



원형탱크 구조물 벽체의 텐던 배치에 대한 고찰

전세진^{1)*} · 정철현¹⁾ · 진병무¹⁾

¹⁾대우건설기술연구소

(2002년 4월 28일 원고접수, 2002년 8월 30일 심사완료)

Effect of the Prestressing Tendon Arrangement in the Wall of Circular Storage Tank

Se-Jin Jeon^{1)*}, Chul-Hun Chung¹⁾, and Bycong-Moo Jin¹⁾

¹⁾ Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, 440-210, Korea

(Received April 28, 2002, Accepted August 30, 2002)

ABSTRACT

Prestressing tendons in the wall of circular storage tank are investigated from the viewpoint of equivalent load method. Special attention is paid to the effectiveness of eccentricities of the hoop and vertical tendons. Local effect at the bent point of vertical tendon in the wall with varying thickness is examined. Some aspects which are frequently overlooked or misinterpreted in the conventional analyses of vertical tendons are discussed. Numerical examples are presented to emphasize the significance of accurate analysis of the vertical tendon in practice. It is expected that the equivalent load method can be effectively used to simplify the analysis of tendons in the circular wall and to minimize the errors.

Keywords : prestressed concrete, circular storage tank, equivalent load method, hoop(circumferential) tendon, vertical tendon

1. 서 론

원자력발전소 격납구조물이나 LNG 저장탱크와 같은 원형탱크 구조물에는 구조적 효율성을 위하여 프리스트레싱 텐던이 널리 쓰여져 왔다. 유한요소법 등의 컴퓨터 해석 기법의 발전으로 그러한 프리스트레스트콘크리트(PSC) 구조물의 해석시 철근이나 텐던을 실제의 배치형상과 최대한 가깝게 모델링하는 것도 가능하게 되었다. 그러나, 텐던의 대략적인 배치형태를 결정하는 예비설계단계부터 그 처럼 상세한 모델링을 수행하는 것은 비효율적인 경우가 많으며, 이 경우 실용적으로 널리 쓰이는 텐던의 해석법이 등가하중법이다.

등가하중법(equivalent load method)¹⁾은 프리스트레싱 텐던의 영향을 구조물에 작용하는 외력으로서 고려하는 것으로, 프리스트레싱의 효과를 명확히 하고 해석을 단순화시켜주는 유효한 방법론이다. 일반적으로 등가하중법은 PSC 보의 해석에 있어 널리 쓰여져 왔으며, 그 적용범위가 매우 넓어서 본 논의 대상 구조물인 원형탱크와 같은 PSC 쉘 구조물의 해석에서도 유용하게 쓰일 수 있다.

본 연구에서는 등가하중법의 관점에서 원형탱크 벽체의 원환텐던(hoop or circumferential tendon) 및 수직텐던(vertical tendon)의 배치가 구조물에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고, 예제를 통하여 그 영향을 평가하였다. 주로 텐던의 편심배치 및 절곡배치의 영향을 고찰하였으며, 이와 관련하여 기존의 설계 및 해석에 있어서 간과하거나 잘못된 점들에 대해 고찰하였다.

2. 원환(圓環) 텐던

2.1 원환텐던의 역할

원환텐던은 원형탱크 구조물에 있어서 주요 설계하중인 내압이나 유체압을 상쇄하는 1차적인 중요성을 가진다. 시방서에서는 원환텐던에 의해 주요 설계하중을 상쇄하고 추가의 원환방향 압축응력이 도입되도록 규정하는 경우가 많으며, 이는 건조수축이나 온도변화 등에 대비한 것이다. 예를들어 ACI 373²⁾ 및 PCI³⁾에서는 200 psi(14 kgf/cm²)의, BS 7777⁴⁾에서는 1.0 N/mm²(10 kgf/cm²)의 여유압축응력을 규정하고 있다.

Fig. 1은 주요 설계하중이 유체압인 경우에 대해 일반적인 원환텐던의 배치 및 프리스트레싱 힘의 적절한 도입

* Corresponding author

Tel : 031-250-1180 Fax : 031-250-1131

E-mail : jsj@mail.dwconst.co.kr

수준을 나타내어 주고 있다.

2.2 원환텐던의 편심배치

원환텐던은 수직텐던에 접하여서 벽체 중심에 가깝게 배치될 수도 있으나[Fig. 2(a)], 수직텐던이 없을 경우 벽체 바깥쪽의 수직철근에 접하여 시공되는 경우도 있다 [Fig. 2(b)]²⁾. 또한 벽체 바깥쪽으로 강선이나 강연선을 감는 시공방식의 경우 극단적으로 편심배치되게 된다[Fig. 2(c)]³⁾.

참고문헌 6에서는 이러한 원환텐던의 편심배치의 영향을 등가하중법 및 그러한 등가하중법과 밀접한 관계가 있는 텐던의 직선이동(linear transformation)¹⁾의 원리를 통하여 자세히 고찰하였으며 Nielsen⁷⁾의 연구결과와 비교하였다. 참고문헌 6에서 결론적인 사항을 요약하자면 다음과 같다.

PSC 연속보의 해석 및 설계시 흔히 사용되는 직선이동의 원리를 원형탱크 벽체의 원환텐던의 편심배치 문제에 확장시켜 적용하였을 때, 비록 몇몇 관점에서는 연속보의 경우와 다른 점이 있지만 결론적으로 이때에도 직선이동의 원리가 성립한다. 이는 바꾸어 말하면 실제 구조물에 있

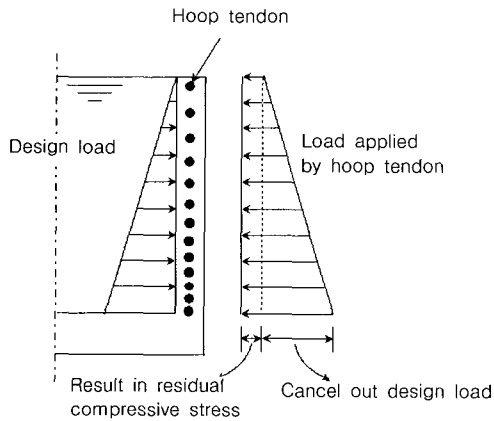


Fig. 1 Design of hoop tendons

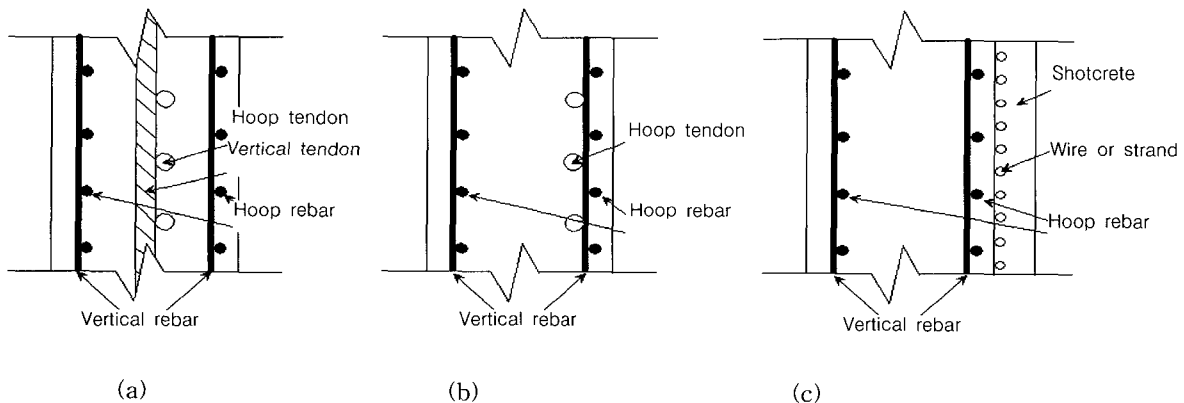


Fig. 2 Tendon arrangement in the circular wall (left face : inner face)

어서 원환텐던을 어떻게 편심배치시키건 구조거동에 큰 차이는 없다는 것을 의미하므로, 편심배치 문제는 시공시 원환텐던의 위치 확보의 용이성 등 주로 시공상의 관점에서로부터 결정된다고 사료된다.

시방서 상에는 원환텐던의 편심배치에 직접적으로 관계된 규정은 마련되어 있지 않지만, 편심배치시 텐던의 피복두께 규정은 만족하고 있어야 하며, ACI 334⁸⁾에서는 1 in 또는 덕트의 직경 중 큰 값이상의 피복두께를 확보하도록 하고 있다.

3. 수직텐던

3.1 수직텐던의 역할

ACI 372⁹⁾ 및 373¹⁰⁾에 의하면 수직텐던에 의해서 프리스트레싱 힘의 손실후에도 200 psi(14 kgf/cm²)의 압축응력이 높이 방향으로 도입되어야 한다고 규정하고 있다. 이를 통하여 설계하중 또는 원환텐던 하중이 유발하는 벽체의 휨에 의한 휨인장응력을 허용치^{3,5)} 이하로 감소시킬 수 있다. 그러나 시방서에는 또한 휨압축응력의 허용치³⁾가 규정되어 있으므로, 그에 의해 수직텐던에 의한 압축응력의 도입수준이 제한되게 된다.

지붕의 하중이나 벽체의 자중도 수직텐던과 비슷하게 벽체에 높이 방향 압축응력을 작용시키게 되며, 따라서 수직텐던에 의한 압축응력 도입수준의 결정시에 함께 고려해야 할 사항이다.

3.2 프와송비에 의한 2차 효과

정밀해석시 수직텐던의 편심배치 여부에 관계없이 수직텐던은 원형탱크 벽체에 미소한 높이방향 휨을 유발한다. 이는 수직벽체가 높이방향 압축을 받을 때 프와송비에 의하여 원환방향으로 팽창하려는 것을 벽체 하부가 구속하

고 있기 때문이다^{9, 11)}. 셸 구조물의 정밀해석에서는 이러한 효과가 자연스럽게 고려된다. 그러나 고전적인 방법론에 의해 원통형 셸을 탄성지반위에 지지된 보로 대체시켜 해석할 경우¹²⁾에는 단순히 보의 축방향 압축으로서 휨을 유발하지 않게 되어 이러한 효과를 고려할 수 없음을 주의해야 한다(Fig. 3).

이러한 효과를 수계산으로 고려할 때는 구속이 없었을 경우 발생했을 벽체 하부의 반지름방향 변위를 계산하여 이 변위 구속이 유발하는 모멘트를 구하는 방법론을 따르게 된다.

실용적으로 수직텐던에 의한 이러한 2차적인 효과는 무시하는 경우가 많으며 관련 시방서에서도 이를 고려하도록 규정하고 있지는 않지만, 예제 1과 같이 이러한 효과에 의해 실구조물에서 적지 않은 휨모멘트가 발생되는 경우도 있으므로 주의를 요한다.

3.3 수직텐던의 편심배치

3.3.1 편심배치의 효과

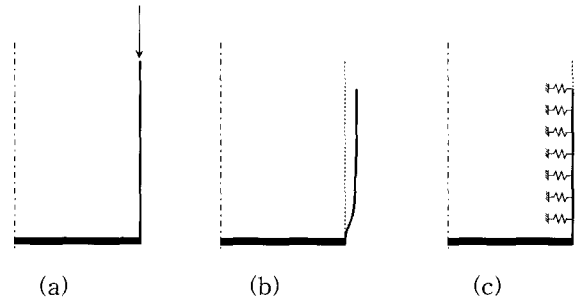
수직텐던은 일반적으로 Fig. 2(a)와 같이 벽체 중심에 가깝게 위치한다. 그러나 구조적인 목적이나 시공편의상 수직텐던이 벽체중심에 대하여 편심배치되는 경우도 있는데 이러한 편심배치의 효용성에 대한 연구가 비교적 최근까지도 이루어져 왔다^{9, 11)}.

Nielsen⁹⁾은 탱크의 설계하중에 의해 발생하는 벽체의 높이방향 휨모멘트를 수직텐던의 편심배치를 통하여 해결하려는 것이 오랜 관례였으나 실제로는 큰 효과가 없음을 지적하였다. 이것은 등가하중법 관점에서 고찰할 때 명확하다. 편심배치된 수직텐던은 양단 정착부에서 편심재하되는 집중하중을 발생시키며 이러한 하중은 벽체 중심에 재하되는 집중하중 및 모멘트로 치환할 수 있다(Fig. 4). 여기에서 P 는 벽체의 원환방향 단위길이당의 프리스트레싱 힘이며, 편심배치의 영향은 정착부에서의 모멘트 $M=Pe$ 의 영향으로 볼 수 있다.

벽체설계에서 가장 문제가 되는 것은 설계하중이 작용할 때 강성이 큰 바닥판에 의해 구속되는 벽체 하부에서 발생하는 높이방향의 모멘트이다. 그러나 Fig. 4의 수직텐던에 의한 벽체 하부의 모멘트는 고정단에 작용하는 하중과 같아서 실제 벽체의 거동에는 거의 영향을 미치지 못한다. 한편 Fig. 4는 벽체 상부가 자유단인 경우인데 이때 벽체 상부에 작용하는 모멘트는 대부분의 원형탱크 벽체가 Long shell의 범주에 들고 있음을 고려할 때[예제 1의 식 (1) 참조] Fig. 5의 변형형상이 나타내는 바와 같이 벽체 하부로 갈수록 그 영향이 급속히 줄어드는 것이 보통이므로, 벽체의 주요한 높이에 있어서는 큰 영향을 미치지 못한다. 이러한 점들로부터 미루어 수직텐던의 편심배치는 설계하중에 의한 벽체의 휨을 완화시켜주는 역할을 한다

고 보기는 힘들다고 판단된다.

그러나 공칭강도면에서 평가하면 수직텐던의 편심배치가 유리할 수도 있다. 예를들어 벽체의 휨거동에 있어 인장응력의 영역에 수직텐던이 편심배치된다면 강도설계법에 의한 벽체의 공칭모멘트강도계산시 수직철탄근과 비슷하게 공칭강도에 기여하게 된다¹³⁾. 그러나 수직텐던이 벽체



(a) Undeformed shape and equivalent load of vertical tendon
(b) Deformed shape by shell analysis
(c) Deformed shape by equivalent beam analysis

Fig. 3 Vertical tendon-induced deformation

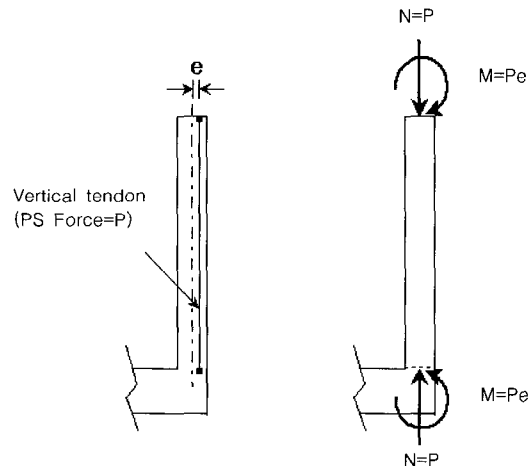


Fig. 4 Equivalent loads by the eccentrically located vertical tendon

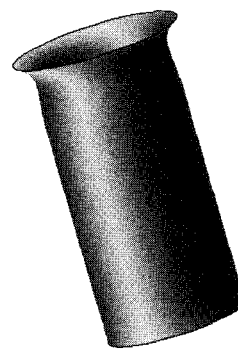


Fig. 5 Deformed shape by the eccentrically located vertical tendon of Fig. 4

중심에 배치될 경우에는 공칭강도에 대한 기여는 거의 없게 된다.

3.3.2 편심배치의 잘못된 해석

기존의 PSC 관련 문헌^{1,13)}이나 설계도서에서 이러한 수직텐던의 편심배치 문제를 잘못 해석한 예를 찾을 수 있으며, 특히 Fig. 4와 같은 경우 수직텐던의 편심에 의한 1차 모멘트 $M=Pe$ 만을 고려하여 벽체의 모든 높이에서 휨응력을 $\sigma=Pe \cdot c/I$ 로 산정하는 것이 가장 빈번한 오류이다. 여기에서 I 는 벽체 원환방향 단위길이당의 단면 이차모멘트, c 는 벽체 중심으로부터의 두께방향 거리이다. 이는 원통형 벽체를 정정구조물(determinate structure)로서의 캔틸레버로 보았을 때 성립한다. 그러나 Fig. 4의 원통형 벽체는 탄성지반위에 지지된 캔틸레버로 보는 것이 올바르며 이는 정정구조물이 아닌 부정정구조물(indeterminate structure)임이 자명하다.

PSC 구조물이 부정정일 경우 1차 모멘트 이외에도 부정정반력에 의한 2차 모멘트를 고려해야 하며, 이러한 1차 및 2차 모멘트를 합산한 총모멘트로 휨응력을 산정하는 것이 올바른 절차이다. 그러나 이러한 방법론을 원통형 벽체에 똑같이 적용시켰을 경우 탄성지반에 해당하는 개별 스프링의 힘들이 모두 반력이 되므로 2차 모멘트를 구하는 절차가 매우 복잡하고 비실용적이 된다.

따라서 개념적으로 좀 더 명확하고 해석을 단순화시켜 오류를 최소화시킬 수 있는 방법은 역시 등가하중법이며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 텐던이 구조물에 작용시키는 힘을 Fig. 4와 같이 일반 외력으로 다루어서 원통형 쉘의 해석을 수행하는 것이다.

3.4 변단면 벽체의 수직텐던

LNG 저장탱크와 같은 액체 저장탱크의 경우 벽체 하부에서 모멘트가 크게 발생하므로 변단면을 사용하는 것이 효율적인 경우가 많다. 통영¹⁴⁾이나 인천의 지상식 LNG 저장탱크의 경우 Fig. 6와 같이 벽체 상부의 1/2은 등단면, 하부의 1/2은 변단면의 형상을 갖는다. 변단면에서의 수직텐던 및 원환텐던의 배치는 Fig. 6와 같이 벽체 바깥면에서 일정한 거리를 유지하는 방식으로 시공되었다. 따라서 등단면과 변단면이 만나는 곳에서 수직텐던이 꺾이는 형상을 가지게 되며, 변단면 구간에서 수직텐던은 벽체 중심에 대하여 편심을 가지게 된다.

이러한 형상의 텐던에 대해서도 3.3.2절의 오류를 포함하여 잘못 해석한 예를 찾을 수 있으며, 역시 바람직한 방법은 텐던에 의해 발생하는 등가하중에 대하여 원통형 쉘의 해석을 수행하는 것이다. 정착부에서 발생하는 모멘트 및 집중하중에 대한 논의는 Fig. 4에서와 같으나, 텐던이 절곡되는 부분에서 발생하는 등가의 집중하중 P_c 의 영향

이 변단면 벽체의 설계시 흔히 간과되어 왔다.

P_c 의 크기는 벽체의 바깥면이 절곡되는 각도를 θ 라 했을 때 부록과 같이 유도될 수 있다. 예제 2와 같이 실 구조물에서 변단면의 기울기 θ 가 그리 크지 않더라도 수직텐던의 절곡부위에서 적지 않은 크기의 등가집중하중이 발생할 수도 있으므로 텐던 설계시 주의를 요한다.

4. 예 제

4.1 예제 1 : 수직텐던과 프와송비의 영향

Fig. 7은 통영의 LNG 저장탱크¹⁴⁾와 유사한 단면을 가진 원형탱크의 예이다. 단, 벽체 부분만을 해석에서 고려하였으며 변단면 벽체 구간을 편의상 등단면으로 가정하였다. 바닥판은 강성이 크므로 고정단으로 근사화하였다. 해석에 필요한 자료도 다음과 같이 실제의 설계값을 취하였다. 여기에서 프리스트레싱 힘은 원환방향 단위길이당의 손실후 값이다.

$$\text{설계기준강도 : } f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{탄성계수 : } E &= 10,500\sqrt{400} + 70,000 \\ &= 2.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 = 2.8 \times 10^6 \text{ tf/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{프와송비 : } \nu = 0.18$$

$$\text{프리스트레싱 힘 : } P = 373.2 \text{ tf/m}$$

Fig. 7에서 r 및 d 는 각각 원형탱크 벽체의 반지름 및 지름, h 는 벽체 두께, L 은 벽체 높이이다. Fig. 7의 원형탱크 벽체는 다음 식 (1)과 같이 η 가 충분히 큰 값이므로 Fig. 8 및 식 (2)와 같은 Long shell의 식을 쓸 수 있다.

일반적으로 $\eta > 2.9$ 이면 Long shell의 범주에 들며 정밀해석에서도 $\eta > 7.3$ 정도이면 충분하다¹¹⁾. 식 (2)에서

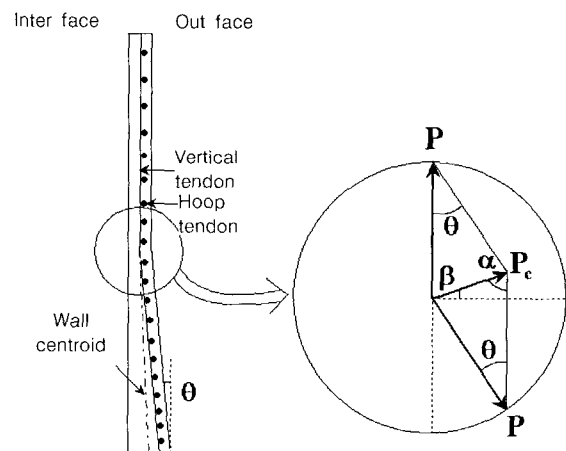


Fig. 6 Equivalent load at the bent point of vertical tendon

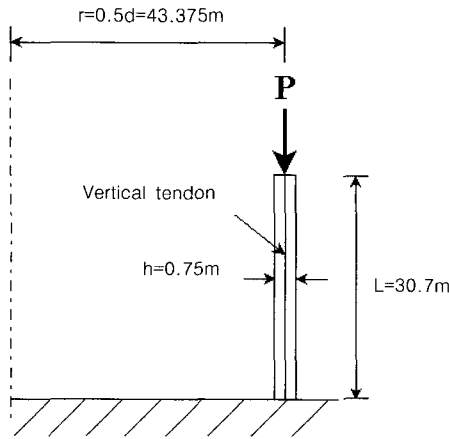


Fig. 7 Numerical example 1

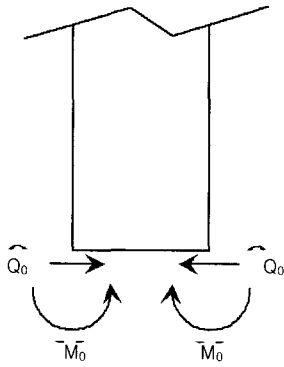


Fig. 8 Long shell [Refer to Eq. (2)]

w_0 는 반지름의 외측 방향 변위이고, θ_0 는 단부 모멘트 M_0 에 대응되는 회전각이다.

$$\eta = \frac{L^2}{dh} = \frac{30.7^2}{86.75 \times 0.75} = 14.5 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2D}{\mu^2} & \frac{2D}{\mu} \\ -\frac{4D}{\mu^3} & -\frac{2D}{\mu^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = 101,734 \text{ tf} \cdot \text{m} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{(rh)^{\frac{1}{2}}}{[3(1-\nu^2)]^{\frac{1}{4}}} = 4.37 \text{ m} \quad (4)$$

벽체 하단부의 구속이 없었다면 수직력 P 에 의해 하단부에서 반지름의 외측 방향으로 변위 w_0 및 $\theta_0(=0)$ 가

발생하며, w_0 의 크기는 원환방향으로 가상의 힘 νP 가 발생하는 것으로 가정하여 구할 수 있다. 실제로는 하단부가 고정단이므로 w_0 및 θ_0 의 크기는 같고 방향은 반대인 변위를 일으키는 모멘트를 하단부의 반력 모멘트 M_0 로 볼 수 있다.

$$M_0 = \frac{2D}{\mu^2} w_0 = \frac{2D}{\mu^2} \left(-\frac{\nu Pr}{Eh} \right) = -14.8 \text{ tf} \cdot \text{m/m} \quad (5)$$

식 (5)의 결과는 원통형 쉘의 이론에 근거하여 정확하게 구한 결과이다. 범용 유한요소해석 프로그램 ANSYS¹⁵⁾의 2절점 축대칭셸요소(SHELL51)를 채택하여 벽체 높이를 등간격으로 10개로 분할하여 유한요소해석을 수행한 결과 $M_0 = -15.2 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$ 로서 식 (5)의 수계산의 결과와 비슷한 값을 산출하였다.

실제 통영 LNG 저장탱크에서 내압, LNG 자중, 원환텐던에 의한 하중을 설계하중으로 고려했을 때 운전시 벽체 하단부에서 발생하는 모멘트가 $+30 \text{ tf} \cdot \text{m/m}$ 정도이므로, 프와송비에 의한 휨모멘트의 효과는 이러한 설계모멘트를 50% 수준으로 낮출 수 있어 본 예제의 경우에는 유리한 효과로 볼 수 있다.

4.2 예제 2 : 수직텐던의 절곡의 영향

Fig. 9은 통영의 LNG 저장탱크¹⁴⁾ 중 벽체부분만을 고려한 것이며 실제의 변단면 모양과 같다. 수직텐던의 프리스트레싱 힘은 역시 예제 1과 같이 373.2 tf/m 이다.

벽체 및 수직텐던이 절곡되는 각도 θ 는 다음과 같다.

$$\text{Arctan}\left(\frac{0.25}{15.35}\right) = \theta = 0.0163 \text{ rad} \quad (6)$$

부록의 식 (12) 및 식 (13)으로부터 텐던의 절곡 부분에서 발생하는 등가의 집중하중 P_c 의 크기는 다음과 같다.

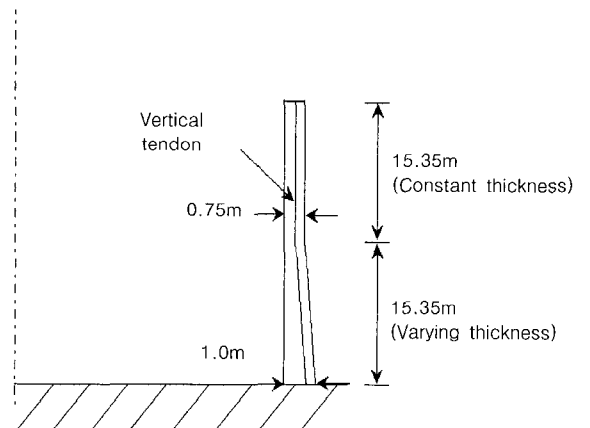


Fig. 9 Numerical example 2

$$P_c \text{의 수평성분} \approx 6.1 \text{ tf/m} \quad (7)$$

$$P_c \text{의 수직성분} \approx 0$$

P_c 의 수평성분의 방향은 벽체 바깥쪽이므로 원환텐던에 의해 작용하는 하중과 반대방향이고 따라서 절곡 부분 근처에서 원환텐던에 의해 도입된 여유압축응력을 감소시킬 위험성이 있다. 예를들어 통영의 경우 한 개의 원환텐던에 도입되는 손실후의 프리스트레싱 힘은 215 tf이므로 이를 원형탱크 벽체의 반지름 43.375 m로 나누어 분포하중으로 환산해보면, 원환텐던의 축을 따라 $215 \text{ tf} / 43.375 \text{ m} \approx 5.0 \text{ tf/m}$ 의 하중을 벽체 안쪽방향으로 작용시킨다. 따라서 수직텐던의 절곡의 영향으로 절곡 부위에서 원환텐던 1개이상의 효과가 상쇄되어버리며, 이로 인하여 원환방향 여유압축응력이 부족할 경우 수직방향 균열이 발생할 가능성이 있다. 물론 P_c 의 수평성분에 의해 국부적으로 벽체 높이방향 휨이 발생하여 수평균열이 발생할 수도 있다.

관련 시방서에는 수직텐던의 절곡과 관련된 규정은 없으므로, 이상의 분석결과로부터 시공성에 있어 큰 차이가 없다면 기존 설계와 같이 변단면 시작점에서 수직텐던이 절곡되는 것 보다는 절곡점 없이 직선 형상을 갖는 수직텐던을 배치하는 것이 구조적으로 유리하다고 사료된다.

5. 결 론

원형탱크 구조물 벽체의 원환텐던 및 수직텐던의 배치에 대한 영향을 등가하중법의 관점에서 고찰하였으며, 실제 구조물에 대한 수치예제를 통하여 올바르게 정확한 해석의 중요성에 대해 부각하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 원환텐던을 벽체의 중심에 대해 어떻게 편심배치 시키더라도 구조거동에 큰 차이는 없으며, 이는 텐던의 직선 이동의 원리를 통하여 이론적으로 설명될 수 있다.
- 2) 수직텐던을 편심배치 하더라도 벽체의 주요 위치에서 설계하중에 의한 휨을 완화시키기는 어렵다. 그러나, 적절한 편심은 수직텐던을 수직철근과 같이 공칭모멘트강도에 기여하게 하는 장점이 있다.
- 3) 기존의 수직텐던의 설계 및 해석에 있어서 수직텐던의 편심배치에 의한 모멘트 효과를 잘못 산정한 예에 대해 올바른 해석법을 제시하였다. 개념적으로 명확한 등가하중법을 통하여 원형탱크 벽체의 텐던 해석시 오류를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 프와송비의 효과에 의해 벽체 중심에 배치된 수직텐던도 휨을 유발하며, 때로는 적지 않은 모멘트를 벽체 하부에서 발생시킬 수 있으므로 수계산시에도 이러한 프와송비의 효과를 산정해 보는 것이 바람직하다.

5) 유체 저장탱크의 변단면 벽체에서 흔히 절곡된 형태의 수직텐던을 사용하여 왔으나, 등가하중법을 통하여 절곡의 영향을 평가해 볼 때 국부적으로 원환방향 여유압축응력을 감소시킬 가능성이 있다. 따라서, 시공성에 큰 차이가 없을 경우 가능하면 절곡점을 두지 않고 직선 형상으로 수직텐던을 배치하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참고문헌

1. Lin, T. Y. and Burns, Ned H., "Design of Prestressed Concrete Structures," 3rd edition, John Wiley & Sons, 1981.
2. ACI 373R-97, "Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons," American Concrete Institute, 1997.
3. PCI Committee on Precast, Prestressed Concrete Storage Tanks, "Recommended Practice for Precast Prestressed Concrete Circular Storage Tanks," *PCI Journal*, V. 32, No. 4, July-Aug. 1987, pp.80~125.
4. BS 7777, "Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service: Part 3," British Standards Institution, 1993.
5. ACI 372R-97, "Design and Construction of Circular Wire and Strand-Wrapped Prestressed Concrete Structures," American Concrete Institute, 1997.
6. 오병환, 전세진, "등가하중법 관점에서 분석한 프리스트레싱 텐던의 직선이동," 콘크리트학회 논문집, 제14권 6호, 2002. 12. (계재예정).
7. Brøndum-Nielsen, T., "Linear Transformation of Center of Gravity of Steel Line in Statically Indeterminate Prestressed Concrete Structures," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 2, March-April 1992, pp.139~140.
8. ACI 334.1R-92, "Concrete Shell Structures Practice and Commentary," American Concrete Institute, 1997.
9. Brøndum-Nielsen, T., "Prestressed Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 82, No. 4, July-Aug. 1985, pp.500~509.
10. Ghali, A. and Elliott, E., "Prestressing of Circular Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov.-Dec. 1991, pp.721~729.
11. Ghali, A., "Circular Storage Tanks and Silos," 2nd edition. E & FN Spon. 2000.
12. Priestley, M. J. N., "Analysis and Design of Circular Prestressed Concrete Storage Tanks," *PCI Journal*, Vol. 30, No. 4, July-Aug. 1985, pp.64~85.

13. Nawy, E. G., "Prestressed Concrete: A Fundamental Approach," Prentice Hall, 1989.
14. (주)대우건설, 대림산업주식회사, "통영 생산기지 저장 탱크 및 본설비공사 기술제외서(Technical Part)," 한국가스공사, 1999.
15. "ANSYS 5.6 - User's Manual," ANSYS, Inc., 1999.

부록 : 등가집중하중의 수평 및 수직성분 크기의 유도

Fig. 6에서,

$$2\theta + (\pi - \theta) + 2\alpha = 2\pi \quad \therefore \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

$$\alpha + \beta + \frac{\pi}{2} = \pi \quad \therefore \beta = \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

등가집중하중 P_c 의 크기는,

$$P_c \cos \beta = P \sin \theta \quad (10)$$

$$\therefore P_c = P \frac{\sin \theta}{\cos \beta} = P \frac{2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} = 2P \sin \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

따라서 P_c 의 수평 및 수직성분의 크기는 다음과 같다.

Fig. 10에서 보듯이 수평성분이 수직성분보다 지배적이며, 일반적인 벽체 단면과 같이 θ 가 작을 때에는 아래에 예시된 근사식을 사용할 수 있다.

$$P_c \text{의 수평성분} = P \sin \theta \approx P\theta \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_c \text{의 수직성분} &= P_c \sin \beta = 2P \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \\ &= 2P \frac{1 - \cos \theta}{2} = P(1 - \cos \theta) \approx 0 \end{aligned} \quad (13)$$

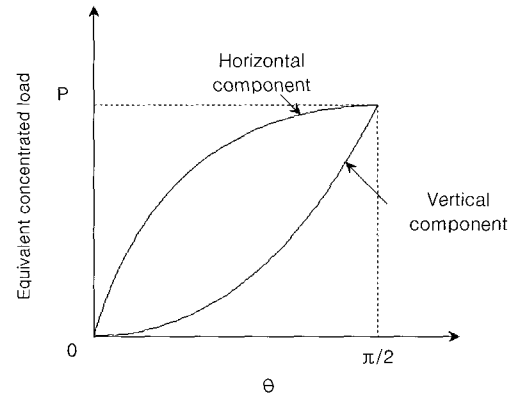


Fig. 10 Magnitude of equivalent load vs bent angle of vertical tendon

요 약

등가하중법은 프리스트레싱 텐던의 영향을 구조물에 작용하는 외력으로서 고려하는 것으로, 프리스트레싱의 효과를 명확히 하고 해석을 단순화시켜주는 유력한 방법론이다. 본 연구에서는 등가하중법의 관점에서 원형탱크 벽체의 원환텐던 및 수직텐던의 배치가 구조물에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였으며, 관련된 설계 시방서에서 규정하고 있지는 않지만 실구조물에서 적지 않은 영향을 미칠 수도 있는 사항들에 대해 고찰하였다. 원환텐던의 편심배치시 텐던의 직선이동의 원리가 성립하므로 어떠한 편심배치에 대해서도 구조거동은 크게 달라지지 않을 것으로 사료된다. 또한, 기존의 수직텐던의 설계 및 해석에 있어서 편심배치에 의한 모멘트 효과를 잘못 산정한 예에 대해 올바른 해석법을 제시하였다. 일반적으로 수직텐던의 편심배치는 구조적으로 큰 효과가 있다고 보기는 힘든 것으로 사료된다. 수직텐던과 관련하여 프와송비의 효과나 절곡부위의 영향이 흔히 간과되어 왔으나, 예제의 분석결과 때로는 원형탱크의 구조거동에 적지 않은 영향을 미칠수도 있다고 판단된다.

핵심용어 : 프리스트레스트 콘크리트, 원형탱크, 등가하중법, 원환텐던, 수직텐던