

JÓZEF CŁOMB, STANISŁAW MENTEL

Katedra Budowy Mostów

BADANIE KRATOWEGO ŻELBETOWEGO MOSTU KOLEJOWEGO

1. UWAGI WSTĘPNE

Kratowe mosty żelbetowe, będące jedną z form ewolucji żelbetu w mostownictwie, były wynikiem dążenia do obniżenia ciężaru stałego konstrukcji, a tym samym zwiększenia przekraczanych rozpiętości. Szereg czynników, a wśród nich mała przejrzystość pracy statycznej i wysoki koszt wykonania, ograniczył jednak zakres ich zastosowania.

Obecnie wraz z szerokim zastosowaniem betonu sprężonego w budownictwie tendencja do wykonywania kratownic żelbetowych wydaje się odżywać. W związku z tym może okazać się przydatne przedstawienie wyników badań i prac analitycznych nad warunkami pracy statycznej i nośnością kratowego żelbetowego mostu kolejowego o rozpiętości $l_t = 18,80$ m. Pomiarzy przeprowadzone zostały przez Katedrę Budowy Mostów w ramach realizacji szerokiego programu badań nad określeniem dynamicznych parametrów pracy mostów drogowych i kolejowych. Dodatkowym celem pracy było ustalenie rezerw nośności mostu, co wiąże się z poważnym zwiększeniem nacisków na oś, które w okresie budowy (1907 r.) wynosiły 4,1 t a obecnie prawie 9,0 t. Badany most (rys.1) usytuowany jest na szlaku kolei wąskotorowej Głiwice Wąsk.-Trynek przy przejściu przez rzekę Kłodnicę. Ustrój nośny stanowią dwie kratownice żelbetowe z jazdą dołem, stężone poprzecznicami i płytą pomostu. Tor kolejowy 850 mm ułożony jest na podsypce żuźlowej.

W toku ponad pięćdziesięciu lat eksploatacji most doznał licznych uszkodzeń. Oprócz ubytków w warstwie otuliny i korozji zbrojenia (dochodzącej w niektórych prętach wypełnienia do 20%), wystąpiły rysy w węzłach, przy czym zarysowaniu uległy słupki i krzyżulce, pasy zaś pozostały nienaruszone. Charakter uszkodzeń obrazuje rys.2.

Ilość i rozmieszczenie zbrojenia zostały ustalone na podstawie zachowanych fragmentów dokumentacji oraz odkuć. Całość pracy obejmowała oprócz oceny stanu technicznego połączonej z określeniem jakości materiałów - analizę statyczną - wytrzymałościową oraz badania statyczne i dynamiczne mostu.

2. OKREŚLENIE STANU WYŁĘŻENIA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH KRATOWNICY

Można przypuszczać, że podstawą pierwotnych obliczeń statycznych był klasyczny schemat kratownicy o węzłach przegubowych (rys.3a), z pominięciem wpływu sztywności węzłów i aspektów przestrzennej pracy ustroju.

Celem obecnej analizy wytrzymałościowej było określenie wielkości i rozkładu dodatkowych naprężeń oraz bliższego rzeczywistości schematu statycznego, uwzględniającego rzeczywisty charakter pracy ustroju (sztywność węzłów) i stan techniczny obiektu (uszkodzenia). Jako wielkość porównywalną przyjęto naprężenia w elementach kraty, obliczone dla schematów I, II, III (rys.3) i jednolitego obciążenia ruchomego zestawem parowozów o schemacie jak na rys.4. Obliczenie belki głównej w schemacie kratownicy o węzłach sztywnych (schemat II) pozwoliło określić z dobrym przybliżeniem wielkość naprężeń dodatkowych wywołanych sprężystym utwierdzeniem prętów w węzłach, w stosunku do naprężeń podstawowych wyliczonych dla kratownicy o węzłach przegubowych. Na rysunku 5 zestawiono procentowe przyrosty naprężeń wywołane sztywnością węzłów w stosunku do schematu I. Jak widać, przyrost ten jest znaczny dla przypodporowych prętów pasów oraz dla środkowych prętów wypełnienia. Należy nadmienić, że wyliczone dla schematu I naprężenia (w stali) w krzyżulcach i słupkach już przekraczały o 10 - 60% naprężenia dopuszczalne. Przyrost naprężeń w niedociążonych pasach nie miał większego znaczenia dla pracy ustroju.

Wpływ naprężeń dodatkowych jeszcze wyraźniej widoczny jest na rys.6, gdzie zestawiono wartości stosunku

$\alpha = \frac{\sigma_{obl}}{\sigma_{dop}}$, przy czym licznik kryje w sobie sumę naprężeń podstawowych i dodatkowych.

Wyniki obliczeń dla schematu II pozwalają stwierdzić, że w kratowym moście żelbetowym o węzłach sztywnych i konstrukcji pomostu, zapewniającej współdziałanie w pracy pasów dolnych, sztywność węzłów wywiera bardziej znaczny wpływ na wielkość naprężeń w prętach wypełnienia, niż na naprężenia w pasach.

Powyższe spostrzeżenie może stanowić, przy uwzględnieniu wielkości i rozkładu zbrojenia, wyjaśnienie zjawiska wystąpienia rys w przywęzłowych częściach prętów wypełnienia, przy równoczesnym braku rys w pasach.

Schemat III przedstawia zewnętrznie statycznie wyznaczalną ramownicę, utworzoną przez pręty konturu kraty z przegubowo dołączonymi prętami wypełnienia (rys.3c). Schemat ten wydaje się najbardziej bliski charakterowi pracy wytrzymałościowej kratownicy. Przemawiają za nim następujące względy:

- a) rzeczywista ciągłość, dobry stan i duża sztywność pasów,
- b) mała sztywność prętów wypełnienia oraz układ zbrojenia w tych prętach na styku z pasami (zbliżony do półprzegubów żelbetowych),
- c) zarysowania i wykruszenia w przywęzłowych częściach większości krzyżulców i słupków.

Obliczenia przeprowadzone dla tego schematu wykazały, że obliczeniowe naprężenia w prętach wypełnienia wydatnie zmalały (o ok.45%). Jest to rezultatem przejścia przez przekrój pasów pewnej części sił poprzecznych. Zmniejszył się również wpływ sił osiowych w pasach (o ok. 30% w stosunku do schematu I) przy równoczesnym wzroście wpływu momentów zginających.

Zestawienie wyników obliczeń dla wszystkich schematów oraz rezultaty bezpośrednich pomiarów - zostały zawarte w tabl.1. Dla dokonania weryfikacji metod obliczeniowych oraz określenia rezerw nośności obiektu przeprowadzone zostały badania, które objęły bezpośrednio wyznaczenie odkształceń (naprężeń) w stali i betonie oraz pomiar ugięć. Pomiar naprężeń wykonany został metodą

tensometrii oporowej oraz mechanicznymi czujnikami Huggenbergera. Stosowano również dla kontroli deformetry Huggenbergera. Przy pomiarach oporowych zastosowano czujniki RL 20/120 (na zbrojeniu) i RL 70/500 (na betonie), mostek ZKTR-1 oraz do badań dynamicznych mostek produkcji Pol. Gdańskiej i dwukanałowy rejestrator "Oscilloscript" firmy Phillips.

Obciążenie próbne stanowiły dwa parowozy TW-47 o ciężarach służbowych po 40 t.

Na moście naklejono ogółem 20 czujników oporowych przy czym każdy punkt pomiarowy składał się co najmniej z dwóch czujników.

Wielkości odkształceń (naprężeń) uzyskane metodą tensometrii oporowej były kontrolowane, szczególnie przy pomiarach na betonie, przy pomocy mechanicznych czujników Huggenbergera. Rozmieszczenie punktów pomiarowych zaznaczono na rys.7.

Wyniki bezpośredniego pomiaru naprężeń w poddanych badaniu prętach zestawiono również w tab.1.

Dla porównania podano tam również odpowiadające wielkości naprężeń wyliczonych dla poszczególnych schematów. Wielkości te ujmują wyłącznie wpływ obciążenia ruchomego bez dodatku dynamicznego, z uwzględnieniem różnicy między obciążeniem ruchomym przyjętym do obliczeń i obciążeniem użytym w czasie pomiarów statycznych.

Porównanie wyników obliczeń i pomiarów statycznych naprężeń pozwala na dokonanie następujących spostrzeżeń:

- a) Pomierzone wielkości naprężeń wykazują największą zbieżność z wynikami obliczeń schematu III, nie mniej jednak pomiar wykazuje rezerwę nośności elementów mostu, sięgającą średnio 1,5-krotnej wartości naprężeń pomierzonych.
- b) Słuszność hipotezy o nieznacznym wpływie momentów sprężystego utwierdzenia prętów w węzłach na wielkość sił w prętach wydaje się być ograniczona do układów o podobnej sztywności prętów pasów i wypełnienia.
- c) W żelbetowych mostach kratowych uwzględnienie współdziałania płyty pomostowej w pracy pasa rozciąganego jest w pełni usprawiedliwione i prowadzi do znacznej oszczędności zbrojenia.

Tablica 1

Napreżenia statyczne od obciążenia ruchomego

| Elementy kraty | Pręt | Napreżenia obliczone | | | | Napreżenia pomierzone | | | Pomiar na B-betonie S-stali | |
|----------------|------|--|------------|-------------|--|-----------------------|-------------------|-------------|-----------------------------|---|
| | | Maks. wartości napreżeń kg/cm^2 | | Schemat III | Maks. wartości napreżeń kg/cm^2 | Tens. oporowa | Tens. Huggenberg. | | | |
| | | Schemat I | Schemat II | | | | | Schemat III | | |
| | | + | - | + | - | + | - | + | - | |
| Pas dolny | 2-3 | 8,3 | 9,2 | 9,5 | - | - | 6,1 | - | - | B |
| | 2-3 | 381 | 420 | 179,5 | - | 48,9 | - | - | - | S |
| | 3-4 | 463 | 545 | 214 | - | 86,1 | - | - | - | S |
| Pas górny | 8-9 | - | 19,7 | - | 12,4 | - | 10,5 | - | 9,5 | B |
| | 1-6 | 137 | 40,7 | 114 | 234 | 61,3 | 167 | - | - | S |
| Słupki | 4-9 | 273 | 480 | 237 | - | 127,0 | - | - | - | S |
| | 2-6 | 310 | 3,72 | 182 | 43 | 125,0 | 21,7 | - | - | S |
| Krzyżulce | 3-7 | 20,3 | 26 | 131 | - | 12,6 | - | - | - | B |
| | 4-8 | 321 | 414 | 219 | 97 | 131 | 163 | - | - | S |

Pomiar ugięcia przeprowadzony metodą niwelacji precyzyjnej wykazał dla $l/2$ wielkość $r = 1,55$ mm, a więc 1,75-krotnie mniejszą od ugięcia obliczonego w schemacie III (rys.8). Podkreślić należy, że kratownica z większymi uszkodzeniami była mniej sztywna i wykazała ugięcia większe o 15%.

3. BADANIA DYNAMICZNE

Informacje o statycznych wartościach naprężeń są w zasadzie niewystarczające dla oceny nośności mostów. Przeciążenie dynamiczne konstrukcji nośnej mostu kolejowego może w niekorzystnych warunkach osiągnąć znaczne wartości (dochodzące do 100%). Ponadto obserwacja propagacji fal pozwala uzyskać cenne wskazówki odnośnie ogólnego stanu obiektu.

Dlatego też badania dynamiczne opisywanego mostu miały stosunkowo szeroki zakres i objęły oprócz pomiaru wielkości dodatku dynamicznego przy różnych prędkościach przejazdu i dla różnych elementów kraty także określenie częstości drgań swobodnych i wymuszonych mostu jako całości i poszczególnych elementów konstrukcyjnych.

Do pomiaru drgań - oprócz aparatury wymienionej poprzednio - zastosowano dwa wibrografy Geigera oraz czujnik indukcyjny Phillipsa.

Do obciążenia dynamicznego zastosowano te same parowozy co do obciążenia statycznego. Charakterystyczny zakres dynamicznego nacisku koła osi napędowej parowozu TW-47 przedstawiony jest na rys.9.

Określenia częstości drgań własnych mostu i sprzężonego układu mostu - obciążenie, przeprowadzono metodą impulsową (przy uderzeniach ciężarem ok. 100 kg z wysokości 1 - 3 m).

Pomierzone wartości wynosiły dla mostu nieobciążonego średnio $u = 13,5$ Hz, a dla mostu obciążonego ok. 20 Hz. Uzyskane dane porównano z wynikami obliczenia. W tym celu wykorzystano dający wystarczające przybliżenie wzór

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{4 \cdot l (D + g)}{10 g \cdot C}}$$

przy czym "C" oznacza pionową sztywność mostu tj. siłę, która powoduje w środku mostu jednostkowe ugięcie. Wyliczony w ten sposób okres podstawowej formy drgań pionowych wynosił $T_p = 0,06$ sek, co daje $n = 16,7$ Hz. Różnica wynosi ok. 20% co jest zrozumiałe ze względu na warunki podparcia oraz trudności w dokładnym ustaleniu współczynnika redukcji masy w takim skomplikowanym statycznie ustroju.

Ponieważ średnica kół trakcyjnych parowozu TW-47 wynosi 800 mm prędkość krytyczna (rezonansowa) wynosi:

$$V = \frac{\pi D}{T} = 41,8 \text{ m/sek.}$$

Wobec tego rezonans na moście nie może wystąpić.

Zależność między częstością wymuszonych drgań pionowych mostu a prędkością przedstawiona jest na rys. 10, a częstość pionowych i poziomych poprzecznych drgań pasa górnego w 1/2 na rys. 11.

Przykładowe taśmy z przebiegów obciążenia, (których łącznie było 62) przedstawione są na rys. 12.

Na rys. 13 przedstawiono wykres zmienności dodatku dynamicznego jako funkcji prędkości przebiegów obciążenia przy czym zaznaczono miejsca pomiaru na poszczególnych elementach kraty (pasy, słupki, krzyżulce). Jedynym wnioskiem jaki tutaj można (z pewnymi zastrzeżeniami) wyzyskać jest stwierdzenie, że współczynnik dynamiczny dla prętów wypełnienia jest niższy niż dla prętów pasów. Ogólne wyniki dynamicznych badań mostu wyrażają się następującymi spostrzeżeniami:

- częstotliwość drgań wymuszonych mostu jako całości (mierzona w poziomie sztywnego pomostu) posiada wartość równą 65-75% częstotliwości drgań własnych mostu, zaś 45-50% częstotliwości drgań własnych układu most obciążenie,
- częstotliwość pionowych drgań wymuszonych pasa górnego mostu otwartego jest o ok. 40% wyższa od częstotliwości drgań wymuszonych mostu jako całości,
- stosunek częstotliwości poziomych poprzecznych i pionowych drgań wymuszonych pasa górnego mostu otwartego wyraża się liczbą 0,17 - 0,33, przy czym wartość ta

rośnie z wzrostem prędkości obciążenia. Amplitudy drgań poziomych pasa górnego były znacznie większe niż drgań pionowych,

- wielkość pomierzonych z naprężeń dodatków dynamicznych jest różna dla różnych elementów kraty, posiada różną zależność od prędkości obciążenia i w ogólności jest niższa o ok. 40% od normowej wartości współczynnika dynamicznego dla badanego mostu,
- współczynnik dynamiczny naprężeń dla prętów wypełnienia (krzyżulce, słupki) jest większy niż współczynnik dynamiczny dla pasów kratownicy. W związku z tym należy przy dalszych badaniach rozważyć w jakim stopniu współczynnik dynamiczny wyznaczony z ugięć dla całej belki kratowej może być miarodajny przy obliczeniach poszczególnych elementów kratownicy.

4. WNIOSKI OGÓLNE

Z omawianych badań i obliczeń wysnuć można następujące wnioski ogólne:

- most wykazuje znaczne rezerwy wytrzymałościowe i ma znaczną sztywność. Ogólny układ sił i naprężeń odbiega od układu charakterystycznego dla kratownicy o węzłach przegubowych, zbliża się natomiast do układu odpowiadającego schematowi ramownicy - konturu z przegubowo dołączonymi prętami wypełnienia,
- wielkość dodatku dynamicznego jest mniejsza od wielkości normatywnej, przy czym jest ona zróżnicowana dla poszczególnych elementów kratownicy i towarzyszy różnym prędkościom krytycznym.

Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić, że po wykonaniu pewnych zabiegów remontowych most może być dalej użytkowany mimo wzrostu obciążenia użytkowego.

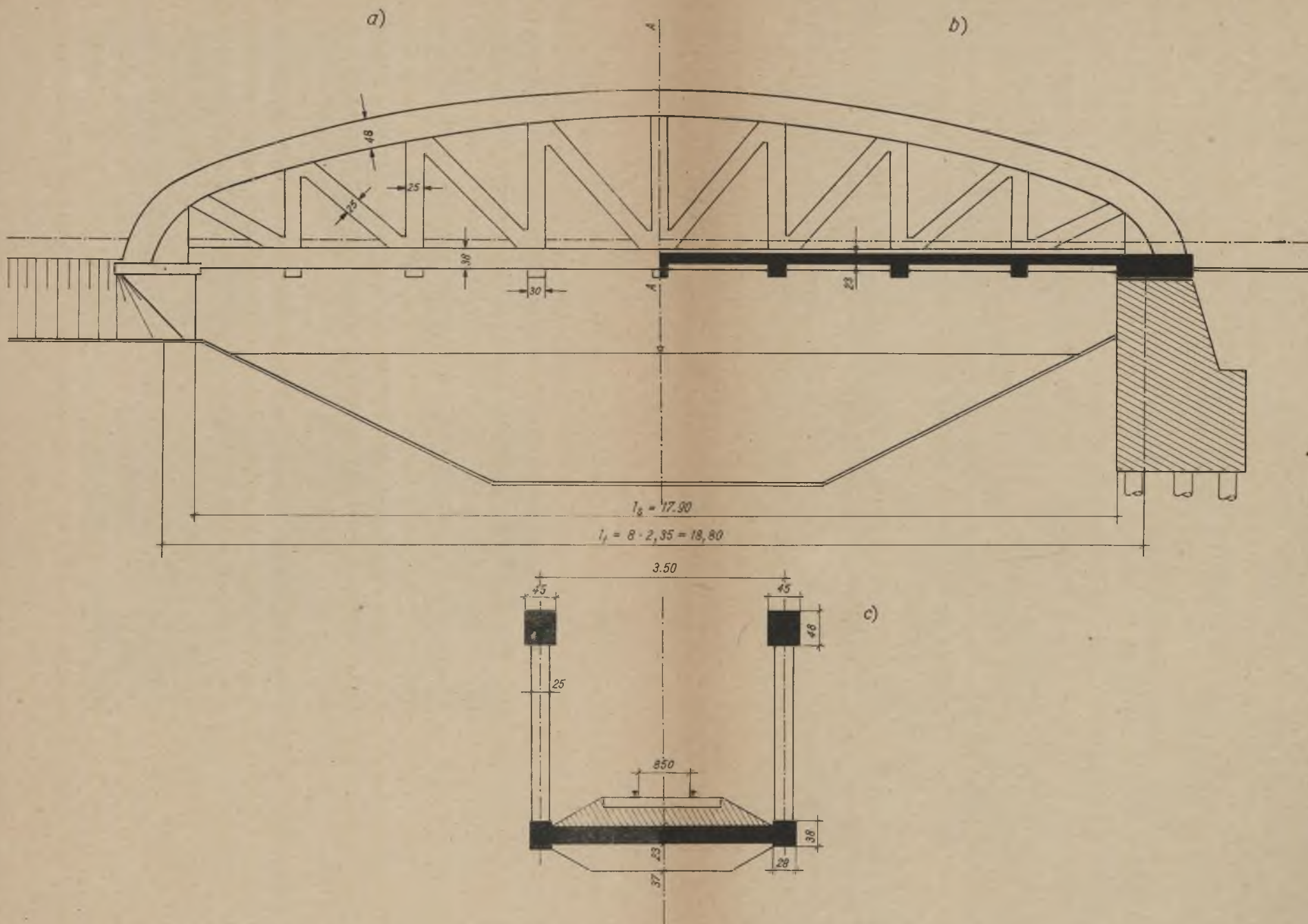
Статическое и динамическое испытание решётчатого железобетонного железнодорожного моста

В работе проведен статический и динамический анализ грузоподъёмности железобетонной фермы, учитывая жесткость узлов и совместную работу помоста. Результаты вычислений проверено опытным путем посредством измерения деформаций стержней и прогибов. Определено также динамическую надбавку для разных конструктивных элементов и другие динамические параметры.

Static and dynamic examination of concrete railway bridge

The static and dynamic analysis of reinforced concrete latticework load-carrying capacity was carried out in this paper.

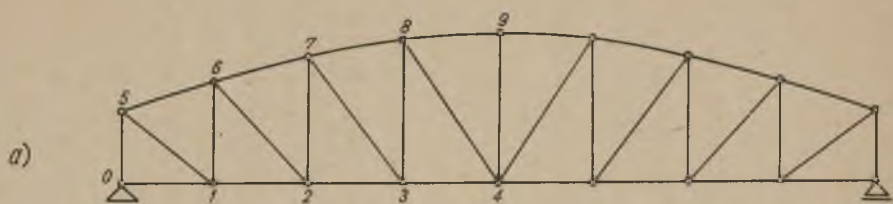
At the same time the rigidity of knots and the cooperation of platform were taken into consideration. The results of computations have been experimentally checked by means of rods' strains and deflexions. The dynamic additive for different structural elements as well as other dynamic parameters have been determined.



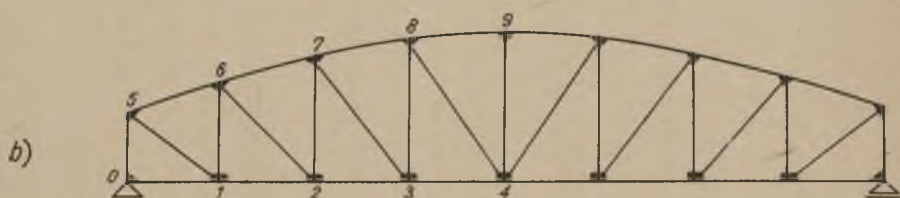
Rys.1. Szkic ogólny badanego mostu
 a) widok, b) przekrój podłużny, c) przekrój poprzeczny A-A



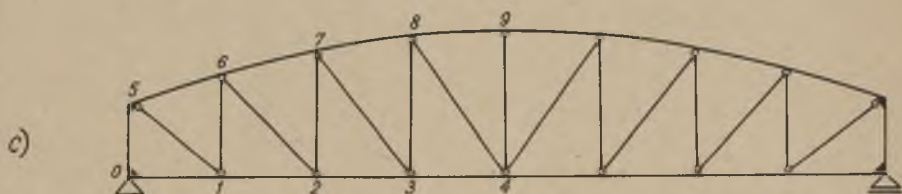
Rys-2. Charakter uszkodzeń kratownicy



Schemat I – kratownica o węzłach przegubowych

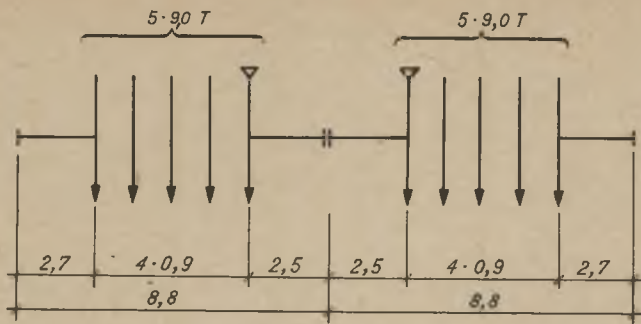


Schemat II – kratownica o węzłach sztywnych

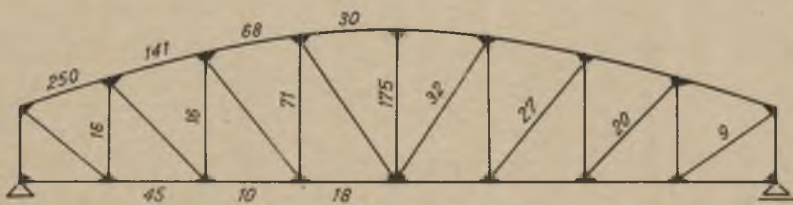


Schemat III – ramownica zamknięta z przegubowo połączonymi prętami wypełnienia

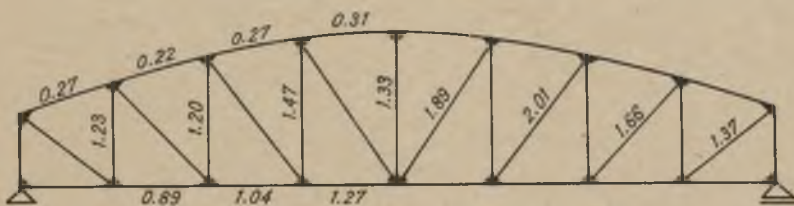
Rys.3. Obliczeniowe schematy statyczne



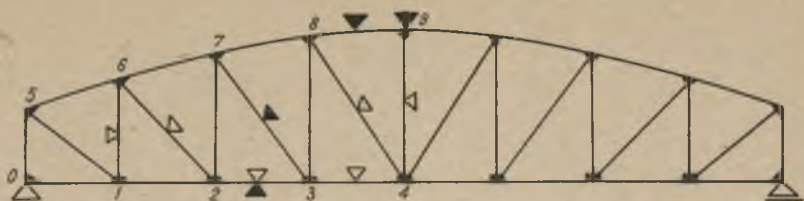
Rys.4. Schemat obciążenia ruchomego



Rys.5. Procentowe wartości naprężeń dodatkowych



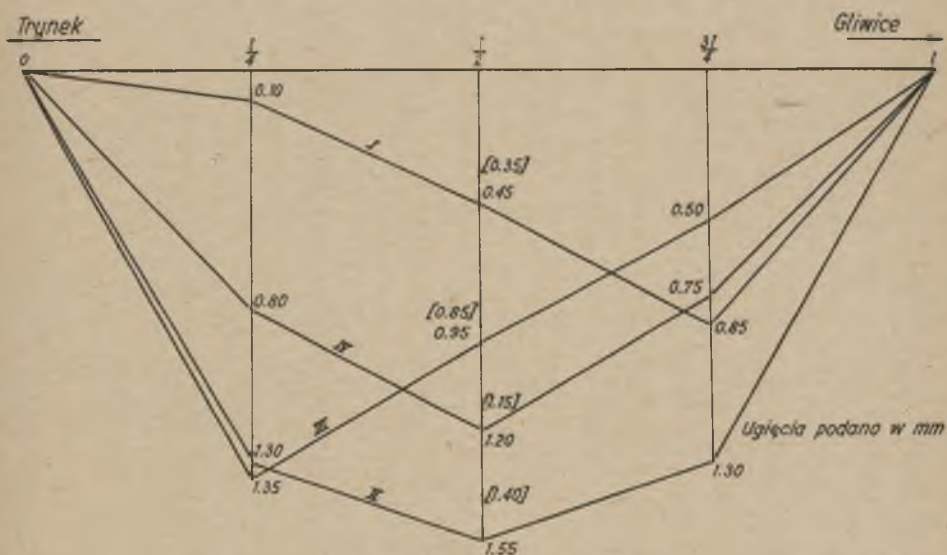
Rys.6. Wartości $\alpha = \frac{\sigma_{obl}}{\sigma_{dop}}$



Rys.7. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

- ▽ - pomiar na stali
- ▼ - pomiar na betonie

Rzędne w nawiasach odnoszą się do kratownicy wschodniej



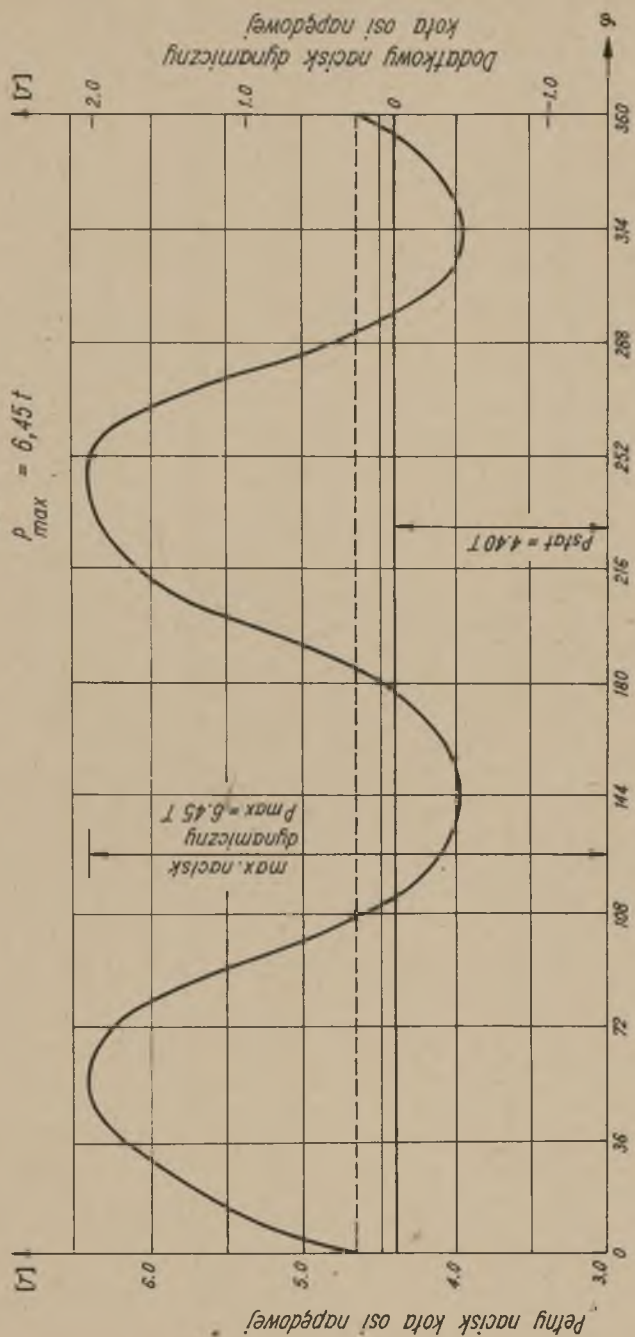
Rys.8. Linie ugięcia belek kratowych

- Linia I - 1 parowóz TW3 na prawej stronie mostu
- Linia II - 2 parowozy TW3 w ustawieniu symetrycznym
- Linia III - 1 parowóz TW3 na lewej stronie mostu
- Linia IV - 1 parowóz TW3 na środku mostu

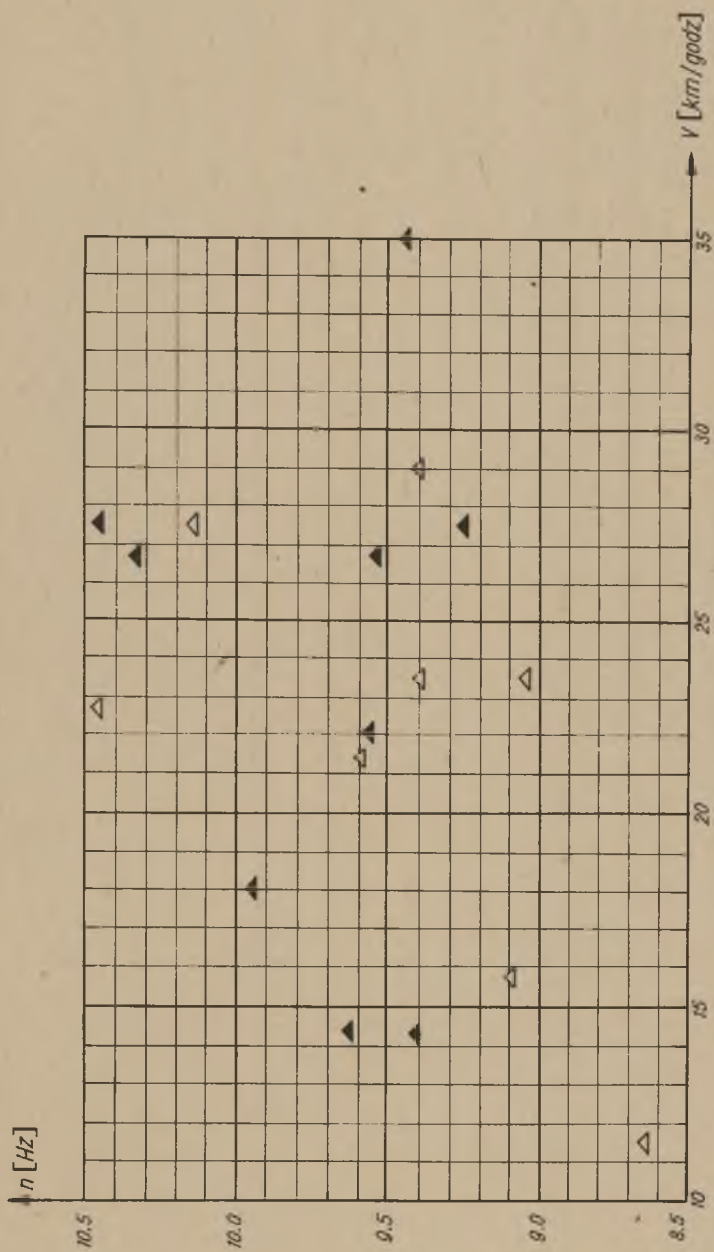
$$P_{stat} = 4,40 \text{ t}$$

$$P_{dyn} = 2,05 \text{ t}$$

$$P_{max} = 6,45 \text{ t}$$



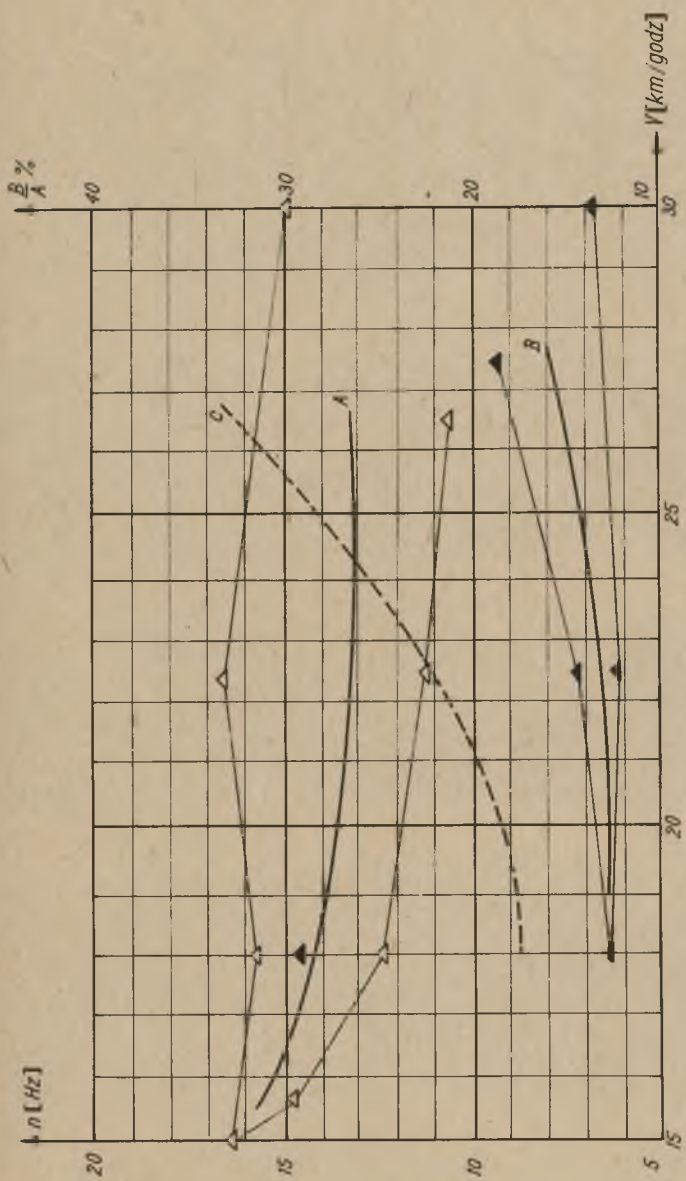
Rys.9. Wykres dynamicznego nacisku koła osi napędowej parowozu wąskotorowego TW-47



Rys.10. Częstotliwości drgań wymuszonych mostu jako funkcja prędkości

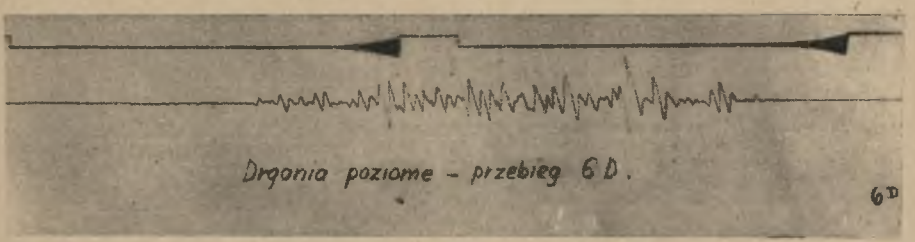
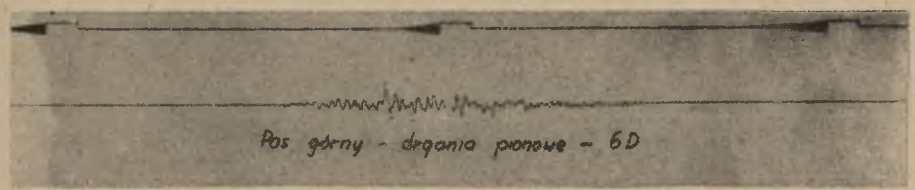
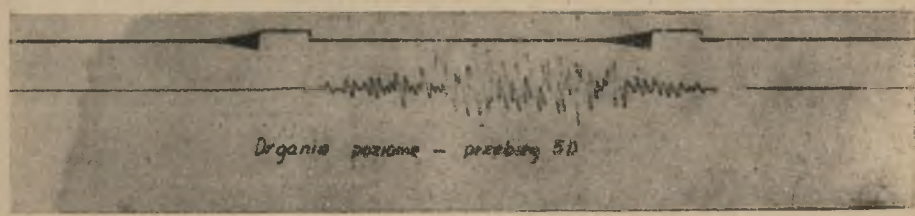
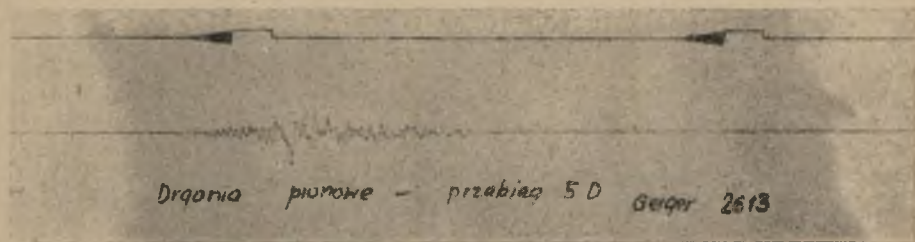
▲ - częstotliwości przy obciążeniu 2 parowozami

△ - częstotliwości przy obciążeniu 1 parowozem

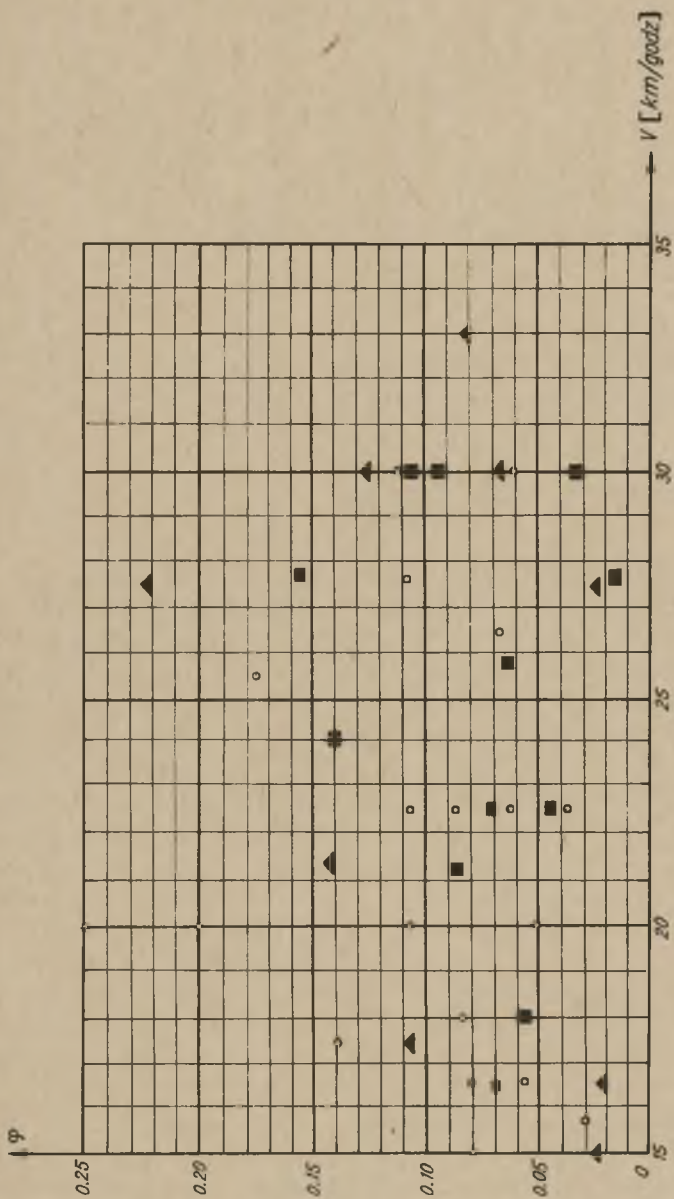


Rys.11. Drgania pasa górnego

- A - częstotliwość pionowych drgań wymuszonych pasa górnego
- B - częstotliwość poziomych drgań wymuszonych pasa górnego
- C - procentowe wartości stosunku częstotliwości $\frac{B}{A}$



Rys.12. Taśmy z pomiaru drgań pionowych i poziomych pasa górnego



Rys. 13. Wykres zmienności dodatku dynamicznego

- o - dla pasa dolnego
- ▲ - dla słupków
- - dla krzyżulców