

# BEZPEČNOST A SPOLEHLIVOST BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN

## SAFETY AND RELIABILITY OF THE POWER PLANT CONCRETE CONTAINMENT

PETR ŘEŘIČKA,  
ZDENĚK BITTNAR

*Bezpečnost předpjatého betonového kontejnmentu elektrárny Temelín při mimořádných zatíženích. Pád letadla, návrhová nehoda (LOCA) s vnitřním přetlakem, zemětřesení. Výpočet spolehlivosti a životnosti pro jednoduché kritérium porušení těsnosti.*

*Safety of the Temelín power plant concrete containment for extraordinary loads. Aircraft impact, design basis accident (LOCA) with inflat pressure, earthquake. Reliability and service life assessment for a simple leakage failure criterion.*

Spolehlivost stavebních konstrukcí se běžně dosahuje návrhem podle norem. Pro důležité stavby je někdy vhodný podrobnější rozbor, zejména ve vztahu k mimořádným zatížením. Na katedře stavební mechaniky bylo několik takových analýz provedeno pro kontejnment reaktoru Jaderné elektrárny Temelín:

- náraz vojenského a civilního dopravního letadla
- mezní přetlak při LOCA (únik a odpaření chladicí vody primárního okruhu)
- zemětřesení
- predikce ztrát předpětí ve válcové části kontejnmentu
- odhad životnosti pravděpodobnostním rozbohem

Ve většině případů byl výpočet spolehlivosti limitován nedostatkem statistických charakteristik vstupních údajů, vhodných metod a také nedůsledností současných norem včetně Eurokodů. Obecně známá je nedůslednost norem při použití nelineárního výpočtu konstrukce, který by vlastně měl být pro mezní stavy únosnosti hlavní metodou. EC2 vyžaduje při takovém výpočtu střední hodnoty materiálových konstant, jmenovitě pevností. Výsledek nelineárního výpočtu, tj. vnitřní síly nebo napětí na mezi únosnosti, závisí u dráhově závislých materiálů jako jsou ocel a beton na jejich poddajnosti během přitěžování, takže požadavek EC2 na použití středních hodnot při výpočtu konstrukce je v podstatě správný [1]. V mezním

stavu takto modelované konstrukce budou mít vnitřní síly v kritických průřezích mezní hodnoty, odpovídající použitým středním hodnotám materiálových konstant. Při posuzování průřezů se používají výpočtové hodnoty, aby byla zajištěna potřebná rezerva bezpečnosti, takže kritické průřezí nutně nevyhoví.

Mimořádná zatížení mají často výrazně dynamický charakter. Pro posouzení spolehlivosti ve vztahu k takovým zatížením je zmíněný formát výpočtu vlastně nepoužitelný. Mezní stav nenastává při těchto zatíženích dosažením mezních vnitřních sil v dostatečném počtu průřezů a vznikem mechanismu, jak formát EC2 předpokládá, nýbrž dosažením kritické deformace vstýlky a s tím spojeným porušením těsnosti obálky v libovolném průřezu. Až do toho okamžiku může být historie vnitřních sil v jednotlivých průřezích složitá včetně dosahování a opouštění různých mezních stavů.

Zdá se nepochybně, že jediným východiskem je opuštění metody dílčích součinitelů a použití vyšších úrovní spolehlivostních metod. EC1 a EC2 však zatím neposkytují dostatečnou podporu pro metody II. a III. úrovně. Následující příklady navíc ukazují, že důsledný výpočet spolehlivosti a životnosti podle těchto metod je zatím prakticky neproveditelný bez drastických zjednodušujících předpokladů.

### NÁRAZ LETADLA

Podrobnější popis výpočtu byl uveřejněn v [2 a 3]. Postupná destrukce draku a interakce s kontejnmentem při nárazu letadla je pro posouzení kontejnmentu nahrazován zatěžovací funkcí. Pro vojenské letadlo byla použita funkce dodaná ještě sovětskou stranou při přípravě projektu. Liší se jen málo od zatěžovací funkce letadla Phantom letícího rychlostí 700 km/h, používané v SRN.

Toto zjednodušení je založeno na rozbohách nárazu a doporučeno Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE). Byly uvažovány nárazy na kopuli v jejím středu a v místě přechodu do věnce, v obou případech kolmo na povrch. Také náraz dopravního letadla je nahrazo-

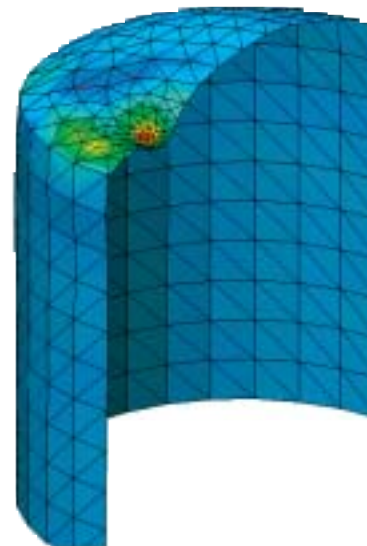
ván zatěžovací funkcí mezinárodně používanou. Simuluje náraz B707-320 rychlostí 300 km/h.

Výpočtovým modelem je mindlinovská skořepina s uvažováním vlivu příčného smyku, k diskretizaci jsou použity trojúhelníkové konečné prvky, v mezích jednoho prvku se používá teorie plochých skořepin. Materiálové vztahy se uplatňují v sedmi vrstvách betonu, šesti vrstvách měkké výztuže a dvou vrstvách předpínací výztuže v každém prvku. Beton i výztuž se považují v zásadě za pružno-plastické, u betonu se počítá s tlakovým i tahovým změkčením až do úplného porušení. Kritickým módem porušení je vytlačení smykového kuželu při nárazu na okraj kopule. Na obrázku je deformace symetrické poloviny obálky a barevně vyznačené kontury posouvající síly při tomto porušení.

Opakováním výpočtu se zvyšováním zatížením (násobkem celkové kontaktní síly při stejném tvaru zatěžovací funkce v prostoru i čase) byla nalezena mezní únosnost jako 1,25 násobek nominálního zatížení podle MAAE. Až na jednu lokální výjimku jsou napětí, deformace i průhyby

Obr. 1 Deformace obálky při nárazu vojenského letadla, kontury posouvající síly

Fig. 1 Containment deflection due to an aircraft impact, shear force contours



při nárazu dopravního letadla menší. Použijí-li se mezinárodně používané zatěžovací funkce a kritéria odolnosti, přenesení kontejnment JE Temelín náraz vojenského i dopravního letadla s malým lokálním poškozením pro střední hodnoty materiálových konstant, zejména pevností a rezerva únosnosti je 25 %. Tento výsledek však málo vypovídá o spolehlivosti obálky. Pro představu o nárocích výpočtu spolehlivosti podle úrovně II a III je užitečný nástin postupu v tomto zvláštním případě.

### NÁSTIN VÝPOČTU SPOLEHLIVOSTI OBÁLKY PROTI NÁRAZU LETADLA

Každý výpočet spolehlivosti musí obsahovat čtyři hlavní kroky:

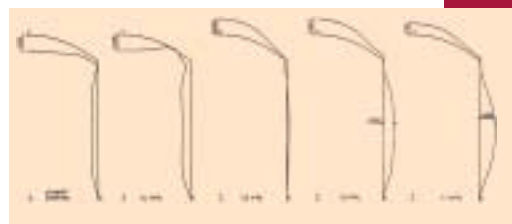
- **Stanovení kritérií mezního stavu.** Na základě provedených deterministických výpočtů je jedním z nich mezní příčná smyková deformace skořepiny (v kopuli nebo válci) kolem 0,003. Dalším kritériem musí být mezní poměrná deformace vystýlky vlivem ohybu, její hodnota by rovněž měla být kolem 0,003. Důkladný rozbor by dodal další, např. mezní posunutí stěny válce, která nesmí narazit na vnitřní konstrukce kolem šachty reaktoru, přípustné zrychlení dráhy polárního jeřábu apod.
- **Stanovení vstupních náhodných parametrů.** Týká se parametrů zatížení, konstrukce, materiálů i výpočtových metod. Podrobněji je tento krok popsán níže.
- **Vyjádření kritérií mezního stavu jako funkcí vstupních náhodných parametrů, tzv. limitních funkcí.** V daném případě to nelze udělat v explicitní formě. Lze pouze dodat nástroj, tj. výpočtový program, kterým se pro dané hodnoty parametrů zjistí, zda některé z kritérií mezního stavu bylo porušeno
- **Vlastní stochastický výpočet.** Vzhledem k charakteru limitních funkcí je nezbytná metoda Monte Carlo, nebo nahrazení limitních funkcí jejich aproximacemi, běžně nazývanými plochami odezvy (response surface) a následný FORM výpočet. V druhém případě je velmi citlivý výběr bodů v prostoru náhodných parametrů, v nichž se plochy odezvy sestavují. Konstrukce ploch odezvy je v podstatě prokládání numerických simulací jednoduchými funkcemi. V obou případech to znamená řádově tisíce až desetitisíce deterministických simulací nárazu podobných těm z předchozího odstavce a to ještě za předpokladu, že se pro Monte Carlo podaří najít efektivní metodu adaptivní výběrové simulace [4, 5 a 6].

Pokud jde o výběr náhodných parametrů zatížení, je úloha v tomto případě jednoduchá. Zatěžovací funkce je v podstatě dohodnutá. Vychází sice ze simulací skutečného nárazu, ale reprezentuje i jiná zatížení podobného charakteru, jako exploze, zásahy střelami apod. Její hlavní funkcí tak je definovat určitou dohodnutou odolnost stavby vůči podobným dynamickým jevům, podobně jako normou stanovená zatížení pozemních staveb definují požadovanou odolnost těchto staveb vůči běžným zatížením. Dohodnuté parametry nemá smysl považovat za náhodné. Naproti tomu je bezpochyby náhodné místo nárazu. Předpokládáme-li osově symetrickou obálku, je místo nárazu určeno polohou na meridiánu obálky, jde tedy o jeden náhodný parametr, jehož rozdělení pravděpodobnosti zřejmě může být rovnoměrné.

Zbývají parametry konstrukce, především vlastnosti materiálů. Předpokládáme, že použité materiálové modely a metody výpočtu jsou ověřené, takže není třeba uvažovat nejistotu výpočtového modelu. Náhodnými parametry jsou materiálové konstanty betonu a výztuží. Je ovšem třeba vzít v úvahu prostorovou proměnlivost a korelaci těchto parametrů a také jejich vzájemné korelace (např. pevnost v tahu a pevnost v tlaku v jednom místě nejsou nezávislé). O prostorové korelaci materiálových konstant v betonových konstrukcích jsou pouze útržkovité znalosti. Tento problém úzce souvisí se vzdáleností integračních bodů konečných prvků a tím také s hustotou sítě MKP. Při přijatelných hustotách sítě např. podle obr. 1 jsou typické korelační vzdálenosti relativně malé ve srovnání se vzdáleností integračních bodů a materiálové konstanty v sousedních prvcích lze považovat za nezávislé. To ovšem znamená, že počet náhodných parametrů je násobkem počtu prvků. Obrovský rozsah takto formulované úlohy spolehlivosti je zřejmý a je hlavním důvodem, proč dosud nebyl takový výpočet proveden.

### MEZNÍ PŘETLAK PŘI LOCA

Úkolem bylo najít mezní vnitřní přetlak a porovnat ho s návrhovou hodnotou  $p_d = 5,75$  MPa a s hodnotou přetlaku při ZIK (zkouška integrity kontejnmentu),  $p_{ZIK} = 0,46$  MPa a poskytnout kontrolní hodnoty deformací, napětí a posunutí pro porovnání se ZIK. Podrobný popis řešení je v [7]. Výpočet byl čistě deterministický.

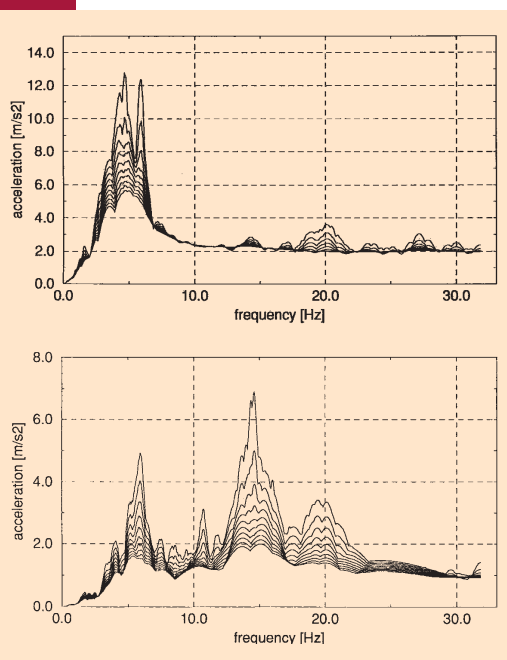


Obr. 2 Deformované tvary meridiánu pro vzrůstající přetlak při LOCA, měřítka posunutí jsou různá, daná vypsáním posunutím středu kopule

Fig. 2 Meridian displacements for increasing inflate pressure, the displacement scales are different, given by the dome top values in the figure

Výpočtovým modelem byla osově symetrická mindlinovská skořepina, diskretizovaná vrstvičkovými konečnými prvky. Podobně jako u výpočtu nárazu letadla se beton i všechny druhy výztuže modelují jako pružnoplastické materiály, u betonu se změkčením až k úplné destrukci. Za mezní stav se považuje neomezený vzrůst deformací. Na obr. 2 je postupná deformace meridiánu při vzrůstajícím přetlaku. Při návrhovém přetlaku jsou beton i výztuž pružné všude včetně míst, kde je potenciální nebezpečí porušení betonu tahem. Pouze ve středu kopule vzniká tahové porušení betonu již při  $p_{ZIK}$ , které se při  $p_d$  dočasně uzavře a v přechodu kopule/věvec vzniká přechodné tahové porušení ve vnějším líci. To vše za předpokladu, že mezní pružné protažení betonu je  $\epsilon_{el} = 0,00065$ . Praskání betonu je při těchto přetlacích pouze místní. Vystýlka je hluboko pod mezí kluzu. Napětí ve vystýlce zůstávají pod mezí kluzu až do přetlaku 1,0 MPa, kdy je dosažena v přechodu věvec/válec ve směru meridiálním a téměř dosažena ve středu válce ve směru obvodovém. Při tomto tlaku vzniká také velká smyková deformace v patě válce, kde se plastizuje měkká výztuž. Tlak 1,1 MPa lze považovat za mezní. Při zkušební tlaku  $p_{ZIK}$  je konstrukce v téměř ideálním stavu, pokud jde o napětí a deformace betonu.

Vnitřní přetlak patří mezi zatěžovací stavby, pro které je současný formát posuzování pomocí dílčích součinitelů vhodný. Spolehlivost je tedy bezpochyby zaručena návrhem podle norem. Provedené výpočty posloužily jako další kontrola a pro tlaky do 0,46 MPa také pro srovnání vypočtených a naměřených průhybů.



Obr. 3 Spektra odezvy vodorovného (nahore) a svislého (dole) zrychlení v úrovni polárního jeřábu vypočtena pro poměrný útlum 0,01 až 0,1 s diferencí 0,01 mezi sousedními čarami

Fig. 3 Response spectra of the horizontal (top) and vertical (bottom) accelerations at the polar crane level for relative damping levels 0.01-0.1

pravděpodobností akceptovaných v jaderném průmyslu (kolem  $10^{-7}$ /rok). K zatížení byly použity akcelerogramy skutečných zemětřesení, doporučené a dodané Geofyzikálním ústavem ČSAV, normované na návrhovou intenzitu maximálního zrychlení  $1 \text{ m/sec}^2$  vodorovně a  $0,44 \text{ m/sec}^2$  svisle. Z akcelerogramů byl použit vždy jen interval tří sekund s největší intenzitou otřesů. Vzhledem k nejnižším vlastním frekvencím kolem 5 Hz je to dostatečně dlouhý interval. Zejména s ohledem na snazší vyhodnocení výsledků se uvažuje vodorovný pohyb pouze v jednom směru, takže úloha má rovinu symetrie a stačí modelovat pouze polovinu konstrukce, podobně jako při nárazu letadla. Současný pohyb ve směru svislém je zahmut. Zrychlení jsou udělena přímo podlahové desce kontejnmentu. Předběžný rozbor totiž ukázal, že poddajnost kontejnmentu samotného je cca 10 až 20krát větší, než poddajnost železobetonových konstrukcí a podloží pod touto deskou. Výpočtový model a materiálové vztahy jsou podobné, jako při analýze nárazu letadla a mezním přetlaku, síť konečných prvků je ovšem jiná. Výpočet je proveden přímou explicitní integrací. Ve srovnání s rozkladem do vlastních tvarů nevznikají žádná frekvenční omezení a nelineární chování nepůsobí principiálně žádné potíže.

Pro návrhovou intenzitu zemětřesení zůstává konstrukce v pružném stavu ve všech částech, výchyly napětí jsou daleko pod pevností betonu v tlaku a nikde nevznikají tahová napětí. Návrhové zemětřesení nezpůsobí žádné poškození kontejnmentu, konstrukce může být pro následující zatížení považována za nedotknutou a návrhové zemětřesení nemá tedy žádný vliv na spolehlivost a životnost kontejnmentu.

Dalším cílem výpočtu bylo určení spekter odezvy v důležitých úrovních pro případné následné posouzení vnitřních zařízení na otřesy.

Se záměrem odhadnout mezní úroveň

zemětřesení, kterou kontejnment snese, byl výpočet (bez zpracování spekter odezvy) opakován se vzrůstajícím zrychlením při zachování frekvenčního složení. Při úrovních 3 a  $10 \text{ m/s}^2$  zůstala konstrukce obálky stále ještě pružná a bez poškození. Teprve při  $20 \text{ m/s}^2$  se objevilo závažné tahové poškození betonu v patě válce. Napětí ve výstylce v tomto místě jsou těsně pod mezí pevností oceli a pravděpodobně by se výstýlka odtrhla od stěny. Plastické deformace ale nerostou bez omezení, takže kontejnment by se nezhroutil ani při této úrovni zemětřesení.

#### PREDIKCE ZTRÁT PŘEDPĚTÍ

Dotvarování a smršťování je z hlediska životnosti kontejnmentu kritickým jevem, neboť u předpjatých konstrukcí ovlivňuje předpínací síly a tím i vnitřní síly obecně. Dlouhodobé zkušenosti se staršími předpjatými konstrukcemi ukazují, že výpočtové modely většinou podceňují dotvarování. Pro predikci byl v tomto případě užít dvojnásobný mocninový zákon navržený Z. P. Bažantem [8]. Originálním příspěvkem je metoda a program pro průběžnou identifikaci parametrů Bažantova modelu z dosud naměřeného chování. Model a jím předpovídané dotvarování je tak možno upřesňovat, kdykoli jsou k dispozici nová data z měření. Dotvarování obálky se vypočítává numericky, s respektováním různého stáří betonu v konstrukci. Předpokládá se osová symetrie a meridián skořepiny je pro numerické řešení rozdělen na dílky po 5 m. V obr. 4 je odvozená funkce poklesu předpínací síly jednoho kabelu vlivem dotvarování spolu s naznačeným pětiprocentním kvantilem této síly, jak vyplývá ze statistického vyhodnocení dosavadních měření. Predikce dotvarování je hlavním vstupním údajem pro zjednodušený odhad životnosti.

#### ODHAD ŽIVOTNOSTI

##### PRÁVDĚPODOBNOSTNÍM ROZBOREM

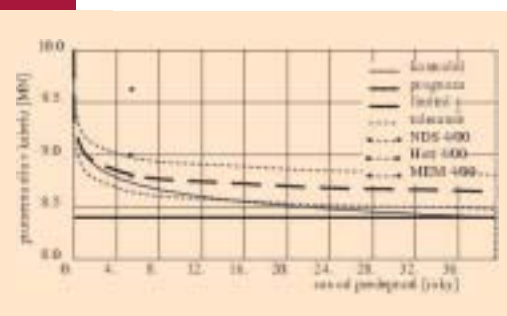
Jestliže kvantifikovaný odhad spolehlivosti při známém stavu konstrukce je pro mimořádná zatížení velmi obtížný, pak odhad životnosti je úloha o řád složitější. Pro něj je třeba mít predikci vývoje statistických charakteristik konstrukce i zatížení v čase, prostředky pro výpočet časově závislé spolehlivosti a metodu pro výpočet pravděpodobnosti porušení během životnosti konstrukce  $t_L$ . V plném rozsahu, s uvažováním všech možných kritérií porušení, je to úloha prakticky neřešitelná

#### ZEMĚTŘESENÍ

Cílem výpočtu je ocenit kombinovaný účinek maximálního výpočtového zemětřesení (SSE) a návrhové nehody se ztrátou chladiwa (loss of coolant accident – LOCA) v tomto pořadí na konstrukci kontejnmentu. Předpokládá se, že SSE může iniciovat LOCA tím, že poškodí zařízení reaktoru nebo primárního okruhu. Události v tomto pořadí tak nemohou být považovány za nezávislé. Události v opačném pořadí jsou nezávislé. V takovém případě je pravděpodobnost jejich současného výskytu rovna součinu pravděpodobností jednotlivých událostí a je pod prahem

Obr. 4 Predikce úbytku předpínací síly vlivem dotvarování, zakreslen je i 5% kvantil, limitní přípustný pokles podle technických podmínek a výsledky některých měření

Fig. 4 Prestress loss prediction owing to creep and shrinkage, its 5% margin, limit admissible level according to the vendor's technological conditions and some measured values are shown





i pro mnohem jednodušší konstrukce a zatížení. Obvyklá dílčí řešení se zakládají na výběru jednoho, velmi zjednodušeného jednorozměrného kritéria porušení. V daném případě byla za kritérium porušení zvolena poměrná deformace vystýlky v obvodovém směru ve střední části válcové skořepiny obálky při LOCA. Z předcházejících analýz mezního přetlaku je totiž známo, že právě v tomto místě a směru jsou poměrné deformace vystýlky v mezním stavu největší. Důsledný spolehlivostní výpočet, na rozdíl od deterministického řešení, se ovšem nemůže spokojit s tímto jednoduchým kritériem. Připustíme-li náhodné variace materiálových vlastností, může být kritické poměrné deformace dosaženo s jistotou pravděpodobností kdekoli a tato pravděpodobnost by měla být zahrnuta do výsledné spolehlivosti. Samo kritérium poměrné deformace vystýlky je pouze jedním z mnoha, které by bylo třeba brát v úvahu při důsledném výpočtu spolehlivosti a životnosti. Toto kritérium vychází z hlavní funkce obálky, totiž ze zajištění plynutěnosti. Předpokládá se při něm, zase dosti zjednodušeně, že k porušení dojde při jisté kritické poměrné deformaci  $\varepsilon_l$ .

Ve skutečnosti k němu může dojít také prorezavěním, odtržením od podkladu, při nárazu letadla a pod. Při posuzování životnosti kontejnmentu se navíc nelze spokojit s porušením plynutěnosti jakožto jediným způsobem porušení jeho funkce. Nadměrné deformace obálky či dokonce estetické vady typu viditelných trhlin jsou další příklady. Uvádíme tyto příklady, abychom ilustrovali, jakého zjednodušení se dopouštíme, přijmeme-li výše uvedené jednorozměrné kritérium. Důvodem pro tak obrovské zjednodušení není pouze značná teoretická a výpočtová náročnost obecnějších kritérií, ale především skutečnost, že pro parametry takových kritérií nemáme dostatečné znalosti o jejich statistických charakteristikách a jejich vývoji během předpokládané životnosti konstrukce. Pominutí ostatních kritérií jsou oprávněná tehdy, jestliže pravděpodobnosti jejich porušení jsou zanedbatelná ve

srovnání s pravděpodobností porušení zvoleného kritéria.

Následující odhad životnosti tak lze považovat spíše za studii aplikace některých metod, než platný odhad skutečné životnosti. Po výběru kritéria porušení je druhým krokem spolehlivostního výpočtu výběr náhodných parametrů a vyjádření zvoleného kritéria pomocí těchto parametrů. Volba parametrů je opět značně subjektivní. Nabízí se materiálové parametry betonu, měkké i předpínací výtzuže, vystýlky, parametry zatížení atd. Z toho lze předem vyloučit ty, pro které nejsou k dispozici ani přibližné statistické charakteristiky. Majíce na paměti zjednodušení přijatá při volbě kritéria, omezíme se na tři, podle našeho názoru rozhodující, náhodně proměnné parametry:

- průměrná předpínací síla kabelu válce  $N(t)$  v čase LOCA
- kritická poměrná deformace vystýlky  $\varepsilon_{lim}$
- vnitřní přetlak  $p(t)$ .

Rezerva spolehlivosti z je rozdíl limitní obvodové membránové síly ve válci  $n_{lim}$  a membránové síly způsobené přetlakem  $p(t)R$ , kde  $R$  je poloměr válce.

$$z(N(t), \varepsilon_{lim}, p(t)) = n_{lim}(n(t), \varepsilon_{lim}) - p(t)R, \quad n(t) = \alpha N(t) \quad (1)$$

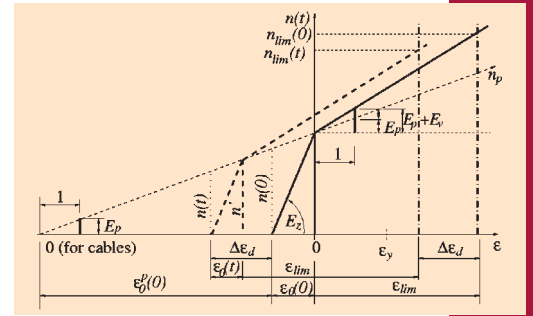
Membránová síla  $n(t)$  v době vzniku LOCA je úměrná  $N(t)$  s konstantou úměrnosti  $\alpha$ , která závisí na vedení kabelů. Limitní síla  $n_{lim}$  je ve skutečnosti složitá funkce, kterou by bylo možno vyšetřit bod po bodu numerickými simulacemi LOCA v podstatě shodnými s výpočtem mezního přetlaku, jak byl popsán výše. To není adekvátní přijatým zjednodušením a místo toho je použita přibližná linearizovaná funkce, kterou lze odvodit z pracovního diagramu válce při vzrůstajícím přetlaku (obr. 5).

$E_p$ ,  $E_v$  a  $E_z$  jsou efektivní tuhosti předpínací a měkké výtzuže a celková tuhost neporušeného železobetonového průřezu válce. Dostaneme jednoduchou funkci

$$n_{lim}(N(t), \varepsilon_{lim}) = N(t) \alpha \frac{E_z}{(E_b + E_v)} + \varepsilon_{lim} (E_v + E_p), \quad (2)$$

kde  $E_b$  je efektivní tuhost betonu válce.

Z hlediska odhadu životnosti je důležitá proměna parametrů v čase. Předpokládáme konstantní  $\varepsilon_{lim}$ , což odpovídá faktu, že vlastnosti vystýlky se během životnosti nemění. Úbytek předpínací síly je dán dotvarováním. Poměrně dobře lze tako-



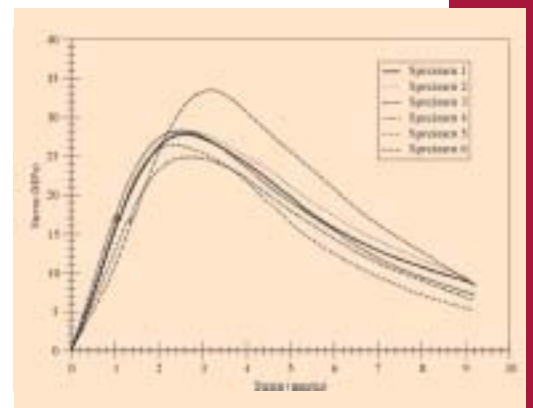
Obr. 5 Pracovní diagram stěny válce ve směru obvodovém, plnou čarou je vyznačen diagram v čase 0 (čas předpětí), čárkovaně diagram po ztrátách předpětí v čase t,  $\varepsilon_y$  je deformace na mezi kluzu výtzuže a  $\Delta\varepsilon_d$  je deformace dotvarováním v čase t

Fig. 5 Hoop strain-stress diagram of the cylinder, vertical ordinate is the hoop membrane force,  $\varepsilon_y$  is the strain at yield of the reinforcement and  $\Delta\varepsilon_d$  is the hoop strain due to creep and shrinkage at time t

vou proměnu vystihnout slabě nestacionární náhodnou funkcí  $N(t)$ , která má klesající střední hodnotu, danou predikcí dotvarování a konstantní rozptyl, který je možno odhadnout z existujících měření na kabelech in situ. Přetlak  $p(t)$  je důsledkem několika možných iniciačních událostí, z nichž každé přísluší jistá střední frekvence výskytu, řádově  $10^{-7}$  až  $10^{-2}$ /rok, a jistá velikost přetlaku, 160 až 800 kPa. Lze předpokládat, že tyto iniciační události jsou navzájem nezávislé a jejich frekvence se během životnosti nemění. Vhodným statistickým modelem pro každou událost je Poissonův proces, jehož

Obr. 6 Pracovní diagram betonu v tlaku při teplotě 100 °C

Fig. 6 Strain-stress diagram of concrete at 100°C



Tab. 1 Pravděpodobnost porušení těsnosti  $p_l$  v závislosti na čase  $t_l$

Tab. 1 Probability of the leak-tightness failure as a function of time

čas [roky]	6	12	18	24	30	32
$p_l \cdot 10^3$	2.27	2.43	2.54	2.62	2.69	2.74

## Literatura:

- [1] *Eibl J.*: Nonlinear design and an appropriate safety format, IABSE Reports Vol. 74, IABSE Coll. Basis of design and applications to structures, Delft, 1996, s. 159–164
- [2] *Řeřicha P.*: Odolnost kontejmentu JE Temelín proti nárazu letadla, Stavební obzor 5 (1996), č. 1, s. 2–5
- [3] *Bittnar Z., Řeřicha P.*: Účinek zemětřesení na kontejment JETE, Zpráva ČVUT Stavební fakulta, Praha, 1996, 23 s.
- [4] *Ditlevsen O., Madsen H. O.*: Structural reliability methods, John Wiley&Sons, Chichester, U.K., 1996, 367 s.
- [5] *Melchers R. E.*: Search-based importance sampling, Struct. safety 9 (1990), s. 117–128
- [6] *Bucher C. G.*: Adaptive sampling – an iterative fast Monte-Carlo procedure, Struct. Safety 5 (1988), s. 119–126
- [7] *Bittnar Z., Řeřicha P.*: Mezní vnitřní přetlak kontejmentu JETE, Zpráva ČVUT Stavební fakulta, Praha, 1995, 74 s.
- [8] *Krejčí T., Šejnoha J.*: Prognóza ztrát předpětí v kabelech válcové části ochranné obálky JETE, Zpráva ČVUT Stavební fakulta, 2003, 17 s.
- [9] Nuclear safety: Diagnosis, safety and ageing of concrete structures in nuclear power plants, final report, Zpráva ČVUT Stavební fakulta, 1996, 24 s.

rozdělení pravděpodobnosti je známo. Integraci v čase dostaneme pravděpodobnost porušení danou událostí pro danou životnost  $t_L$ . Jejich součet pro všechny události pak udává absolutní pravděpodobnost porušení  $p_f$  v závislosti na předpokládané životnosti  $t_L$  (tab. 1)

Výsledek je dobrou ilustrací toho, co lze

od rozboru životnosti očekávat a co může být pro odběratele zklamáním. Nedává totiž jednoduchou odpověď na otázku, jak dlouho konstrukce bude sloužit. Místo toho poskytuje pravděpodobnost porušení jako funkci času a je na uživateli, jaká pravděpodobnost je pro něj přijatelná.

**EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM  
A VYBAVENÍ**

Na Stavební fakultě ČVUT se kromě výpočetních modelů intenzivně rozvíjí experimentální výzkum vlastností betonu, který byl použit při výstavbě kontejmentů JE Temelín. Vzorky byly vybetonovány při výstavbě druhého bloku a jsou uchovány pro další měření (část na elektrárně v Temelíně, část na stavební fakultě). Pro měření slouží unikátní lis DSN 2500, který díky své schopnosti rychle reagovat na porušení a odlehčit vzorek umožňuje získat údaje o změkčení betonu po dosažení meze pevnosti. Příklad pracovního diagramu takové zkoušky je na obr. 6.

V článku je využito výsledků grantu GAČR 103/03/350.

Doc. Ing. Petr Řeřicha, DrSc.  
tel.: 224 354 478, fax: 224 310 775  
e-mail: rer@cml.fsv.cvut.cz  
Prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.  
Stavební fakulta  
Kat. stav. mechaniky, FSv ČVUT  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

**BETON SE DOBŘE NOSÍ**

Po 25 letech navrhování šperků a uměleckých předmětů z tradičních materiálů uvažoval Andrew Goss, umělec a šperkař, co je vlastně ve šperkařství ceněné, zda jsou to drahé kovy a kameny, nebo nápad, invence. Rozhodl se pro materiál z opačné strany spektra – beton. Ponořil se do studia a výzkumu, jak připravit jemnozrný, hustý, odolný a přitom atraktivní materiál. Původní motivací byla pouze chuť dokázat si, že dovede navrhnout hodnotné šperky, o které bude zájem, i z „bezceňného“ materiálu.

Pro šperky užívá nyní směs Portlandského cementu, kamenného prachu, metakaolín ke zlepšení zpracovatelnosti a zvýšení pevnosti, polypropylénová vlákna k zamezení vzniku smršťovacích trhlin (a v tomto měřítku i ke zvýšení tahové pevnosti) a akrylát ke zvýšení houževnatosti a snížení nasákavosti. Jednotlivé kousky lije Goss do jednoduchého kovového nebo plastového bedněni nebo používá techniky podobné intarzování, kdy předělové stěny vytvoří z kovů a plošky vylévá betonem. „Odbedňuje“ po 24 hodinách a povrch dokončuje broušením za vlhka brusným papírem.

Andrew Goss říká o betonu: „Je to materiál, který má jedinečné kvality pro umělce a tvůrčí osobnosti. Je charakteristický svou hmo-



Obr. 1 Přívěšek – list, beton, stříbro, 60 mm

Obr. 2 Náramek, beton, stříbro

Obr. 3 Pírko č. 2, Bronz, zlaté plátky, betonový rám, 180 x 120 x 40 mm



tu, chladností, odolností podobně jako kámen, ale na rozdíl od kamene přebírá tvar bedněni, do kterého je uložena betonová směs. Beton je materiál bez nároků, je na umělci jak ho rozezní.“

Goss A.: *Concrete handbook for artist: Technical notes for smallscale object*, Goss Design Studio, Ontario, Canada 2002, e-mail: [concrete@makersgallery.com](mailto:concrete@makersgallery.com), [www.makersgallery.com/concrete](http://www.makersgallery.com/concrete)

Concrete, February 2003, str. 56, redakčně zkráceno