

BETON VE VODNÍM STAVITELSTVÍ CONCRETE IN WATER ENGINEERING

VOJTĚCH BROŽA

Typické pro betonové konstrukce ve vodním stavitelství jsou velké rozměry (hydratační teplo) a velké nároky na vodotěsnost a trvanlivost. K zhoštění přispívá zejména technologie válcovaného betonu. Aktuální jsou technologie oprav při zvýšené vlhkosti, popř. pod vodou.

Large sizes (hydration heat) and high demands on water tightness and durability are typical features of concrete structures in water engineering. Roller compacted concrete technology improves the economy. Repair technologies based on increased moisture or applied under water are currently used.

Beton, jako materiál schopný dlouhodobě odolávat tlakovým a průsakovým účinkům vody, většinou v kombinaci s účinky prostředí a dalšími zatíženími, se v širokém měřítku uplatňuje ve vodním stavitelství. Specifické nároky na vodotěsnost a trvanlivost vodních staveb si vynutily zvláštní technologická opatření, která se později odrazila ve specializovaných normách pro vodostavební betony.

Pro mnohé betonové konstrukce vodních staveb jsou charakteristické velké rozměry konstrukcí, popř. jejich samostatných konstrukčních částí: jde o masivní objekty. Typickým představitelem masivních betonových konstrukcí jsou přehrady. K masivním objektům je možno přidat i pevné jezy, popř. spodní stavby jezů pohyblivých, zdi plavebních komor, nábřežní zdi, spodní stavby vodních elektráren, popř. čerpacích stanic i konstrukce velkých podzemních vodojemů. Zásadním požadavkem pro masivní betonové konstrukce je zvládnutí problémů spojených s vývinem hydratačního tepla a se vznikem trhlin v masivním betonu. Proto postupně došlo k vývoji a uplatnění široké škály technologických i konstrukčních opatření, která výrazně posunula technologii masivního betonu kupředu.

Požadavky na vodotěsnost betonových konstrukcí vodních staveb je nutno chápat nejen ve vztahu k vlastnímu betonu, ale také k nezbytným dilatačním popř. pracovním spárám, potenciálním trhlinám popř. dalším singularitám. Samotný beton je i v ideálním případě pórovitý materiál s filtrační souvislostí jednotlivých pórů – tudíž propustný (pokud se někdy charakterizuje pomocí filtračního součinitele, lze se setkat s hodnotami $k < 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$). Podstatně náročnější však je zamezit soustředěným průsakům vody v uvedených singularitách. Pokud jsou nároky na vodotěsnost betonové konstrukce velmi vysoké, zpravidla se problém řeší samostatným těsnicím pláštěm z jiného materiálu. Jinou možností je drenážní soustava.

Vodotěsnost betonu úzce souvisí s jeho odolností vůči účinkům agresivních vod, mrazuvzdorností, popř. dalšími nároky. Za nejpřísnější je třeba považovat hledisko trvanlivosti, následuje vodotěsnost a teprve za nimi pevnost, která bývá jako důsledek prvních dvou kritérií většinou vyšší než požadovaná.

Problém trhlin v betonu je stále aktuální. U konstrukcí z vyztuženého betonu je nutno uspořádáním výztuže zamezit jejich vzniku a rozvoji, což je stav, k jehož dosažení směřují příslušné normativní zásady. Podstatu problému je nutno hledat zejména v celkové koncepci vyztužení spolu s dodržением zásad techno-



Obr. 1 Vodní dílo Itaipu na řece Paraná, Brazílie, výška přehrady 196 m, instalovaný výkon 12 000 MW

Fig. 1 Itaipu Dam on the Paraná River, Brazil, height of the dam 196 m, installed capacity 12 000 MW

logie betonu. V případě masivních betonů bez výztuže je zřejmě výskyt trhliny zcela běžný, jde však o to, aby tyto trhliny nebyly významné pro konstrukci z funkčního i strukturálního hlediska. Hydratační trhliny jsou zpravidla bez patrného dopadu na vlastnosti konstrukce; přesto je zřejmá snaha technologů co možná jejich výskyt omezit.

Jako příklad hodný pozornosti je možno uvést vývoj pláštového betonového těsnění hutněných násypů, např. přehrad, hrází kanálů v násypu atd. [1]. Původní uspořádání, pro něž bylo charakteristické rozdělení pláště soustavou spár na vyztužené desky o rozměrech 15 x 10 až 15 m (ev. i 20 x 10 až 20 m) se neosvědčilo. Četné průsakové i konstrukční poruchy po zatížení vodou vedly k velkým celkovým průsakům (řádově 10^2 až 10^3 ls^{-1}), navíc trvale účinná náprava nepříznivého stavu se ukázala jako obtížná. K renesanci v posledních desetiletích přispěla myšlenka omezit vodorovné dilatační spáry v zásadě na jednu obvodovou (oddělující těsnicí plášť od zavázání do podloží), takže betonové těsnění je pak složeno z betonových pásů, jejichž délka po spádnici může přesáhnout 100 m i více. Tak se zamezilo křížení těsnicích prvků dilatačních spár, v nichž docházelo k nejněžším poruchám, ovšem za cenu akceptování velkého rizika trhlin v betonu vyztuženém uprostřed tloušťky pásů (o min. tloušťce 0,3 m s nárůstem ~5 mm na 1 m hloubky vody). Ukázalo se, že více než 80 % zjištěných trhlin není nutno nijak dodatečně sanovat, protože jejich příspěvek k celkovému průsaku je velmi malý. Toto nové konstrukční řešení lehce vyztuženého betonového pláštového těsnění se úspěšně aplikovalo, a to i u přehrad významně překračujících 100 m, např. Foz do Areia v Brazílii má výšku 160 m.

Nejvýznamnější realizace betonových konstrukcí vodních staveb jsou spojené s výstavbou vodních děl na tocích. Prokazují to některé vybrané údaje:

Vodní dílo Three Gorges (Tři soutěsky) v Číně, v současné době v pokročilém stadiu výstavby, bude mít ve svých objektech (přehrada, vodní elektrárna, plavební objekty a další) zabudováno $28 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ betonu.

Dosud největší hydroenergetické dílo na světě, Itaipu na řece Paraná (Brazílie – Paraguay), si při výstavbě vyžádalo uložení $12,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ betonu (Obr.1).

V evropských poměrech je vhodné připomenout švýcarskou přehradu Grande Dixence o kubatuře betonu $5,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, která je až dosud nejvyšší betonovou přehradou na světě (285 m).

Na území České republiky, co do objemu uloženého betonu zaujímá, první místo vodní dílo Orlik s $1,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Za zmínku stojí, že při výstavbě vodního díla Dalešice, s nejvyšší naší přehradou (100 m) – kamenitou se středním zemním těsněním a přečerpávací vodní elektrárnou u paty přehrady, byly vybudovány betonové objekty o celkové kubatuře přesahující $0,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ převážně vyztuženého betonu.

Technologie masivního vodostavebního betonu zřejmě dosáhla vrcholné úrovně již při stavbě přehrady Hoover v USA v letech 1931 až 1936. Po druhé světové válce je nutno ocenit přínosy odborníků v různých evropských zemích. Ve Francii byly navrženy progresivní konstrukce betonových přehrad (A. Coyne), intenzivní výstavba vysokých přehrad ve Švýcarsku přinesla významné podněty v oblasti racionalizace stavebních prací. Významný byl i přínos italských inženýrů. Později se mimořádně

rozvinula výstavba betonových přehrad zejména ve Španělsku, mimo Evropu v Japonsku, Jihoafrické republice a Číně.

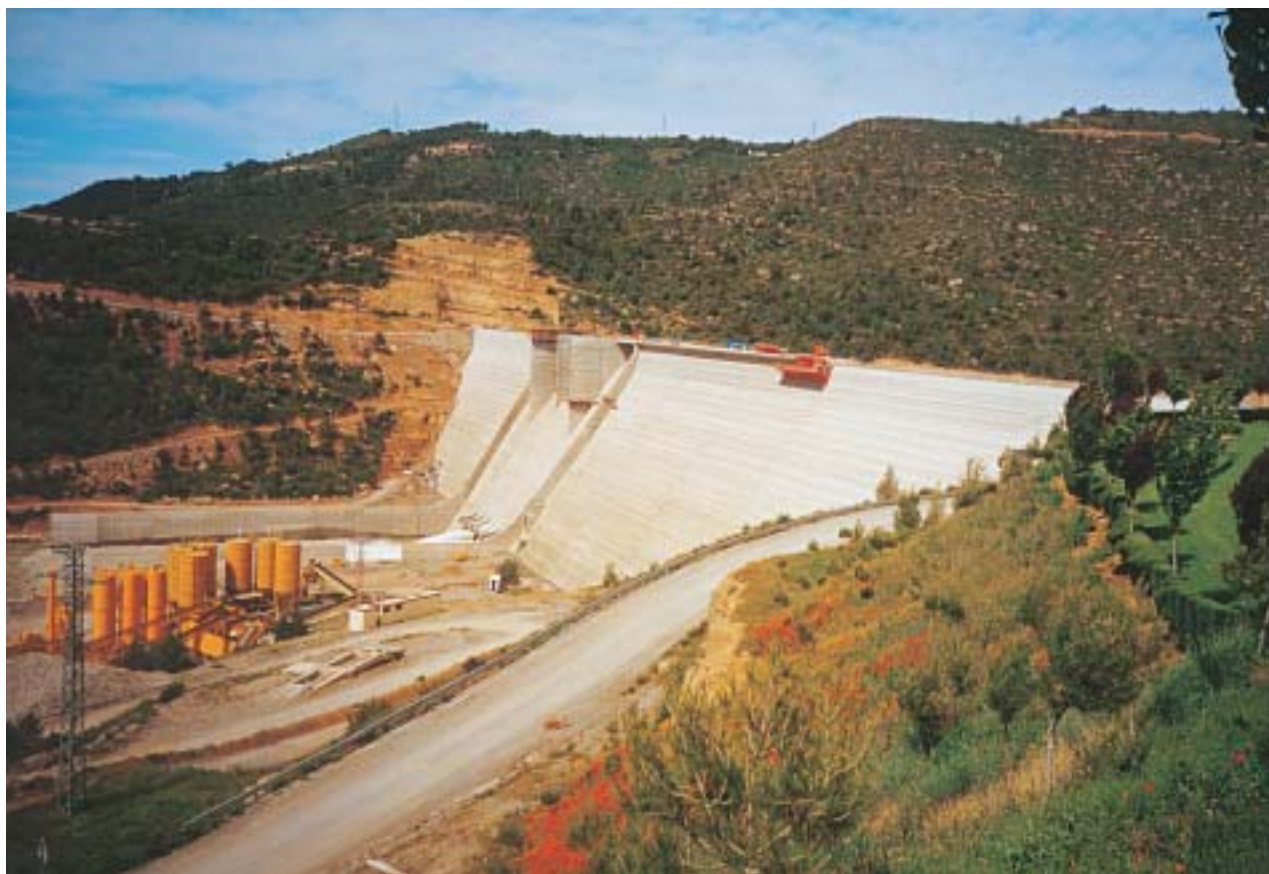
Přes kontinuálně pokračující zdokonalování technologie bylo již před rokem 1970 zřejmé, že budou nezbytné nové stimuly, aby betonové přehrady byly schopné obstát v konkurenci s hospodárnějšími a z hlediska pracnosti a spotřeby energií méně náročnými přehradami sypnými.

Bylo formulováno zadání: zrychlit a z hospodárnit výstavbu betonových přehrad. Po jistém váhání, kdy někteří odborníci poukazovali na nutnost dosáhnout celkové úspory betonu, převážil trend přibližující stavební postupy masivních betonových objektů vysoce mechanizované technologii hutněných násypů. V průběhu 10 až 15 let došlo k rozvoji technologie betonu zhutňovaného válcováním (roller compacted concrete – ve zkratce RCC, popř. slangově „rollcrete“; francouzsky BCR). Od počátku se rozvinuly dva hlavní směry, z nichž první (hlavně v USA, Austrálii atd.) znamenal vědomě výrazné odchýlení od zásad klasické technologie masivního betonu; druhý, představovaný japonskou školou, naopak nijak nechtěl slevovat z dřívějších vysokých požadavků. Mezi nimi byl vcelku dostatečný prostor pro širokou koncepční variabilitu při konkrétních stavbách. První přehrady (Willow Creek v USA, Shimajigawa v Japonsku a další), dokončené v letech 1980 až 1985, prokázaly reálnost této cesty a zejména možnost splnění požadavků na zrychlení a z hospodárnění výstavby. Ukázalo se, že varianta gravitační přehrad z válcovaného betonu může činit ve srovnání s klasickým stavebním postupem pouhých 50 až 60 % kalkulovaných nákladů (např. přehrada Monksville v USA).

Podářilo se zvládnout návrh betonových směsí s malým obsahem cementu (většinou do $100 \text{ kg na } 1 \text{ m}^3$), s použitím popíl-

Obr. 2 Přehrada Rialb, Španělsko, vybudovaná technologií válcovaného betonu

Fig. 2 Rialb Dam, Spain, roller compacted concrete gravity dam



ku nebo pucolánu, které dovolují zpracování na místě spočívající v rozprostření souvislé vrstvy o tloušťce zpravidla 0,3 m dozerem, s následujícím zhuštěním pojezdy vibračního válce. V tom se postup výstavby masivních betonových objektů značně přiblížil technologii výstavby sypaných přehrad.

Zachovány zůstaly významné přednosti betonu z hlediska účinků vody, tj. odolnost proti povrchové i vnitřní erozi.

V současné době, kdy má technologie RCC za sebou stovky aplikací v různých státech převážně při výstavbě gravitačních přehrad, je možno ji považovat za plně zvládnutou [2, 3]. Návrh složení betonové směsi se přizpůsobuje namáhání, přičemž pevnost betonu (s ohledem na velký podíl pucolánu i na dostatečný časový odstup plného zatížení od výstavby), hodnocená až po 90, 180 dnech, popř. i po roce, se může pohybovat od 10 až do 45 MPa. Podařilo se zvládnout projektové řešení tak, aby podporovalo přednosti stavebních postupů technologie RCC, stejně jako racionální výstavbu lícnicích zón, které na sebe přejímají požadavky na trvanlivost a vodotěsnost konstrukcí (Obr. 2).

Rozvoj válcovaného betonu přinesl i některé obecně použitelné novinky, např. modely časového vývoje teplotního namáhání masivních betonových konstrukcí od počátku výstavby, využití kameniva uloženého do izolovaných skládek v zimním období pro výraznou redukci počáteční teploty betonové směsi a další. Neméně významný se ukázal zpětný dopad technologie RCC na klasický postup výstavby masivních betonových objektů. Pro ilustraci stavu rozvoje je možno uvést, že v současné době je ve stavbě 7 přehrad vyšších než 100 m, z toho nejvyšší 188 m vysoká kolumbijská přehrada Miel I. V současné době se v Číně zahajuje výstavba dalších přehrad touto technologií, z nichž dvě budou ještě vyšší (196 m vysoká Guangzhao a klenbová přehrada Longtan o výšce 192 m, s možností zvýšení až na 217,5 m).

Další mezistupeň mezi betonovými a sypanými přehradami představuje použití tzv. „tvrdého násypu“ (hardfill), což je další vývojový stupeň technologie RCC, při níž se využívá místních zemín (popř. materiálů z výkopů) jako kameniva do „betonu“ o malé pevnosti. Projektový tvar příčného řezu přehrad tohoto typu je lichoběžníkový, sklon svahů však bývá strmější než u sypaných přehrad, tj. 1: 0,6 až 1:1. Předností tohoto řešení je výhodné chování konstrukce při seizmických účincích; nevznikají tahové zóny. Jistou modifikací je tzv. CGS – stavební postup (cement, štěrk, písek), který naznačuje, že zřejmě není reálné použití libovolných zemín (např. jílovitých).

V ČR byly tyto nové technologie se zájmem sledovány a usku-tečnily se i některé experimenty „in situ“. Bohužel v důsledku celkového útlumu výstavby vodních děl nedošlo k jejich ověření na experimentální stavbě, i když se připravovala. Technologie masivního betonu v ČR dosáhla vrcholu při výstavbě vodního díla Orlík (1963), kdy odpovídala vysokému evropskému standardu. V dalších letech orientovaných převážně na sypané přehradu se rozvíjela hlavně výstavba náročných manipulačních objektů, v nichž se často sdružovaly funkce přelivných, výpustných a odběrných zařízení (Obr. 3). Tyto sdružené objekty je možno považovat za náš přínos k rozvoji světové přehradní výstavby. Přes tvarovou složitost byla při jejich výstavbě často použita technologie kontinuální betonáže do posuvného bednění, zřejmě jako výraz snah o vyloučení pracovních spár – potenciálního zdroje problémů s průsakem. Z technologického hlediska však optimalizaci složení betonové směsi nebyla vždy věnována adekvátní pozornost, požadovaná kvalita se často



Obr. 3 Sdružený manipulační objekt přehrady Želivka (přeliv, výpust, odběr vody)

Fig. 3 Combined spillway-outlet-intake structure of the Želivka Dam

doháněla zvýšeným obsahem cementu. Rovněž na výztuži se nešetřilo.

Dnes se betonové konstrukce vodních staveb z první poloviny 20. století blíží nebo i přesáhly věk 70 let, takže na nich proces porušování s časem značně pokročil. Bohužel i mnohem mladší betonové objekty na vodních dílech vyžadují opravy, protože jejich realizace byla často spojena s technologickými nedostatky. U vodních staveb se pozornost vedle technologií zajišťujících kvalitu oprav i v podmínkách vysoké vlhkosti spolu s účinky rychle proudící vody atd. zaměřuje i na technologie oprav prováděných pod vodou. Často totiž není možno vyloučit, ani dočasně, příslušný objekt z funkce, protože náhradní zásobování vodou není reálné. Příkladem úspěšného zvládnutí opravy tohoto typu je věžový odběrný objekt z nádrže Přísečnice v Krušných horách. Opravou se odstranily velké nedostatky při výstavbě, jejichž důsledkem byla mj. nereálnost uzavření odběrných otvorů na počátku přívodu vody k úpravně vody.

Vodohospodářská výstavba u nás, stejně jako v mnoha dalších zemích, je dnes v dlouhodobém útlumu, takže není mnoho příležitostí uplatnit progresivní směry rozvíjené v celosvětovém měřítku. Trvale aktuální jsou však speciální technologie, spojené s modernizací, zvýšením nebo změnami využití vodních děl a nápravou projevů jejich stárnutí.

Literatura

- [1] ICOLD. Bulletin 70. Barrages en enrochements à masque en béton, Paris, 1988
- [2] Broža V.: Válcovaný beton – nová technologie výstavby masivních hydrotechnických konstrukcí, Stavební obzor I, 1992, č. 4
- [3] Dunstan M., Santus F.O.: The interrelationship between design and construction for efficient RCC Dams, In: Workshop Modern Techniques for Dams ICOLD, Dresden, 2001

Prof. Ing. Vojtěch Broža, DrSc.
Katedra hydrotechniky, Stavební fakulta ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
tel.: 02 2435 3879, 2435 4616, fax: 02 2435 5408