

PODCHOD ŘEKY YANGTZE – NÁROČNÁ RAŽBA VELKOPROFILOVÝM TBM V ČÍNĚ

YANGTZE RIVER CROSSING – CHALLENGING LARGE-PROFILE TBM EXCAVATION IN CHINA

HARALD WAGNER

ÚVOD

Wuhan, hlavní město provincie Hubei na spodním toku řeky Yangtze se 7,3 milionu obyvatel patří k největším a nejvýznamnějším městům v Číně. Wuhan je rozdělen na tři části řekami Yangtze a Han. Omezený přechod přes řeku Yangtze (dva mosty) blokuje významně dopravu a brání dalšímu ekonomickému rozvoji města. Proto se představitelé města rozhodli postavit silniční tunel pod řekou Yangtze přímo v centru města.

Silniční tunel s návrhovou rychlostí 50 km/h je umístěn mezi dvěma mosty přes řeku Yangtze a propojuje komunikaci Hankou Dazhi na severu s komunikací Wuchan Yonyi na jihu. Bude se jednat o hlavní komunikaci přes řeku Yangtze v tomto městě. Tunel má celkem 4 pruhy (2 v každém směru), dvě tunelové trouby jsou spojeny propojkami (obr. 1). Celková délka tunelu je 3,630 km. Celkem 2,72 km je raženo pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů TBM průměru 11,38 m, zbytek tunelu je hloubený. Na opačných březích řeky byly postaveny dvě šachty, ražby tunelu probíhaly ze startovací šachty na jihu do demontážní šachty na severu. Životnost tunelu je 100 let. Minimální poloměr směrový tunelu je 800 m, maximální sklon tunelu je 4,4 %.

Ražba ve složitých geologických podmínkách podloží řeky Yangtze, které zahrnuje množství vrstev horninových, písčitých, prachovitých či šterkovitých sedimentů včetně vodního tlaku až 6 barů, začala začátkem roku 2006. První TBM ražba byla úspěšně dokončena prorážkou 19. ledna 2008. Prorážka druhého stroje proběhla na konci února 2008. Uvedení tunelu do provozu je plánováno během letošního roku.

Hlavním dodavatelem stavby je sdružení China Railway Tunnel Group JV (CRTG JV), které zahrnuje také společnost D2 Consult jako konzultanta ražeb TBM. Dvě TBM byla vyrobena sdružením zahrnujícím NFM z Lyonu ve Francii, Wirth z německého Erkelenzu a Shenyang Steel Ltd z čínské provincie Liaoning.

INTRODUCTION

Wuhan is the Capital of Hubei province and one of the largest and most important cities in China with population over 7 million people. Wuhan city is divided into three parts by Yangtze river and Han river. The restricted passage across Yangtze (two bridges) blocks seriously the traffic and impedes the economic development of Wuhan city. So the Wuhan government has decided to build a road tunnel across Yangtze river in the centre of the city.

The road tunnel with a design speed 50 kph is located between the two Yangtze bridges, connecting Hankou Dazhi road in the north with Wuchan Yonyi road in the south. It will be the main road passing Yangtze river in the city. The tunnel has four lanes (two in each direction), two tubes are connected with cross-passages (Fig.1). The total length of the tunnel is 3,630 m. 2,720 m are bored with 11.38 m diameter TBMs, the rest of the tunnel is constructed as cut and cover section. Two shafts have been constructed on both river banks; driving direction was from the starting shaft in the south to the arrival shaft in the north. The tunnel was designed for the lifetime 100 years. Minimum radius of tunnel curvature is 800 m, maximum slope of the tunnel is 4.4%.

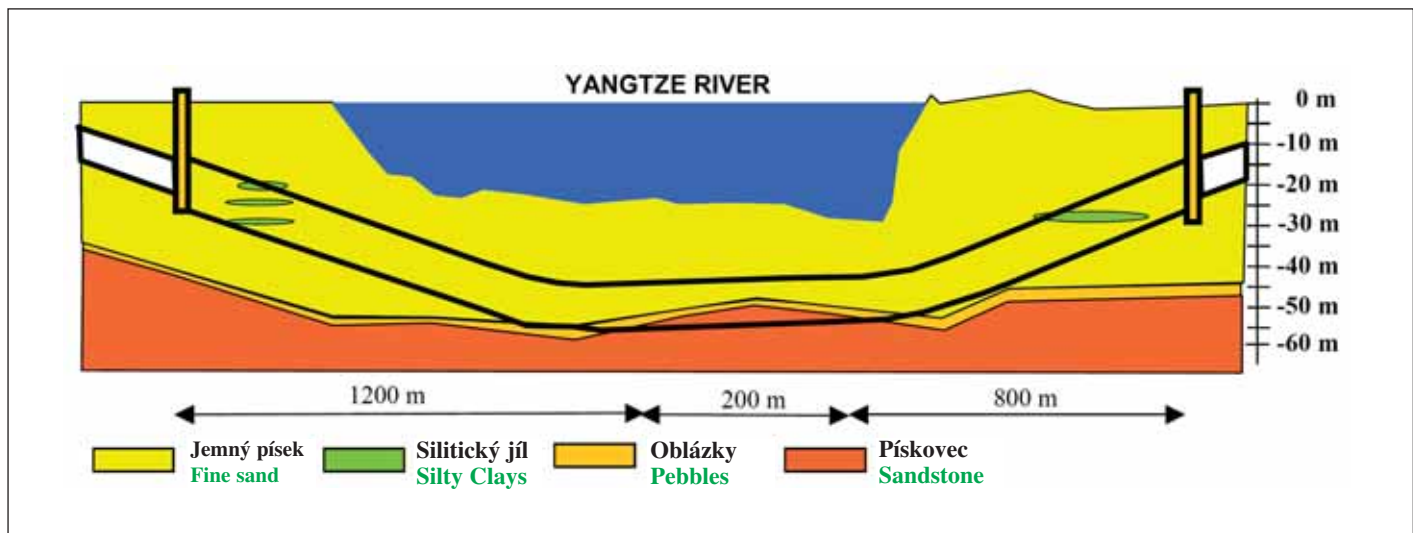
Construction in the difficult geologic ground conditions of the Yangtze River bed consisting of numerous layers of rocky, sandy, silty and gravely river deposits and water pressures of up to 6 bars started in early 2006. The first TBM drive has been successfully completed with the breakthrough on 19 January 2008. Breakthrough of the second TBM into the arrival shaft is expected at the end of February 2008. The final opening of both tunnels for the public is planned to happen during this year.

General Contractor of the project is China Railway Tunnel Group JV (CRTG JV) which includes company D2 Consult as TBM drives consultant. The two TBM's are manufactured by a JV consisting of Shenyang Steel Ltd. from Liaoning Province in China, NFM from Lyon in France and Wirth from Erkelenz in Germany.



Obr. 1 Příklad řez tunelem

Fig. 1 Tunnel cross-section



Obr. 2 Podélný geologický řez
Fig. 2 Longitudinal geological cross-section

GEOLOGICKÉ POMĚRY

Místo s minimálním nadložím (okolo 9,5 m) je situováno v km 4,356; maximální nadloží nad TBM ražbou je 40 m (km 4,493). Na většině délky je na povrchu volná hladina řeky Yangtze River (obr. 2). Hloubka vody v řece se pohybuje od 3,76 do 22,96 m, výška hladiny je v 15 m n. m.

V podélném geologickém řezu je horní vrstva složena z nedávno uložených neulehlých prachovitých písků a středně zrnitých písků holocenního vývoje čtvrtohor. Střední vrstva je složena ze středně ulehlých až ulehlých prachovitých písků holocenního vývoje čtvrtohor. Spodní vrstva je tvořena pelitickými prachovci s vložkami pískovců a břidlicemi z období siluru.

Na severním a jižním břehu je povrch lokálně pokryt nezhutněnými navážkami a jezerní formací kvartéru, horní vrstva je složena z měkkých, plastických, prachovitých aluviálních jííl holocenního vývoje kvartéru, střední vrstva je složena ze středně ulehlého až ulehlého prachovitého písku holocenního vývoje kvartéru, skalní podloží spodní vrstvy je tvořeno pelitickými prachovci s vložkami pískovců a břidlicemi silurského vývoje.

Umělé navážky nejsou ulehlé, což znamená stabilitní problémy během stavby hloubených úseků tunelu a šachet, proto adekvátní zapažení bylo nezbytné. Aluviální vrstva kvartéru je především v oblasti povrchu říčního koryta a je složena z prachovitých písků nebo středně hrubých písků v neulehlém stavu, které jsou také značně nestabilní.

HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY

Podzemní voda v oblasti projektu zahrnuje tři typy: vrchní stojatá voda, neomezená voda a omezená voda. Vrchní stojatá voda se především vyskytuje v umělých navážkách a v malém množství v soudržných zeminách kvartéru. Neomezená voda se především vyskytuje ve vrstvě prachovitých písků a ve vrstvě středně hrubých písků pod dnem řeky, tato voda je propojena s vodou v řece. Omezená voda se především nachází ve vrstvě prachovitých písků a ve vrstvě středně ulehlých písků na obou březích. Z výsledků rozboru vzorků stojaté a neomezené vody nemá přítomná voda erozní účinky na betonové konstrukce nebo na ocelovou výztuž, nicméně má lehké erozní účinky na ocelové konstrukce.

Koeficient propustnosti prostředí se obecně pohybuje mezi 2,6 a 37,9 m za den. S ohledem na čerpací zkoušku ve velkoprofilové čerpací studni v blízkosti šachty Wuchan je obecná velikost propustnosti masivu v jižní části řeky 26,72 m za den.

Řeka Yangtze nad tunelem zasahuje vrchní část zvodně holocenní vrstvy kvartéru. Proto existuje přímé spojení mezi vodou v řece a podzemní vodou, úroveň hladiny podzemní vody se mění v závislosti na úrovni vody v řece Yangtze. Úroveň vody závisí na srážkách, hladina stoupá po deštích a klesá v obdobích sucha. Navíc poté, co dešťové srážky vyrovnají neomezenou vodu, tak dále kompenzují i omezenou vodu, tudíž i hladina omezené vody je ovlivněna dešti.

GEOLOGICAL CONDITIONS

The point with the minimum overburden (about 9.50m) is located at km 4.356, maximum overburden above TBM excavation is 40m (km 4.493). In the project area, the surface water is dominated by the water in Yangtze River (Fig.2). The depth of water in the river is from 3.76 to 22.96m (based on the river surface elevation being 15m).

In the river crossing section, the upper stratum is composed of the newly deposit loose silty sand and medium coarse sand in the Holocene Series of Quaternary System, and the middle stratum is composed of medium dense to dense silty sand in the Holocene Series of Quaternary System, and the bedrock in lower stratum is composed of pelitic siltstone intercalated with sandstone, and shale of the Silurian System.

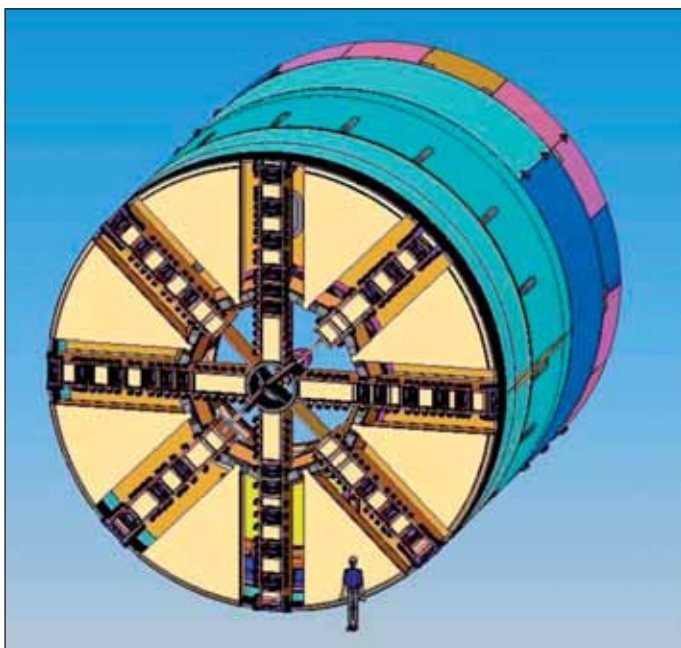
In north and south shores, the ground surface is covered with loose artificial filled soil and lacustrine formation of Quaternary System locally, the upper stratum is composed of the alluvial soft, plastic silty clay in the Holocene Series of Quaternary System, the middle stratum is composed of medium dense to dense silty sand in the Holocene Series of Quaternary System, and the bedrock in lower stratum is composed of pelitic siltstone intercalated with sandstone, and shale of the Silurian System.

The artificial filled layer is in loose state, which is unstable during the construction of open-cut tunnel and shaft. Therefore an appropriate support was necessary. Alluvial layer of the Quaternary System is mainly distributed in the surface layer of riverbed, composed of silty sand, or medium coarse sand locally, in loose state, which is also significantly unstable.

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

The groundwater in the project area includes three types: upper backwater, unconfined water, and confined water. The upper backwater mainly exists in the artificial fill and cohesive soil layer of Quaternary System, in small quantity. The unconfined water mainly exists in the silty sand layer and medium coarse sand layer below riverbed, having close link with water in river. The confined water mainly exists in silty sand layer and medium coarse sand layer of both shores. According to the quality analysis of backwater and unconfined water taken from site, the groundwater is not erosive to concrete structure or the rebar inside concrete structure, but slightly erosive to steel structure.

Permeability coefficient generally varies between 2.6 and 37.9m per day. Based on the water pumping test in the large-diameter pumping well in Wuchan shaft area, the comprehensive permeability coefficient of the confined water-bearing ground in southern river section is 26.72m per day.



Obr. 3 Bentonitové TBM použité pro ražbu
Fig. 3 Slurry TBM used for excavation

PLNOPROFILOVÉ TUNELOVACÍ STROJE TBM

Dva bentonitové plnoprofilové tunelovací stroje TBM společnosti NFM Technologies o průměru 11,38 m jsou použity pro výstavbu (obr. 3). Délka strojů je 58 m, jejich váha je 1285 t, výkon je 4500 kW, kroutivý moment 17 745 kNm, maximální rychlost postupu je 4 cm za minutu, celkový přítlak je 120 000 kN. Plnoprofilová řezná hlava má 8 ramen. Rozrušování masivu je prováděno řeznými dlaty, řeznými disky a nastavitelnými nástroji pro úpravu velikosti výrubu. TBM jsou na elektrický pohon a s 8 motory mají nastavitelnou rychlost. Erektor má 6 stupňů volnosti s rozsahem plus nebo minus 220°. Za strojem TBM jsou 3 návěsy. Nejvyšší výstup rubaniny je 1144 m³ za hodinu.

Stroje TBM jsou vybaveny zařízením pro injektování a monitorování pro potřebu zlepšování masivu bentonitem pro omezení přítoků vody. Sofistikovaný monitorovací systém byl vytvořen pro určení polohy TBM, pro polohu uložených segmentů, pro zdvihání či sedání povrchu, pro stávající budovy na povrchu, pro podzemní síť a pro změnu polohy či napjatosti masivu.

Provozní tlak TBM musel odpovídat hydrostatickému tlaku. Nejvyšší tlak vody na čelbě, který musel být zohledněn, byl tlak při maximální úrovni hladiny vody v historii (výška Wusong 29,73 m).

Ostění tunelu je tvořeno prefabrikovanými železobetonovými segmenty s vnitřním průměrem 10 m a vnějším průměrem 11 m (obr. 4). Mezera mezi segmenty a masivem je vyplňována cementovou maltou pomocí synchronního či sekundárního injektování. Tloušťka šroubovaných segmentů je 500 mm, jejich délka je 2 m, 9 segmentů je třeba na jeden prstec.

RAŽBA POMOCÍ TBM

Horninový masiv ražený pomocí TBM obsahuje uhlý prachovitý písek. Spodní část tvoří kamenitá vrstva a velmi zvětralé pelitické prachovce s proplásky pískovce a břidlic. Lokálně se ve spodní části vyskytuje středně uhlý písek, uhlý písek a plastické prachovité jíly. Horninový masiv v blízkosti šachet je tvořen měkkými plastickými jíly a uhlými prachovci. Většina horninového masivu je třídy ražnosti I, kromě středně zvětralých pelitických prachovců s vložkami pískovců a břidlic třídy IV a velmi zvětralých pelitických prachovců s vložkami pískovců a břidlic třídy III.

V oblastech s nízkým nadložím, kde byla mocnost nadloží nižší než vnější průměr TBM, bylo nadloží převážně tvořeno neulehlými písčitymi zeminami. Proto musela být použita efektivní opatření pro zajištění bezpečné ražby (použití tlaky, injektáže, monitoring, atd.).

Horninový masiv v oblasti tunelu byl převážně tvořen písčitymi zeminami bohatými na vodu. Jednalo se především o omezenou

The Yangtze River above the tunnel cuts the top plate of confined pore water-bearing layer of Holocene of Quaternary System. Therefore, there is close water link between river water and groundwater, and the ground level changes along with the water level in Yangtze River. The level of stored water and unconfined water in upper part is controlled by rain. The water level rises after rain, and descends in dry season. Additionally, after the rain compensates the unconfined water, it further flows to compensate the confined water, thus the confined water level is also influenced by the rain.

TUNNEL BORING MACHINES

Two slurry TBM's of company NFM Technologies with the 11.38 m diameters are used for the construction (Fig.3). Their length is 58m, weight is 1,285t, installed power is 4,500 kW, maximal torque is 17,745 kNm, maximal speed of advance is 4 cm per minute, total thrust is 120,000 kN. Full face cutter head has 8 arms. Ground cutting is provided by drag bits, disc cutters, and variable overcuts. TBM's are electrically powered, they have a variable speed with 8 motors. Erector has six degrees of freedom with range plus or minus 220°. There are three back-up gantries behind the machine. The maximum outlet flow of slurry is 1,144 m³ per hour.

TBM's are equipped with grouting equipment and monitoring equipment for the purpose of treating the ground with slurry to stop water. A sophisticated monitoring system was established to monitor the stance of TBM, segment installation position, ground heave or settlement, existing building on ground, underground pipeline, change of ground displacement and stress.

The operation pressure of TBM had to match with water pressure. The maximum water pressure at excavation face had to be considered to be the pressure under maximum flood water level in the history (Wusong elevation 29.73m).

The tunnels are lined with one pass pre-cast reinforced concrete segments with internal diameter 10m and external diameter 11m (Fig.4). The gap between segments and ground is filled by cement grout by synchronous grouting or secondary grouting. Thickness of bolted segments is 500mm, their length is 2 m, 9 segments are required for one ring.



Obr. 4 Instalace segmentů v horní části ostění
Fig. 4 Segment assembling in the roof area



Obr. 5 Pohled do šachty z dokončeného tunelu
Fig. 5 View to shaft from the completed tunnel

vodu s vysokým vodním spádem, případně o neomezenou vodu s vysokým vodním spádem pod řekou. Vzhledem k vysokému tlaku vody byly očekávány náhlé přítoky vody či písku během TBM ražby, které mohly způsobit významnější kolapsy. Vysoký hydrostatický tlak vyžadoval vysokou spolehlivost TBM a vodonepropustnost tunelového ostění. Analýza musela být provedena pro prozkoumání možnosti výměny řezných nástrojů pod řekou. Zejména bylo prozkoumáno, jaké problémy se během výměny řezných nástrojů mohou objevit.

Vrstva oblázků byla zastižena ve spodní části profilu tunelu. Přestože oblázky nejsou velké a vrstva není příliš mocná, musela být tato skutečnost zohledněna pro nastavení profilu výrubu a pro sedání povrchu způsobeného vlivem této vrstvy na práci řezné hlavy. Spodní část tunelu v km 3,588–4,250 zastihla vrstvu ulehlých oblázků a středně až velmi zvětralých pelitických prachovců s vločkami pískovců a břidlic. Čelba tunelu byla nehomogenní s proměnnou tvrdostí masivu, proto musel být řešen problém odklonu TBM směrem vzhůru vzhledem k nerovnoměrné síle působící na řeznou hlavu.

Byl také požadován monitoring teoreticky nebezpečných plynů. Žádný nebezpečný plyn však během ražby nebyl zastižen.

Průměrná rychlost ražby byla 8–10 m za den, maximální dosažené postupy byly 18 m za den. Pod vedením sdružení CTRG JV byly veškeré problémy během ražeb zvládnuty na nejvyšší technické úrovni. Projekt byl po celou dobu v souladu s časovým harmonogramem.

ZÁVĚR

Po dlouhé době omezeného vývoje dopravní infrastruktury v Číně začal nový vývoj v 80. a 90. letech 20. století s významnou podporou mezinárodních financí z World Bank, Asian Development Bank a z dalších finančních institucí. Vzhledem ke stále narůstající ekonomické síle domácích zdrojů je v dnešní době stále více projektů financováno z čínských městských, provinčních a národních rozpočtů. V současnosti Čína představuje největší a významně rostoucí tunelářský trh na světě. Příklady, jako jsou systémy metra v Beijingu a v Šanghaji se stovkami km postavených během několika let a desítky kilometrů dálnic a železnic dokončených každý rok, jsou velmi dobře známy tunelářské komunitě. Konvenční tunelování podobně jako ražby pomocí maloprofilových TBM v průměrných geologických podmínkách již byly zvládnuty čínskými společnostmi a experty. Unikátní tunelářské výzvy v Číně, jako např. podchod řeky Yangtze ve Wuhanu, však ještě stále budou v příštích letech potřebovat špičkové technologie a odborné znalosti od světového tunelářského průmyslu.

HARALD WAGNER, Ph.D., PE., office@d2consult.eu,
D2 CONSULT ZT GmbH

Recenzoval: Ing. Otakar Hasík

TBM EXCAVATION

The ground passed by TBM's mainly includes dense silty sand. The lower part is pebble layer and strongly weathered pelitic siltstone intercalated with sandstone and shale. There are locally medium-dense sand, dense sand and plastic silty clay. The ground near shafts is soft-plastic silty clay, dense silt. The excavation-ability most ground is class I, except that of medium weathered pelitic siltstone intercalated with sandstone and shale being class IV, and that of strongly weathered pelitic siltstone intercalated with sandstone and shale being class III.

In the areas with small overburden, whose thickness was less than the outer diameter of TBM, the overburden was mainly composed of loose sandy soil. Therefore effective measures had to be taken to ensure safe TBM tunnelling (applied pressure, grouting, monitoring, etc.).

The ground passed by tunnel was dominated by sandy soil bearing rich water, whose groundwater features confined water with high water head in both shores, or unconfined water with high water head under the river. Since the pressure of water was high, sudden water inflow or sand flow were expected during TBM tunnelling, which could cause large area collapse. Therefore the high water pressure required high reliability of TBM, and watertightness of the tunnel lining. An analysis had to be provided in regard to the feasibility of changing cutters under the river. In particular it was elaborated what problems might occur in the context of the cutter change.

Pebble layer was encountered at the lower part of excavation face. Though the pebble is not so large in size, and the layer is not thick, the overcut and ground settlement caused by the disturbance of cutterhead to the pebble layer during tunnelling was taken into account. The tunnel lower part in section of km 3.588 – 4.250 did cut into dense pebble, and strongly or medium weathered pelitic siltstone intercalated with sandstone and shale. The tunnel face was inhomogeneous with various ground hardness, therefore the danger of TBM deviation upward due to uneven force acting on the cutterhead had to be sorted out.

It was required to monitor the potential harmful gas. No harmful gas was discovered during the tunnelling.

The average progress rate was 8 - 10 m per day whereas peak progress rates have been achieved 18 m per day. Under the strong leadership of the CTRG JV Project Headquarters, no problems have been encountered without being mastered on the highest technical performance in construction. The project has been always on time and schedule.

CONCLUSION

Over long time underdeveloped traffic infrastructure in China started its new development in 80th and 90th years of 20th century with high portion of international financing by the World Bank, Asian Development Bank and other financial institutions. With increasing economic power of domestic sources, more tunnelling projects are financed from Chinese municipal, provincial and national budgets nowadays. Today, China represents biggest and rapidly growing, tunnelling market in the world. Examples of Beijing and Shanghai Metro systems with hundreds of km constructed within several years and tens of km of highway and railway tunnels finished each year are well known to international tunnelling community. Conventional tunnelling as well as smaller diameter TBM tunnelling in moderate conditions has been already mastered by Chinese companies and experts. Unique tunnelling project challenges in China, as e.g. Wuhan Yangtze Crossing, however, would still need high-tech technologies and expertise from international tunnelling industry in years to come.

HARALD WAGNER, Ph.D., PE., office@d2consult.eu,
D2 CONSULT ZT GmbH