



~~c. 10404~~



nr. 645

2 Rezultaty pomiarów mostu żelaznego o kracie złożonej przy pomocy przyrządów Manet-Rabut'a.

1
Podali

Stefan Bryła i Alfons Chmielowiec.

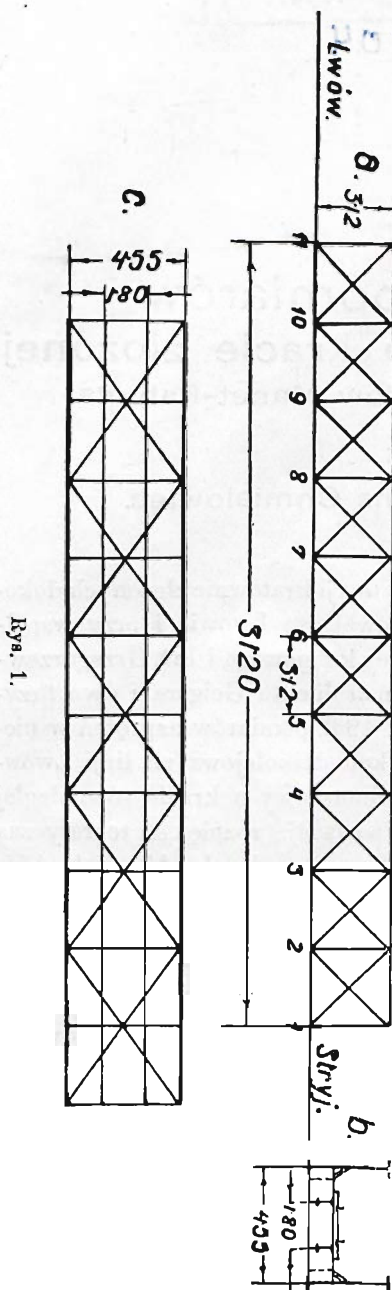
Celem sprawdzenia przybliżonej teorii kratownicy złożonych dokonano za zezwoleniem Dyrekcji Kolejowej we Lwowie i przy współudziale pp. Inż. Gustawa Jagiełło, radcy kolejowego i Inż. Grzegorzewskiego, przy pomocy samopiszącego instrumentu Geigera i dwu przyrządów Manet-Rabut'a, w dniu 31. VI. 1932 pomiarów naprężeń w niektórych prętach mostu na Dniestrze koło Mikołajowa na linii Lwów-Stryj w km 48.170. Jest to most jednotorowy o kracie równoległej złożonej (rys. 1). Dźwigary główne posiadają rozpiętość teoretyczną $31,20 = 10 \times 3,12$ m., wysokość 3,12, odstęp belek głównych 4,55, odstęp podłużnic 1,80 m. Most jest otwarty o pomoście dołem. Tężnik poziomy ma kratę złożoną, której przedział jest dwa razy większy niż przedział dźwigara głównego. Podłużnica jest blachownicą złożoną ze ścianki 440×10 , 4 kątownek $70 \cdot 70 \cdot 8$ i nakładki górnej 238×8 . Pomiedzy kątowniki a ściankę wstawiono płaskowniki 75×8 . Poprzecznicą składa się ze ścianki 765×10 i 4 kątownek $100 \cdot 100 \cdot 12$.

Pociągu próbnego (lokomotywa T W 11 z tendrem i 1 wagon) dostarczyła Dyrekcja. Poniżej opisano pomiary przy pomocy instrumentów Manet-Rabut'a.

Instrument Manet-Rabut'a pozwala zmierzyć wydłużenie lub skrócenie pręta pomiędzy dwoma punktami tegoż, odległymi o $l=20$ lub 50 cm, w sposób precyzyjny. Tarcza ze wskazówką podzielona jest na 100 części. Pełnemu obrotowi wskazówki odpowiada przy-

264-706-572

BG04A/002-40



Rys. 1.

rost długości $\frac{1}{2}$ mm, zatem przesunięciu wskazówki o jedną kreskę odpowiada wydłużenie

$$\delta l = \frac{1}{200} \text{ mm}$$

Dla stali można przyjąć moduł Younga $E = 2000000 \text{ kg/cm}^2$, Ponieważ $\delta l : l = \sigma : E$, to, jeżeli $l = 50 \text{ cm} = 500 \text{ mm}$, naprężenie odpowiadające przesunięciu wskazówki o jedną kreskę wynosi $\sigma = E \frac{\delta l}{l} = \frac{2000000}{500 \cdot 200} = 20 \text{ kg/cm}^2$ Jeżeli $E = 2150000 \text{ kg/cm}^2$, to $\sigma = 21,5 \text{ kg/cm}^2$. Zatem można przyjąć $E = 2,000,000$, a następnie naprężenie mnożyć przez $21,5 : 20 = 1,075$.

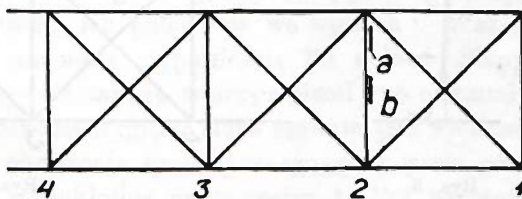
Tego jednak nie czyniono z dwu powodów: 1) Materiałem mostu jest stare żelazo spawalne a nie nowoczesna stal zlewna, 2) otwory na nity, zmniejszając średni przekrój, zwiększają nieco wydłużenie pręta, więc działają tak, jakby moduł E był nieco mniejszy. Z tego powodu np. Bażant¹ w obliczeniu naprężeń II-rzędnych przyjmuje stale $E = 2000000 \text{ kg/cm}^2$. Należy tu zauważyć, że naprężenie, obliczone w powyższy sposób z pomiaru, jest naprężeniem średnim na długości l pręta pomiędzy uchwytami przyrządu. Dokładne naprężenia miejscowe otrzymalibyśmy teoretycznie przy $l = 0$. Przez zmniejszanie jednak długości

¹ Bażant, Influence du système de triangulation sur les efforts secondaires, Prague 1923.

l zmniejsza się czułość instrumentu, a więc i dokładność pomiaru.

Poniżej okazemy, że błąd z powodu skończonej długości l można wyeliminować.

W jednym z pomiarów umocowano dwa takie same instrumenty, a i b na słupie 2 według rys. 2. Słup w przekroju poprzecznym ma kształt krzyża, którego dwa ramiona są w płaszczyźnie belki kratowej, dwa inne zaś w płaszczyźnie prostopadłej do belki. Oba instrumenty umieszczono na krawędzi jednego z dwu pierwszych ramion (w płaszczyźnie kratownicy), mianowicie od strony narożnika. Instrument a umieszczono możliwie jak najwyżej tak, iż górny uchwyt znajdował się tuż przy ścianie pasa górnego, t. j. w odległości 36 cm od górnego konturu (t. j. szczytu konstrukcji) belki. Instru-



Rys. 2.

ment b natomiast umieszczono w środku pręta, przyczem górny uchwyt był w odległości 130 cm od górnego konturu. Zatem odległość obu instrumentów teoretyczna wynosiła $h = 130 - 36 = 94$ cm.

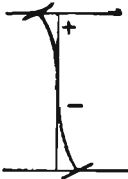
Tablica 1. podaje wyniki pomiarów.

TAB. 1.

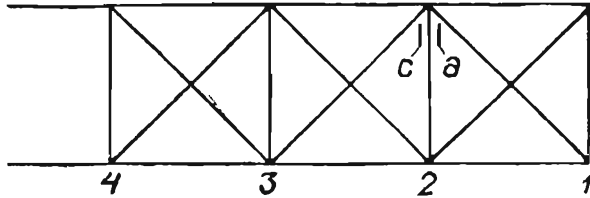
Instru- ment	Odczyty	Różnica odczytów	Naprężenie
a	50 82 50	+ 32	+ 640 kg/cm ²
b	50 47 50	- 3	- 60 „

W stanie nieobciążonym mostu wskazówki ustawiono na cyfrę 50. Podczas przejazdu pociągu próbnego z prędkością 5 km/godz zauważono największe odchylenie wskazówki przy odczycie 82 na instrumencie a , zaś przy odczycie 47 na instrumencie b . Zatem, odchyłka wynosiła w pierwszym wypadku +32, w drugim -3, czemu odpowiadają naprężenia $+32 \times 20 = 640$ kg/cm², i $3 \times 20 = -60$ kg/cm², por. tabl. 1. Dowodzi to, że w górnej części pręt jest mocno rozciągany, w środkowej zaś lekko ściskany. Ponieważ

siła osiowa w pręcie jest stała na całej jego długości, zatem różnica w naprężeniach przy nasadzie pręta w pasie górnym i w środku jego długości pochodzi od naprężeń drugorzędnych. Słup w chwili przejazdu pociągu doznaje esowatego zgięcia, wyginając się u góry wypukłością ku narożnikowi, a w pobliżu środka linja ugięcia słupa posiada punkt przegięcia (rys. 3). Aby się o tem przekonać, przełożono następnie instrument *b* tak, iżby się znalazł naprzeciw instrumentu *a* w równej z nim wysokości, por. rys. 4 instrument *c*. Tablica 2 podaje wyniki pomiarów. Instrument *a* wykazywał ciągnie-



Rys. 3.



Rys. 4.

nie, instrument *c* ciśnienie. Wpobliżu pasa górnego słup doznaje więc momentu zginającego tak, iż instrument *a* jest na krawędzi wypukłej, zaś *c* na wklęsłej (rys. 3).

TAB. 2.

Prędkość km/godz.	Instru- ment	O d c z y t y			Różnica odczytów	Naprężenie kg/cm ²	Średnio
5	a	49,5	82,5	49,5	+ 33	+ 660 kg/cm ²	+ 130
	c	49	29	49	- 20	- 400 "	
5	a	49,5	82	49	+ 32,75	+ 655 kg/cm ²	+ 157,7
	c	48,3	31,5	48,5	- 17	- 340 "	
50	a	49,0	82	49	+ 33	+ 660 kg/cm ²	+ 150
	c	48,0	30	48	- 18	- 360 "	

Ponieważ przekrój słupa jest symetryczny względem płaszczyzny, przechodzącej przez słup prostopadle do kratownicy, więc uchwyciliśmy wartości naprężeń w warstwach ściskanej i rozciąganej, oddalonych równo od środka ciężkości badanego przekroju słupa (w pobliżu pasa górnego). Średnia arytmetyczna tych naprężeń jest naprę-

zeniem osiowem. W ten sposób wyeliminowaliśmy wpływ naprężeń drugorzędnych. Wyniki pomiaru nie są jednak ściśle, gdyż wiadomo, czy zanotowane największe odchylenia wskazówki instrumentu występują równocześnie, t.j. czy odpowiadają one temu samemu położeniu ciężarów. Wiadomo o nich tylko, że są największe. Aby uzyskać wyniki ściślejsze, należy badać w chwili, gdy pociąg jest na moście w spoczynku w pewnym ściśle określonym położeniu. Tak też uczyniono przy następnych pomiarach, o czem niżej.

Ale już pomiary opisane, zarówno jak i pomiary następne, znakomicie ilustrują i potwierdzają wnioski teorii naprężeń drugorzędnych (po niem. Nebenspannungen), t.j. naprężeń, jakie powstają w prętach wskutek sztywności ich połączenia we węzłach¹. Wskutek obciążenia oba pasy się ugną wypukłością ku dołowi. Słupy połączone są z pasami sztywnie tak, że tworzą z nimi i po odkształceniu kąty proste. Stąd pochodzi wygięcie słupa esowate, tem większe, im bliżej narożnika. Dla obciążenia symetrycznego, przy pasie górnym pręty wyginają się wypukłością na zewnątrz, t.j. ku narożnikom, zaś przy pasie dolnym wypukłością ku osi symetrii belki. Gdyby stycznne do obu pasów, poprowadzone na obu końcach słupa, były do siebie równoległe, to punkt przegięcia ugiętej słupa byłby w jego połowie.

W punkcie przegięcia niema naprężeń drugorzędnych, więc naprężenie rzeczywiste równe jest ciągnięciu osiowemu i wynosi w naszym przypadku ok. $+150 \text{ kg/cm}^2$, jak to wynika z tabl. 2. Instrument *b*, umieszczony w połowie wysokości słupa (rys. 2) wykazał naprężenie -60 kg/cm^2 . Ponieważ naprężenie wzdłuż tej samej krawędzi słupa zmienia się linijnie, przeto punkt przegięcia słupa znajduje się powyżej połowy słupa w wysokości x . Z proporcji $x:94 = (60 + 150) : (60 + 640)$ wynika $x = 28,2 \text{ cm}$. Odchylenie punktu przegięcia od połowy słupa wgórę, a co zatem idzie, znacznie większy moment zgięcia na dolnym końcu słupa niż na górnym, tłumaczy się poniekąd utwierdzeniem słupa w poprzecznicę, która połączona jest ze słupem wysoką blachą kątową. Ponieważ naprężenie krawędziowe w pręcie zmienia się według prostej, więc naprężenie średnie pomiędzy uchwytami instrumentu odpowiada ściśle naprężeniu miejscowemu w połowie pomiędzy uchwytami. Instru-

¹ Thullie-Chmielowiec, Naprężenia drugorzędne w belkach kratowych Akademja Nauk Technicznych Nr. 5, Lwów 1928; Bryła, Naprężenia drugorzędne w belkach kratowych. Podręcznik inżynierski II. 1249.

ment a mierzy zatem naprężenie o 25 cm poniżej górnego uchwytu. W miejscu samego uchwytu, t. j. w wysokości $94 + 25 = 119$ cm ponad połową słupa naprężenie wynosi $640 + y$, przyczem, z proporcji $y : (640 + 60) = 25 : 94$, wynika $y = 186 \text{ kg/cm}^2$, zaś $640 + y = 826 \text{ kg/cm}^2$. Odpowiednio przy dolnym węźle, tuż przy pasie dolnym na tej samej krawędzi słupa naprężenie wynosi: $-(826 + 60 + 60) = -946 \text{ kg/cm}^2$. Natomiast na krawędzi przeciwnej, zwróconej do węzła 3, naprężenie jest przeciwnego znaku i co do bezwzględnej wartości większe o podwójną wartość naprężenia osiowego. Wynosi zatem $946 + 150 + 150 = +1246 \text{ kg/cm}^2$. Naprężenie to zmniejszy się nieco, jeśli uwzględnimy rozszerzanie się blachy katowej (diafragmy), dzięki czemu przekrój słupa rośnie ku dołowi, a naprężenie osiowe maleje. Niemniej jednak stwierdzić trzeba, że naprężenie rzeczywiste w słupie jest uderzająco wielkie, i że naprężenia drugorzędne grają tu rolę dominującą. Ponieważ niema powodów, aby naprężenie drugorzędne w słupach innego systemu kraty było dużo mniejsze niż w kracie złożonej, więc stwierdzenie bardzo wielkich naprężeń II-rzędnych w słupach kraty złożonej jest poważnem „memento“ dla innego systemu, gdzie już naprężenia główne są duże.

Z powyższego wynika, że z trzech położań instrumentów, z których dwa są naprzeciw siebie, jak na rys. 4, zaś 3-ci w innym przekroju pręta, można obliczyć naprężenie główne i drugorzędne w dowolnem miejscu pręta, o ile ten posiada krawędzie w płaszczynie kratownicy.

Następne pomiary były dokonywane, gdy pociąg był w spoczynku, w ściśle określonym położeniu, które zmieniano miarowo, aby uchwycić wpływ posuwania się pociągu po moście na wielkość naprężeń drugorzędnych i głównych (osiowych). Przy tem samym ustawieniu instrumentów (rys. 4), co w poprzednim pomiarze, przed wjazdem pociągu na most odczytano na instrumencie a pod wskazówką kreskę 49, na instrumencie c zaś 48. Następnie wjechał pociąg na most od strony Lwowa (por. rys. 1 a), przyczem druga os parowozu stanęła nad poprzecznicą 2, odpowiadającą badanemu słupowi S_1 . Jest to prawie najniekorzystniejsze położenie dla tegoż słupa. Odpowiednie odczyty były 79 i 37. Następnie cofano pokolei pociąg w stronę Lwowa tak, iż pierwsza os parowozu stawała i zatrzymywała się kolejno nad poprzecznicą 3, 4, 5 i t. d. Wyniki doświadczeń zawiera tabl. 3.

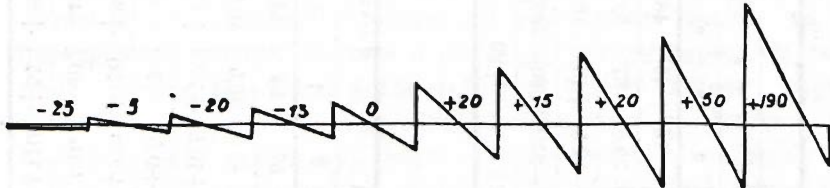
TAB. 3.

we węźle	I-sza oś parowozu										II-ga oś	
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	a	c
instrument	a	c	a	c	a	c	a	c	a	c	a	c
1 odczyt	49	48	49	48	49	48	49	48	49	48	49	48
	47,5	47	48	46,5	50	45	52	43,7	55	42	59	40
2 różnica	-1,5	-1	+1	-1,5	+1	-3	+3	-4,3	-6	+10	-8	+14
3 σ kg/cm ²	-30	-20	+20	-30	+20	-60	+60	-86	+120	-120	+200	-160
4 σ_0 kg/cm ²	-25	-5	-20	-13	0	+20	+15	+20	+20	+20	+15	+20

TAB. 4.

we węźle	I-sza oś parowozu											II oś		I-sza oś poza węzłem i w odległości metrów			
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	3	6	9	20		
1 Odczyt	Lwów 46,5	46,5	45,5	44	42	43	51	54	54	57	54	51	50	49	46,5		
	Stryj 48,5	49	50	52	55	60,5	59	53,5	61	49	46,5	46,5	46,5	48	48,5		
2 Różnica	L 0	0	-1	-2,5	-4,5	+1,5	+4,5	+7,5	+7,5	+10,5	+7,5	+4,5	+3,5	+2,5	0		
	S 0	+0,5	+1,5	+3,5	+6,5	+12	+10,5	+5	+2,5	+0,5	-2	-2	-2	-0,5	0		
3 σ kg/cm ²	L 0	0	-20	-50	-90	+30	+90	+150	+150	+210	+150	+90	+70	+50	0		
	S 0	10	+30	+70	+130	+240	+210	+100	+50	+10	-40	-40	-40	-10	0		
4 σ_0 kg/cm ²	0	-5	+5	+10	+20	+155	+150	+125	+100	+110	+55	+25	+15	+20	0		

Odejmując odczyty początkowe (49 i 48) od wartości w wierszu 1, otrzymaliśmy różnice (wiersz 2), na podstawie których obliczono naprężenia (wiersz 3). Przyrząd *a* wykazywał rozciąganie (+), zaś *c* ściskanie (—), które to naprężenia malały w miarę oddalania się pociągu od badanego słupa. Rozkład naprężeń w badanym przekroju słupa S_1 w pobliżu górnego pasa przy różnych położeniach pociągu uwidoczniają wykresy rys. 5. Otrzymano je nanosząc,



Rys. 5.

w pewnej skali, wartości wiersza 3, tablicy 3. Każda linia ukośna przedstawia diagram naprężeń w tym samym przekroju, tylko przy innym położeniu pociągu. Pierwsza od prawej strony linia ukośna odnosi się do wypadku, gdy druga oś parowozu jest we węźle 2. Druga linia ukośna odnosi się do wypadku, gdy pierwsza oś parowozu jest we węźle 3. Następne, gdy we węźle 4 i t. d. Z tych wykresów wynika, że pręt był w swej górnej części wypukłością wygięty w stronę narożnika, czyli wklęsłością ku środkowi belki, co było do przewidzenia. Na wykresach tych wypisane są średnie naprężenia, czyli naprężenia w osi. Następnie te same badania powtórzono na słupie 6, który jest w osi symetrii belki kratowej (rys. 1). Tabela 4 podaje wyniki pomiarów.

Na wykresach rys. 6 możemy dokładnie śledzić przebieg naprężeń w miarę posuwania się pociągu od strony Lwowa w stronę Stryja. W chwili, kiedy pierwsza oś znajdzie się na czwartym węźle, wygięcie pręta staje się odwrotne. Trapez naprężeń się odwraca. Oczywiście przy pewnym pośrednim położeniu pociągu, t. j. gdy I oś parowozu znajdzie się gdzieś pomiędzy 4 i 5 węzłem, figurą naprężeń jest prostokąt, czyli oś pręta jest prostą (przynajmniej w pobliżu badanego przekroju gdzie dokonywano pomiaru). Wiersz 4, tabl. 3 i 4 podaje średnie arytmetyczne z obu naprężeń skrajnych, t. j. naprężenie w środku ciężkości przekroju pręta, czyli naprężenie osiowe. Takie właśnie naprężenie panowałoby w całym pręcie w przypadku połączeń przegibnych. Spróbujmy je zanalizować.

Linia wpływowa któregośkolwiek słupa siły osiowej według przybliżonej teorii belki o kracie złożonej, jest trójkątem, którego rzedna pod węzłem badanym wynosi $\frac{1}{2}$, podstawą zaś jest długość $2a$, przy czym a jest odstępem poprzecznic (rys. 7). Zatem linia wpływowa słupa 2 sięga od narożnika do węzła 3. Jeżeli więc pierwsza oś parowozu jest w węźle 3, (tabl. 3), zaś dalsze osie są poza węzłem 3, to teoretycznie naprężenie osiowe w słupie 2 powinno być równe zero. Wpływ obciążenia na partjach dalszych poza oba pola sąsiadujące ze słupem, powinien zniknąć. Tymczasem wiersz 4 tabl. 3 wykazuje dla naprężeń osiowych wartości różne od zera i to zrazu dość pokaźne, malejące w miarę oddalania się pociągu od badanego słupa i przechodzące następnie w naprężenia odwrotnego znaku. To samo obserwujemy na tabl. 4 odnośnie słupa 6: dopóki pierwsza oś parowozu nie przekroczy węzła 7, zbliżając się do słupa 6, mielibyśmy siłę osiową równą zero. Tymczasem według tabl. 4 (wiersz 4), jest ona różna od zera. W położeniu najniekorzystniejszym dla słupa 2 z spośród położzeń, wymienionych w tabl. 3, druga oś parowozu jest we węźle (rys. 8). Przyjmując obciążenie jednej osi średnio 13,3 ton, otrzymamy teoretycznie siłę w słupie S_2 według równania:

$$4S_2 = 13,3(1 + 0,55 + 0,55 + 0,1) = 13,3 \cdot 2,2 = 29,26 \text{ t.}$$

Przekrój pełny słupa wynosi $F = 34,2 \text{ cm}^2$, zatem naprężenie osiowe

$$\sigma_0 = \frac{1}{4} \frac{29,260}{34,2} = 214 \text{ kg/cm}^2$$

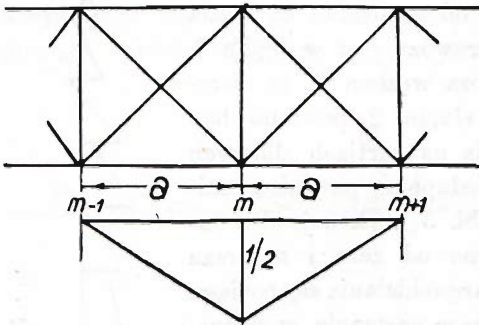
Według pomiaru naprężenie wynosi 190 kg/cm^2 . Różnica $214 - 190 = 24 = 11\%$. Naprężenie rzeczywiste jest o 11% mniejsze od teoretycznego. Analogicznie dla słupa 6 pomierzono 135, zatem różnica $214 - 135 = 79 \text{ kg/cm}^2 = 37\%$. Naprężenie rzeczywiste jest o 37% mniejsze od teoretycznego.

Odchyłka pomiaru od obliczenia pochodzi poniekąd stąd, że w obliczeniu przyjęto kratę złożoną jako rozłożoną na dwie kraty pojedyncze i na każdą przyjęto połowę obciążenia. Jest to sposób przybliżony. Według niego, siła w słupie równa się połowie różnicy

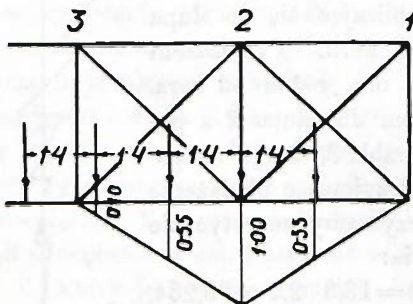


Rys. 6.

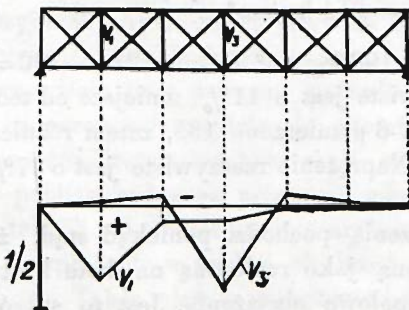
ciężarów, zaczepiających w węźle dolnym i górnym, W rzeczywistości tak nie jest. Melan (Der Brückenbau III. Bd. I. Hälfte S. 353-354) znalazł, że błąd przybliżonego sposobu obliczenia belek złożonych może wynosić dla krzyżulców nawet $17 \times \sqrt{2} = 24 \%$.



Rys. 7.



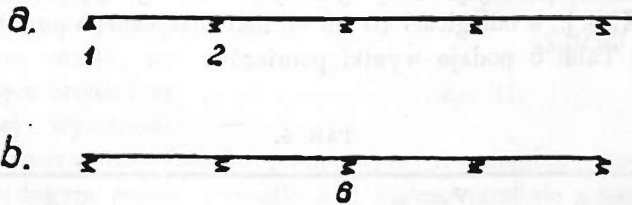
Rys. 8.



Rys. 9.

Dla słupów błąd ten powinien być mniejszy. Z cytowanego dzieła wyjmujemy linje wpływowe dwu słupów belki złożonej o 6 polach, obliczone sposobem dokładnym przy pomocy równań sprężystości (rys. 9). W przeciwieństwie do linii wpływowych przybliżonych linje dla V_1 i V_3 nie ograniczają się do dwu pól belki kratowej, sąsiadujących z danym słupem, ale ciągną się przez całą belkę. Z linii dla słupa V_1 wynika, że i ciężary znajdujące się poza polami sąsiadującymi ze słupem wywołują w nim pewne, acz niewielkie rozciągania. To samo właśnie stwierdziliśmy doświadczalnie na słupie S_1 . Natomiast dokładna linja wpływowa słupa środkowego V_3 posiada, poza przedziałami z nim sąsiadującymi, gałęzie ujemne. Linja wpływowa słupa S_3 naszej kratownicy będzie zasadniczo podobna tak, iż ciężary znajdujące się na zewnątrz teoretycznego pola wpływu, t. j. pomiędzy

węzłem 11 i 7, lub pomiędzy 5 i 1, wywołują w słupie S_6 ściskanie zamiast rozciągania. Tymczasem według tabl. 4, obserwujemy wciąż naprężenia rozciągające w słupie S_6 we wszystkich położeniach poprzegu. Z tego widać, że odchyłki pomiaru od wyników obliczonych nie dadzą się wytłumaczyć wyłącznie niedokładnością przybliżonej teorii belek złożonych. Należy je tłumaczyć również ciągłością podłużnic i z tem związaną solidarnością poprzecznic¹, czyli wogóle współpracą pomostu. Polega ona na tem, że ciężar spoczywający na danej poprzeczniczy dźwigają także poprzecznicie sąsiednie, chociaż w mniejszym stopniu. Rys. 10 przedstawia schematycznie poprzecznicę jako podpory sprężyste belki ciągłej, którą jest podłużnica.



Rys. 10.

Na rys. *a* poprzecznicę skrajną jest sztywna, zaś sąsiadująca z nią poprzecznicę 2 przenosi swoje obciążenie na słup S_2 . Na rys. *b* poprzecznicę badaną 6 jest sprężystą podporą belki ciągłej cztero-przęsłowej, o ile pominiemy przęsła bardziej oddalone, których wpływ na reakcję 6 jest już znikomym mały. Z porównania obu rysunków *a* i *b*, jak zresztą z dokładnej teorii belek na sprężystych podporach wiadomo, widać, że poprzecznicę 6 pomagają sąsiednie poprzecznicę w dźwiganiu ciężaru nad nią spoczywającego, w znacznie wyższym stopniu niż poprzecznicę 2. Poza tem sprężystość podpór podłużnic, jako belki ciągłej, polega nietylko na ugięciu samych poprzecznic, któremu podlega zresztą i poprzecznicę skrajna, ale również na ugięciu belki głównej, której węzły są podporami końców poprzecznic. Wskutek tego charakterystyka sprężystości podpór środkowych belki

¹ Bryła, Pomost współpracujący. Przegląd Techniczny 1929; Bryła, Pomost współpracujący pod działaniem siły skupionej. Czasopismo Techniczne 1930; Bryła, The cooperating bridge floor. International Congress for Metallic Structures, Liege 1930. III. b. (przetłumaczone także na język słoweński).

ciągłej, jak np. podpory 6 w rys. 10 *b* jest większa, aniżeli charakterystyka podatności podpory 1 lub 2 w rys. 10 *a*. Tem się tłumaczy znacznie większe współdziałanie poprzecznie z poprzecznicą 6 aniżeli z poprzecznicą 2. Dlatego pomierzono mniejsze naprężenie w słupie S_6 aniżeli w słupie S_2 pomimo, że przybliżona linja wpływowa siły osiowej w obu słupach jest identyczna.

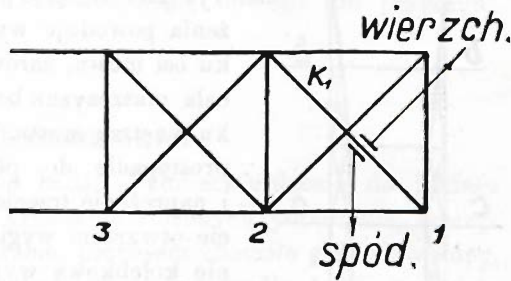
Jeśli też chodzi o stwierdzenie wpływu współdziałania poprzecznie przy pomocy pomiarów na prętach belki głównej, to do tego najlepiej nadają się słupy belki o kracie złożonej.

Następnym pomiarem był pomiar naprężeń w krzyżulcu K_1 , przy umocowaniu instrumentów według rys. 11. Górne uchwyty obu instrumentów były tuż przy krzyżulcu, krzyżującym się z krzyżulcem K_1 , t. j. w odległości 10 cm od matematycznego punktu skrzyżowania. Tabl. 5 podaje wyniki pomiarów.

TAB. 5.

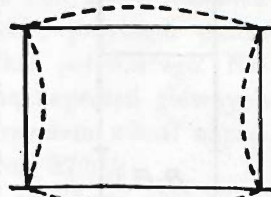
instrument	V km/godz.	o d c z y t y			Diff.	kg/cm ²
spód	20	50	37	48	— 12	— 240
wierzch		51	29,5	51	— 21,5	— 430
spód	20	48	37	49	— 11,5	— 230
wierzch		51	31	51	— 20	— 400
spód	30	49	37	49,5	— 12,25	— 245
wierzch		50	28	50	— 22	— 440
spód	30	49,5	37	49	— 12,5	— 250
wierzch		49,5	29	49,5	— 20,5	— 410
spód	40	49	37	49	— 12	— 240
wierzch		50	28,5	50	— 21,5	— 430
zewnątrz	50	52	38	52	— 14	— 280
wierzch		52	31,5	52	— 20,5	— 410
zewnątrz	50	52	38	52	— 14	— 280
wierzch		52	31,5	52	— 20,5	— 410

Dokładność pomiarów charakteryzuje się odchyłką poszczególnych odczytów od wartości średniej. Naprężenia pomierzone na instrumencie spodnim wahają od -230 do -250 kg/cm^2 . Odchyłki od wartości średniej -240 wynoszą więc ± 10 . Na instrumencie wierzchnim zaś naprężenia wahają od -400 do -440 , zaś odchyłki od wartości średniej -420 wynoszą ± 20 , t. j. ok. 5% . Ostatnie cztery wiersze odpowiadają innemu położeniu instrumentów, mianowicie instrument od spodu umocowano nazewnątrz mostu, na tym samym przecie i na tej samej wysokości,

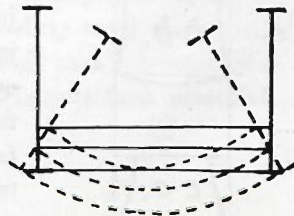


Rys. 11.

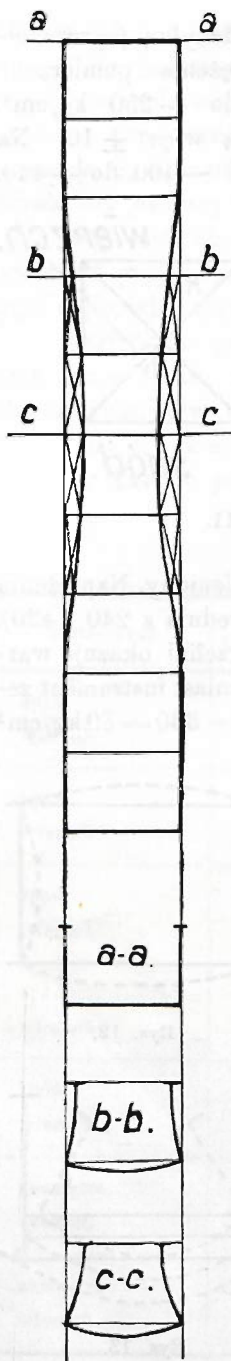
natomiast instrument wierzchni pozostawiono niezmieniony. Naprężenie osiowe w danym przecie wynosiło 330 kg/cm^2 (średnia z 240 i 420). W ostatnich czterech pomiarach instrument wierzchni okazuje wartość -410 , a więc prawie tyle co poprzednio, natomiast instrument zewnętrzny wartość -280 kg/cm^2 . O ile różnica $410 - 330 = 80$ kg/cm^2 przedstawia naprężenie drugorzędne po górnej stronie pręta, to odchyłki $330 - 280 = 50$ kg/cm^2 nie można w ten sposób tłumaczyć. Instrument bowiem zewnętrzny utwierdzony był w płaszczyźnie, przechodzącej przez oś pręta a prostopadłej do płaszczyzny belki. W tej płaszczyźnie naprężenia drugorzędne wystąpić nie mogą. Naprężenia drugorzędne występują wskutek momentów zgięcia, działających w płaszczyźnie belki. W danym wypadku odchyłka pochodzi od momentu zginającego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny belki. Tego rodzaju momenty powodują naprężenia, które możemy nazwać naprężeniami trzeciorzędniemi, albo dodatkowemi, (po niem, Zusatzspannungen według Engessaera). Naprężenia trzeciorzędne są zrozumiałe



Rys. 12.



Rys. 13.



Rys. 14.

w mostach zamkniętych, w których pasy górne połączone są wzajemnie i stężone rozporami równoległymi do poprzecznic, w których zatem poprzecznicę tworzą ze słupami i poprzecznicami prostokątne zamknięte ramy (rys. 12). Ugięcie poprzecznicy wskutek obciążenia powoduje wygięcie słupów wypukłością ku osi mostu, zarówno jak i krzyżulców, t. zn. cała płaszczyzna belki wygina się wypukłością ku wnętrzu mostu. Tem się tłumaczą momenty prostopadłe do płaszczyzny belki głównej i naprężenie trzeciorzędne. Natomiast w moście otwartym wygięcie pomostu w powierzchni kolebkową wypukłą ku dołowi nie powoduje odkształcenia płaszczyzn belek kratowych, które pozostaną płaskie i tylko pochyliły się pasami górnymi ku osi mostu. Rys. 13. Wypadek ten zachodzi w przypadku równomiernego obciążenia wszystkich poprzecznic. Jeżeli natomiast poprzecznicę są obciążone nierównomiernie, np. gdy przez obciążenie ruchome obciążona jest tylko poprzecznicę, np. środkowa, to ugnie się ona wypukłością ku dołowi i wywoła pochylenie się słupów, które z nią tworzą półramę sztywną. Górne końce tych słupów naciskają na pasy górne w sensie ich zbliżenia. Zbliżeniu się temu jednak przeszkadzają inne słupy, które są utwierdzone w poprzecznicach nieobciążonych, a więc i nieodkształconych. Oczywiście opór słupów jest sprężysty, zatem pas górny zachowuje się jak belka na sprężystych podporach, działających w płaszczyźnie poziomej. Ugina się on w tejże płaszczyźnie, przyjmując kształt falisty (rys. 14 i 15), (jedna lub więcej półfal), pociągając za sobą słupy, te znów powodują ugięcie poprzecznic, zanikające prędko z oddaleniem od poprzecznic obciążonej. Nierówność ugięcia



Rys. 15.

poprzecznie powoduje ugięcie słupów i krzyżulców w płaszczyznach prostopadłych do kraty, a więc naprężenia trzeciorzędne.

Przy tej sposobności należy podnieść, że z trzech położań instrumentu w tej samej wysokości słupa można wyznaczyć bryłę naprężeń w danym przekroju. Ewentualne czwarte położenie będzie już służyć za kontrolę, ale nie istotnego, nowego nie przyczyni.

Streszczenie.

Celem przeprowadzenia badań było stwierdzenie, do jakiego stopnia teoria przybliżona kratownicy złożonych odpowiada rzeczywistości stanowi rzeczy w kracie, przy czem chodziło głównie o słupy, jako o te pręty, których siły wewnętrzne wedle teorii posiadają linię wpływową identyczną i bardzo charakterystyczną, a więc nadającą się najlepiej do sprawdzenia.

Doświadczenia wykazały, że naprężenia osiowe (podstawowe) różnią się rzeczywiście od obliczonych i są od nich mniejsze, przy czem różnice rosną ku środkowi i wynoszą od 11% (w słupie w pobliżu narożnika) do 37% (w słupie środkowym).

Dominującą rolę grają tu naprężenia drugorzędne, zwłaszcza w słupach skrajnych, gdyż znaczne pochylenie obu pasów wskutek obciążenia zmusza słupy do esowatego wygięcia, przy czem punkt przegięcia osi słupa odchyła się nieco od punktu połowiącego. Naprężenia rzeczywiste krawędziowe, będące sumą naprężeń głównych i drugorzędnych, dochodzą do 1200 kg/cm², przy czem udział naprężeń głównych wynosi 12,5%, zaś drugorzędnych 87,5%.

Na różnicę naprężeń głównych wpływa częściowo niedokładność teorii przybliżonej, częściowo współdziałanie poprzecznie.

W przeciwieństwie do przyjęć, czynionych zawsze dotychczas, odkryto w kracie mostu, otwartego góra, naprężenia zginające w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny belki, czyli naprężenia trzeciorzędne, powstające na skutek sztywności pasa górnego, słupów i poprzecznie, oraz nierównomierności obciążenia tych ostatnich.



nr. 645