

Návrh a výstavba silničního tunelu ART

Londýnské letiště Heathrow je v současnosti nejvytíženější mezinárodní letiště na světě. Odbavuje 67 milionů cestujících ročně, nicméně jeho původní infrastruktura, skládající se ze čtyř terminálů, byla navržena na menší kapacitu. Proto bylo rozhodnuto o stavbě terminálu 5, který bude jedním z nejmodernějších na světě. Odbavovací kapacita letiště se tím zvýší na 95 milionů cestujících za rok.

Stavba nového terminálu 5 (obr. 1) zahrnovala mimo jiné i ražbu 13,5 km tunelů. Největší realizovanou podzemní stavbou byl silniční tunel v prostoru letiště ART (Airsides Road Tunnel). Bude sloužit pro dopravní spojení mezi centrální oblastí letiště (terminály 1, 2 a 3) a terminálem 5. Dvě tunelové roury tohoto 1,3 km dlouhého tunelu mají vnitřní průměr 8,1 m. Spirálový východní portál obsahuje 140m obousměrnou vozovku vedoucí do 80 m dlouhého hloubeného tunelu. Západní portál je otevřená křižovatka ve tvaru T (obr. 2), která umožňuje vozidlům přístup ke vzdáleným místům stání letadel nebo k terminálu 5. Hlavní tunelové trouby jsou spojeny 12 propojkami. Ražba tunelu musela být realizována pod kritickou oblastí mezinárodního letiště (obr. 3), zahrnující například pojezdové plochy letiště či potrubí na palivo a vodu.

PODÉLNÝ PROFIL TUNELU

Tunel ART musel podejít nebo nadejít tunel Heathrow Express, který slouží pro podzemní železniční rychlodráhu. Vzhledem k umístění portálů a omezení nivelety (maximální spád 1 : 19) byl učiněn závěr, že jediným reálným řešením je, aby tunel přešel nad tubusem Heathrow Express. Poloha nivelety tunelu ART byla snížena tak, aby bylo maximalizováno jílové nadloží nad většinou jeho délky (s výjimkou místa křížení s Heathrow Express a míst portálů). Výsledkem byla niveleta ve tvaru W se spodními lomovými body vždy uprostřed mezi portálem a místem křížení s tunelem Heathrow Express (místa jímek). Tunel byl ražen v londýnských jílech, které byly překryty zvodnělou vrstvou štěrku o mocnosti 3–5 m. V místě křížení s Heathrow Express je světlá vzdálenost mezi tunely pouze 3 m, jílové nadloží nad ART je zde pouze 3 m vysoké. Celkově se mocnost nadloží tunelu pohybuje od 5 do 16 m.

POPIS POUŽITÉHO TBM

Tunel ART byl navržen tak, aby byl v celé délce ražen v jílu. V úvahu přicházely dva typy tunelovacích strojů (TBM – tunnel boring machine): zeminový štít (EPB – Earth Pressure Balance) a stroj na bázi stlačeného vzduchu (APB – Air Pressure Balance). Zatímco princip stlačeného vzduchu byl v prostředí londýnského jílu již mnohokrát použit, EPB zatím v této geologii nasazen nebyl. Důvodem rozhodnutí pro EPB byly možné deprese štěrkového nadloží až do profilu tunelu, které by při práci pod stlačeným vzduchem znamenaly riziko okamžité ztráty tlaku (tj. erupce nadloží).

Proto bylo rozhodnuto vytvořit TBM schopný pracovat ve dvou režimech – APB a EPB (obr. 4). Možnost nasazení zeminového štítu v jílech musela být otestována – přímo ve výrobní firmě Herrenknecht. Průměr sestrojeného TBM byl 9,15 m, délka 6,5 m, váha bez šnekového dopravníku 600 t (obr. 5). Čelo stroje bylo ze 70 % uzavřené.

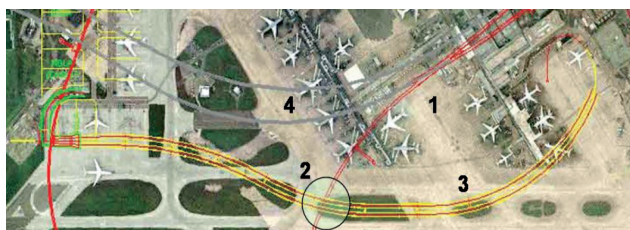
Vlastní ražba tunelu probíhala v záběrech po 1,7 m. Vytěžený jíl byl šnekovým dopravníkem posunut k dvojici pístů (sestrojeny firmou Putzmeister) pro zajištění tlaku vzduchu na čele stro-



Obr. 1 – Výstavba terminálu 5 na letišti Heathrow



Obr. 2 – Západní portál tunelu ART



Obr. 3 – Situace tunelů ART (1 – Heathrow Express [HEX], 2 – křížení tunelů HEx a ART, 3 – ART, 4 – prodloužení HEx)

je. Píсты byl jíl vytlačen na systém pásových dopravníků, které ho transportovaly na dočasnou deponii poblíž portálu tunelu.

Po vyražení záběru byl sestaven prstenec ostění. Délka šroubovaných betonových dílců byla shodná s délkou záběru (1,7 m), tloušťka dílců byla 350 mm. Vnitřní průměr prstence byl 8,1 m. Každý prstenec byl ve svislém směru zkosený (rozdíl 75 mm). Různá poloha zavíracího segmentu zaručovala natočení ostění ve směru osy tunelu. Prostor mezi ostěním a zemí (mežera 175 mm) byl vyplněn cementovou směsí (injektáž přes zadní část pláště). Pro dopravu segmentů, cementové směsi, bentonitu a dalšího materiálu byly použity dva kolové dopravníky.

TUNELOVÉ PROPOJKY

Hlavní tunelové trouby jsou spojeny 12 propojkami, které mají různý účel:

- osm nouzových propojek – fungují jako únikové východy pro chodce, mají průměr 3 m,
- dvě místnosti zabezpečení – mají tvar Z a slouží jako prostor pro strojní a elektrické zařízení (obr. 6); maximální průměr komor je 5,5 m,
- dvě nouzové propojky s jímkami – pro jímání vody z hlavních tunelových trub a současně i umožnění úniku chodců; průměr spojovací chodby je 6,2 m; jímkové jsou tvořeny šachtami o průměru 6,2 m vyhloubenými uprostřed spojovací chodby.

Práce na propojkách začaly po dokončení ražby východní trouby. Před vytvořením otvoru v segmentovém ostění silničního tunelu byly dílce podepřeny ocelovými rámy. Rámy byly k segmentům připojeny ocelovými trny. Po osazení rámu byly diamantovou pilou na pásovém podvozku přeříznuty segmenty ostění. Následovala ražba komory pro obvodový věnec v ústí propojky, realizovaná pomocí stříkaného betonu. Po vyražení prostoru pro věnec byla do komory umístěna mohutná výztuž věnce. Pro jeho betonáž pak bylo použito ocelové bednění. Z továrny kvůli tomu byly předem dovezeny dvě sady forem. Skládaly se z bubny a dvou čel s příloženými vibrátory. Práce na armatuře a bednění na jedné propojce trvaly asi týden. Když byl věnec zabetonován a pevnost v tlaku dosáhla požadovaných hodnot, byly bednění a provizorní rámy rozebrány. Potom začala další ražba propojovací chodby (obr. 7) metodou Laser-Shell (ražba pomocí stříkaného betonu s jednovrstevným ostěním).

KONTROLA SEDÁNÍ POVRCHU NAD TBM

Sedání nadloží tunelu bylo přímo ovlivněno volbou následujících tlaků:

- tlak na čelbě TBM (tlak zeminy či vzduchu),
- tlak na plášti TBM (tlak bentonitu),
- tlak injektáže vnějšího líce segmentů (tlak cementové směsi).

Po úvodním testování ražby v režimu EPB bylo zjištěno, že tunelovací stroj měl problémy při čelbě stroje zcela zaplněné zeminou (vysoký otáčivý moment řezné hlavy). Při režimu APB byl potřebný moment podstatně nižší (zaplnění prostoru pouze ze 60 %). Navíc bylo možné vytěženou zeminu použít na zemní práce na jiných částech stavby (nižší obsah lubrikačních materiálů). Proto byla většina ražeb provedena v režimu APB.

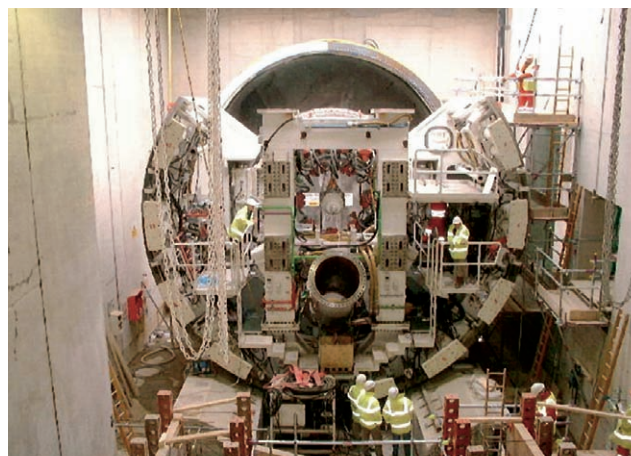
Při práci na prvních 300 m bylo sedání nadloží monitorováno automaticky v reálném čase a hodnoty použitých tlaků byly přímo porovnávány s naměřeným sedáním. Měření ukázala, že tlak vzduchu na čelbě 0,5 baru je dostatečný (původní projekt předpokládal 1–2 bary). Tlak bentonitu na plášti byl stanoven na 1 bar (řezná hlava dostatečně utěsnila prostor mezi pláštěm a čelbou). Tlak injektáže segmentů ostění byl zvolen jako 90 % tlaku nadloží plus 0,5 baru (tj. hodnoty do 3 barů).

KONTROLA SEDÁNÍ POVRCHU

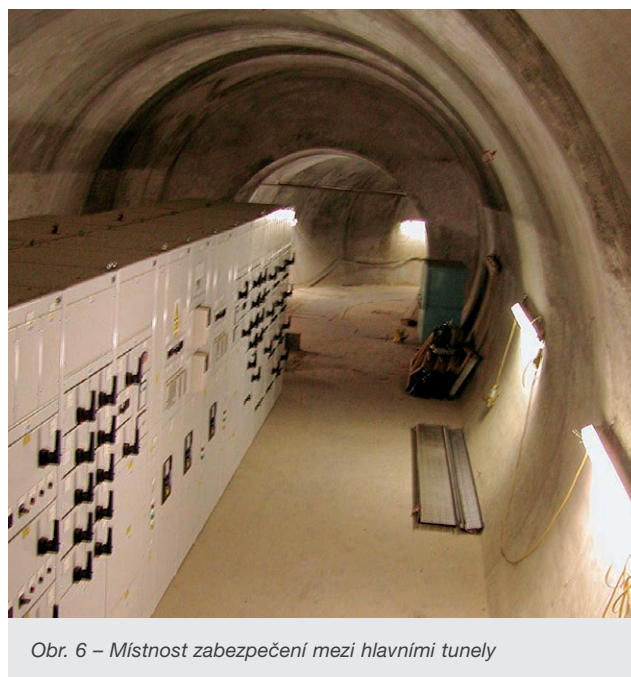
Projekt předpokládal sedání do hodnoty ztráty objemu zemin 1%. Pro prvních 300 m ražby tunelu pomocí TBM bylo sedání měřeno automaticky každou hodinu. Během dalších ražeb byla měření prováděna manuálně jednou denně. Výsledky měření byly diskutovány na každodenních schůzkách zúčastně-



Obr. 4 – TBM použitý pro ražbu



Obr. 5 – Sestavování TBM před ražbu



Obr. 6 – Místnost zabezpečení mezi hlavními tunely

ných stran a parametry stroje byly přizpůsobeny naměřeným hodnotám.

Měření tunelu Heathrow Express při ražbě v jeho blízkosti bylo také prováděno automaticky. Měření sedání povrchu ukázala, že první deformace byly zaznamenány při vzdálenosti



Obr. 7 – Ražba propojek metódou LaserShell



Obr. 8 – Tunel ART pred dokončením

- ▶ čela TBM 12 m od měřeného bodu. Při ražbě pod měřeným bodem bylo zpravidla zaznamenáno zvednutí do hodnot okolo 10 mm. Po průchodu TBM pod měřeným bodem bylo zaznamenáno sedání (s hodnotami pod 20 mm). Výsledky měření sedání povrchu ukázaly, že pro 90 % délky tunelu bylo realizované sedání povrchu v rozmezí ± 10 mm. Sedání způsobené tunelovacím strojem nepřesáhlo 20 mm. Celková ztráta objemu zeminy byla pouze 0,35 %. Maximální zjištěné sedání, způsobené ražbou zajišťovanou stříkaným betonem, bylo 24 mm (u konstrukcí s větším profilem). Maximální zjištěné celkové sednutí (vyvolané TBM a ražbou propojek) bylo 31 mm, ale všeobecně se na většině monitorovaných bodů drželo pod 20 mm. Celková deformace tunelu Heathrow Express, ležícího 3 m pod tunelem ART, byla 2 mm.

ZÁVĚR

Příprava a realizace tunelu ART pod britským letištěm Heathrow byla velmi náročná. Tunel musel podejít pod místy stání letadel a pojezdovými drahami, nad tunelem Heathrow Express a pod dalšími konstrukcemi a inženýrskými sítěmi.

Tunelovací stroj, postavený pro ražbu tunelu ART, splnil očekávání. Tunel byl realizován v předpokládaném čase, bez narušení provozu letiště, žádné naměřené hodnoty sedání nepřesáhly stanovené mezní hodnoty. Dosažení extrémně nízkých hodnot sedání nadloží bylo dáno jednak komplexností použitého TBM (možnost použití dvou režimů – EPB a APB, kontinuální monitorování tlaku na čelbě, pláště a za segmenty, možnost vysunutí řezné hlavy směrem k čelbě atd.).

Druhým velmi důležitým faktorem, vedoucím k úspěchu ražeb, byla vhodná koordinace veškerých prací a okamžitá reakce na nestandardní situace (např. změna parametrů stroje při vyšším nárůstu deformací). Ani následná konvenční ražba tunelových propojek nevedla k větším deformacím.

Výsledkem včasného plánování, správné kontroly rizik a pečlivého provádění prací byl minimální dopad na provoz letiště. Při ražbách nebyly poškozeny žádné stavby nebo jiné vybavení letiště. To bylo velmi důležité, jelikož možné finanční důsledky by byly obrovské. Tunel byl předán investorovi k provozu v roce 2005 (obr. 8).

Autor článku se podílel na výstavbě tunelu ART jako zaměstnanec britské firmy Mott MacDonald Ltd.

Matouš Hilar,
D2 Consult Prague, s. r. o.

The London airport Heathrow dispatches 67 million passengers at four terminals a year, which means it belongs to the most utilized airports in the world. But its original infrastructure was designed for lower capacity, therefore it was decided on the construction of terminal 4 (Fig. 1). The construction included apart from others driving of 13.5 km of tunnels. The biggest implemented underground construction was the road tunnel in the area of ART (Airside Road Tunnel). It shall serve for the traffic connection between the central airport area (terminals 1, 2 and 3) and terminal 5. The author of the article describes machinery and methods used for its driving and a sophisticated system of the area monitoring.

7th International Conference on Steel Bridges (ICSB)

V dňoch 4.–6. júna 2008 sa bude konať na Univerzite Minho v Guimarães v Portugalsku 7. medzinárodná konferencia Ocelové mosty (www.steelbridges08.com).

Organizujú ju European Convention for Constructional Steelwork (ECCS, Európske združenie výrobcov ocelových konštrukcií, <http://www.steelconstruct.com>), The Portuguese Steelwork Association (CMM, Portugalské združenie výrobcov ocelových konštrukcií, www.cmm.pt) a University of Minho (www.uminho.pt). Účastníci obdržia zborník a CD so všetkými príspevkami. Vybrané príspevky budú publikované

v karentovaných časopisoch (Journal of Constructional Steel Research a ďalšie). Potrebné je poslať abstrakt o rozsahu 300 slov, akceptácia bude známa 30. júna 2007. Súčasťou konferencie je súťaž a udelenie ocenenia ECCS víťazným mostným konštrukciám.

Ivan Baláž,
Stavebná fakulta, STU Bratislava