 변형률의 대부분이 PE-PANEL로 전이된다. 수화열에 의한 콘크리트 온도상승의 영향은 Table 2에 나타내었다.

3.3. 건조수축에 의한 콘크리트 수축의 영향

3차원 유한 요소 모델링을 통한 구조 해석결과, PE-PANEL의 경우 X 방향응력에서는 콘크리트만의 팽창이 일어나는 경우와 마찬가지로 X 방향으로의 변형률이 거의 구속되므로 PE-PANEL로 전이되는 변형이 경미하여 압축응력이 거의 발생하지 않았다. 그러나 Y, Z 방향의 응력은 콘크리트 변형이 전이되어 $0.7 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 압축응력이 발생하며, 또한 콘크리트의 경우는 X, Y, Z 방향 응력 모두 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 수축이 생기는 경우와 비교 인장응력의 증가가 거의 없다. 건조수축에 의한 콘크리트 수축의 영향은 Table 3에 나타내었다.

이상의 결과를 보면 콘크리트의 건조수축에 의한 영향은 수화열에 의한 영향과 같은 경향을 나타낼 수 있다. 즉 콘크리트의 수축력이 PE-PANEL에 직접적으로 영향을 미치지만 그 정도가 미미하여 PE-PANEL의 구속력이 콘크리트에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 2. Analysis result with heat of hydration

| 구분 | 해석 결과 | |
|-----------|-------|--|
| X방향 응력 | PE P. | · PE-PANEL에 하중으로 작용하게 되는 X방향으로의 콘크리트의 변형률이 거의 구속되므로 PE-PANEL로 전이되는 변형이 경미하여 인장응력이 거의 발생하지 않는다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 온도를 20°C 상승하는 경우와 비교하여 압축응력의 증가가 거의 없다. |
| Y방향 응력 | PE P. | · 콘크리트의 변형이 PE-PANEL로 전이되어 $0.8 \sim 1.3 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 인장 응력이 발생한다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 온도를 20°C 상승하는 경우와 비교하여 압축응력의 증가가 거의 없다. |
| Z방향 응력 | PE P. | · 콘크리트의 변형이 PE-PANEL로 전이되어 $0.8 \sim 1.3 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 인장 응력이 발생한다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 온도를 20°C 상승하는 경우와 비교하여 압축응력의 증가가 거의 없다. |

Table 3. Analysis result with drying shrinkage

| 구분 | 해석 결과 | |
|-----------|-------|---|
| X방향 응력 | PE P. | · 콘크리트만의 팽창이 일어나는 경우와 마찬가지로 X방향으로의 콘크리트의 변형률이 거의 구속되므로 PE-PANEL로 전이되는 변형이 경미하여 압축응력이 거의 발생하지 않는다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 수축이 생기는 경우와 비교하여 인장응력의 증가가 거의 없다. |
| Y방향 응력 | PE P. | · 콘크리트의 변형이 PE-PANEL로 전이되어 $0.7 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 압축응력이 발생한다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 수축이 생기는 경우와 비교하여 인장응력의 증가가 거의 없다. |
| Z방향 응력 | PE P. | · 콘크리트의 변형이 PE-PANEL로 전이되어 $0.7 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 정도의 압축응력이 발생한다. |
| | CONC. | · 콘크리트는 벽체에 발생하는 응력은 콘크리트만을 모델링하여 수축이 생기는 경우 비교하여 인장응력의 증가가 거의 없다. |

Table 4. Analysis result with hydrostatic pressure

| 구분 | 해석 결과 | |
|-----------|-------|---|
| X방향 응력 | PE P. | · 응력이 거의 '0'에 가깝다. |
| | CONC. | · 응력이 거의 '0'에 가깝다. |
| Y방향 응력 | PE P. | · 응력이 거의 '0'에 가깝다. |
| | CONC. | · 인장, 압축연단에 연단에 응력이 약 5.5 kgf/cm ² 정도의 응력이 발생하고 상부로 올라갈수록 응력이 점차 '0'으로 수렴한다. |
| Z방향 응력 | PE P. | · 응력이 거의 '0'에 가깝다. |
| | CONC. | · 응력이 거의 '0'에 가깝다. |

3.4. 저수에 의한 정수압 작용의 영향

3.4.1. 정수압만 작용하는 경우

정수압만 작용하는 경우 X, Z의 방향으로서는 콘크리트와 PE-PANEL 양쪽에 모두 경미한 응력만이 발생하였고 Y방향으로는 콘크리트에는 상,하연 각각에 대하여 바닥부에서 약 5.5 kgf/cm²의 응력이 발생하다가 상부로 갈수록 '0'이 되었다. 그러나 콘크리트에 이러한 응력을 일으키는 변형은 상대적인 강성의 차이로 인하여 PE-PANEL에는 아주 경미한 응력만이 발생되었다. Table 3, 4를 보면 콘크리트에 발생되는 응력은 PE-PANEL이 없는 경우의 해석결과와 비교할 때 중립축의 이동으로 인한 변화정도만이 있을 뿐 PE-PANEL로 인한 콘크리트의 응력 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 정수압만 작용하는 경우의 구조해석 결과는 Table 4에 나타내었다.

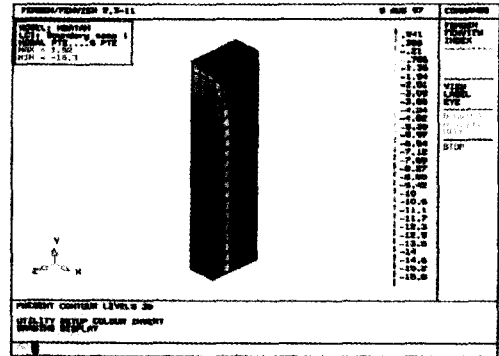
3.4.2. 정수압과 온도하강이 동시에 일어나는 경우

정수압과 온도하강이 동시에 일어나는 경우는 위에서 나타났듯이 정수압에 의한 영향이 Y방향을 제외하고는 거의 작용하지 않으므로 전체적으로 온도 변화의 영향에 의하여 지배된다.

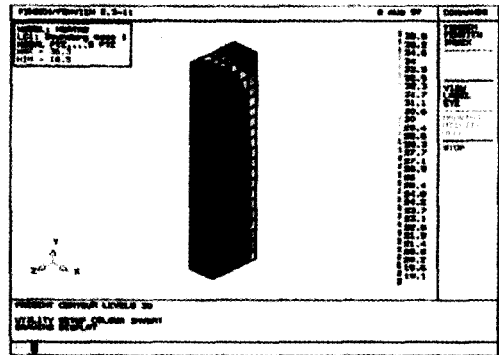
PE-PANEL에 의한 콘크리트의 응력 변화나 콘크리트에 의한 PE-PANEL의 거동변화는 거의 발생하지 않았다.

3.5. 온도구배에 따른 합성체의 영향

온도 구배에 의한 구조물의 응력 상태를 알기 위해 선 먼저 온도해석을 실시한 후, 동일한 유한요소 모델링을 가진 구조물에 온도를 하중으로 대입하고 이로 인한 응력 상태를 계산하여야 한다. 대상구조물의 온도해석에 의한 결과는 다음 Fig. 4과 같다.



(a) The winter season



(b) The summer season

Fig. 4. Analysis of temperature result in the winter season and the summer season

온도 구배로 인하여 구조물에 발생되는 X 방향 응력은 동절기의 경우는 외벽에 약 30~40 kgf/cm²의 인장 응력이 발생하고, 내벽에는 4~7 kgf/cm² 정도의 압축 응력이 발생하는데 이것은 철근콘크리트 벽체가 저항하도록 설계되므로 문제가 되지 않는다. 하절기의 경우는 외벽에는 70~100 kgf/cm² 정도의 압축 응력이 발생하였고, 내벽에는 45~60 kgf/cm² 정도의 압축응력이 발생하는 것으로 나타났다. Y방향과 Z방향의 응력은 구속이 없는 관계로 거의 '0'이 되었다.

4. 결론

폴리에틸렌 재질의 특성을 이용한 PE-PANEL과 콘크리트 합성구조물에 대한 구조해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PE-PANEL과 콘크리트 구조물에서 온도변화가 일어나는 경우, 열팽창 차이로 인한 응력의 대부분

은 콘크리트의 강성이 PE-PANEL에 비해 월등히 높으므로 PE-PANEL에 미치게 되나 PE-PANEL의 탄성계수 범위 내에서 발생하여 구조물을 손상시키는 정도에는 이르지 않았다.

2. 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승 결과, PE-PANEL에서 발생된 인장응력을 콘크리트의 팽창변형률이 모두 하중으로 전이된 응력과 거의 동일하여 구조물에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다.

3. 콘크리트의 건조수축 및 정수압작용에 의한 PE-PANEL의 응력변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 온도구배로 인하여 콘크리트 구조물에 발생되는 응력은 크게 나타났지만 콘크리트의 상대적인 탄성계수의 차이가 크므로 PE-PANEL에는 응력이 크게 발생하지 않았다.

5. PE-PANEL과 콘크리트 구조물과의 구조해석 결과 전반적으로 문제가 없는 것으로 나타났으나

PE-PANEL과 콘크리트 구조물의 합성거동에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) 朴承國 譯, "Polyethylene 수지", pp. 5, 9, 42, 45, 大光書林, 1968.
- 2) (株) 京好技術團, "PE-요철형 PANEL 방수·방식 공법 보고집" pp. 3, 9, 42, 1998.
- 3) L. E. Nielsen, "Mechanical Properties of Polymers", Reinhold, pp. 122~131, 1962.
- 4) P. J. Canterino, "Encyclopedia of Polymer Sci. and Tech." H. F. Mark ed. p. 431, 1967.
- 5) 건설교통부제정 도로교 설계기준 - 한국도로교통협회, pp. 21~22, 1996.
- 6) 콘크리트 표준시방서 - 한국콘크리트학회, pp. 119~132, 1999.