*Zvláštní otisk z časopisu Inženýrské stavby č. 6, roč. 1961 (12)*

**Inž. ZDENĚK P. BAŽANT, Dopravoprojekt Praha**

**DT 624.072.33**

# Výpočet rámových konstrukcí s pruty namáhanými šikmým ohybem

**Deformace průřezového prvku prutu namáhaného šikmým ohybem. Zavedení pojmů náhradní moment setrvačnosti pro šikmý ohyb a koeficient příčné deformace. Deformace prutu. Prostorové působení rámu s pruty šikmo ohýbanými. Řešení přesné a přibližné. Při přibližném se řeší účinky prostorové odděleně od rovinných a zjednodušeně. Výpočet šikmého sdruženého rámového mostu s vloženými klouby. Číselné výsledky konkrétního projektu.**

U šikmých rámových konstrukcí, vyskytujících se hlavně u mostů, jsou pilíře namáhány šikmým ohybem, což způsobuje příčná namáhání a prostorové působení celé konstrukce. Ze statického hlediska mohou šikmé rámové mosty působit dvojím způsobem. Je-li poměr rozpětí k šířce nosného průřezu malý (menší než 3 až 5), působí konstrukce jako plošná, tj. desková nebo roštová, a pro ohyb v příčném směru jako nosné stěny. Je-li zmíněný poměr velký (větší než 3 až 5), působí konstrukce v rovině i napříč roviny rámu jako prutová, a je tedy prutovým rámem, působícím prostorově i při zatížení v jeho rovině. Dále se budeme zabývat pouze tímto typem konstrukcí.

## Deformace prvku prutu namáhaného šikmým obybem

Všimněme si napřed deformace prvku délky $dz$ prutu podle obr. 1. Nechť osy $x, y$ leží v rovině průřezu a z nich $y$ leží též v rovině rámu a $x$ je na ní kolmá. Osy $x_0$, $y_0$ jsou hlavní osy setrvačnosti průřezu, od nichž jsou osy $x$, $y$ odkloněny o úhel $\alpha$. Na prvek prutu délky $dz$ nechť působí moment $M$ v rovině ($yz$) rámu, který způsobí vzájemné pootočení $d\varphi$ sousedních průřezů kolem neutrální osy $n$, sdružené k ose $y$, jež je odkloněna od $x_0$ o úhel $\beta$.

Pro výpočet deformací je nutno moment $M$ nahradit momenty $M \cos\alpha$ a $-M \sin\alpha$, otáčejícími kolem hlavních os setrvačnosti $x_0$ a $y_0$, které způsobují deformace pouze v rovinách svého působení. Pootočení $d\varphi$ lze pak nahradit pootočením sousedních průřezů kolem os $x_0$, $y_0$, jež se rovnají

$$d\varphi_{x0} = \frac{M}{EJ_{x0}} \cos\alpha \, dz, \quad d\varphi_{y0} = \frac{M}{EJ_{y0}} \sin\alpha \, dz$$

kde a $J_{x0}$, $J_{y0}$ značí hlavní momenty setrvačnosti, $E$ modul pružnosti.

Promítnutím vektoru ($d\varphi_{y0}$, $d\varphi_{x0}$) do směrů os $x$ a $y$ dostaneme, že celkové pootočení $d\varphi$ kolem neutrálné osy lze nahradit pootočeními sousedních průřezů $d\varphi_x$, $d\varphi_y$ kolem os $x, y$ odkloněných od hlavních os $x_0, y_0$ o úhel $\alpha$

$$d\varphi_x = \frac{M}{E}\left(\frac{\cos^2\alpha}{J_{x0}} + \frac{\sin^2\alpha}{J_{y0}}\right) dz,$$

$$d\varphi_y = \frac{M}{E}\left(\frac{1}{J_{y0}} - \frac{1}{J_{x0}}\right)\frac{\sin 2\alpha}{2}\, dz$$

Tyto výrazy můžeme též psát ve tvaru

$$d\varphi_x = \frac{M}{E}\frac{J_y}{J_{x0}J_{y0}}\, dz \tag{1}$$

$$d\varphi_y = \frac{M}{E}\frac{D_{xy}}{J_{x0}J_{y0}}\, dz \tag{2}$$

v nichž značí

$$J_y = J_{y0}\cos^2\alpha + J_{x0}\sin^2\alpha \tag{3}$$

moment setrvačnosti průřezu k ose $y$, ležící v rovině rámu, a

$$D_{xy} = \frac{1}{2}(J_{x0} - J_{y0})\sin 2\alpha \tag{4}$$

deviační moment průřezu k osám $x, y$.

Označme
$$J_a = \frac{J_{x0}\, J_{y0}}{J_y}, \tag{5}$$
Pak je

$$\boxed{d\varphi_x = \frac{M}{EJ_a}\, dz} \tag{6}$$

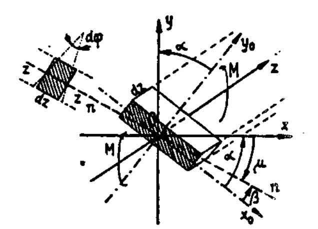
Hodnotu $J_a$ nazveme *náhradním momentem setrvačnosti* při šikmém ohybu, neboť je jím určena deformace prvku prutu v rovině momentu $M$, tj. zde v rovině rámu. Je to hodnota momentu setrvačnosti prutu přímo ohýbaného, který by měl v rovině působícího momentu stejné deformace jako prut šikmo ohýbaný. Jeho hodnota se liší, a to někdy velmi značně, od hodnoty momentu setrvačnosti k ose $x$ kolmé k rovině působícího momentu nebo od hodnoty momentu setrvačnosti ke sdružení neutrálné ose $n$. Tato záměna je často chybná, což vede u šikmých mostů k výsledkům zkresleným až o několik set procent.

Označíme-li dále

$$\mathrm{tg}\mu = \frac{D_{xy}}{J_y} \tag{7}$$

můžeme psát

$$\boxed{d\varphi_y = d\varphi_x \mathrm{tg}\mu} \tag{8}$$




Obr. 1. Šikmo ohýbaný průřezový prvek prutu

Hodnotu $\mathrm{tg}\mu$ nazveme *koeficientem příčné deformace*. Snadno se lze přesvědčit, že úhel $\mu$ značí úhel odklonu neutrálné osy $n$ průřezu od osy $x$ kolmé k rovině působícího momentu (obr. 1). Jako takový je možno vypočíst jej též ze vztahů

$$\mu = \beta - \alpha, \quad \mathrm{tg}\beta = \frac{J_{x0}}{J_{y0}}\mathrm{tg}\alpha \tag{7'}$$

## Deformace prutu šikmo ohýbaného

Všimněme si dále deformace celého prutu (obr. 2). Uvažujme přímý prut průřezu obecně proměnného, délky $l$, zatížený ohybovými momenty $M$ v rovině ($yz$). Nechť počáteční průřez má pootočení $\varphi_{x1}$, $\varphi_{y1}$ a průhyby $x_1$ $y_1$ a koncový průřez má pootočení $\varphi_{x2}$, $\varphi_{y2}$ a průhyby $x_2$, $y_2$. Potom vzájemná pootočení počátečního a koncového průřezu jsou[1].

[1]) U křivých prutů platí obdobné vztahy, avšak výpočet je komplikovanější tím, že úhel $\alpha$ vlivem zakřivení střednice je proměnný.

$$\left.\begin{aligned}\varphi_{x2}-\varphi_{x1} &= \int_0^l \frac{M}{E\mathcal{J}_a}\,dz\\ \varphi_{y2}-\varphi_{y1} &= \int_0^l \frac{M}{E\mathcal{J}_a}\,\mathrm{tg}\mu\,dz\end{aligned}\right\}\quad (9a)$$

$$\left.\begin{aligned}y_2-y_1 &= \int_0^l \frac{M}{E\mathcal{J}_a}(l-z)dz\\ x_2-x_1 &= \int_0^l \frac{M}{E\mathcal{J}_a}(l-z)\,\mathrm{tg}\mu dz\end{aligned}\right\}\quad (9b)$$

Je-li ve všech průřezech prutu hodnota $\mathrm{tg}\mu$ konstantní, tj. úhel $\alpha$ a poměr $\mathcal{J}_{yo}/\mathcal{J}_{xo}$ neměnné, což obvykle bývá, lze psát

$$\varphi_{y2}-\varphi_{y1}=(\varphi_{x2}-\varphi_{x1})\,\mathrm{tg}\mu \quad (10a)$$

$$x_2-x_1=(y_2-y_1)\,\mathrm{tg}\mu \quad (10b)$$

Dodejme ještě, že deformační práce $\pi$ ohybových momentů prutu šikmo ohýbaného je rovna

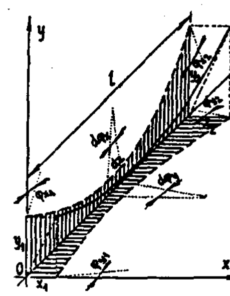
$$\pi=\frac{1}{2}\int_0^l \frac{M^2}{E\mathcal{J}_a}\,dz$$

## Prostorové působení rámu

Rovinná a rovinně zatížená rámová konstrukce s pruty namáhanými šikmým ohybem nepůsobí jako rovinná, nýbrž jako prostorová. Šikmo ohýbané pruty vyvolají příčné deformace všech prutů rámu, jež se projeví ohybovými momenty a posouvajícími silami v rovinách kolmých na rám a normálnými silami, a dále zkroucení prutů, jež se projeví kroutícími momenty. Vnější zatížení se pak přenáší nejen ohybovými momenty a posouvajícími silami v rovině rámu a normálnými silami, ale též kroutícími a ohybovými momenty a posouvajícími silami napříč rámu.

Na základě dříve uvedených vztahů lze provést *přesný výpočet* prostorového působení rámu. Nejnázornější je výpočet silovou metodou.[2]) Uvolníme tolik vazeb, tj. podpor, kloubů nebo průřezů, až konstrukce přejde v základní soustavu (staticky určitou nebo též neurčitou). Místo vazeb zavedeme staticky neurčité veličiny, jichž bude značně více, než kdyby rám působil jako rovinná konstrukce. Tak např. při uvolnění vetknutí je třeba zavést místo tří šest staticky neurčitých, a to ohybové momenty a posouvající síly v rovině rámu a napříč rámu, kroutící moment a normálnou sílu. Na základní soustavě dáme pak místo staticky neurčitých veličin působit jednotkovým silám a určíme jimi způsobené deformace ve smyslu všech staticky neurčitých, při jejichž výpočtu musíme zahrnout vliv příčných deformací prutů. Dostaneme tak koeficienty $\delta_{ik}$ silové metody. Z nich sestavíme pro staticky neurčité systém lineárních rovnic, jichž bude značně více než kdyby konstrukce působila jako rovinná.

Pro koeficienty $\delta_{ik}$ lze užitím principu virtuálných prací sestavit snadno obecné rovnice. Je vhodné a také vždy možno staticky neurčité veličiny zavést tak, že veličiny $X_r$ působí pouze v rovině rámu a zbývající veličiny $X_s$ pouze kolmo na rovinu rámu. Zatížení veličinami $X_r$ pak na základní staticky určité soustavě působí namáhání pouze v rovině rámu a zatížení veličinami $X_s$ pouze napříč rámu. Nechť na základní staticky určité soustavě způsobí zatížení veličinou $\overline{X_r}=1$ ohybové momenty $\overline{M_r}$ v rovině rámu, zatížení veličinou $\overline{X_s}=1$ ohybové momenty $\overline{M_s}$ napříč rámu a vnější zatížení v rovině rámu ohybové momenty $M$ v rovině rámu. Z velikosti virtuálné práce momentů $M_r$ resp. $M$ na složkách pootočení v rovině rámu od momentů $\overline{M_s}$ plyne, že deformace $\delta_{rs}$ od zatížení veličinou $\overline{X_r}=1$ ve smyslu veličiny $X_s$ se rovná



Obr. 2. Ohybová čára šikmo ohýbaného prutu a její složky

$$\delta_{rs}=\delta_{sr}=\int_O \overline{M_r}\,\overline{M_s}\,\mathrm{tg}\mu\,\frac{ds}{E\mathcal{J}_a} \quad (11a)$$

a deformace $\delta_s$ od vnějšího zatížení ve smyslu veličiny $X_s$

$$\delta_s=\int_O M\overline{M_s}\,\mathrm{tg}\mu\,\frac{ds}{E\mathcal{J}_a} \quad (11b)$$

Zde značí $\mathcal{J}_a$ náhradní momenty setrvačnosti v rovině rámu a $O$ integraci přes všechny pruty konstrukce. Hodnota $\mathrm{tg}\mu$ je kladná, mají-li momenty $\overline{M_s}$ a $M$ resp. $\overline{M_r}$ ke hlavní centrálné ose setrvačnosti s menším momentem setrvačnosti složky stejného smyslu. Též lze psát

$$\delta_{rs}=\int_O \overline{M_r}\,\overline{M_s}\,\frac{D_{xy}}{\mathcal{J}_{xo}\mathcal{J}_{yo}}\,ds$$

$$\delta_{sr}=\int_O M\overline{M_s}\,\frac{D_{xy}}{\mathcal{J}_{xo}\mathcal{J}_{yo}}\,ds$$

Ostatní koeficienty $\delta_{ik}$ určující vzájemný vliv dvou staticky neurčitých veličin, působících v rovině rámu nebo napříč rámu, se vypočtou podle běžných vzorců.

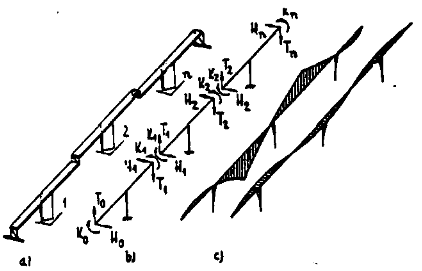
Vyjma některých jednoduchých případů, jako např. šikmý dvoukloubový rám, je přesný výpočet velmi pracný. Ve většině případů však je tuhost trámu v kroucení značně menší než tuhost pilíře v příčném ohybu. Příčné ohybové momenty jsou pak mnohokrát menší (požadujme aspoň 10 až 20krát) než ohybové momenty v rovině rámu a výsledný moment na pilíř působí tedy i v staticky neurčité konstrukci přibližně v rovině rámu. V těchto případech zcela postačí *přibližný výpočet*, který se skládá ze dvou fází:

1. Zanedbáme vliv prostorových příčných účinků na momenty a posouvající síly v rovině rámu a počítáme rám jako *rovinný*, přičemž však u prutů šikmo ohýbaných dosazujeme jejich náhradní momenty setrvačnosti podle rovnice (6).

2. *Prostorové* účinky, tj. kroutící a ohybové momenty a posouvající síly napříč rámu, vypočteme pak odděleně na základě hodnot momentů a posouvajících sil v rovině rámu, vypočtených podle bodu 1 pro zatížení vyvozující největší účinky. Toto zatížení nejlépe určíme a hodnoty podle bodu 1 vypočteme pomocí příčinkových čar příčných deformací, jež jsou ohybovými čarami pro příslušnou příčnou deformaci; bývá to obyčejně zatížení, které vyvozuje největší ohybový moment v pilíři. Přitom lze většinou počítat kroutící momenty odděleně od ohybových momentů a posouvajících sil napříč rámu. Podle povahy rámu též lze, jak ukážeme na příkladě, zjednodušit statický systém

[2]) Řešení některou deformační metodou je též možné, avšak nepřináší velkou výhodu, protože v prostoru není obyčejně přetvárná neurčitost o tolik menší než statická, jako je tomu v rovině.

už i na jedenkrát staticky neurčitý). Zvolíme jeho základní soustavu a pomocí koeficientů tg$\mu$ vypočteme pro namáhání od vnějšího zatížení podle bodu 1 a od jednotkových hodnot staticky neurčitých její příčné deformace (podle rov. (8)), z nichž pak silovou metodou vypočteme prostorové účinky.



Obr. 3. Šikmý sdružený rám s vloženými klouby
a) statický systém; b) základní soustava; c) svislá a vodorovná složka ohybové čáry při zatížení lichých polí

Přitom zde musí být splněna přibližným výpočtem předpokládaná podmínka, že vypočtené příčné momenty v šikmo ohýbaných pilířích musí být nejméně 10 až 20krát menší než ohybové momenty v rovině rámu.

Prostorové účinky není třeba vůbec vyčíslovat pro málo šikmé mosty, u kterých koeficient příčné deformace pilířů je zhruba menší než 0,05 až 0,20. Nejnebezpečnějším prostorovým účinkem u mostů je kroucení trámu a případného kloubu v poli a vodorovná posouvající síla v kloubu. Velikost prostorových účinků roste s výškou pilíře a s jeho klesající tuhostí v ohybu. Je větší, je-li šikmo ohýbaný pilíř namáhán momentem stejného znaménka, jako je tomu u vetknutého rámu s vloženými posuvnými klouby v poli, než když je moment různého znaménka, jako je tomu u téhož rámu bez kloubů nebo částečně u dvoukloubového rámu.

## Šikmý sdružený rám s vloženými klouby

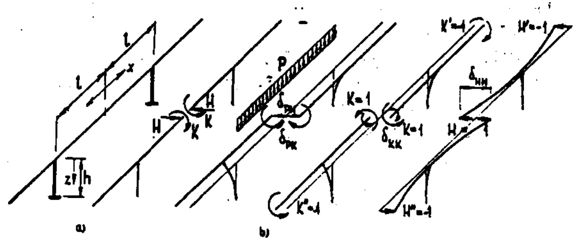
Pro názornost konkrétně uvažujme šikmý sdružený rám s vloženými klouby uprostřed polí, umožňujícími vodorovný posun a pootočení v rovině rámu a pootočení ve vodorovné rovině (stat. schéma na obr. 3a). Tento rám, jenž by v rovině byl $(n+1)$krát staticky neurčitý, je v prostoru $3(n+1)$-krát staticky neurčitý a téhož počtu rovnic bylo by třeba k jeho přesnému řešení. Základní soustavu zvolíme podle obr. 3b se staticky neurčitými $T_0, \ldots T_n$, $K_0, \ldots K_n$, $H_0 \ldots H_n$. Šikmý ohyb pilířů v rovině rámu vyvolá jejich ohyb napříč roviny rámu, z toho dále vznikne zkroucení a vodorovný ohyb trámu, tím pak zpětně zkroucení pilířů a další příčný ohyb atd.

Při přibližném výpočtu zvolíme pro výpočet kroutících momentů $K$ a vodorovných posouvajících sil $H$ ve vnitřním poli podle bodu 2 zjednodušenou základní soustavu tvořenou jedním polem při jediné neurčité $K$ nebo $H$. Pilíře jsou od svislého zatížení namáhány po celé výšce stejnými momenty, jež označíme $M_{p1}$. Snadno nahlédneme, že nejúčinnějším zatížením pro $K$ a $H$ je to, které vyvodí největší rozdíl ohybových momentů $M_{p1}$ a $M_{p2}$ v pilířích tohoto pole. Příčinkovou čáru $(M_{p2} - M_{p1})$ dostaneme jako rozdíl příčinkových čar $M_{p1}$ a $M_{p2}$ (např. obr. 6). Nejúčinnějším je zatížení buď sudých nebo lichých polí. Při tomto zatížení vznikají v sousedních polích $K$ a $H$ opačného znaménka (a u rámu s nekonečným počtem polí stejné absolutní hodnoty). Protože pilíře bývají v příčném ohybu a v kroucení značně tužší než trám v kroucení a v příčném ohybu, přenáší se $K$ a $H$ z trámu převážnou částí do pilíře a jen zanedbatelně do sousedního pole. Je proto možné pro výpočet $K$ a $H$ za statický systém uvažovat rám tvořený jediným polem s přilehlými konzolami o dvou staticky neurčitých $K$ a $H$ v kloubu tohoto pole, jejichž vzájemný vliv lze obyčejně zanedbat. Hodnotu $K$ nebo $H$ pak dostaneme řešením jediné lineární rovnice.

Nechť všechny pilíře mají stejné $J_a$ pro ohyb v rovině rámu a $J_a$ pro ohyb napříč rámu, stejnou výšku $h$ a stejný tg$\mu$ a nechť konzoly vnitřních polí mají stejnou délku $l$ a stejné momenty setrvačnosti $J$ pro ohyb ve svislém směru, $J'$ ve vodorovném a $J_k$ v kroucení. Označme dále $x$ vzdálenost průřezu konzoly od kloubu a $z$ vzdálenost průřezu pilíře od jeho hlavy a $G$ modul pružnosti ve smyku (obr. 4a). Na staticky neurčité soustavě uvolníme jedinou staticky neurčitou $K$ nebo $H$ (obr. 4a) a vypočteme deformace $\delta_{pK}$ nebo $\delta_{pH}$ od svislého zatížení ve smyslu této veličiny (obr. 4b). Při použití vzorců (6) a (8) obdržíme

$$\left.\begin{aligned} \delta_{pK} &= 2\,\mathrm{tg}\mu \int_0^h \frac{M_{p2} - M_{p1}}{EJ_a}\, dz, \\ \delta_{pH} &= 2\,\mathrm{tg}\mu \int_0^h \frac{M_{p2} - M_{p1}}{EJ_a}\, z\, dz \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Potom zavedeme zatížení $K = 1$ nebo $H = 1$, přičemž vzhledem k tomu, že v sousedních polích vznikají $K$ a $H$



Obr. 4. Statický systém pro výpočet prostorových účinků

opačného znaménka, dáme působit na konzoly sousedních polí kroutícímu momentu $-1$ nebo vodorovné posouvající síle $-1$. Od tohoto zatížení určíme pootočení $\delta_{KK}$ nebo posunutí $\delta_{HH}$ (obr. 4 b)

$$\left.\begin{aligned} \delta_{KK} &= 2\int_0^l \frac{dx}{GJ_k} + 4\int_0^h \frac{dz}{EJ_a}, \\ \delta_{HH} &= 2\int_0^l \frac{x^2}{EJ'}\, dx + 4\int_0^h \frac{z^2}{EJ'_a}\, dz \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Odtud pak vypočteme

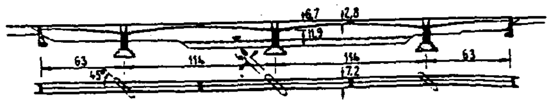
$$K \doteq \frac{\delta_{pK}}{\delta_{KK}}, \quad H \doteq \frac{\delta_{pH}}{\delta_{HH}} \tag{14}$$

Zanedbali jsme přitom vzájemný vliv $K$ a $H$, protože deformace od $K$ a $H$ jsou obyčejně proti $\delta_{pK}$ nebo $\delta_{pH}$ zanedbatelně malé.

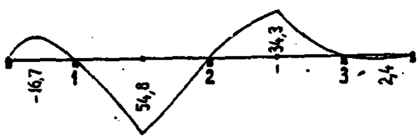
Jestliže se však tuhost trámu v kroucení příliš neliší od tuhosti pilíře v příčném ohybu, byla by chyba tohoto přibližného výpočtu příliš velká a je třeba počítat obdobným způsobem na základní soustavě tvořené více poli. Není-li však splněna podmínka přibližného výpočtu, že $2K < 1/10$ až $1/20$ $M_p$ v rovině rámu, je nutno provést přesný výpočet.

*Příklad*

Pro představu o možné velikosti prostorových účinků uveďme hodnoty, které byly získány při projektu velmi šikmého železničního dvoukolejného mostu přes Vltavu v Praze. Bylo zjištěno, že prostorové účinky od šikmosti jsou v některých místech velmi značné, někde i rozhodující a jinde zase zanedbatelné.



Obr. 5. Podélný a vodorovný řez mostu



Obr. 6. Příčinková čára ($M_{p2} - M_{p1}$), rozměr m

Most byl navržen jako sdružený rám s vloženými klouby z předpjatého betonu, betonovaný letmo (obr. 5). Most má čtyři pole rozpětí 63,0 + 114,0 + 114,0 + 63,0 m. Průřez konzol je dvojitá komůrka, jež má u pilíře výšku 6,7 m a moment setrvačnosti 105 $m^4$ a u kloubu 2,8 m resp. 7,5 $m^4$. Pilíře, jejichž šikmost k podélné ose mostu je 45°, mají tloušťku 4,0 m délku 19,65 m a výšku 11,5 m. Jejich hlavní momenty setrvačnosti jsou 91 $m^4$ a 2046 $m^4$, takže je náhradní moment setrvačnosti $J_a = 175$ $m^4$ a koeficient příčné deformace $\mathrm{tg}\mu = 0{,}915$. Kdybychom za moment setrvačnosti pilíře vzali moment k ose kolmé na osu mostu, který je 1069 $m^4$, nebo moment ke sdružené neutrálné ose, jenž je 100 $m^4$, jak se často nesprávně dělá, dopustili bychom se hrubé chyby. Jak je vidět, zvyšuje šikmost mostu tuhost pilířů v rovině rámu.

Staticky byl most vypočítán přibližným způsobem podle předešlého odstavce. Prostorové účinky byly počítány pomocí příčinkové čáry ($M_{p2} - M_{p1}$) (obr. 6). Byly získány tyto hodnoty:

Označení: index ($C$)... centrické zatížení vlaky na obou kolejích, index ($E$) ... od excentricity zatížení vlakem na jedné koleji, $K$ ... kroutící moment, $H$ ... vodorovná posouvající síla, $T$ ... svislá posouvající síla.

V konzole vnitřního pole: $K^{(C)} = +470$ tm nebo $-350$ tm, $H^{(C)} = +20$ t nebo $-15$ t, u kloubu $K^{(E)} = \pm 300$ tm, v líci pilíře $K^{(E)} = \pm 1300$ tm, $M = -90000$ tm, $M^{(C)}_{vod.\,H} = 1100$ tm ($\delta^{(C)}_{bet.} = \pm 3{,}0$ kg/cm²)
V konzole krajního pole: $K^{(C)} = -300$ tm nebo $+100$ tm, $H^{(C)} = -13$ t nebo $+4$ t, u kloubu nad opěrou $K^{(E)} = \pm 670$ tm, v líci pilíře $K^{(E)} = \pm 970$ tm

Smyková napětí $\tau$ stěny konzoly vnitřního pole:

| | | u kloubu | v místě největ. hlavního tahu | v líci pilíře |
|---|---|---|---|---|
| $\tau_T^{(C)}$ | od svislé pos. síly | 14 kg/cm² | 22 kg/cm² | 12 kg/cm² |
| $\tau_K^{(C)}$ | od kroucení | 4,5 | 3,2 | 0,8 |
| $\tau_K^{(E)}$ | | 3,0 | 3,3 | 2,0 |
| $\tau$ celkové nejnebezpečnější | | 18 | 25 | 14 |

Svislé zatížení $P$ krajního ložiska při 1,5násobném pohyblivém zatížení: v kloubu vnitřního pole $P_T^{(C)} = +47$ t nebo $-57$ t, $P_K^{(C)} = \pm 44$ t, nad opěrou při záporné reakci $P_T^{(C)} = +10$ t, $P_K^{(C)} = +42$ t.

Ohybový moment ve středním pilíři a základu: napříč rámu $M_p^{(C)} = \pm 820$ tm, $M_p^{(E)} = \pm 2600$ tm, v rovině rámu $M_p^{(C)} = \pm 38\,000$ tm.

Možnost přibližného výpočtu potvrdilo to, že vyšlo $2K^{(C)} = 1/40\, M_p^{(C)}$.

Z porovnání vidíme, že účinky prostorového působení vlivem šikmosti mostu jsou rozhodující pro bezpečnost proti nadzdvižení z ložisek nad opěrou, kde činí 420 % rovinných. V kloubu vnitřního pole jsou též důležité, neboť činí 94 % rovinných. Významně se dále podílejí na hlavním napětí v tahu. V průřezu u kloubu, kde je stěna nejslabší, zvyšují smykové napětí o 32 %, v průřezu s největším hlavním tahem o 15 %. Důležitá je též vodorovná posouvající síla kloubu, zejména při odlehčených ložiskách. Pro normálná napětí betonu konzoly má prostorové působení malý vliv (2 %) a stejně tak pro namáhání pilíře a základové spáry.

Z uvedených výsledků plyne, že u velmi šikmého rámového mostu není možno účinky prostorového působení vlivem šikmosti zanedbat, což platí zejména pro výpočet smykových napětí a pro dimenzování ložisek a jejich bezpečnost proti nadzdvižení.

Závěrem lze říci, že u šikmých rámových konstrukcí je správné u šikmo ohýbaných prutů počítat s náhradními momenty setrvačnosti pro šikmý ohyb a při velkých šikmostech že je nutno počítat též účinky prostorového působení vlivem šikmosti.

*Vytiskla Polygrafia, n. p., závod 01 v Praze*