

# Investigación a Partir de Simulación Numérica Para la Construcción de Pasajes Transversales Utilizando de Métodos Mecánicos

Yi-min GAO<sup>a</sup>, Xian LIU<sup>b</sup>, Gonzalo RAMOS<sup>c</sup>, Jose TURMO<sup>d</sup> y Sebastian RIVERA<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. yimin.gao@upc.edu

<sup>b</sup>Doctor Ingeniero de Caminos, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. Profesor titular. xian.liu@tongji.edu.cn

<sup>c</sup>Doctor Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. Profesor completo. gonzalo.ramos@upc.edu

<sup>d</sup>Doctor Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. Profesor completo. jose.turmo@upc.edu

<sup>e</sup>Estudiante de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. 2090040@tongji.edu.cn

## RESUMEN

La construcción de pasajes transversales mediante métodos mecánicos introduce un enfoque novedoso y eficiente para la conexión de estructuras subterráneas. Este método no solo es viable, sino que también presenta un considerable potencial de aplicación. Sin embargo, plantea una serie de desafíos significativos cuando se utiliza en túneles excavados con escudos de pequeño diámetro en entornos caracterizados por suelos blandos. Este estudio investiga el comportamiento estructural de estos sistemas utilizando un modelo numérico de contacto con carcasa. Los resultados indican que el modelo de contacto con carcasa simula de manera efectiva las aberturas en túneles con un margen de error mínimo. Además, el análisis del esfuerzo cortante radial máximo entre los segmentos revela el patrón de transmisión de fuerzas internas, que se propaga desde la abertura hacia la clave del túnel y se reduce gradualmente.

## ABSTRACT

The construction of cross passages using mechanical methods introduces a novel and efficient approach for connecting underground structures. This method is both feasible and offers considerable potential for application. However, it does present a number of significant challenges when used in small-diameter shield tunnels within environments characterised by soft soil. This study investigates the structural behavior of such systems with shell-contact numerical model. The findings indicate that the shell-contact model effectively simulates tunnel openings with minimal error. Furthermore, analysis of the maximum radial shear between segments reveals the internal force transmission pattern, which propagates from the opening to the tunnel crown and gradually diminishes.

**PALABRAS CLAVE:** Pasajes transversales, Método mecánico, Modelo de contacto con carcasa, Abertura, Transmisión de fuerzas internas.

**KEYWORDS:** Cross passages, Mechanical method, Shell-contact model, Opening, Internal force transmission

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la necesidad de una construcción expedita de estructuras subterráneas, la utilización de técnicas mecánicas para la formación de pasajes transversales en la construcción de túneles ha ganado popularidad en los últimos años [Tabesh A et al., 2016]. La respuesta estructural del túnel principal bajo este método es representativa de un problema típico de abertura en túneles, donde la distribución de esfuerzos en el revestimiento del túnel se altera durante el proceso de apertura, generando una concentración de esfuerzos cerca de la ubicación de la abertura. Este fenómeno ha captado una atención significativa por parte de académicos e ingenieros, quienes han llevado a cabo investigaciones exhaustivas para comprender sus mecanismos subyacentes y desarrollar estrategias de mitigación potenciales.

Para abordar esta problemática, se han realizado pruebas de campo [Shen KJ et al., 2013; Yayong Li et al., 2016; Georg Atzl et al., 2017], pruebas a escala real [Liu Xian et al., 2020] y pruebas a escala reducida [Ping Lu et al., 2022]. Sin embargo, el costo de estas pruebas es desproporcionado en relación con su número, y la interpretación del proceso de transferencia de fuerzas tanto en las direcciones circunferencial como longitudinal de los túneles utilizando un número limitado de puntos de medición sigue siendo una tarea compleja. Por ello, los académicos recurren frecuentemente a pruebas de modelación numérica [Spyridis, P. et al., 2015; Sun Longfei et al., 2019] para investigar este problema, lo

que permite un análisis complementario de la respuesta estructural y del mecanismo de transferencia de fuerzas.

La respuesta estructural de las aberturas en túneles ha sido objeto de numerosos estudios, siendo el método estratigráfico-estructural una de las aproximaciones más destacadas en este ámbito. En la modelación numérica, existe una compensación entre la eficiencia y la precisión computacionales. Representa un desafío para la academia modelar túneles con suficiente detalle mientras se mantiene un nivel aceptable de eficiencia computacional en los cálculos basados en el estrato. Además, el alcance de la respuesta estructural de una abertura en túneles es limitado. Simplificando la modelación del estrato externo mediante el método de carga-estructura y adoptando un modelo refinado del túnel principal en este estudio, es posible analizar la respuesta estructural de un túnel durante su apertura, manteniendo un nivel adecuado de eficiencia computacional.

## 2. ESTUDIO DE CASO

El contexto del proyecto corresponde a la Línea S1 de Wuxi, en la provincia de Jiangsu, China, que se extiende hacia el este desde la estación Yiting Road, ubicada al oeste de Wuxi, hasta la estación Huaqiao, cercana a Shanghái. El método mecánico se utilizó para construir los pasajes transversales entre la estación Lujia y la estación Gallery Central, en un tramo de 1.835 km de longitud. Las condiciones de la capa de suelo y los detalles de la construcción se presentan en la Figura 1.

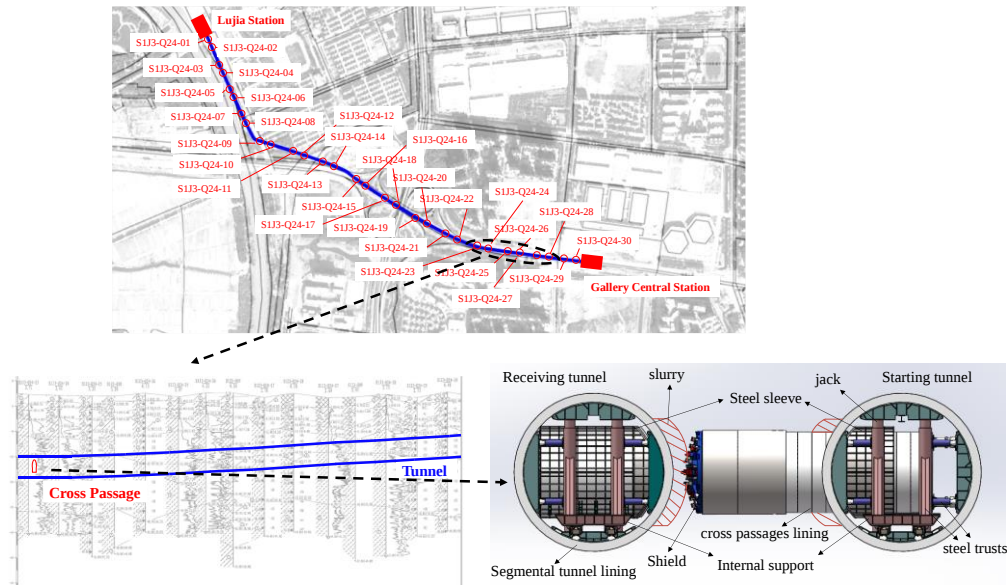


Figura 1 Proyecto de la Línea S1 del Metro de Wuxi en China y método de construcción de pasajes transversales.

El modelo numérico se emplea inicialmente para ajustarse al experimento a escala real. Si los resultados entre ambos coinciden de manera satisfactoria, el modelo se utilizará para la simulación del proyecto real. Los equipos de prueba y el proceso se basan en referencias de trabajos previos [Liu Xian et al., 2024].

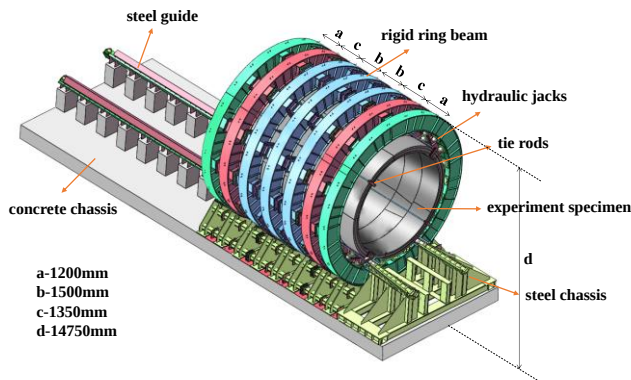


Figura 2 Dispositivos de carga

### 3. MÉTODO DE ANÁLISIS

El modelo incorpora dos sistemas de coordenadas distintos. El sistema de coordenadas global se designa como OXYZ, mientras que el sistema de coordenadas local de los componentes del modelo se designa como oxyz.

Los segmentos de concreto reforzado están representados por elementos de carcasa gruesa, tridimensionales, de cuatro nodos y con capas, como se ilustra en la Figura 3.

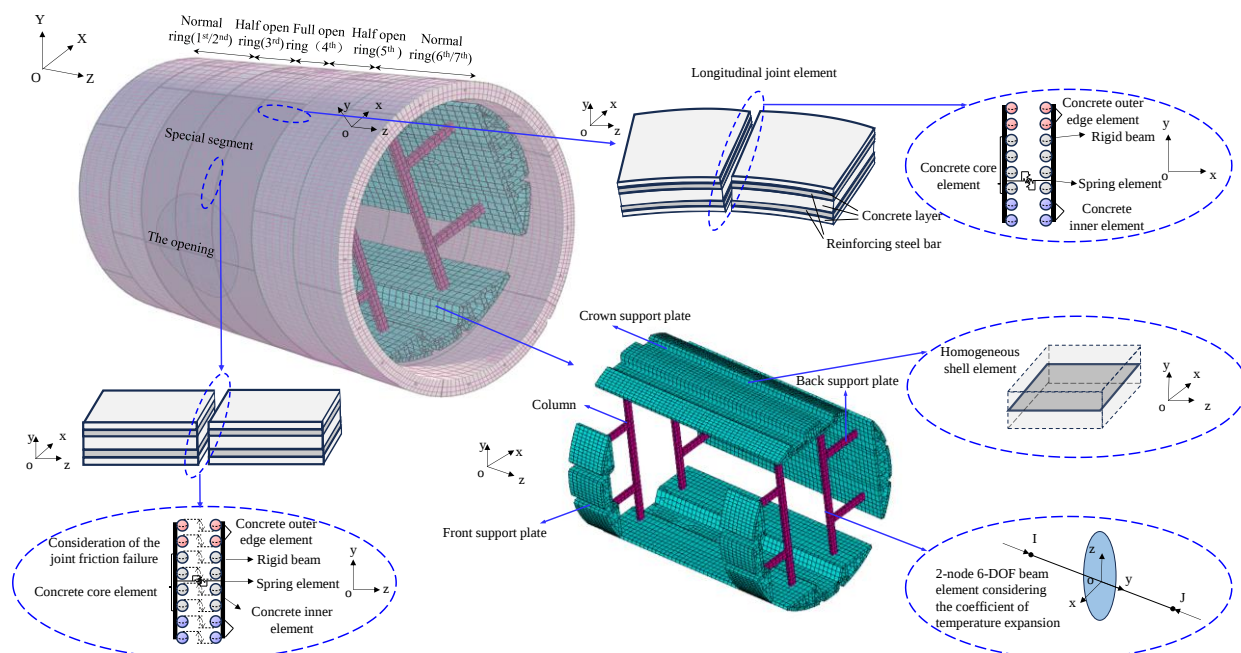


Figura 3 Modelo Numérico

La sección transversal del segmento se subdivide en ocho capas, que comprenden dos capas de estructura de barras de acero de refuerzo y seis capas de estructura de concreto. Tanto las juntas longitudinales como las circunferenciales se representan mediante vigas rígidas y elementos de contacto no lineal. En particular, las tres juntas circunferenciales situadas en proximidad a las aberturas emplean una configuración refinada de juntas que incorpora la posibilidad de falla por fricción.

Los soportes internos están diseñados combinando modelos de carcasa y vigas. Las placas crescentiformes de soporte interno emplean el mismo modelo de elementos de carcasa que el túnel principal, mientras que las columnas se simulan mediante elementos de viga lineales tridimensionales de dos nodos. Entre las placas crescentiformes de soporte interno y el túnel principal, se utilizan elementos de contacto (contacto duro) para simular

la condición en la que solo se transmiten fuerzas compresivas, sin transmisión de fuerzas tensiles.

La modelación numérica de los parámetros del material y los casos de carga se realizó de manera consistente con la prueba. Para obtener más detalles sobre el proceso específico de la prueba, por favor consulte el artículo (2-4).

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Verificación del modelo numérico

En vista de la deformación preliminar observada en la respuesta estructural durante la prueba, se llevó a cabo un análisis comparativo de las diferencias de deformación entre los revestimientos del túnel bajo los casos de carga adyacentes. La comparación resultante del desplazamiento estructural y la deformación del anillo completamente abierto se presenta en la Figura 4 a continuación.

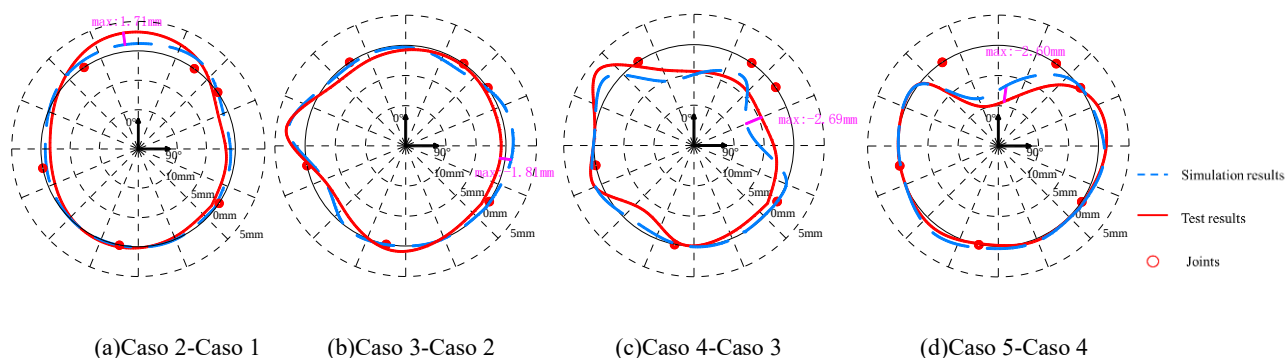
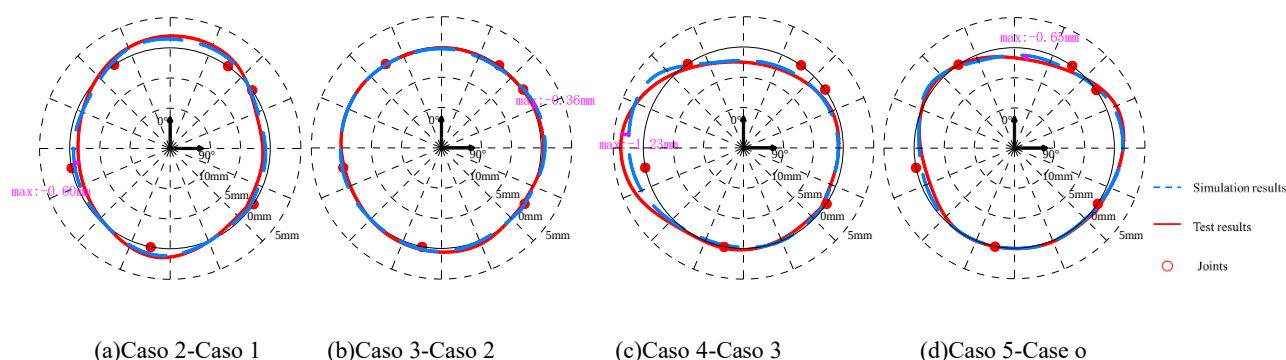


Figura 4 Diferencia de deformación del anillo completamente abierto entre el modelo numérico y la prueba a escala real.

En la simulación numérica, el fenómeno más destacado entre todos los casos de carga corresponde al cuarto anillo (anillo completamente abierto). El lado de corte del anillo con abertura completa presenta una deformación hacia afuera bajo la condición de corte, mientras que los segmentos superior e inferior del lado de corte experimentan una deformación hacia adentro en el caso 4. Además, el segmento de la clave del túnel se deforma hacia abajo en el caso 5.

La segunda respuesta más pronunciada se observa en el tercer y quinto anillo (anillos semiabiertos). En

estos casos, el lado de corte del segmento se deforma hacia afuera bajo el caso 4, mientras que el segmento de la clave se deforma hacia abajo en el caso 5. Los resultados de la simulación numérica bajo diferentes casos son consistentes con los resultados experimentales, y el estado final de deformación es idéntico. La discrepancia en la deformación entre los casos 4 y 5 para el anillo completamente abierto es mínima, con una diferencia máxima de desplazamiento de 2.69 mm (35%, 67.5°). Los resultados del anillo semiabierto se ilustran en la Figura 5 a continuación.



(a)Caso 2-Caso 1 (b)Caso 3-Caso 2 (c)Caso 4-Caso 3 (d)Caso 5-Caso 0  
Figura 5 Diferencia de deformación del anillo semiabierto entre el modelo numérico y la prueba a escala real

El error de deformación del anillo con agujero semiabierto es menor que el del anillo con agujero completamente abierto. Además, la diferencia máxima de desplazamiento entre el Caso 4 y el Caso 3 es de 1.23 mm (307.5°), con una diferencia máxima de desplazamiento relativo del 51%. Las posiciones restantes muestran una diferencia de desplazamiento de aproximadamente 0.5 mm o menos.

#### 4.2 Ley del efecto de corte entre anillos.

Según los resultados de las fuerzas internas de la prueba a escala real, se sabe que la ubicación de la máxima fuerza cortante entre los anillos corresponde al lugar de cambio brusco de la fuerza interna de la estructura dentro del anillo. De acuerdo con los resultados de la simulación numérica, se puede observar que la máxima fuerza cortante radial entre los anillos ocurre desde la posición de la abertura, gradualmente hacia la parte superior y finalmente desaparece (como se muestra en la Figura 6), y el rango de influencia de la respuesta estructural también desaparece en la posición del primer y

séptimo anillo normal. Esto muestra que la tendencia del cambio de la máxima fuerza cortante entre los anillos refleja la dirección y la tendencia de la transferencia de la "fuerza interna entre anillos".

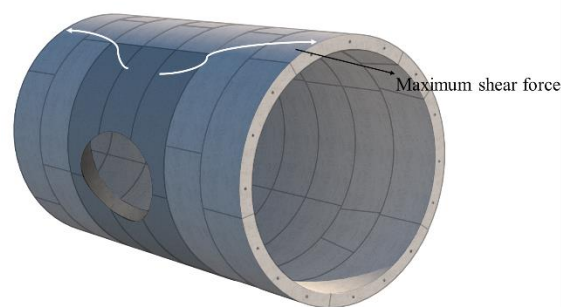


Figura 6 Diagrama esquemático de la línea de máxima fuerza cortante entre anillos.

## 5 CONCLUSIONES

De acuerdo con el modelo de contacto con carcasa, este artículo examina el modelo numérico para el proceso de apertura del túnel principal en el método de pasajes transversales mecánicos. Se comparan y validan los resultados con los de la prueba a escala

real. Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas de las evidencias presentadas:

El modelo de contacto con carcasa emplea un enfoque de "contacto suave", lo que permite no solo la simulación de la rotación de las juntas, sino también la simulación acoplada de presión y corte en la posición de la junta.

Se propone un método de modelado mecánico refinado de los segmentos de túnel escudo considerando la fricción entre anillos. El modelo muestra un alto grado de correlación con respecto a la deformación estructural de las pruebas a escala real (con un error de deformación máxima del anillo dentro del 27%), y el desalineamiento del estado límite entre anillos (dentro del 20% de error). No obstante, dado el posible desacuerdo entre la fuerza longitudinal empleada en la prueba y la utilizada en el modelo numérico, sería prudente someter este último a un escrutinio adicional en el contexto del proyecto real posterior.

La dirección de la transferencia y disipación de la fuerza entre anillos puede determinarse en función de la ubicación de la máxima fuerza cortante entre los diferentes anillos. En el contexto del proyecto de túnel escudo, donde pueden presentarse cargas o estructuras asimétricas, el modelo numérico puede ser utilizado para simular y analizar la máxima fuerza cortante entre anillos. Esto permite el refuerzo de la trayectoria de movimiento de la máxima fuerza cortante de manera económica y eficiente, mientras se garantiza una transmisión efectiva de la fuerza entre los anillos.

### **Referencias**

- [1] Tabesh A, Najafi M, Korky S J, et al. Comparison of construction methods for underground freight transportation in Texas[M]//Pipelines 2016. 2016: 817-826.
- [2] Shen KJ,Wan S and Zhang XC Effect of cross passage construction on the structural safety of collapse reinforcement segment of existing tunnel. Advanced Materials Research, 2013, 779–780: 538–543.
- [3] Yayong Li, Xiaoguang Jin, Zhitao Lv, Jianghui Dong, Jincheng Guo. Deformation and

mechanical haracteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,2016,56: 22-33

- [4] Georg Atzl , Enrico Soranzo , Vladislav Mihaylov , Bernhard Hochgatterer. Special segments at the cross passages in the Filder Tunnel - Interpretation of the data from monitoring segments.Geomechanics and Tunnelling 10 (2017), No. 2:160-176
- [5] Liu Xian, GAO Yi-min, Zhang Jiao-long, et al. Structural response of main tunnel linings during construction of connecting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(05):951-960.
- [6] Ping Lu, Dajun Yuan, Dalong Jin, Weiping Luo, Minggao Liu, Centrifugal model tests on the structural response of the shield tunnel when constructing cross passages by mechanical methods, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 128, 2022, 104621, ISSN 0886-7798
- [7] Spyridis, P., Bergmeister, K. Analysis of lateral openings in tunnel linings. Tunn. Undergr. Space Technol., 2015, 50, 376-395.
- [8] Sun Longfei, Chen Zhenlei, Li Jiancheng. Effects of Surface Subsidence in Excavation of Metro Crossing Passage Tunnel by Shield Machine[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019,33(04):197-201+213.
- [9] LIU, Xian, Gao Yimin, Ramos, G., Turmo, J., & Zhu, Yaohong. Full-scale tests on segmental lining with mechanically cut cross-passage opening. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 151: 105874.