SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE
Series B
The Jan Perner Transport Faculty
3 (1997)

MOŽNOSTI PODOBNOSTNÍ METODY STUDIA ADHEZE

Jaroslav ČÁP

Katedra dopravních prostředků

Modelový experimentální výzkum adheze patří k obvyklým formám jeho studia. Laboratorní výzkum na zmenšeném zařízení dovoluje nejen poměrně dobře udržovat parametry pokusu, ale i eliminovat těžko postihnutelné provozní vlivy. Navíc modelová zařízení jsou cenově přístupnější, zvláště pro rozsáhlejší postupy. Samozřejmě i při tomto náhradním způsobu sledujeme otázku obecnější platnosti získaných výsledků. To je možné jen s využitím teorie fyzikální podobnosti.

Děje, které jsou popsány stejnými bezrozměrnými argumenty, nazýváme fyzikálně podobné. Z požadavku shodnosti bezrozměrných argumentů plynou podmínky podobnosti, vyjádřené modelovými měřítky. Pokud model splňuje stanovené podmínky, jsou zákonitosti zjištěné na modelu exaktní a platné pro dílo. Určitý problém je stanovení všech veličin ovlivňujících děj. Často je ani neznáme, zvláště u složitějších případů a soustřeďujeme se jen na základní vlivy. Tím ovšem připouštíme určité odlišnosti vztahu model / dílo, což při vyhodnocování musíme respektovat.

Řadu veličin modelově měnit nelze (např. tíhové zrychlení g) a jsme nuceni použít jiných náhradních prostředků. Obdobně nelze (podle výsledků modelových měřítek) měnit modul pružnosti E a Poissonovo číslo ν, protože je nutné zjišťovat určité parametry reálných vlastností, v našem případě adhezní a třecí vlastnosti kovových materiálů. Další otázkou je i ekonomie stavby modelu; zda je bezpodmínečně nutné zachovávat všechny modelové vlastnosti, protože se zvyšuje cena modelového zařízení a efektivita této metody se snižuje.

Je tedy třeba nalézt určitý kompromis a soustředit se na hlavní a uvážené zvolené požadavky. To splňují tzv. přibližné modely. V přibližném modelu musí být ovšem stanoveny hlavní parametry tak, aby zjištěné poznatky - byť částečně odlišné od chování díla - byly věrohodné a obecněji platné. Pokusíme se nyní nastínit požadavky takového zařízení.

Pro stanovení modelových měřítek vybereme tyto základní veličiny:

Veličina	symbol	rozměr
délka, obecně reprezentovaná poloměrem kola	r	m
plocha dotykové plošky	U	m^2
rychlost :		
- obvodová	u	ms^{-1}
- postupná	v	ms^{-1}
- skluzová	w	ms^{-1}
- úhlová	ω	s^{-1}
síla:		
- normálová	Q	$kgms^{-2}$
- tečná	T	$kgms^{-2}$
parametry materiálu		
- měrná hmotnost	ρ'	kgm^{-3}
- modul pružnosti	E	$kgm^{-1}s^{-2}$
- Poissonovo číslo	ν	1
napětí :		
- normálové	σ	$kgm^{-1}s^{-2}$
- tečné	τ	$kgm^{-1}s^{-2}$
úhel šikmého chodu kola	α	1
Čas	t	s
poměrné parametry:		
- součinitel adheze	μ	1
- relativní skluz	s	1

Z veličin se stejným rozměrem využijeme vždy jednu, dále lze vyloučit bezrozměrné parametry. Zůstávají tedy veličiny r, U, v, ω, Q, ρ', E, t. Další veličiny lze vyřadit zavedením simplexů $\frac{r^2}{U}$, $t\,.\,\omega$, $\frac{v}{r.\omega}$,

takže zbývají r, Q, ω, ρ', E, ze kterých vytvoříme bezrozměrné argumenty π_i pro něž platí

$$\pi_i = m^0\,kg^0\,s^0 = [\,1\,], \tag{1}$$

což lze ve smyslu rozměrné analýzy symbolicky zapsat

$$\begin{array}{c|c} & \begin{array}{ccccc} r & Q & \omega & \rho' & E \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} m \\ kg \\ s \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -3 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

Soustavu tří rovnic s pěti neznámými řešíme alternativní volbou α_4 = 0; α_5 = 1, resp. α_4 = 1; α_5 = 0 a získáme bezrozměrné argumenty

$$\pi_1 = \frac{r^2 E}{Q} = [1] \tag{1a}$$

$$\pi_2 = \frac{r\omega^2 \rho'}{Q} = [1] \tag{1b}$$

k nimž přiřadíme výše uvedené simplexy

$$\pi_3 = \frac{r^2}{U} \tag{1c}$$

$$\pi_4 = t \cdot \omega \tag{1d}$$

$$\pi_5 = \frac{\mathrm{v}}{r \cdot \omega} \tag{1e}$$

Z argumentů stanovíme modelová měřítka, protože pro vztah dílo - model platí

$$\pi_{i\,díla} = \pi_{i\,\mathrm{mod}\,elu}\,, \tag{2}$$

a pro modelové měřítko veličiny i platí

$$\lambda_i = \frac{i_m}{i_d}\,, \tag{3}$$

kde i_m je hodnota veličiny na model
i_d je hodnota veličiny na díle.

Základním měřítkem zvolíme měřítko délek, tedy

$$\lambda_r = \frac{r_m}{r_d}\,. \tag{4}$$

Další měřítka stanovíme z bezrozměrných argumentů. Přitom je třeba si uvědomit, že zařízení je navrženo jako přibližný model. Vysvětlení plyne z (1b), kdy platí

$$\lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_{r^2}}\sqrt{\frac{\lambda_Q}{\lambda_{\rho'}}}\,. \tag{5}$$

Použijeme-li obecně platný vztah $\lambda_E = \lambda_Q / \lambda_r^2$ a dosadíme do (5), dostáváme

$$\lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_r}\sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_{\rho'}}}\,, \tag{6}$$

z kterého je zřejmé, že pro úplný fyzikální model by muselo být splněno

$$\lambda_\omega \cdot \lambda_r \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{\rho'}}{\lambda_E}} = 1\,. \tag{7}$$

Toho by se dalo dosáhnout pouze použitím specifického modelového materiálu, kde $E_m \neq E_d$ resp. $\rho'_m \neq \rho'_d$ a tomu by musela být přizpůsobena volba měřítek. V našem případě jsou však rozhodující adhezní a třecí vlastnosti reálně používaných materiálů na obručích kol i na kolejích. Proto i na modelovém zařízení užijeme kovové materiály, a tedy platí

$$E_m = E_d \qquad \text{resp.} \qquad \rho'_m = \rho'_d,$$

a tedy i pro modelové měřítko materiálu platí

$$\lambda_E = \lambda_{\rho'} = 1. \tag{8}$$

Velikost dalších modelových měřítek stanovíme z argumentu π_1, π_2 a ze simplexů. Nejdůležitější modelová měřítka jsou:

- u silových účinků

$$\lambda_Q = \lambda_{r^2} \cdot \lambda_E = \lambda_{r^2} \tag{9}$$

- u úhlových rychlostí (frekvencí i otáček)

$$\lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_{r^2}}\sqrt{\frac{\lambda_Q}{\lambda_{\rho'}}} = \frac{1}{\lambda_r}\sqrt{\frac{E}{\lambda_{\rho'}}} = \frac{1}{\lambda_r} \tag{10}$$

Zjednodušeně bychom pak dále mohli konstatovat, že pro rychlost $\underline{v}$, relativní skluz $\underline{s}$, součinitel adheze μ, napětí σ a τ platí modelová měřítka

$$\lambda_v = \lambda_s = \lambda_\mu = \lambda_\sigma = \lambda_\tau = 1, \tag{11}$$

Musíme však ještě uvážit, že modelové „dvojkolí“ se nevalí po rovné kolejnici, ale po protikotouči o poloměru r_{2x}. Schematicky je situace pro skutečný a modelový případ v podélném směru naznačena na *obr. 1*.

Chceme-li respektovat jen podélný směr ovlivnění dotykové plošky,musíme uvažovat redukovaný poloměr kolo „dvojkolí“ r'_m podle vztahu

$$\frac{1}{r'_m} = \frac{1}{r_{1xm}} + \frac{1}{r_{2xm}}, \tag{12}$$

a základní modelové měřítko délek (4) získá hodnotu

$$\lambda_{r'} = \frac{r'_m}{r_d}, \tag{13}$$

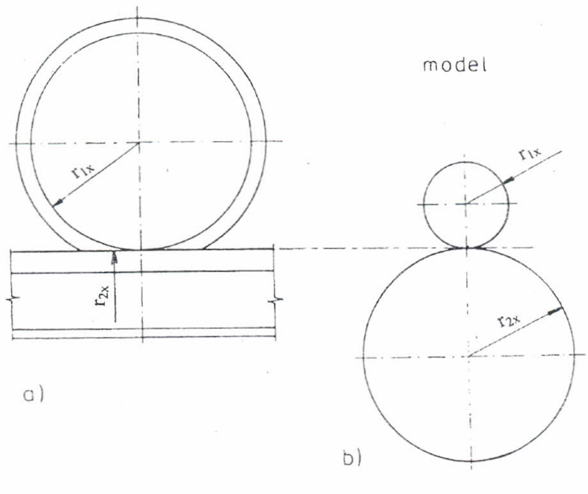
což se nutně odrazí i v dalších měřítkách, jak naznačuje v tabulce korekce podle (13).

Pokud bychom respektovali i příčný směr - jak naznačuje *obr. 2* - volbou r_{2ym}, je redukovaný poloměr kola dvojkolí

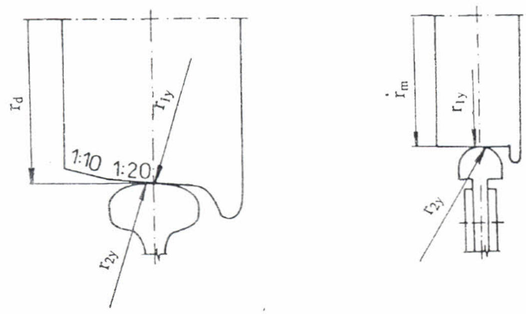
$$\frac{1}{r'_m} = \frac{1}{r_{1xm}} + \frac{1}{r_{2xm}} + \frac{1}{r_{2ym}} \tag{14}$$

a základní modelové měřítko získá hodnotu

$$\lambda_{r''} = \frac{r''_m}{r_d} \tag{15}$$



obr. č. 1



obr. č. 2

Z naznačeného je zřejmé, že přesné stanovení základního modelového měřítka je možné jen pro zcela konkrétní hodnoty, jak díla tak i modelu. Pro modelaci styku kola s obrysem UIC-ORE, by navíc bylo nutné respektovat proměnné křivosti r_{1yd}, v závislosti na posunutí y.

V obecném vyjádření kde respektujeme vztahy (4), (13), (15), resp. (11), platí:

Veličina		modelové měřítko
Poloměr	r	λ_{r^i}
Síla	Q	$\lambda_{r^{i2}}$
Úhlová rychlost	ω	$1/r_{ri}$
Rychlosti	v, u, w	1
Součinitel adheze	μ	1
Relativní skluz	s	1

Dodržíme-li tedy příslušné parametry, potom lze očekávat při $\lambda_\mu = \lambda_s = 1$poměrně věrné zobrazení charakteristik.

Závěrem se zmíníme o přesnosti měření. Vzhledem k tomu, že pro základní veličiny platí $\mu = T / Q$ resp. $s = \mu - v / v = w / v$, jsou obě veličiny získávány nepřímým měřením a platí pro relativní chyby těchto veličin

$$\delta_{r(\mu)} = \sqrt{\delta_r^2(T) + \delta_r^2(Q)} \qquad \text{resp.} \qquad \delta_r(s) = \sqrt{\delta_r^2(w) + \delta_r^2(v)} .$$

Předpokládáme-li u měření sil relativní chyby $\delta_r\ (T,Q)$ = 1,5 % ; pro stanovení skluzové rychlosti (bývá obtížnější) $\delta_r\ (w)$ = 2,0 % a pro určení postupné rychlosti $\delta_r(v)$ = 1,5 % lze očekávat výsledné $\delta_r(\mu)$ = 2,1 % resp. $\delta_r\ (s)$ = 2,5 %.

Získané poznatky platí ovšem i pro hodnocení literárních pramenů ze zkoušek na modelových zařízeních, kde bychom se měli zajímat jak byly - pokud vůbec - použity poznatky podobnostní metody.

Lektoroval: Ing. Karel Sellner, CSc.

Předloženo v lednu 1998.

Literatura

[1] Půst L.: Experimentální metody v dynamice - skripta ČVUT – 1991.

Resumé

MOŽNOSTI PODOBNOSTNÍ METODY STUDIA ADHEZE

Jaroslav ČÁP

Příspěvek naznačuje možnosti modelové podobnostní metody, při návrhu experimentálních zařízení pro výzkum adhezního mechanismu. Jako realizovatelný se jeví přibližný model, který však umožňuje věrné zobrazení adhezních charakteristik.

Summary

POSSIBILITIES OF SIMILITUDE METHOD OF ADHESION STUDY

Jaroslav ČÁP

The paper indicates the possibilities of model similitude method when projecting the experimental appliances for adhesion mechanism research. The approximate model, making the faithful representation of adhesion characteristics possible, appears to be feasible to realize.

Zusammenfassung

MÖGLICHKEITEN DES ÄHNLICHKEITSMETHODE BEI DER ADHÄSIONSFORSCHUNG.“

Jaroslav ČÁP

Der Beitrag gibt die Möglichkeiten der Modell - Ähnlichkeits - Methode beim Entwerfen der experimentellen Einrichtungen für die Untersuchung des Adhäsionsmechanismus an. Als realisierbar erscheint das approximative Modell. Ein solches Modell ermöglicht eine getreue Darstellung der Adhäsionscharakteristiken.