

Estrategias de Diseño del Revestimiento de Túneles con el Método de Hinca Vertical

Design strategy on shafts of conveyance tunnels constructed by vertical jacking method

Yi-min GAO^a, Xian LIU^b, Jose TURMO^c, Gonzalo RAMOS^d y Sebastian RIVERA^e

^aEstudiante de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. yimin.gao@upc.edu

^bDoctor Ingeniero de Caminos, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. Profesor titular. xian.liu@tongji.edu.cn

^cDoctor Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. Profesor tiempo completo. gonzalo.ramos@upc.edu

^dDoctor Ingeniero de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. Profesor tiempo completo. jose.turmo@upc.edu

^eEstudiante de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tongji, Shanghai, China. 2090040@tongji.edu.cn

RESUMEN

El método de hinca vertical ascendente es una técnica muy utilizada para la construcción de pozos de captación de túneles hidráulicos. En comparación con otros métodos, tiene la ventaja de ser más sencillo de construir y de requerir menos medios auxiliares. Sin embargo, la intensidad de la fuerza de hincado vertical es incierta, lo que influye en la respuesta estructural. En este estudio se examinan los efectos de diferentes factores en el comportamiento estructural. Los resultados indican que la reducción del área de apertura del pozo con respecto al diámetro del túnel mejora la seguridad durante el corte de las dovelas de coronación del túnel, mientras que el grosor del anillo de dovelas tiene un efecto mínimo sobre las tensiones internas. Las dovelas mixtas de acero-hormigón en la zona de entronque túnel pozo mejoran la resistencia a pesar del aumento localizado de las fuerzas.

ABSTRACT

The vertical jacking method is a technique that is widely used for the construction of shafts of conveyance tunnels. In comparison to other methods, it has the advantage of being simpler to equip and easier to construct. However, the vertical jacking force intensity is uncertain, which has significant influence on structural responses. This study examines the effects of different influencing factors. The findings indicate that reducing the opening area improves safety during crown removal, while segment thickness has minimal effect on internal forces. Steel-concrete composites enhance load capacity despite localized force increases.

PALABRAS CLAVE: Método de Hinca Vertical, Pozo, Túneles hidráulicos, Respuesta estructural, Diseño estratégico

KEYWORDS: Vertical jacking method, Shaft, Conveyance tunnels, Structural response, Design strategy

1. Introducción

En la construcción de pozos de captación de agua para túneles de conducción de agua que se adentran en ríos, lagos o mares dentro de regiones de suelo blando, se suelen emplear métodos constructivos con medios acuáticos o con penínsulas artificiales. Teniendo en cuenta el coste de construcción, el empleo de métodos mecánicos se ha vuelto cada vez más común en los últimos años [Kondo et al., 2004; Ito K et al., 2004]. El método de hincas vertical es una técnica mecánica habitual. Ofrece la ventaja de ser relativamente sencillo de construir y requerir pocos medios auxiliares, en comparación con otros métodos mecánicos [Dong et al., 2012; You et al., 2012; Wang et al., 2021; Liu et al., 2024]. Sin embargo, la fuerza reactiva del empuje del gato vertical actúa directamente hacia abajo sobre las dovelas del túnel de transporte, y la magnitud del empuje está influenciada por diversos factores [Wang et al., 2011; Xu et al., 2021]. Por lo tanto, durante la fase de diseño del túnel, debe realizarse una evaluación exhaustiva del impacto de estas fuerzas en diseño del túnel de transporte y de los pozos de captación.

Se ha construido una central eléctrica experimental muy cerca de la zona costera de Shanghai. El túnel hidráulico de este proyecto se construyó con un escudo, mientras que los pozos se construyeron con el método de hincas vertical. El túnel horizontal está situado a una profundidad de 8,45 metros bajo el

lecho marino. Consta de 30 anillos de dovelas, cada uno con un diámetro exterior de 3.700 mm y un espesor de dovela de 350 mm. La anchura de cada anillo es de 985 mm, como se ilustra en la figura 1.

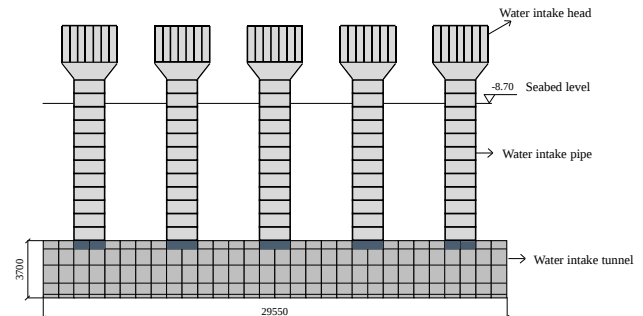
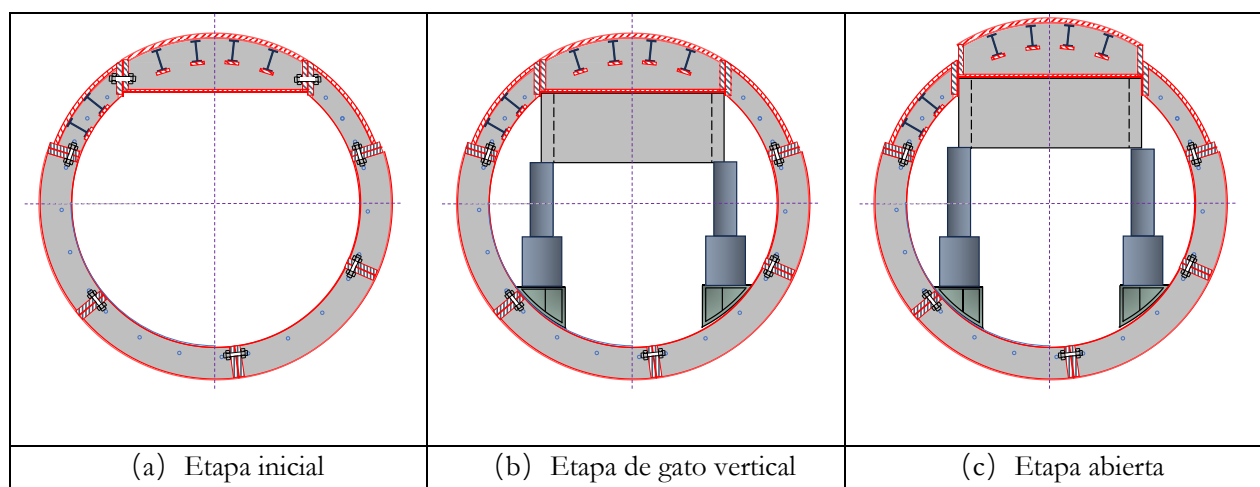


Figura 1 Ilustración del caso de estudio

En las secciones perforadas del túnel hidráulico, las dovelas superiores en coronación conectan con el pozo, están construidas con dovelas estructurales de acero, que sirven al doble propósito de permitir la elevación vertical e instalación del tubo ascendente. Cada abertura mide 1970 mm × 1970 mm, lo que supone una relación alta entre el área abierta y el diámetro interior si se compara con proyectos similares [Wang et al., 2021]. Cuanto mayores sean los diámetros de los pozos, mayor será la fuerza de elevación vertical requerida y más exigente será la respuesta estructural, lo que plantea mayores retos para la seguridad del túnel hidráulico. De ahí que sea esencial un diseño cuidadoso.

Teniendo en cuenta el proceso de construcción real y las condiciones de carga, el proceso completo puede simplificarse a los siguientes pasos (ilustrados en la figura 2).



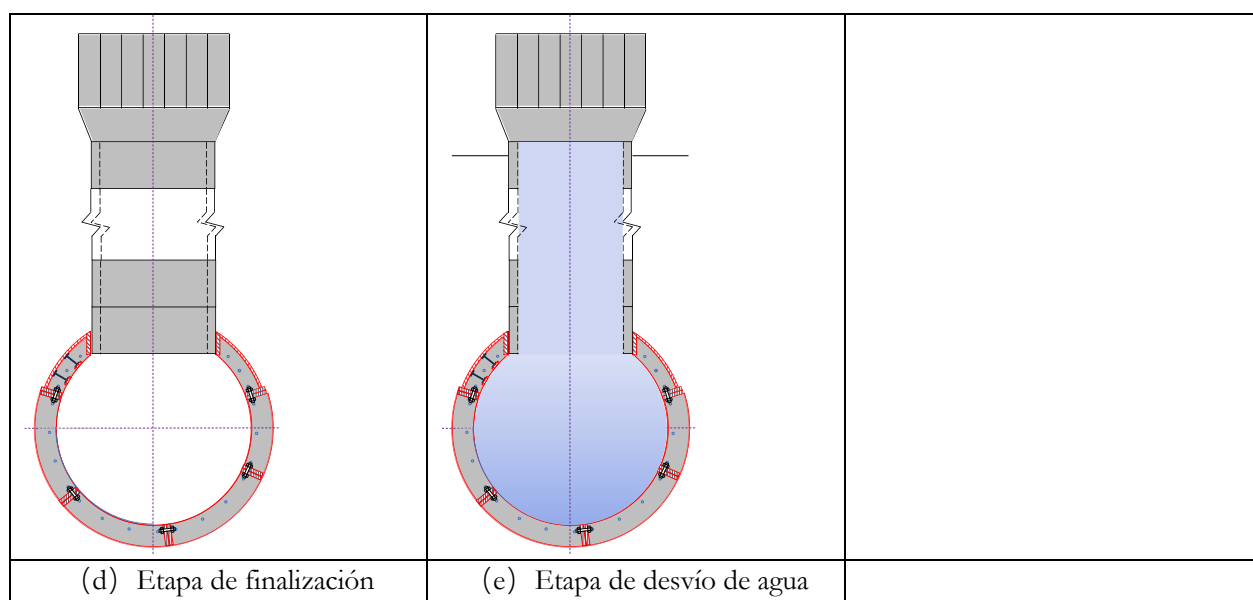


Figura 2 Diagrama esquemático de las condiciones de trabajo

- (1) Fase inicial: El túnel se construye y se somete a la presión externa del suelo, al peso propio y a cargas adicionales.
- (2) Etapa de elevación vertical: La fuerza de elevación vertical se aplica en los anillos a abrir.
- (3) Etapa de apertura: La primera sección del tubo del eje se empuja verticalmente hacia fuera, creando la abertura.
- (4) Etapa de finalización: La estructura vertical de la tubería, las juntas finales y las vigas de conexión se completan, y la fuerza de elevación vertical se reduce a cero.
- (5) Etapa de desviación del agua: El agua se introduce en el túnel, incorporando los efectos de peso propio, presión interna y flujo.

2. Método de análisis

Con el fin de reflejar con mayor precisión las características de las dovelas y juntas del túnel hidráulico, se emplea para la simulación un modelo tipo placa con contacto. Se simulan un total de 30 anillos de dovelas en el túnel, y la disposición de las dovelas es la misma que la del proyecto real. (Como se muestra en la figura 3)

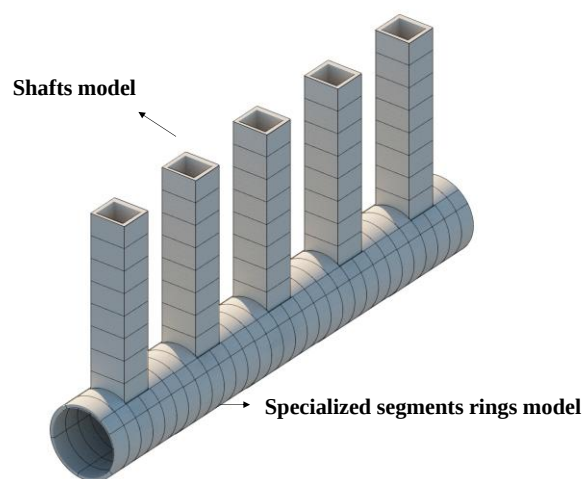


Figura 3 Modelo de segmentos y secciones de eje

La parte estructural de hormigón se simula mediante un elemento tipo placa multicapa. Se simulan tanto la capa de hormigón como la capas de armadura. Teniendo en cuenta la estructura real de juntas del proyecto, los bordes de hormigón están revestidos de acero. Para representar las juntas de las dovelas del revestimiento, se emplea una serie de elementos tipo viga rígidos para simular tanto el grosor de la dovela como las conexiones de las juntas de acero. Un modelo de Coulomb se emplea para modelizar el comportamiento del acoplamiento entre fuerzas normales y tangenciales en las juntas, incluidas las conexiones circunferenciales y longitudinales. Se utilizan elementos de contacto para representar el comportamiento a compresión del hormigón en las interfaces de contacto. Las posiciones de los pernos circunferenciales y longitudinales se definen con

precisión de acuerdo con sus ubicaciones reales, como se ilustra en la figura 4.

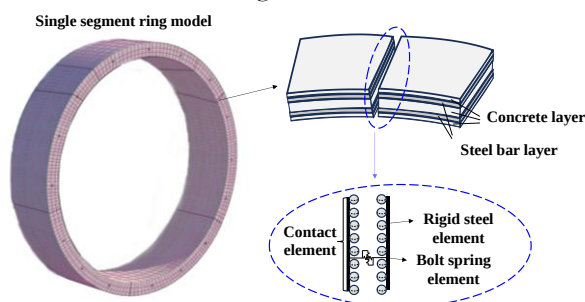


Figura 4 Modelo de segmentos y articulaciones

El modelo incorpora 30 anillos de dovelas que representan la zona de estudio del túnel. Para simular las condiciones de fuerza longitudinal dentro del túnel y para tener en cuenta la tensión residual longitudinal, se aplica un empuje del 30% del empuje de la máquina de escudo en ambos extremos del túnel. Las reacciones del terreno a la deformación del túnel se modelizan mediante muelles distribuidos a lo largo del perímetro del túnel. Cada muelle que rodea las dovelas y los pozos está caracterizado por tres rigideces: uno en la dirección normal y dos en las direcciones tangenciales según los parámetros geológicos pertinentes.

La simulación de las etapas de carga se realiza por separado según las cinco etapas descritas en la sección anterior.

3 Evaluación del impacto de los distintos factores en el diseño

3.1 Influencia del grosor de las dovelas

En el caso de estudio, los análisis se realizaron con espesores de 300 mm y 350 mm. Durante la etapa inicial, ambos diseños mostraron deformaciones comparables, lo que llevó a una convergencia de 1 mm entre coronación y contrabóveda. Las variaciones de convergencia observadas durante la transición de la etapa inicial a la etapa de llenado de agua se mantuvieron dentro de 1 mm.

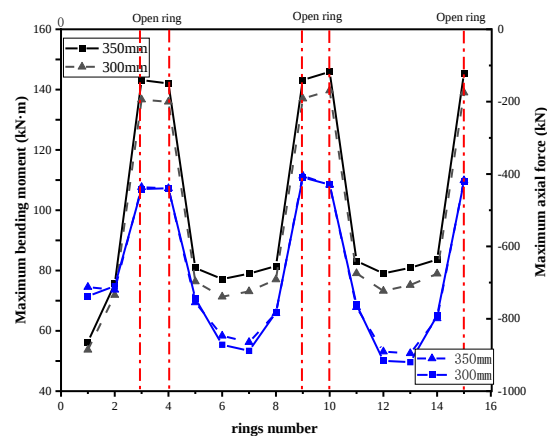


Figura 5 Momento de flexión (azul) y fuerza axial (negro) máximos de diferentes espesores en la etapa de apertura

Las diferencias más notables en los esfuerzos internos se observan durante la etapa de apertura. Como se ilustra en la figura 5, se observa que el momento flector en el esquema de 350 mm de espesor supera al del esquema de 300 mm de espesor en menos de 10 kN-m, lo que corresponde a una diferencia de aproximadamente el 5%. Del mismo modo, la fuerza axial en el esquema de 350 mm también es mayor, con una diferencia máxima de menos de 50 kN (aproximadamente un 5%). Estos resultados indican que el grosor de las dovelas de revestimiento tiene una influencia relativamente menor en las fuerzas internas de la estructura.

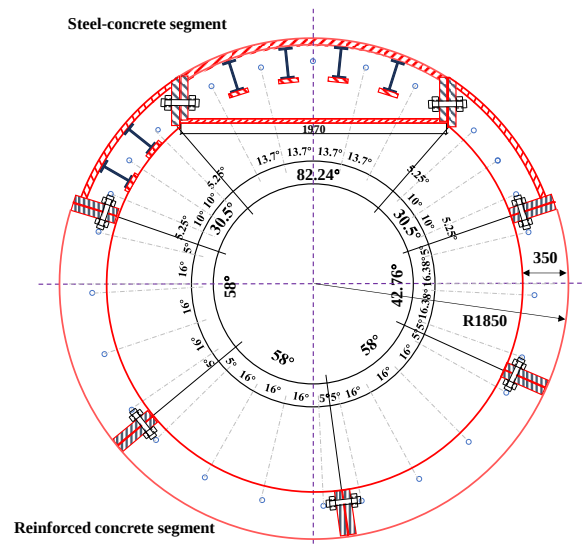
3.2 Influencia del tamaño del pozo abierto

En el caso de estudio, se realizaron cálculos para evaluar el impacto de variar las dimensiones de la abertura. El esquema original presentaba una abertura de 1970 mm × 1970 mm. En cambio, los esquemas 2 y 3 empleaban aberturas de 1300 mm × 1300 mm y 1000 mm × 1000 mm, respectivamente. Los esquemas modificados mostraron tendencias de deformación diferentes de las del esquema original. Esta discrepancia puede atribuirse al hecho de que el esquema original implica la eliminación de dos dovelas completas del anillo, mientras que los esquemas modificados conservan una parte de las dovelas.

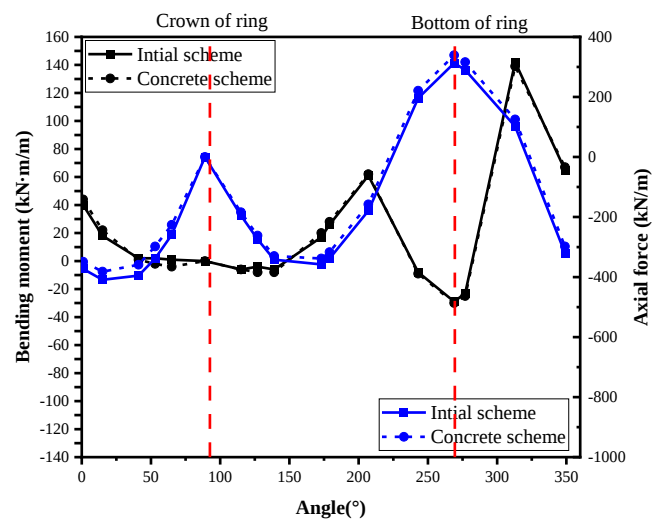
Como se ilustra en la figura 6, durante la fase de apertura, una reducción del tamaño de la abertura provoca una disminución del momento flector máximo del anillo abierto, al tiempo que se produce un aumento de la fuerza axial máxima. Una reducción del área de apertura da lugar a una disminución de la fuerza requerida del gato, lo que a su vez da lugar a

Durante la fase de terminación, se observa una concentración parcial de tensiones en las dovelas restantes del anillo abierto a medida que disminuye el área abierta. Aunque este fenómeno no se representa explícitamente en el presente documento, merece sin embargo una atenta consideración en los análisis relacionados.

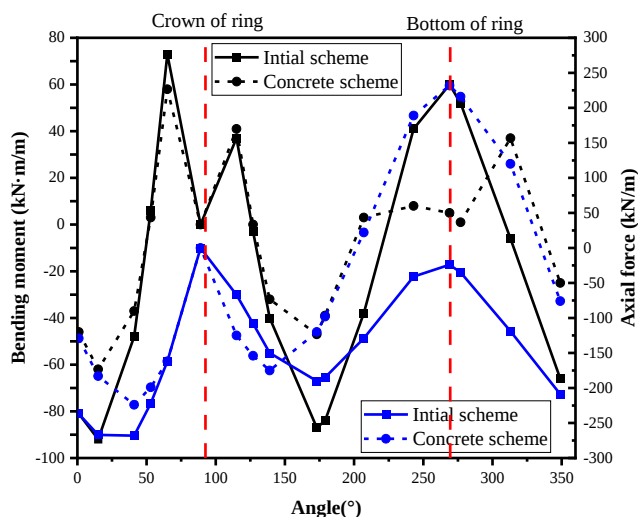
El diseño original emplea dovelas compuestas de acero-hormigón en la coronación de cada anillo (mostrados en la Figura 7). Con el fin de mejorar la eficiencia económica, se propone una variación en la que el anillo está constituido en su totalidad por dovelas de hormigón armado. En concreto, todas las dovelas de acero en coronación se sustituyen por dovelas de hormigón. Es importante señalar que la configuración de las dovelas de hormigón en otros lugares permanece inalterada.



Teniendo en cuenta las etapas de construcción de la estructura, a saber, la etapa de apertura y la etapa de desviación del agua, se realiza un análisis comparativo para evaluar los esfuerzos internos del anillo abierto (Anillo 15) con dos diseños.



Nombres autores - et... / IX CONGRESO ACHE - GRANADA 2025 5



(b) Fuerza interna del decimoquinto anillo en la fase de desviación del agua

Figura 8 Momento de flexión y fuerza axial máximos de diferentes tipos de segmentos

Como se ilustra en la figura 8, la aplicación de la configuración de dovelas de hormigón tiene una influencia relativamente menor en el anillo abierto durante la fase de apertura. Durante la etapa de desviación del agua, la aplicación del esquema de hormigón provoca una reducción de los momentos flectores de los anillos abiertos. Además, algunos anillos abiertos experimentan un cambio de la fuerza axial de compresión a tracción, que puede atribuirse a la precarga de los pernos.

4 Conclusiones

Se ha demostrado que el modelo con elementos tipo placa y con elementos de contacto es un método eficaz para simular el método de hincado vertical. Al incorporar las recomendaciones de diseño descritas anteriormente, los pozos de captación del túnel de transporte del proyecto de la central eléctrica de Shanghai se construyeron con éxito utilizando la técnica de hincado vertical, garantizando la seguridad durante todo el proceso.

El estudio demuestra además que el grosor de las dovelas de revestimiento tiene un impacto insignificante en la respuesta mecánica estructural. Aunque el momento flector y la fuerza axial son ligeramente inferiores para los segmentos de revestimiento de 300 mm de espesor en comparación con los segmentos de 350 mm de espesor, la discrepancia se mantiene por debajo del 5%, lo que

indica un impacto mínimo. Por lo tanto, el diseño del espesor del segmento de revestimiento debe dar prioridad a la adecuación del refuerzo transversal.

A medida que disminuye el área abierta, se reduce el momento flector global de la estructura de anillo abierto debido a la disminución de la carga. Sin embargo, la reducción del área da lugar a la presencia de dovelas de revestimiento en la coronación del anillo abierto, lo que consecuentemente da lugar a un aumento de la fuerza axial estructural. En consecuencia, el diseño del tamaño de apertura para las dovelas debe considerar meticulosamente las variaciones de fuerza interna asociadas a los diferentes tamaños de apertura, la influencia de las dovelas restantes en el rendimiento estructural y el potencial de fenómenos de concentración de tensiones.

Las dovelas mixtas de acero-hormigón presenta una capacidad de carga última superior, aunque va acompañada de un aumento localizado de las fuerzas internas dentro de la estructura. Cabe destacar que cuando la fuerza axial en anillos de hormigón abiertos experimenta una transición de compresión a tracción, la implementación de un diseño de dovela mixta acero-hormigón representa una estrategia eficaz para abordar esta situación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto PID2021-126405OB-C31 financiados con fondos FEDER Una manera de hacer Europa y Ministerio de Economía y Competitividad MICIN/AEI/10.13039/501100011033/

Referencias

- [1] Kondo F, Sakamoto H, Takaishi T, et al. "Construction of three vertical shafts using upward shield machine - the Bandai-Hannan sewer tunnel construction work. Actas del 30º Congreso Mundial de Túneles ITA-AITES, 2004, 19:491.
- [2] Ito K, Sakae T, Hara S, et al. Development of Upward Shield Method. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004,19(4-5):488-489.
- [3] Dong Shengxian, Luo Shuqing. Aplicación del método de elevación vertical a la ingeniería de

túneles de suministro de agua y drenaje en centrales eléctricas. *Electric Power Survey & Design*, 2012(06):47-51+69.

- [4] You Xueti. Application of Lager Diameter Vertical Lifting Water-intake Hats to Nuclear Power Station in Sanmen. *Electric Power Survey & Design*, 2012(05):48-52.
- [5] Wang Xiao, et al. Vertical tunneling in China-A case study of a hydraulic tunnel in Beihai". *Tecnología de túneles y espacios subterráneos*. 2021(107): 103650.
- [6] Liu, X., Gao, Y., Ramos, G., Turmo, J., & Zhu, Y. Full-scale tests on segmental lining with mechanically cut cross-passage opening. *Tecnología de Túneles y Espacios Subterráneos*, 2024, 151: 105874.
- [7] Wang Lizhong, Wang Zhan, Li Lingling, et al. Construction behavior simulation of a hydraulic tunnel during standpipe lifting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(6):674-685.
- [8] XU Shiyang, LIU Shuzhuo, CHEN Junsheng, YANG Chunshan. Tunnel Deformation in Vertical Jacking Construction Stage of Shield Shaft. *HENAN SCIENCE*, 2021, 39(01):76-83.