EAN '94

32th Conference of Experimental Stress Analysis
32. konference o experimentální analýze napětí
30. 5. - 2. 6. 1994 VŠST Liberec Czech Republic

DETERMINATION OF AXIAL FORCE OF STAYES AND EXTERNAL CABLES OF BRIDGES

URČENÍ OSOVÉ SÍLY ZÁVĚSŮ A VNĚJŠÍCH KABELŮ MOSTŮ

Baťa M., Bílý V., Plachý V., Polák M., Sýkora J.

Before the introduction of cable-stayed bridge to service there is necessary to check forces in cables of stayes after the last rectification of the bridge. The external cables are very important elements of bridges built by segmental technology. This problem is also important at periodical inspection of bridges in servis life. The paper discusses the theoretical relations for determination of axial forces of cables and the errors of results. There is also described the measurements on cables, used measuring line and processing of data. At the end there are compared obtained results.

1.ÚVOD

V poslední době byly v ČR postaveny tři zavěšené mosty (přes Labe v Poděbradech, přes Jordán v Táboře a přes nákladové nádraží Vršovice v Praze). U těchto mostů je důležitá kontrola osové síly v kabelech jejich závěsů nejen před uvedením do provozu po poslední rektifikaci ale i během jejich provozu. Obdobné sestavení kabelů z určitého počtu nízkopopouštěných lan Ø Lp 15,5-1800 vedenými a zainjektovanými v trubkách (obr.1) je i u vnějších kabelů předpjatých mostů postavených segmentovou metodou (mosty v Kolíně, Mělníku a v Klabavě, tramvajový most Palmovka v Praze). I při jejich uvádění do provozu je třeba získat výchozí údaje pro porovnání osové síly ve vnějších kabelech po určité době provozu mostu (periodické prohlídky podle ČSN 73 6221).

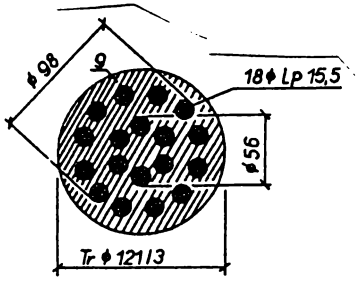
2.VÝPOČET OSOVÉ SÍLY V KABELECH

Při výpočtu osové síly v kabelech lze postupovat dvojím způsobem.Pro osovou sílu v kabelu uvažovaném jako struna platí [1]

$$N^{s}_{(j)} = \mu\left(\frac{2f_{(j)}l}{j}\right)^2 , \qquad (2.1)$$

a jako prut zatížený osovou silou

$$N^{p}_{(j)} = \mu\left(\frac{2f_{(j)}l}{j}\right)^2 - \left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 EJ = N^{s}_{(j)} - \left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 EJ , \qquad (2.2)$$



Obr.1

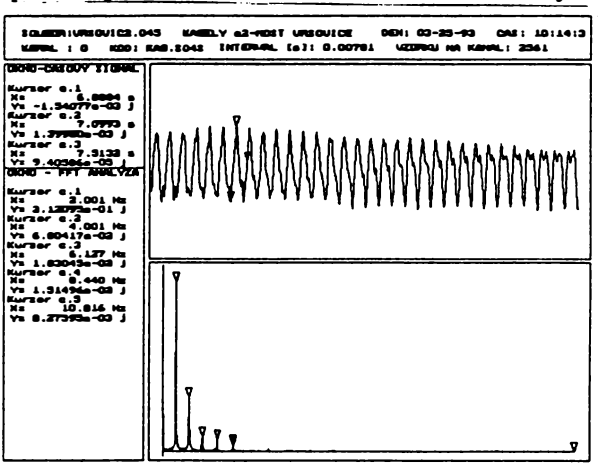
kde μ je hmotnost na metr délky kabelu, $f_{(j)}$ je j–tá vlastní frekvence kabelu, l je délka kabelu a EJ je ohybová tuhost kabelu.

3. POSTUP MĚŘENÍ

Kabel se vybudí rázem nebo periodickou silou a sleduje se jeho volné kmitání. Na kabel jsou pomocí objímky upevněny dva snímače zrychlení B12/200 Hottinger Baldwin případně snímače dráhy IWT 302 ve směru roviny kabelu a druhý ve směru kolmém na rovinu kabelu. Snímače jsou napojeny na měřicí linku řízenou počítačem IBM PC/AT–3. Měřené veličiny se nahrávají po digitalizaci v A/D převodníku DYNALOG 2000 do řídícího počítače. Předběžné zpracování rychlou Fourierovou transformací (FFT) se děje analyzátorem ONO SOKKI CF–930 v režimu on line.

4.VYHODNOCENÍ

K výpočtu osové síly podle rovnice (2.1) nebo (2.2) bylo v laboratoři vyhodnoceno prvních pět frekvencí vlastního kmitání kabelu jako průměr ze šesti hodnot získaných z různých úseků časových průběhů naměřených signálů. Celý proces je založen na FFT (obr.2) a probíhá v řídícím počítači podle zpracovaného software. Příklad výsledků na zavěšeném mostě ve Vršovicích je v tab. 1 a 2. K hodnocení výsledků je třeba provést rozbor možných chyb. Rozhodujícími parametry jsou ohybová tuhost, hmotnost a délka kabelu. Vedle toho má samozřejmě velký vliv na přesnost stanovení osové síly přesnost vyhodnocení vlastních frekvencí kabelu. Především je potřeba velmi pečlivě stanovit hodnoty ohybové tuhosti EJ a hmotnosti μ kabelu. Při výpočtu EJ je třeba průřez kabelu uvažovat jako ideální. Hmotnost kabelu je nejlépe určit přesným vážením vzorku. Vliv chyby určení hmotnosti $\Delta\mu$ a ohybové tuhosti ΔEJ na velikost osové síly kabelu $\Delta N_{(j)}$ je dán vztahy



Obr.2

$$\Delta N_{(j)} = \Delta\mu\left(\frac{2f_{(j)}l}{j}\right)^2 \quad , \qquad (4.1)$$

Strunová teorie

TABULKA

Kód kabelu	Hmotnost kabelu μ (kgm^{-1})	Délka kabelu l (m)	Osové síly v kabelu při j-té frekvenci (kN)					Průměr osové síly $N_{(j)}$ pro j=2 až 5 (kN)
			$N_{(1)}$	$N_{(2)}$	$N_{(3)}$	$N_{(4)}$	$N_{(5)}$	
S14S	84,9	86,06	2515	2754	2729	2675	2773	2733
S14J	84,9	86,06	2515	2839	2729	2839	2773	2795
S13S	84,9	81,59	2861	2783	2704	2742	2861	2773
S13J	84,9	81,59	2861	2861	2704	2821	2861	2812
S12S	84,9	77,16	2559	2851	2752	2776	2851	2808
S12J	84,9	77,16	2559	2559	2751	2667	2732	2677
S11S	84,9	72,73	2806	2600	2622	2668	2695	2646
S11J	84,9	72,73	2086	2735	2667	2702	2806	2728
S10S	84,9	68,27	2473	2473	2640	2598	2700	2603
S10J	84,9	68,27	2473	2350	2431	2473	2573	2457
S9S	84,9	63,87	2619	2386	2462	2560	2595	2501
S9J	84,9	63,87	2619	2619	2683	2560	2715	2644
S8S	84,9	59,50	2172	2071	2137	2170	2273	2163
S8J	84,9	59,50	2273	2222	2273	2324	2420	2310
S7S	84,9	55,14	2323	2323	2323	2421	2561	2407
S7J	84,9	55,14	2228	2133	2323	2396	2500	2338
S6S	58,18	50,75	1349	1239	1275	1320	1429	1316
S6J	58,18	50,75	1239	1239	1239	1349	1463	1336
S5S	79,78	46,45	2109	1961	2184	2243	2341	2157
S5J	79,78	46,45	2109	1961	2109	2243	2453	2192
S4S	79,78	42,22	2275	2275	2347	2512	2690	2456
S4J	79,78	42,22	2275	2275	2444	2569	2753	2510
S3S	79,78	38,00	1843	1814	1940	2142	2398	2074
S3J	79,78	38,00	1843	1960	2081	2268	2544	2213
S2S	79,78	33,88	2066	2176	2385	2585	2859	2501
S2J	79,78	33,88	2120	2251	2405	2646	2949	2563
S1S	79,78	29,93	1787	1854	2162	2449	2781	2309
S1J	79,78	29,93	1743	1854	3091	2415	2758	2530

Tab.1

Prutová teorie

TABULKA

Kód kabelu	Hmotnost kabelu μ (kgm^{-1})	Délka kabelu l (m)	Ohybová tuhost kabelu EJ (Pam^4)	Osové síly v kabelu při j-té frekvenci (kN)					Průměr osové síly $N_{(j)}$ (kN)	Chyba měření osové síly (kN)
				$N_{(1)}$	$N_{(2)}$	$N_{(3)}$	$N_{(4)}$	$N_{(5)}$		
S14S	84,9	86,06	3696800	2510	2735	2685	2596	2650	2667	134
S14J	84,9	86,06	3696800	2510	2820	2685	2761	2650	2729	134
S13S	84,9	81,59	3696800	2856	2761	2655	2655	2724	2699	129
S13J	84,9	81,59	3696800	2856	2833	2655	2733	2724	2738	129
S12S	84,9	77,16	3696800	2553	2827	2697	2678	2698	2691	121
S12J	84,9	77,16	3696800	2553	2514	2697	2569	2579	2595	121
S11S	84,9	72,73	3696800	2800	2572	2561	2558	2523	2554	112
S11J	84,9	72,73	3696800	2800	2700	2606	2592	2635	2635	112
S10S	84,9	68,27	3696800	2465	2445	2570	2473	2505	2498	104
S10J	84,9	68,27	3696800	2465	2319	2361	2348	2377	2351	104
S9S	84,9	63,87	3696800	2610	2351	2382	2417	2372	2381	96
S9J	84,9	63,87	3696800	2610	2583	2539	2417	2492	2508	96
S8S	84,9	59,50	3696800	2161	2030	2045	2006	2016	2024	83
S8J	84,9	59,50	3696800	2263	2181	2180	2160	2163	2171	83
S7S	84,9	55,14	3696800	2311	2275	2215	2229	2262	2245	82
S7J	84,9	55,14	3696800	2216	2086	2215	2205	2201	2177	82
S6S	58,18	50,75	1623300	1342	1214	1219	1221	1273	1232	68
S6J	58,18	50,75	1623300	1233	1214	1257	1249	1308	1252	68
S5S	79,78	46,45	3442800	2093	1898	1942	1991	1947	1945	64
S5J	79,78	46,45	3442800	2093	1898	1967	1991	2059	2006	64
S4S	79,78	42,22	3442800	2257	2199	2176	2207	2214	2199	63
S4J	79,78	42,22	3442800	2256	2199	2273	2264	2277	2253	63
S3S	79,78	38,00	3442800	1820	1721	1729	1766	1810	1757	53
S3J	79,78	38,00	3442800	1820	1866	1869	1892	1957	1896	53
S2S	79,78	33,88	3442800	2037	2058	2119	2111	2119	2102	51
S2J	79,78	33,88	3442800	2091	2133	2139	2172	2209	2163	51
S1S	79,78	29,93	3442800	1749	1703	1821	1833	1832	1797	45
S1J	79,78	29,93	3442800	1705	1703	1788	1808	1810	1777	45

Tab.2

$$\Delta N_{(j)} = -\Delta EJ\left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 \quad , \tag{4.2}$$

Délka kabelu se ve výsledcích projeví v podstatě dvakrát. Jednak je to přesné určení délky kabelu. Závažnější však je rozhodnutí o použití strunové nebo prutové teorie k určení osové síly. Bylo stanoveno kriterium

$$l_{MIN} = j\sqrt[4]{\frac{\pi^2}{4}\cdot\frac{EJ}{\mu.f_{(j)}^2}\cdot\frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon}} \quad , \tag{4.3}$$

$$\text{při} \quad \varepsilon = \frac{n}{100} \quad , \tag{4.4}$$

kde n je zvolená přípustná chyba v určení osové síly udaná v procentech.Při délce kabelu menší než l_{MIN} se doporučuje použít prutovou teorii. Chyba stanovení vlastní frekvence je zejména závislá na frekvenčním rozsahu okna FFT analýzy a na počtu vzorků časového záznamu, ze kterého je FFT analýza provedena. Chybu stanovení osové síly $\Delta N_{(j)}$ v závislosti na chybě určení délky závěsu Δl a chybě stanovení frekvence vlastního kmitání Δf lze vyjádřit vzorcem

$$\Delta N_{(j)} = \mu\frac{4l^2}{j^2}\left(2f_{(j)}.\Delta f + \Delta f^2\right) + \mu\frac{4f_{(j)}^2}{j^2}\left(2l.\Delta l + \Delta l^2\right) + \left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 EJ\frac{2\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l^2}{l^2}}{1 + 2\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l^2}{l^2}} + \mu\frac{4\Delta f_{(j)}^2}{j^2}\Delta l^2 . \tag{4.5}$$

Z rovnice (4.5) vyplývá, že přesnější výsledek se získá jako průměr osových sil určených z vyšších vlastních frekvencí s vyloučením první vlastní frekvence. Pro první vlastní frekvenci chyba osové síly (4.5) je nejvyšší. Podle zkušeností může dosáhnout i 30%.

5.ZÁVĚR

V článku je zhodnocen způsob určení osové síly v kabelech závěsů a vnějších kabelech mostů. Metodu lze doporučit jako součást diagnostiky v rámci systému hospodaření s mosty.

LITERATURA

[1] Baťa, M.– Plachý, V.–Trávníček, F.: Dynamika stavebních konstrukcí. Praha, SNTL/ALFA 1987.

[2] Baťa, M. – Plachý, V.– Sýkora, J.– Brůna, M.– Bílý,V.: Měření na závěsech mostu přes Labe u Poděbrad. Praha, FSv ČVUT 1991.

[3] Baťa, M. – Sýkora, J.– Bílý,V.– Polák, M.: Měření sil v kabelech závěsů mostu ve Vršovicích. Praha, FSv ČVUT 1993.

[4] Baťa, M. – Sýkora, J.– Bílý,V.– Polák, M.: Tramvajový most Palmovka, volné kabely. Praha, FSv ČVUT 1993.

Miloslav Baťa, Prof., Ing., DrSc. – Václav Plachý, Prof., Ing., DrSc. – Jiří Sýkora, Doc., Ing., CSc. – Vladimír Bílý, Ing. – Michal Polák, Ing.,

Fakulta stavební ČVUT Praha, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká Republika,

tel.++42-2-3324476, fax ++42-2-24310774, e-mail: vladimir@aix.fsv.cvut.cz