

등가하중법 관점에서 분석한 프리스트레싱 텐던의 직선이동

오병환¹⁾ · 전세진^{2)*}

¹⁾서울대학교 토목공학과 ²⁾대우건설기술연구소

(2002년 1월 18일 원고접수, 2002년 9월 13일 심사완료)

Analysis of the Linear Transformation of Prestressing Tendon Using Equivalent Load Method

Byung-Hwan Oh¹⁾ and Se-Jin Jeon^{2)*}

¹⁾ Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon, 440-210, Korea

(Received January 18, 2002, Accepted September 13, 2002)

ABSTRACT

Linear transformation theory has been effectively used in the design and analysis of prestressed concrete structures. The underlying assumptions of the theory, which were often overlooked, are investigated in the respect of equivalent load method. As a result, it is found that the same equivalent loading system is produced for all the cases of the linear transformation by the assumptions of the conventional equivalent load method. On the other hand, equivalent loading systems in a strict and accurate sense do not satisfy the classical theories of the linear transformation. Also, it is shown that a little different equivalent loading system from the conventional one is obtained for each linear transformation according to the proposed equivalent load method that is derived from the self-equilibrium property of the tendon-induced forces. Therefore, it can be concluded that the linear transformation theory is valid only when referring to the conventional approximate equivalent load method. The discussions are further extended to the eccentrically located circumferential tendon in the wall of containment structures, where the problem of eccentricity is analyzed also from the view point of the linear transformation.

Keywords : prestressed concrete, tendon, linear transformation, equivalent load method, circumferential tendon

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재의 설계 및 해석에서 텐던의 직선이동(linear transformation)은 빈번히 다루어지고 있다. 특히, 포물선형으로 배치된 프리스트레싱 텐던의 직선이동은 연속보의 설계와 관련하여 매우 유용하게 쓰이는 개념이다.

직선이동시킨 텐던은 비록 텐던의 배치가 다르더라도 구조계에 똑같은 총모멘트를 발생시킨다는 공학적인 중요성을 내포하고 있다. 직선이동의 원리에 대한 설명을 위해 연속보의 텐던배치가 가장 빈번하게 예시되지만^{1,2)}, 직선이동의 개념은 연속보 뿐 아니라 평면뿔대구조의 경우에도 적용될 수 있으며^{3,4)}, 또한 곡선보, 원형링(circular ring)형태의 구조물까지 적용범위가 확장될 수 있다³⁾.

Nielsen³⁾은 고전적인 이론과는 다른 접근방식으로 직선

이동을 정의하였으며, 이를 통하여 직선이동에 대한 잘못된 이해를 바로잡고자 하였다. 그 결과 몇몇 특수한 형태의 구조물에서는 텐던의 배치와 관련하여 직선이동이라는 용어를 사용하는 것에 모순이 있음을 지적하였다.

그러나, 직선이동의 개념이 널리 알려지고 그 적용범위가 확장되어진 반면, 직선이동이 과연 이론적으로 정확한 것인지 그리고 만약 근사화가 내재되어 있다면 어떠한 근사화이며 그것이 해석결과에 미치는 영향이 무엇인지에 대한 명확한 설명이 부족하였다고 판단된다. 따라서, 유한요소법과 같이 정밀한 방법론으로 PSC 부재의 텐던을 상세히 모델링하여 해석하였을 때와 기존의 직선이동에 대한 이론으로 계산을 수행한 결과가 약간의 차이를 보인다면 그러한 차이가 왜 발생하는지에 대해 의문을 가질 수 있다. 본 논문에서는 직선이동에 내재된 근사화를 명확히 지적하여, 그러한 의문점을 해소하는데 기여하고자 한다.

본 논문은 크게 두 부분으로 구성되었다. 첫째, 직선이동에 내재된 근사화를 등가하중법(equivalent load method)을 통하여 명확하게 설명하고, 기존의 방법과 차별화 되는

* Corresponding author

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

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

또 다른 등가하중법을 직선이동에 적용하는 방안을 모색하였다. 둘째, 격납구조물 벽체 원환텐던(circumferential tendon)의 편심배치 문제를 직선이동을 통하여 설명하고자 하였다. 원환텐던은 시공편의에 따라 적절히 편심배치되는 경우가 많은데 그러한 편심배치가 구조적인 관점에서 어떠한 영향을 미치는지 분석하기 위해 직선이동의 개념을 도입하였다.

2. 직선이동에 내재된 근사화

2.1 일반적인 이론에 의할 때

Fig. 1은 2경간 연속보에서 텐던의 직선이동을 설명하는 기존의 예를 보여주고 있다. Fig. 1에서 1차 모멘트는 프리스트레싱 힘에 텐던의 편심을 곱하여 구해지며 이는 정정구조물일 때의 모멘트 분포와 같다. 2차 모멘트는 텐던에 의한 구조물의 변형이 구속되어 지점들에서 유발되는 반력에 의해 부재에 발생하는 모멘트이다.

Fig. 1에 예시된 텐던 배치에서 중간지점상의 텐던 위치를 위 또는 아래로 이동시켜서 얻어지는 각각의 직선이동의 경우에 있어 1차 및 2차 모멘트는 각각 달라지게 된다. 그러나 1차 모멘트와 2차 모멘트의 합인 총모멘트는 같다는 데 직선이동의 공학적인 중요성이 있다.

이때 1차 모멘트는 다음 식 (1)에서 산정된다. 여기에서 P 는 프리스트레싱 힘, e 는 부재축으로부터 텐던축까지의 편심, θ 는 텐던축의 접선방향이 수평선과 이루는 각도이다.

$$M_1 = (P \cos \theta) e \approx Pe \quad (1)$$

식 (1)은 지간이 큰 부재에 있어서 일반적으로 θ 가 0에 가까울 것이라는 가정에 근거하고 있으며, 따라서 포물선 형태의 텐던이 발생시키는 1차 모멘트의 분포 또한 정확히 포물선의 형태를 띤다고 볼 수는 없다. θ 값은 텐던의 편심이 클수록 또는 부재의 지간이 작을수록 커지므로, 이러한 형태의 부재에서는 근사화에 따른 오차가 좀 더 커질 가능성이 있다.

한편 2차 모멘트를 발생시키는 지점반력의 크기는 1차 모멘트에 근거하여 모멘트 면적법 등으로 구하게 되므로, 근사적인 1차 모멘트로부터 구한 2차 모멘트 역시 근사적인 분포라고 볼 수 있다. 물론, 1차 모멘트와 2차 모멘트의 합인 총모멘트 역시 근사값이 된다. 즉, 직선이동의 원리는 식 (1)에 근거하여 성립하고 있다.

2.2 등가하중법에 의할 때

등가하중법^{1,2)}으로 Fig. 1과 같은 직선이동을 설명할 수

도 있는데, 이 경우 적절한 계산과정을 거쳐 구한 등분포 등가하중(Fig. 2(a) 참조)으로부터 총모멘트가 먼저 결정되고 여기에서 식 (1)로부터 구한 1차 모멘트를 빼면 2차 모멘트를 구할 수 있다.

그런데, 등가하중법으로 구한 총모멘트도 2.1절의 일반적인 이론에서 구한 총모멘트와 정확히 일치한다. 앞에서 지적하였듯 일반이론에는 근사화 가정이 포함되어 있음을 고려할 때 일반이론 및 등가하중법의 결과가 일치한다면 기존의 등가하중법 역시 비슷한 가정을 포함하고 있다고 유추해볼 수 있다. 이러한 등가하중법의 근사화는 Oh and Jeon^{5,6)}에 의하여 분석된 바 있다. 기존의 방법론에서 텐던에 의한 등가하중은 일반적으로 다음과 같이 산정할 수 있다.

- ① 1차 모멘트의 분포를 $M_1(x) = Pe(x)$ 에서 구한다. 여기에서 x 는 부재의 축방향 좌표이다.
- ② 전단력의 분포를 $V(x) = dM_1(x)/dx = Pe'(x)$ 에서 구한다.
- ③ $w_{app.}(x) = -dV(x)/dx = -Pe''(x)$ 에서 등가하중의 분포를 구한다.

첨부된 예제에서 알 수 있는 바와 같이 텐던의 직선이동시 텐던 곡선에 해당하는 포물선의 2차항 계수는 변하지 않으므로, 위의 절차에 의할 경우 모든 직선이동에 있어 텐던 곡선을 두 번 미분하면 상수값이 산출된다. 즉, 모든 직선이동에 대해 같은 크기의 등분포 등가하중이 얻어진다. 그런데, 이러한 절차에서도 1차 모멘트의 분포를 식 (1)과 같이 가정하는 과정이 ①에 포함되었으므로, 결국 직선이동을 일반이론 및 등가하중법으로 해석한 결과

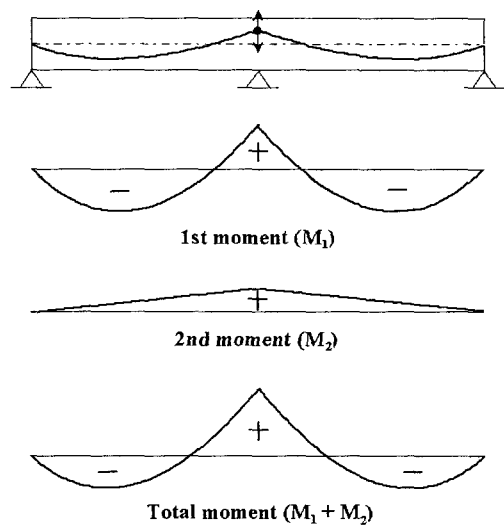


Fig. 1 Linear transformation in the continuous beam with two spans

가 일치하였다고 볼 수 있다.

각각의 직선이동에 있어 같은 등가하중 시스템이 산출된다면 총모멘트의 분포도 같으므로 직선이동의 원리를 만족할 것으로 판단된다. 따라서, 직선이동의 원리를 직선이동시 총모멘트가 변화하지 않는다는 데 주안점을 두고 분석할 경우 이처럼 등가하중법을 사용하는 것이 좀 더 명확하다고 사료된다.

3. 직선이동의 엄밀한 분석

직선이동을 이론적으로 정확하게 분석하기 위해서는 위에서 언급했던 기존의 등가하중법과는 다른 엄밀한 의미의 등가하중법을 도입해야 한다. Oh and Jeon^{5,6)}은 근사화가 포함되지 않은 엄밀한 의미의 등가하중법에 대해 논의하였는데, 이러한 등가하중은 식 (2)와 같이 프리스트레싱 힘에 텐던축의 곡률 x 를 곱하여서 구해진다. 포물선의 경우 곡률은 텐던축을 따라 변하므로 식 (2)에 의한 등가하중은 비록 프리스트레싱 힘이 일정하다고 가정하더라도 텐던축을 따라 크기가 변하게 된다. 또한 등가하중은 텐던의 축을 따라서 텐던축에 직각방향으로 작용하게 되므로 엄밀한 등가하중의 크기 및 분포는 Fig. 2(b)에서 보듯이 매우 복잡한 형태이다. $y = y(x)$ 로 나타내어지는 텐던 곡선에 대해 곡률은 식 (3)과 같이 계산될 수 있다⁷⁾. 참고로 2.2절에서 구했던 기존의 근사적인 등가하중은 식 (3)의 분자 부분만을 취하여서 얻을 수 있다.

$$w_{exact} = xP \quad (2)$$

$$x(x) = \frac{|y''|}{[1+(y')^2]^{3/2}} \quad (3)$$

Fig. 2(b)와 같은 엄밀한 등가하중 시스템을 고려할 때 텐던의 직선이동시 등가하중의 크기, 방향 및 위치가 변화할 것이므로 각각의 직선이동에 대해 텐던 형태에 의존하여 서로 다른 등가하중 시스템이 얻어진다는 것은 자명하다. 한 예로, 직선이동시 각각의 텐던 곡선식을 식 (2) 및 (3)에 대입해보면 등가하중의 크기의 분포가 바뀔을 확인할 수 있다.

따라서 실제의 엄밀한 등가하중의 해석에 의하면 각각의 직선이동마다 서로 다른 총모멘트를 산출하게 되므로 이는 직선이동의 원리에 어긋나게 된다. 결국 직선이동의 원리는 근사적인 등가하중 시스템(2.2절 참조) 또는 그와 동등한 결과를 주는 일반이론(2.1절 참조)하에서만 성립한다고 보는 것이 타당하다. 또한 엄밀한 의미에서는 포물선형 텐던의 배치를 직선이동을 통하여 어떻게 변화시키더라도 하중평형의 개념과 같이 외부에서 등분포로 가해

지는 하중을 이론적으로 완벽하게 상쇄하는 것은 불가능하다고 볼 수 있다.

직선이동에 대한 좀 더 정밀한 해석이 요구될 경우 엄밀한 등가하중 시스템인 Fig. 2(b)를 고려해야 하겠으나, 수계산으로 이와 같은 복잡한 하중분포를 해석하는 것은 용이하지 않으며 유한요소법 등을 통하여 텐던의 영향을 최대한 정확히 해석하는 절차가 필요하다. Sprenger⁸⁾은 개선된 텐던요소를 고려한 유한요소법을 사용하여 프리스트레스트 콘크리트 단순보 및 연속보를 해석하고 그러한 유한요소법의 결과가 기존의 등가하중법을 적용한 결과와 차이를 보임을 지적하였는데, 이와 같은 차이가 발생한 명확한 이유를 설명하고 있지 않다. 그러한 차이는 본 논문 및 Oh and Jeon^{5,6)}에서 언급한 등가하중법의 근사화에 기인하고 있는 것으로 사료된다.

4. 직선이동의 새로운 해석방법 제안

Oh and Jeon^{5,6)}은 접근방법론에 따라 등가하중법을 몇 가지로 분류하였으며, 따라서 2.2절의 기존의 등가하중법과는 다른 방법을 텐던의 직선이동에 적용할 수 있는 여지가 있다고 사료된다. 본 논문에서는 그중에서 텐던의 자체평형(self-equilibrium) 성질을 이용한 등가하중법^{5,6)}을 직선이동에 적용하는 방안을 모색하였다.

텐던에 작용하고 있는 모든 등가하중들은 자체적으로 평형상태를 유지하고 있어야 하는 성질이 있다. 그런데, 2.2절에서 구해진 기존의 등가하중은 그러한 자체평형 상태가 성립하지 않는 단점이 있으며, 이하 제시된 방법은 자체평형을 만족하는 등가하중을 구하여 그러한 모순점을 개선한 장점을 가지고 있다.

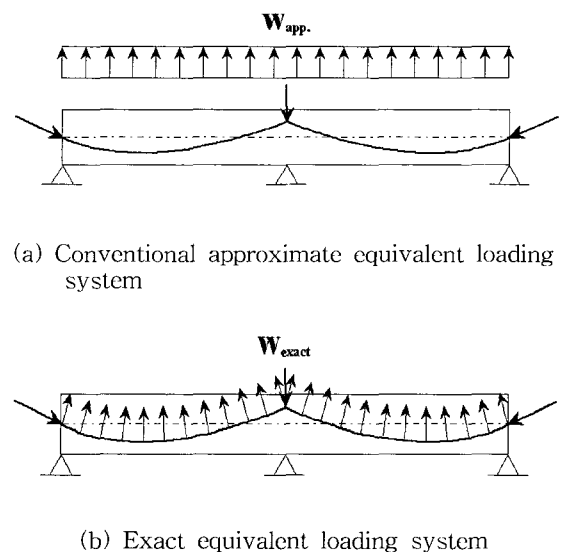


Fig. 2 Comparison of equivalent loading systems

Fig. 3과 같은 텐던배치에 대하여 양단 정착하중과 평형을 이루는 등가하중은 식 (4) 및 (5)와 같이 산정된다.

$$w_i = -\frac{2}{L}(2P \sin \theta_i - P \sin \theta_j) - \frac{6}{L^2}(e_i P \cos \theta_i + e_j P \cos \theta_j) \quad (4)$$

$$w_j = \frac{2}{L}(P \sin \theta_i - 2P \sin \theta_j) + \frac{6}{L^2}(e_i P \cos \theta_i + e_j P \cos \theta_j) \quad (5)$$

그러나 첨부한 예제에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 등가하중법을 사용할 경우 직선이동시 텐던의 형태에 따라 등분포하중이 아닌 선형적으로 변화하는 등가하중이 산정될 수도 있으며 또한 그 분포형상이 각각의 직선이동마다 다르므로 총모멘트의 분포도 다르게 된다.

따라서 엄밀한 등가하중법에서 그러했듯 본 장에서 제안된 새로운 등가하중법 역시 고전적인 의미의 직선이동의 원리는 성립하고 있지 않다. Table 1에서는 본 논문에서 언급되었던 3가지 종류의 등가하중법 및 그러한 등가하중시스템에서의 직선이동 원리의 성립여부를 비교하였다. Case 1의 정확한 등가하중법과 비교할 때, Case 2의 방법은 자체평형의 성질이 성립하지 않는 반면 직선이동의 원리가 성립하여 텐던 배치에 대한 해석을 매우 간략화할 수 있는 장점이 있으며, Case 3은 직선이동의 원리는 성립하지 않지만 자체평형이 성립하는 장점이 있다.

5. 격납구조물 벽체 원환텐던의 직선이동

원자력 발전소 격납구조물이나 LNG 저장탱크 등의 벽체에 위치하는 원환텐던은 시공시 위치 선정을 용이하게 하기 위하여 Fig. 4와 같이 수직철근 및 수직텐던의 위치를 고려하여 편심배치되는 것이 일반적이다^{9,10}.

Nielsen³⁾은 텐던의 직선이동에 대한 새로운 개념을 통하여 격납구조물 벽체 원환텐던의 편심배치 문제를 분석하였다. 그는 직선이동시 식 (6)이 성립한다고 하였는데, 여기에서 $\Delta M(x)$ 는 직선이동에 따른 2차 모멘트의 변화량이며, $\Delta e(x)$ 는 편심의 변화량이다. 따라서 좌변 첫째 항은 직선이동에 의한 1차 모멘트의 변화를, 둘째 항은 역시 같은 직선이동에 의한 2차 모멘트의 변화를 의미한다고 볼 수 있으며, 이 두 개의 항의 합이 0이라는 것은 직선이동에 의해 총모멘트의 변화가 없다는 것으로 해석할 수 있다. $\Delta M(x)$ 는 부정정 반력에 의해 발생하는 모멘트 분포이므로 선형분포를 갖게 되며 또한 $P(x)$ 는 프리스트레싱 힘의 손실을 무시할 때 텐던의 전길이에 있어 일정한 값이므로, 직선이동시 수반되는 편심의 변화량 $\Delta e(x)$ 는 선형이 된다.

식 (6) 또한 1차 모멘트 계산시 식 (1)의 가정에 근거하고 있으며, 따라서 근본적으로는 고전적인 직선이동과 같은 가정을 포함하고 또한 같은 원리를 나타내고 있다고 볼 수 있다.

$$P(x)\Delta e(x) + \Delta M(x) = 0 \quad (6)$$

본 논문에서는 Nielsen이 식 (6)을 통하여 분석했던 격납구조물 벽체 원환텐던의 편심배치 문제를 또 다른 관점에서 재고찰해 보기로 한다. Nielsen은 x 를 벽체 원환방향의 좌표로 둘 때 Fig. 5(b)와 같은 부정정 모멘트 X 는 원환방향으로 일정한 모멘트 $M(x)$ 를 발생시키므로 식 (6)이 성립하고 따라서 원환텐던의 편심배치 또한 직선이동으로 볼 수 있다고 결론지었다.

그러나 본 논문에서는 그에 대한 좀 더 다른 관점을 제

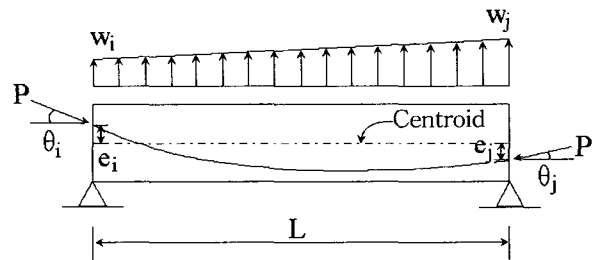


Fig. 3 Proposed equivalent loading system

Table 1 Comparison of the equivalent load methods

	Relevant chapter	Self-equilibrium	Linear transformation
Case 1 (Exact)	3	○	×
Case 2 (Approximate)	2 (Section 2.2)	×	○
Case 3 (Approximate)	4	○	×

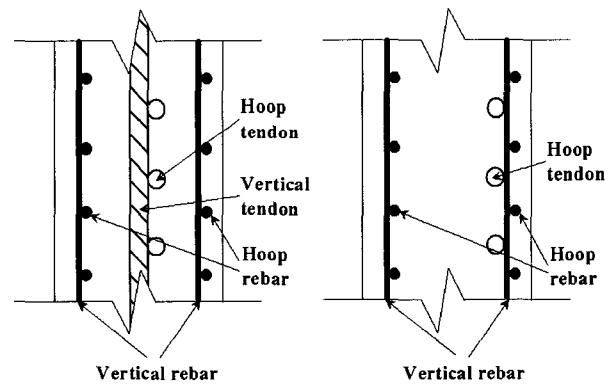
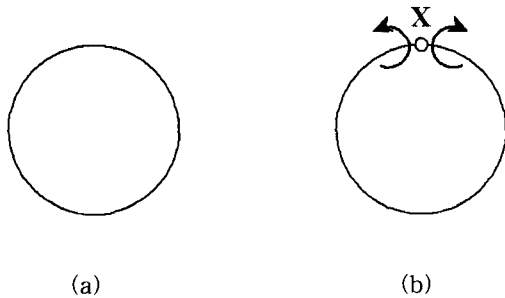


Fig. 4 Installation of circumferential tendons in the wall of containment structures (left face : inner face)

시하고자 한다. 일단 식 (6)의 우변에 대해 논의하자면 Nielsen은 특별한 부가설명 없이 우변이 성립한다고 하였는데, 본 논문의 논의로부터 식 (6)의 우변이 성립하자면 원환텐던의 편심배치에 관계없이 텐던이 발생시키는 증가하중이 같아야 한다. 하지만 식 (2)로 계산되는 증가하중의 크기는 Fig. 6과 같이 편심의 위치에 따라 약간씩 다른 값을 갖게 된다.

탄성체 문제에서는 Fig. 6에서 텐던의 위치 R_1 에 따라서 다른 응력상태를 가진다. 그러나, 일반적으로 증가하중법을 논의할 때 사용되는 뼈대구조물은 부재의 축을 따라 모델링하게 되므로, 증가하중이 이러한 부재축에 작용하지 않을 경우 계산된 증가하중을 보정 없이 그대로 부재축에 작용시킨다면 일관되지 않은 결과가 나올 수 있다. 예를 들어 Fig. 6을 뼈대로 모델링하고 w_1 을 그대로 작용시킬 때 축력은 프리스트레싱 힘과 같은 P 가 아닌 $P(R/R_1)$ 로 산정되는 모순이 생긴다. 여기에서 R 은 원의 중심에서 부재축까지의 거리이다. 따라서 w_1 을 뼈대 해석시 축력 P 를 산출하게 되는 증가하중값으로 보정하는 것이 합리적인데 이러한 증가하중은 P/R 로 산정되며, 즉, 텐던의 위치를 벽체 중심으로 옮긴 것과 같은 효과가



(a) Original indeterminate structure
(b) Determinate structure and indeterminate moment

Fig. 5 Analysis of circular ring structure with a circumferential tendon

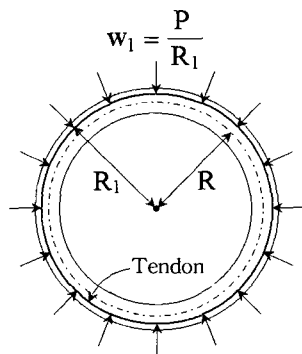


Fig. 6 Equivalent load applied by a circumferential tendon

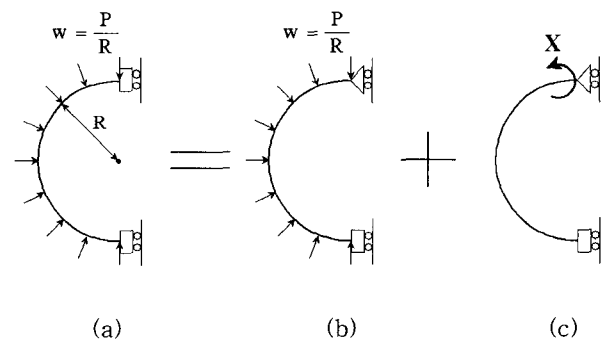
다. 요약하자면 뼈대구조물의 특성을 고려할 때 원환텐던은 편심에 상관없이 일정한 증가하중 P/R 를 발생시키는 것으로 보는 것이 합리적이며, 식 (6)의 우변은 임의로 편심배치된 원환텐던의 경우에도 성립하는 것으로 볼 수 있다.

다음으로 식 (6)의 둘째 항인 2차 모멘트, 즉, Fig. 5(b)의 부정정 모멘트 X 에 의해 발생하는 모멘트 분포에 대해 논의하기로 한다. X 의 크기는 Fig. 7과 같이 대칭성을 이용하여 구조물의 1/2만을 모델링했을 때 X 가 작용하는 곳에서의 회전을 0으로 만드는 적합조건에 의해 구할 수 있다. 그런데, Fig. 7(b)의 하중이 작용할 때 X 가 작용하는 위치에 회전이 발생하지 않으므로 부정정 모멘트 X 의 크기는 0인 것으로 판단할 수 있다. 물론, X 에 의해 발생하는 2차 모멘트의 분포도 전체적으로 0이 된다. 따라서 Nielsen이 부정정 모멘트가 일정 크기를 가진다고 했던 것과 본 논문의 관점은 차이가 있다.

마지막으로 식 (6)의 첫째 항인 1차 모멘트는 Fig. 7(b)에서 발생하는 모멘트이다. Nielsen은 식 (6)의 첫째 항이 연속보 뿐 아니라 원형으로 폐합된 구조에도 적용할 수 있으며, 원환텐던의 편심량에 따라 이 항이 영향을 받는다고 보았다. 그러나, 본 논문에서 힘의 평형 관점에서 분석할 때 편심에 관계없이 1차 모멘트는 부재 전체에 있어 0으로 변동하지 않는 것으로 판단된다.

결론적으로 격납구조물 벽체의 원환텐던을 편심배치시킬 때 편심에 관계없이 동일한 증가하중 시스템을 산출한다는 면에서 텐던의 직선이동의 일종으로 볼 수 있을 것으로 판단되며, 이 점에서는 본 논문의 관점과 Nielsen의 견해가 같다. 이는 바꾸어 말하면 실제 구조물에 있어서 시공의 용이성이나 피복두께 규정 등을 만족하는 한 원환텐던을 어떻게 편심배치시키건 구조거동에 큰 차이는 없다는 것을 의미한다.

그러나, 식 (6)과 같이 텐던에 의해 발생하는 1차 및 2



(a) Indeterminate structure (Total moment)
(b) Determinate structure (1st moment)
(c) Indeterminate moment (2nd moment)

Fig. 7 Calculation of tendon-induced moments
(Parenthesis : relevant moment)

차 모멘트가 각각 변화하더라도 총모멘트는 일정하다는 것에 주안점을 둔 것이 직선이동의 원리라고 본다면, 이러한 원리는 연속보 구조 등에서는 유효하지만 원형링 구조와 같이 폐합된 형태에서는 성립한다고 보기 어려울 것으로 판단된다. 본 논문에서는 어떠한 편심에 텐던이 위치하더라도 1차 및 2차 모멘트의 분포는 변동하지 않는다고 판단하였으며, 이러한 관점은 Nielsen과 차이가 있다.

6. 예제 : 2경간 연속보 텐던의 직선이동

Fig. 8의 2경간 연속보에서 왼쪽 경간의 텐던 곡선을 수학적식으로 나타내었을 때 직선이동되는 텐던의 형상은 Fig. 8의 a 값을 변화시킴으로써 얻을 수 있다.

기존의 등가하중법을 사용할 때에는 2.2절에 제시된 절차에 의해 Fig. 9(a)와 같이 a 값에 관계없이 31.25 kN/m의 크기를 갖는 등분포 등가하중이 얻어지므로 직선이동의 원리를 만족하고 있다.

한편, 본 논문에서 식 (4) 및 (5)와 같이 제안된 방법을 각 경간에 적용하여 등가하중을 구할 경우 $a=4$ 에서는 31.01 kN/m의 크기를 갖는 등분포 하중이 산출되나[Fig. 9(b)], $a=3$ 의 경우에는 선형적으로 변화하는 등가하중이 얻어진다[Fig. 9(c)]. 또한 식 (2) 및 (3)에 의해 수학적으로 정확히 계산된 엄밀한 등가하중을 사용할 경우에도 Fig. 9(d) 및 9(e)와 같이 각 직선이동에 있어 서로 다른 등가하중 시스템을 산출함이 자명하다.

이처럼 제안된 등가하중법이나 엄밀한 등가하중법에 의한 경우 a 값에 따라 서로 다른 등가하중 시스템이 산출되므로 고전적인 직선이동의 원리가 성립하지 않고 있다.

Fig. 9에 나타내어진 각각의 등가하중 시스템에 의해 발생하는 경간부의 최대 정모멘트 및 중간지점부의 최대 부모멘트는 Table 2와 같다. Table 2에서 Fig. 9(d) 및 9(e)의 엄밀한 등가하중 분포에 의한 모멘트는 함께 나타내지 않았으며, 곡선 텐던 또는 불규칙하게 분포하는 하중을 정확히 모델링한 유한요소해석을 통하여 구할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 Table 2에서는 범용 구조해석 프로그램인 SAP 2000TM의 해석결과가 함께 비교되었다. 등간적으로 4개의 뼈대요소(frame element)가 사용되었으며, 텐던의 영향은 SAP2000에 내장되어 있는 텐던의 모델링 기능을 활용하여 구현하였다. 이때 발생한 모멘트 값이 Fig. 9(a)의 기존의 등가하중법을 사용한 경우와 같음을 알 수 있다. 따라서 SAP2000의 경우 프리스트레싱 텐던이 부재에 미치는 영향을 Fig. 9(a)와 같이 기존의 등가하중법에 의한 근사적인 방법론으로 평가하고 있다고 유추해 볼 수 있다.

각 직선이동시 등가하중을 산정하는 방법론에 따른 단면력의 차이는 부재의 경간 길이나 텐던의 편심 등에 의존하여 때로는 적지 않은 차이를 발생시킬 수도 있을 것으로 사료된다.

이 예제는 기존의 등가하중법 및 그러한 등가하중을 사

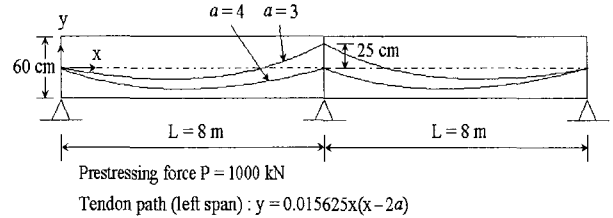
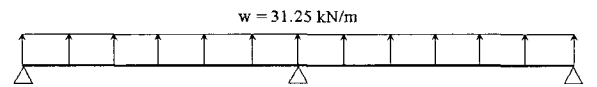
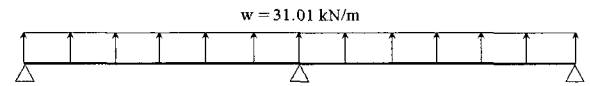


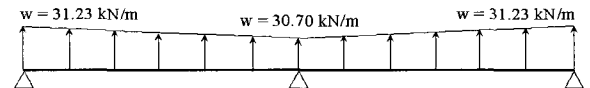
Fig. 8 Numerical example of linear transformations



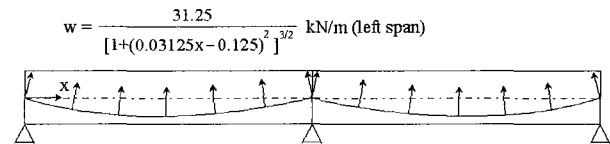
(a) Conventional method (For all values of a)



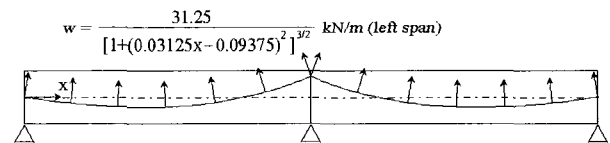
(b) Proposed method (For a=4)



(c) Proposed method (For a=3)



(d) Exact method (For a=4)



(e) Exact method (For a=3)

Fig. 9 Equivalent loading systems corresponding to each linear transformation (Equivalent distributed load only shown)

Table 2 Comparison of the moments in each equivalent loading system

Equivalent loading system (Fig. 9)	Value of a	Max. positive moment (kN · m)	Max. negative moment (kN · m)
(a) Conventional	All values	140.63	-250.0
(b) Proposed	4	139.55	-248.08
(c) Proposed	3	139.56	-247.58
SAP2000	All values	140.63	-250.0

용한 직선이동의 원리는 근사화가 포함된 하나의 방법론일 뿐이며, 또 다른 이론에 근거하여 등가하중을 산정할 경우 직선이동의 원리가 성립하지 않을 수도 있다는 것을 보여주고 있다.

7. 결 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC)의 해석이론에서 텐던의 직선이동은 빈번히 다루어지고 있으며, PSC 부재의 설계에 있어 실용적인 중요성을 가지고 있다. 직선이동의 원리는 주로 연속보의 설계와 관련하여 유용하게 쓰여 왔지만, 실제로 적용 가능한 분야는 연속보 뿐 아니라 평면배대구조, 곡선보, 원형링 형태의 구조물 등까지 확장될 수 있다.

본 논문은 그동안 간과되기 쉬웠던 직선이동에 내재된 근사화를 밝히는데 중점을 두고 있으며, 주로 등가하중법을 통하여 직선이동의 이론을 설명하려 하였다. 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 직선이동의 원리를 일반이론 또는 기존의 등가하중법으로 분석할 때 똑같은 결과가 산출되는 이유는 텐던축이 수평선과 이루는 각도가 매우 작다는 가정이 2가지의 방법 모두에 내재되어 있기 때문이다.

2) 직선이동의 원리가 성립하는지의 여부는 각 직선이동시의 텐던이 똑같은 등가하중 시스템을 산출하는지의 여부로써 용이하게 판단할 수 있으며, 기존의 등가하중법에 의할 경우 내재된 가정에 의해 그러한 직선이동의 원리가 성립하고 있다. 반면 근사화가 포함되지 않은 엄밀한 의미의 등가하중 시스템에서는 직선이동의 원리가 성립하고 있지 않다.

3) 등가하중 시스템이 만족시켜야 할 자체평형의 성질로부터 유도된 등가하중법을 텐던의 직선이동에 적용하여 고찰하였다. 이는 기존의 등가하중법과는 차별화되는 접근 방법이며, 기존의 방법과 비교하여 약간 다른 등가하중 시스템을 산출하게 된다. 이 경우에도 직선이동의 원리는

성립하지 않는다.

4) 격납구조물 벽체 원환텐던의 편심배치가 구조적인 관점에서 어떠한 영향을 미치는지를 직선이동의 개념을 도입하여 분석하고, 기존의 연구와 비교하였다. 원환텐던을 편심배치시킬 때 편심에 관계없이 동일한 등가하중 시스템을 산출한다는 면에서는 텐던의 직선이동의 일종으로 볼 수 있을 것으로 판단되며, 이는 원환텐던을 어떻게 편심배치시키건 구조거동에 큰 차이는 없다는 것을 의미한다. 그러나 격납구조물 벽체와 같이 원형링 형태로 폐합된 구조에서는 원환텐던의 편심배치시 1차 및 2차 모멘트가 변화하지는 않을 것으로 판단되며, 이 점에서는 연속보의 직선이동 문제와 차별화된다.

참고문헌

- Nawy, E. G., "Prestressed Concrete: A Fundamental Approach," Prentice Hall, 1989.
- 신현목, "프리스트레스트 콘크리트," 제4판, 동명사, 1999.
- 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.
- Guyon, Y., "Prestressed Concrete," John Wiley & Sons, 1963.
- Oh, B. H. and Jeon, S. J., "Realistic Equivalent Load Methods in Prestressed Concrete Structures," *KCI Concrete Journal*, Vol. 13, No. 1, Jan. 2001, pp.11~17.
- Oh, B. H. and Jeon, S. J., "Limitations and Realistic Application of Equivalent Load Methods in Prestressed Concrete Structures," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 3, June 2002, pp.223~231.
- Kreyszig, E., "Advanced Engineering Mathematics," 7th edition, John Wiley & Sons, 1993.
- Sprenger, W., and Wagner, W., "On the Formulation of Geometrically Nonlinear 3D-Rebar-Elements Using the Enhanced Assumed Strain Method," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp.209~218.
- Ghali, A., "Circular Storage Tanks and Silos," 2nd edition, E & FN Spon, 2000.
- (주)대우건설, 대림산업주식회사, "통영 생산기지 저장탱크 및 본설비공사 기술제외서(Technical Part)," 한국가스공사, 1999.
- "SAP2000 - Analysis Reference," Computers and Structures, Inc., 1995.

요 약

프리스트레스드 콘크리트 부재의 해석이론에서 텐던의 직선이동(linear transformation)은 텐던 배치에 대한 해석을 간략화시켜주는 장점이 있어 빈번히 다루어지고 있다. 본 논문은 그동안 간과되기 쉬웠던 직선이동에 내재된 근사화 및 그 영향을 밝히는데 중점을 두고 있으며, 주로 등가하중법(equivalent load method)을 통하여 직선이동의 이론을 분석하였다. 텐던이 이동하더라도 똑같은 등가하중 시스템이 산출되는 것을 직선이동으로 볼 경우, 기존의 등가하중법 고유의 내재된 가정은 그러한 직선이동의 원리가 성립하도록 하고 있으며, 반면 근사화가 포함되지 않은 엄밀한 의미의 등가하중 시스템에서는 그러한 원리가 성립하고 있지 않다. 또한, 자체평형의 성질로부터 유도된 등가하중법을 직선이동에 적용하는 방안을 모색하였으며, 기존의 결과와 약간 다른 등가하중 시스템을 산출하였다. 논의를 확장하여 격납구조물 벽체 원환텐던(circumferential tendon)의 편심배치 문제를 직선이동의 관점에서 분석하였다.

핵심용어 : 프리스트레스드 콘크리트, 텐던, 직선이동, 등가하중법, 원환텐던
