ANALÝZA RIZIKA POŽÁRU V SILNIČNÍCH TUNELECH

Zpracovali: Ing. Eva Novotná, Ph.D., Ing. Jan Sýkora, Ph.D., prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., FEng.(Fakulta stavební ČVUT v Praze)

Souhrn

Technický list informuje o výsledku řešení zpracovaného formou dvou časopiseckých publikací [1] a [2]. Po metodické stránce je řešení vždy pojednáno ve dvou částech. První je věnována pravděpodobnostním aspektům (transportní jevy, intenzita a četnost požáru), druhá pak analyzuje poškození tunelového ostění. Jde nejen o odprysk povrchových vrstev, ale i o ztrátu pevnosti v důsledku vysokých teplot. Výsledkem je odhad pravděpodobné škody.

Oblast použití

Výsledky řešení jsou použitelné jak při návrhu nových tunelových staveb, tak při hodnocení důsledků požáru a návrhu sanačních prací k odstranění vzniklé škody. Metodika může být rozšířena i do jiných oblastí infrastrukturních staveb.

Metodika a postup řešení

Riziko je považováno za pravděpodobnou škodu způsobenou požárem v ostění tunelu. První část příspěvku je věnovaná pravděpodobnostním aspektům analýzy, v druhé části jsme se zaměřili na poškození ostění.

1. Pravděpodobnostní model

Do pravděpodobnostního modelu vstupují tyto faktory: (1) Pravděpodobnost, že v místě mimořádné události bude určitá skladba vozidel, $P_f^{[i]}$, $i = 1,2 \ldots . I$, (2) pravděpodobnost, že příslušná skladba bude zasažena požárem o tepelném výkonu q, $p_Q^{[i]}(q)$, (3) pravděpodobnost, že k požáru dojde na úseku dx, tj. $\lambda_f^{[i]}dx$, a konečně, že požár v místě x způsobí škodu $D^{[i]}(q, x)$.

Pruh 1	V	V	PC	PC	V	TB	PC	TB	TB
Pruh 2	V	PC	V	PC	TB	V	TB	PC	TB
Stav	0	1	2	3	4	5	6	7	8

PC = osobní vůz TB = nákladní vůz/autobus V = void

Obr. 1 Možné paralelní skladby vozidel pro dopravu ve dvou pruzích

(1) Možné skladby vozidel v tunelu se dvěma pruhy jsou naznačeny na Obr. 1. Kromě paralelních skladeb ze složek V-void, PC, TB lze uvažovat i sériové stavy, takže celkový počet kombinací může být 16. Pravděpodobnosti stavů lze získat Markovovým modelem, ať už stacionárním (homogenním)[1] při „nekonečném“ proudu vozidel nebo nestacionárním (nehomogenním) při přerušovaném proudu. Vstupními parametry modelu jsou přechodové pravděpodobnosti (resp. intenzity Markovova procesu) mezi složkami řetězce (V, PC, TB) a pravděpodobnosti (intenzity) přejezdů vozidel mezi pruhy. Pro analýzu nestacionárního dopravního proudu byla navržena jednoduchá dynamická bayesovská síť (DBN).

(2) Pravděpodobnosti tepelných výkonů jsou odvozeny za předpokladu, že tepelný příspěvek PC je zanedbatelný. S ohledem na dostupné podklady budeme uvažovat jen dva stavy $[i] = 1,2$. Rozdělení $p_Q^{[1]}$ (hoří jeden TB), obdržené z ETA v [3], je na Obr. 2a a vystihuje kterýkoliv ze stavů $4 \div 7$ z Obr. 1. Rozdělení $p_Q^{[2]}$ (hoří dva TB, ať již v paralelní nebo sériové konfiguraci) je na Obr. 2b. Při stejných tepelných výkonech obou TB a nezávislosti tepelných zdrojů platí

$$p_Q^{[2]}(q^2) = \sum_{(q_1)} p_Q^{[1]}(q^2 - q^1)\, p_Q^{[1]}(q^1). \qquad (1)$$

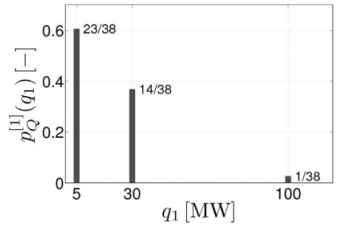
(3) Na požární nehody v tunelu nahlížíme jako na realizace Poissonova procesu s intenzitou λ_f. Tu lze odhadnout ze vztahu

$$\lambda_f = \frac{N_f}{365\{AADT\}L_{ref}}, \qquad (2)$$

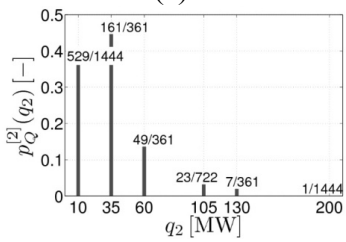
kde N_f je počet požárů za rok zjištěných v tunelech o úhrnné délce L_{ref} při průměrné hustotě denní dopravního proudu AADT. Dle údajů z Rakouska [2] $\lambda_f = 25 \cdot 10^{-9}$ [požárů(vozokm)$^{-1}$]. Data z Itálie [3], [4] dávají vyšší hodnoty, a to v poměru 4:3 u tří-pruhových:dvou-pruhovým tunelům, ale nezahrnují jen TB, ale i PC.

[1] Pojem stacionární naznačuje, že nezávisle proměnnou je čas t [den, rok]. V homogenním procesu je nezávisle proměnou poloha nehody x [m].

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168



(a)



(b)

Obr. 2 (a) Diskrétní rozdělení pravděpodobnosti $Q^{[1]}$ (jeden TB), (b) diskrétní rozdělení pravděpodobnosti $Q^{[2]}$ (dva TB).

Na základě těchto údajů a aplikací věty o podmíněných pravděpodobnostech odhadneme průměrné riziko ze vztahu

$$\mathrm{RISK} = T\{\lambda_f \mathrm{DT}\}$$

$$\sum_{i=1}^{\bar{n}} \sum_{q=1}^{\bar{q}} p_Q^{[i]}(q) \int_L D^{[i]}(q,x) \lambda_f^{[i]}(x) \kappa^{[i]}(x) \lambda_f(x)\,\mathrm{d}x, \tag{3}$$

kde T [dny] je čas pro který se riziko počítá, L [km] je délka tunelu, $D^{[i]}$ [€, Kč] náklady, které je třeba vynaložit na odstranění škody. Je třeba zdůraznit, že $D^{[i]}$ je nelineární funkcí požárního výkonu q, takže jakékoliv zjednodušení vzorce (3), jakkoli lákavé, nelze obecně doporučit. Součinitel $\kappa^{[i]}$ přisuzuje celkovou intenzitu požáru jednotlivým stavům (viz Obr. 1), tj.

$$\lambda_f^{[i]} = \kappa^{[i]} \lambda_f, \quad \sum_{i=1}^{\bar{n}} \kappa^{[i]} = 1. \tag{4}$$

2. Model termo-mechanického poškození

Základem je Künzelův-Kiesslův a Bažantův-Thonguthaiův popis transportu tepla a vlhkosti spočívající na dvou bilančních vztazích pro transport hmotnosti (vlhkosti) a tepla. Výsledkem numerického řešení je rozdělení teplot a pórových tlaků vodní páry v čase a prostoru. Pro odprysk povrchové vrstvy betonu přijmeme konzervativní podmínku

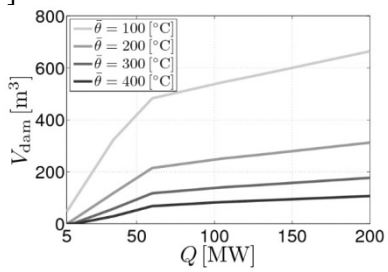
$$\phi p \geq f_t(\theta), \tag{5}$$

kde ϕ [-] je pórovitost.

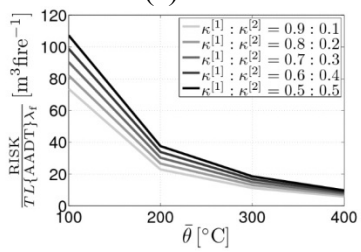
Výsledky

Pro ilustraci metodiky uvažujme jednosměrný silniční tunel se dvěma pruhy. Jako modelovou situaci předpokládejme homogenní dopravní proud, tvořený osmi PC a jedním TB v pruhu 1, a čtyřmi PC, jedním TB a jednou sériovou dvojicí TB v pruhu 2.

Ve vzorci (3) jsme škodu způsobenou konkrétním tepelným výkonem q_i vyjádřili objemem betonu $V_{dam}^{[i]}(q_i)$ [m^3], jednak ztraceného odpryskem a jednak znehodnoceného teplotou $\theta \geq \bar{\theta}$. (obr. 3) Pro určitost jsme zvolili tyto parametry: délka tunelu L = 2 [km], AADT = 17 000 [vozidel.den^{-1}], T = 365 [dnů] = 1 [rok], $\lambda_f = 30 \cdot 10^{-9}$ [požárů(vozokm)$^{-1}$]. Protože nejsou k dispozici data o rozdělení počtu požárů na skladby s jedním TB (součinitel $\kappa^{[1]}$) a se dvěma TB ($\kappa^{[2]}$), jsou na Obr. 3b při predikci rizika uvažovány všechny možné kombinace těchto součinitelů. Výsledkem je pak intervalový odhad rizika. Ze vzorce (3) a Obr. 3b tak vychází, že se pravděpodobná škoda pohybuje v rozsahu 19÷28 [$m^3 rok^{-1}$].



(a)



(b)

Obr. 3 (a) Objemy tunelového ostění o[illegible] odpryskem a znehodnoceného teplotou [illegible] $\theta \geq \bar{\theta}$, (b) náhodná škoda vzhledem k počtu požárních nehod.

Literatura

[1] SÝKORA, J., JARUŠKOVÁ, D., ŠEJNOHA, J., ŠEJNOHA, M. Fire risk analysis focused on damage of the tunnel lining, Fire Safety Journal, zasláno k recenznímu řízení, (2015).

[2] ŠEJNOHA, J., SÝKORA, J., JARUŠKOVÁ, D., NOVOTNÁ, E., ŠEJNOHA, M. Analýza rizika požáru v silničních tunelech. BETON-technologie, konstrukce, sanace, 2015, no. 6, v tisku.

[3] ASFiNAG, Wien, Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006-2012 (2013).

Tento výsledek byl vytvořen s finanční podporou programu Centra kompetence TA ČR, projekt č.TE01020168