

정체식철근콘크리트모형을 리용한 고압복합철관로분기관의 구조해석과 보강대책

리남혁, 김강철

선행연구[1]에서는 복합철관로의 철관에 보강고리를 배치하는 경우 평면변형문제의 해석적풀이식을 제기하고 그에 준하여 높아지는 철관의 림계압력을 정량적으로 분석하였다. 선행연구[3]에서는 손상된 콘크리트구조물을 무근콘크리트와 철근콘크리트로 보강한 경우 류체-구조결합마당해석방법으로 세기와 수명을 비교분석하였다.

복합철관로구조해석과 관련한 연구에서는 대부분이 분기관이 아닌 직선관로에 대하여 평면문제로 보고 해석적풀이를 고찰하였으며 철관주위의 콘크리트를 철근콘크리트로 모형화한 연구는 많이 진행되지 못하였다. 복합철관로의 분기관은 응력집중이 일어나는 부분으로서 해석적풀이를 예측할수 없으며 그 력학적일상태를 정확히 평가하자면 3차원해석을 필요로 한다.

론문에서는 정체식철근콘크리트모형을 리용하여 고압복합철관로의 분기관에서의 응력상태에 대한 3차원유한요소해석을 진행하고 분기점에서의 응력집중정도를 고찰하였으며 콘크리트에 철근을 보강하지 않았을 때와 보강하였을 때의 철관과 콘크리트의 응력상태를 비교분석하고 해당한 대책을 제기하였다.

1. 정체식철근콘크리트모형

콘크리트의 세기평가에는 선응력상태, 평면응력상태, 공간응력상태에 따라 Rankine규준, Druck-Prager규준, William-Warnke규준 등 각이한 세기규준들이 리용되고있으며 공간응력상태에서는 William-Warnke의 5파라메터규준이 콘크리트의 3차원응력상태를 비교적 정확히 반영하는 규준으로 되고있다.[4]

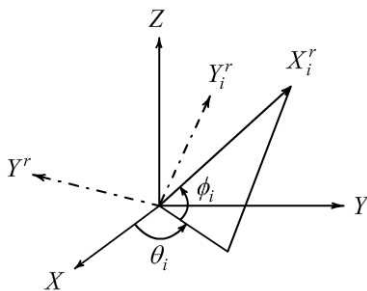


그림 1. 철근의 배치

철근콘크리트모형에는 철근이 자기의 크기와 물성을 가지고 콘크리트에 매몰된것으로 보는 분리식모형과 철근의 크기를 콘크리트와 일정한 체적비로 환산하여 콘크리트에 분산된것으로 가상하고 배근된 방향에서 탄성결수행렬을 변화시키는 정체식모형이 있다.

철근과 콘크리트의 호상작용과 안전성을 따로따로 고찰할 필요가 있을 때에는 분리식모형을 리용하지만 이 경우 모형화와 계산에 품이 많이 든다. 반면에 거시구조전체의 안전성을 고찰할 때에는 정체식모형을 리용하는것이 합리적이다.

범용유한요소해석프로그램 ANSYS에서는 공간응력상태에서 철근배근을 모형화하기 위하여 SOLID65요소의 정체식철근콘크리트모형을 리용하며 이때 매 요소자리표계에서 응력-변형행렬은 철근의 배근방향에 따라 보강향을 포함한다.(그림 1)

그림 1에서 요소자리표계는 (X, Y, Z) 로 표기되었고 (X_i^r, Y_i^r, Z_i^r) 는 보강요소 i 에

대한 자리표이다. 매 자리표계 (X_i^r, Y_i^r, Z_i^r) 에 관한 응력-변형행렬은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = [D^r]_i \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 E_i^r 는 보강요소 i 의 양그를이다. σ_{xx}^r 는 령이 아닌 응력성분이고 보강요소 i 의 X_i^r 방향에서 축방향응력이다.

2. 설계기초자료와 력학적모형화

설계기초자료에서 입구관의 직경은 1.7m, 가지관의 직경은 1.2m, 출구관의 직경은 1.0m, 주관의 길이 15.65m, 흡입구의 길이 2.5m, 분기관의 경사도는 45° 이다.(그림 2의 L)) 또한 철관주위에 사방으로 1m두께로 콘크리트를 타입하고 지상에 6m의 성토를 진행한다.(그림 2의 T))

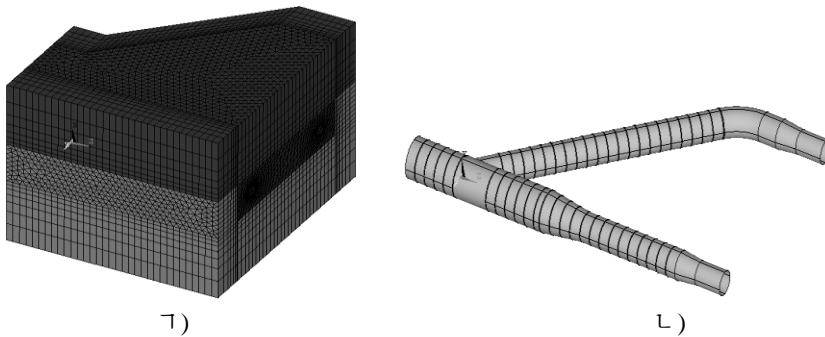


그림 2. 시공한 구조와 내부에 매몰된 철관로의 계산모형
T) 전체모형, L) 철관모형

철관에 흐르는 물의 온도는 15°C , 운동학적점성결수는 $1.204 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 밀도는 1000kg/m^3 이다. 한편 강철의 탄성결수는 190GPa, 가로변형결수는 0.3, 밀도는 7800kg/m^3 , 류동한계는 210MPa, 세기한계는 380MPa이다. 철관은 두께가 30mm이며 그 주위에 두께가 1.5cm, 너비와 높이가 3cm인 T자형강철판띠들을 0.5m간격으로 보강한다.

콘크리트는 탄성결수 20GPa, 가로변형결수 0.167, 밀도 2400kg/m^3 , 당김세기 15MPa, 누름세기 9.0MPa이다.

철관과 콘크리트의 부착상태에서 마찰결수 0.7, 부착세기 0.7MPa이며 지반암석에서 탄성결수 30GPa, 가로변형결수 0.23, 밀도 2800kg/m^3 이고 성토흙에서는 탄성결수 3MPa, 가로변형결수 0.23, 밀도 1700kg/m^3 , 내부마찰각 29° , 응집력 0.05MPa이다.

해석프로그램은 ANSYS19.5를 리용하며 물요소는 FLUID142, 철관과 보강고리요소는

SHELL181(von-Mises 기준), 콘크리트요소는 SOLID65(Concrete: William-Warnke의 5파라미터 기준), 지반압축요소는 SOLID185(Druck-Prager 기준), 흙요소는 SOLID185(Mohr-Coulumb 기준), 철판과 콘크리트사이의 접촉요소는 TARGE170, CONTA174를 리용한다.(그림 2의 ㄱ)) 철판의 보강고리는 분기관주위에 50cm간격으로 주관에 25개, 분기관에 22개, 총 47개를 배치하였다.(그림 2의 ㄴ))

3. 해 석 결 과

류체-구조해석방법을 리용한다. 즉 먼저 류체해석으로서 철판로내부의 흐름을 해석하여 관로에 작용하는 압력분포를 계산하고 그로부터 철판벽에서 압력분포를 얻는다. 이때 철판의 수압에 의한 변위가 반경에 비하여 매우 작으므로 철판의 변형에 의한 류체요소의 모형변화는 무시한다. 다음 구조해석으로서 류체해석에서 얻은 수압분포를 철판내벽에 집경계조건으로 주고 압석과 성토흙의 자름면에 변위경계조건을 준 다음 구조전체의 자중을 체적집으로 주고 콘크리트세기기준으로서 William-Warnke의 5파라미터세기기준(당김세기 1.5MPa, 누름세기 9.0 MPa)을 리용하여 철근콘크리트와 철판의 비선형접촉해석을 진행한다.

먼저 관로안의 내압분포를 고찰한다.

흐름모형은 RNG $k-\varepsilon$ 란류모형을 리용하였으며 이때 레널즈수는

$$Re = \frac{2V_{in}R_{in}}{\nu} \approx 6.496 \times 10^6 \quad (2)$$

으로서 란류해석을 진행한다. 류체해석의 결과 주철판의 입구에서 41.8atm, 출구에서 40.7atm, 분기관의 입구에서 41.6atm의 수압이 작용한다는것을 알수 있다.

다음으로 응력해석을 진행한다.

무근콘크리트에 매몰한 경우 정상운영과 차단정지시 분기관의 뒤부분에서 응력집중이 발생하여 133MPa의 환산응력이 나타나며 분기점이 아닌 철판의 대부분구역에서는 51.4MPa정도로서 분기점에서의 응력집중계수는 2.6정도라는것을 알수 있다. 이때 분기점

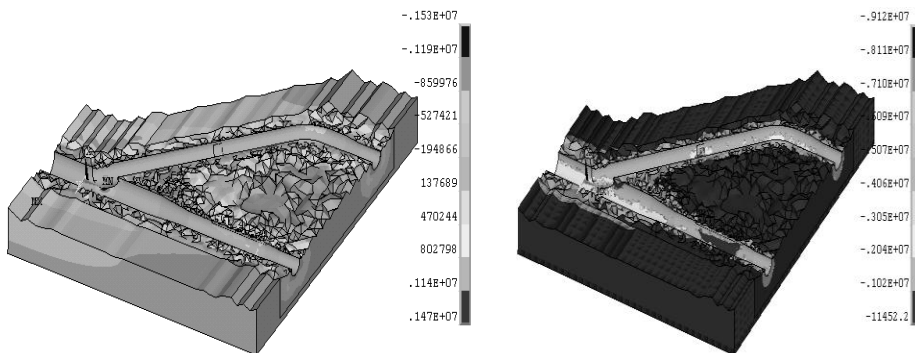


그림 3. 보강고리를 배치한 경우 철판주위콘크리트의 당김, 누름응력분포

에서의 최대응력값은 철판의 류동한계아래에 있으므로 정적안전성은 담보할수 있으나 피로한계가 140.3MPa[2]임을 고려하면 물메짐 혹은 반복적인 피로짐이 피로파괴안전성에 영향을 미친다는것을 알수 있다. 특히 콘크리트의 균열은 거의 결면까지 확대되며 콘크리트의 당김응력은 1.4MPa로서 콘크리트의 당김세기와 거의 일치한다.(그림 3)

그러므로 콘크리트에 철근을 보강하여 응력준위를 낮추기 위한 대책을 세워야 한다.

철근콘크리트에 매몰한 경우 식 (1)을 리용하여 분기관콘크리트주위에 철근을 축방향과 원주방향으로 각각 10cm, 반경방향으로 5cm씩 2층간격으로 배근한 경우의 응력상태를 평가한다. 정상운영과 차단시 주철관의 뒤부분에서 113.0MPa의 환산응력이 나타나는데 무근콘크리트에 매몰한 경우에 비하여 최대응력이 15% 감소하며 특히 철관의 분기점에서 최대응력이 피로한계보다 작아지는것으로 하여 물메짐 혹은 반복적인 피로짐에 대한 안전성이 담보된다. 철관벽주위의 콘크리트의 파괴는 철관의 보강고리주변에 국한되며 콘크리트의 수축변형을 고려하면 국부적인 파괴는 무시할수 있다. 또한 콘크리트의 최대당김응력은 1.12MPa로서 무근콘크리트에 매몰하였을 때보다 20% 정도 작아진다.

맺 는 말

1) 복합철관로운영시 최대응력은 분기점에서 발생하며 특히 관로차단시 분기점에서의 응력집중계수는 2.6정도이다.

2) 관로차단시 철관에서 무근콘크리트에 매몰한 경우 최대환산응력은 피로파괴의 안전성에 영향을 미치지만 제기한 방법으로 철근콘크리트에 매몰하면 최대응력이 15% 감소하며 피로파괴의 안전성도 담보된다.

3) 관로차단시 콘크리트에서 무근콘크리트에 매몰한 경우 분기점주변을 중심으로 균열이 전파되어 콘크리트의 균열이 많이 확대되지만 철관주변의 콘크리트에 축방향과 원주방향, 반경방향으로 철근을 주어진 간격으로 보강하고 콘크리트를 일체식으로 타입매몰하면 철관벽주위의 콘크리트의 파괴는 철관의 보강고리주변에 국한되며 콘크리트의 최대당김응력은 20% 감소되어 구조의 안전성을 담보한다.

참 고 문 헌

- [1] 오영재; 농업수리화, 6, 15, 주체97(2008).
- [2] 송성관 등; 재료력학, 김일성종합대학출판사, 1~317, 주체99(2010).
- [3] Nam-Hyok Ri et al.; Hydro Science & Marine Engineering, 1, 1, 1, 2019.
- [4] Nam-Hyok Ri et al.; IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 16, 3, 39, 2019.

주체109(2020)년 12월 5일 원고접수

Structural Analysis of Branch Conduit in High-pressure Composite Steel Pipe Using Smeared Reinforcement Concrete Model and a Reinforcement Method

Ri Nam Hyok, Kim Kang Chol

This paper evaluates stress concentration and failure behavior of branch conduit in high-pressure steel pipe which is reinforced by steel rings and buried in concrete. In order to reduce the stress level, the paper suggests a reinforcement method of reinforcing iron bars in concrete around the buried pipe and quantitatively compares the result.

Keywords: composite steel pipe, smeared reinforcement concrete model, branch conduit