

Новый подход в проектировании, строительстве, реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ СБОРНОЙ ОБДЕЛКИ ПРИ ИЗГИБЕ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОСИ ТОННЕЛЯ

Е. Н. Курбацкий, Май Дык Минь

*Московский государственный университет путей сообщения,
г. Москва (Россия)*

В работе приведен метод определения эквивалентной жесткости сборных обделок при изгибе перпендикулярной оси тоннеля. Результаты будут использованы, чтобы решать задачи расчета сборных обделок как балка на упругом основании.

Отдельные элементы сборных тоннельных обделок изготавливаются в основном из железобетона или чугуна, крайне редко сборные обделки выполняются из сварных стальных элементов. В некоторых случаях сборные обделки выполняют из композитных материалов.

1. Концепция и допущения

По направлению вдоль оси тоннеля, рассматриваем условие равновесия части конструкции, состоящей из двух половины кольца и поперечного стыка (рис. 1). Эта часть конструкции называется эквивалентным кольцом.

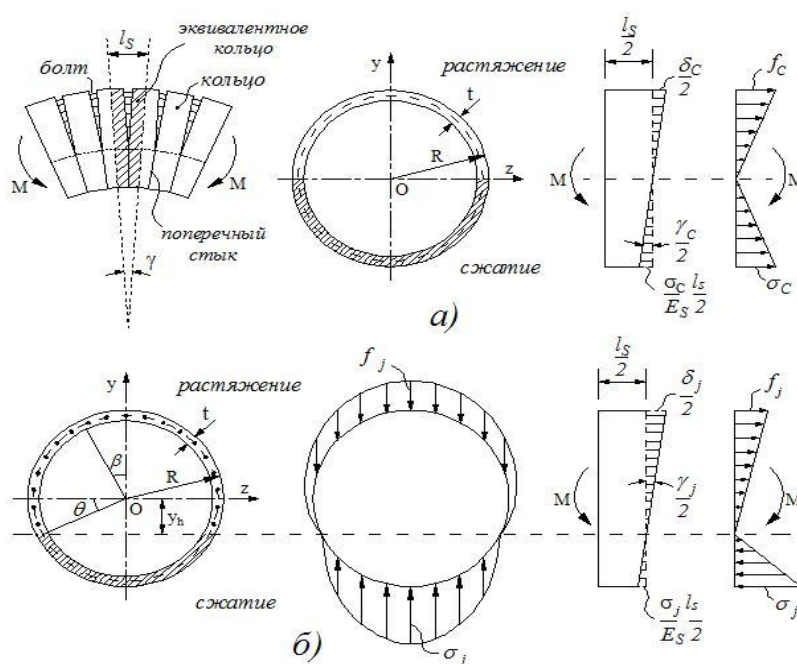


Рис. 1. Расстановка напряжений и поворотное перемещение поперечного сечения обделки тоннеля:
а – в кольце, б – в поперечном стыке

Предположим, что длина кольца значительно меньше, чем длина обделки тоннеля и значение изгибного момента не изменяется в этой части. Толщина обделки значительно меньше, чем радиус тоннеля.

2. Эквивалентная жесткость стыка при изгибе

В поперечном сечении стыка (рис. 1 б), сумма продольных усилий, Q , равно нулю, поэтому:

$$Q = 0 = \int_0^{\pi/2+\theta} 2Rt \frac{f_j (\cos \beta + \sin \theta)}{1 + \sin \theta} d\beta - \int_{\pi/2+\theta}^{\pi} 2Rt \frac{\sigma_j (-\cos \beta - \sin \theta)}{1 - \sin \theta} d\beta \quad (1)$$

Получим:

$$\frac{\sigma_j}{f_j} = \frac{(1 - \sin \theta) \left[\cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta \right]}{(1 + \sin \theta) \left[\cos \theta - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta \right]}, \quad (2)$$

где σ_j и f_j – максимальные напряжения в поперечном стыке при изгибе, H / m^2 ; θ – угол, определяющий положение нейтральной оси.

Из значения поворотного угла поперечного сечения стыка (рис. 1 б) получим уравнение:

$$\frac{\sigma_j l_s}{2E_s (R - R \sin \theta)} = \frac{1}{R + R \sin \theta} \frac{f_j A_s}{2K_j}, \quad (3)$$

где R – радиус обделки тоннеля или:

$$\frac{\sigma_j}{f_j} = \frac{E_s A_s}{K_j l_s} \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \quad (4)$$

Используя выражения (2) и (4), получим уравнение:

$$\frac{E_s A_s}{K_j l_s} = \frac{\cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta}{\cos \theta - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta} \quad (5)$$

Решив уравнение выше, получим результат в следующем виде:

$$\theta + \cotg \theta = \pi \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{E_s A_s / K_j l_s - 1} \right) \quad (6)$$

С одной стороны определим отношение между изгибающим моментом и продольными напряжениями, чтобы сделать это, определяем изгибающий момент поперечного сечения стыка, выражающийся выражением:

$$\begin{aligned} M_{Oz} &= \int_0^{\pi/2+\theta} \frac{2Rt f_j (\cos \beta + \sin \theta)}{1 + \sin \theta} R \cos \beta d\beta - \int_{\pi/2+\theta}^{\pi} \frac{2Rt \sigma_j (-\cos \beta - \sin \theta)}{1 - \sin \theta} R \cos \beta d\beta \\ &= \frac{R^2 t f_j}{1 + \sin \theta} \left[\frac{\pi}{2} + \theta + \cos \theta \sin \theta \right] + \frac{R^2 t \sigma_j}{1 - \sin \theta} \left[\frac{\pi}{2} - \theta - \cos \theta \sin \theta \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив f_j выражения (2) в уравнение (7), получим:

$$M_{Oz} = \frac{\pi R^2 t \sigma_j}{1 - \sin \theta} \frac{\cos^3 \theta}{\cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta} \quad (8)$$

С другой стороны определим отношение между изгибающим моментом и поворотного угла. Значение поворотного угла поперечного сечения стыка можно представить в следующем выражении:

$$\frac{M_{Oz}}{(EI)_j} \frac{l_j}{2} = \frac{\gamma_j}{2} = \frac{\sigma_j l_s}{2 E_s R (1 - \sin \theta)} \quad (9)$$

или:

$$(EI)_j = \frac{M_{Oz} E_s R l_j (1 - \sin \theta)}{\sigma_j l_s} \quad (10)$$

где $(EI)_j$ – эквивалентная жесткость сечения поперечного стыка при изгибе.

Используя выражения (8) и уравнения (9), получим результат, определяющий эквивалентную жесткость поперечного сечения стыка при изгибе сборных обделок:

$$(EI)_j = \frac{E_s I_s l_j}{l_s} \frac{\cos^3 \theta}{\cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta} \quad (11)$$

где $I_s = \pi R^3 t$ – осевой момент инерции поперечного сечения кольца.

3. Эквивалентная жесткость сборной обделки тоннеля при изгибе

Поворотный угол поперечного сечения эквивалентного кольца состоит из поворотных углов кольца и поперечного стыка ($\gamma = \gamma_c + \gamma_j$), поэтому:

$$\frac{l_s}{(EI)_{eq}} = \frac{l_s}{E_s I_s} + \frac{l_j}{(EI)_j} \quad (12)$$

где $(EI)_{eq}$ – эквивалентная жесткость сечения обделки при изгибе.

Используя выражения (11) и (12), получим эквивалентную жесткость сечения обделки при изгибе в виде:

$$(EI)_{eq} = E_s I_s \frac{\cos^3 \theta}{\cos^3 \theta + \cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \sin \theta} \quad (13)$$

Выводы

Используя выражение (13), рассматриваем сборную обделку вдоль оси тоннеля как балка на упругом основании. Результаты этого исследования могут быть использованы, чтобы решить задачи расчета сборных обделок вдоль оси тоннеля на сейсмические воздействия.

Список литературы

1. Zhu, W. Modification of key parameters of longitudinal equivalent model for shield tunnel / W. Zhu, X. Q. Kou, X. C. Zhong, Z. G. Huang // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground : proceedings of the 6-th international symposium. – Shanghai, 2008.
2. Chiu, Te-Fu. Evaluation and Remediation Measures For Shield Tunnels Under Soil Liquefaction / Te-Fu Chiu, Chi-Tso Chang.
3. Филиппов, И. И. Тоннели, сооружаемые щитовым и специальными способами : уч. пос. / И. И. Филиппов. – М. : РГОТУПС, 2004. – 212 с.