

WIADYSŁAW WACHNIEWSKI

ANALIZA PRZYCZYŃ AWARII

WIADUKTU NAD TORAMI KOLEJOWYMI W ZABRZU

Streszczenie. Awaria wiaduktu w Zabrze nastąpiła podczas przejazdu ciągnika i platformy załadowanej koparką łyżkową. Dokonana analiza statyczna wykazała, że obciążenia przyjęte w projekcie i obciążenia, które miały miejsce podczas awarii, nie różniły się w sposób istotny. Stwierdzono, że przyczyną awarii było złe rozwiązanie konstrukcyjne węzłów wahadłowej ramy podporowej.

W dniu 13 kwietnia 1959 r. nastąpiła katastrofa wiaduktu drogowego w Zabrze, który zawalił się podczas przejazdu ciągnika i transportowaną tym ciągnikiem platformą załadowaną koparką łyżkową.

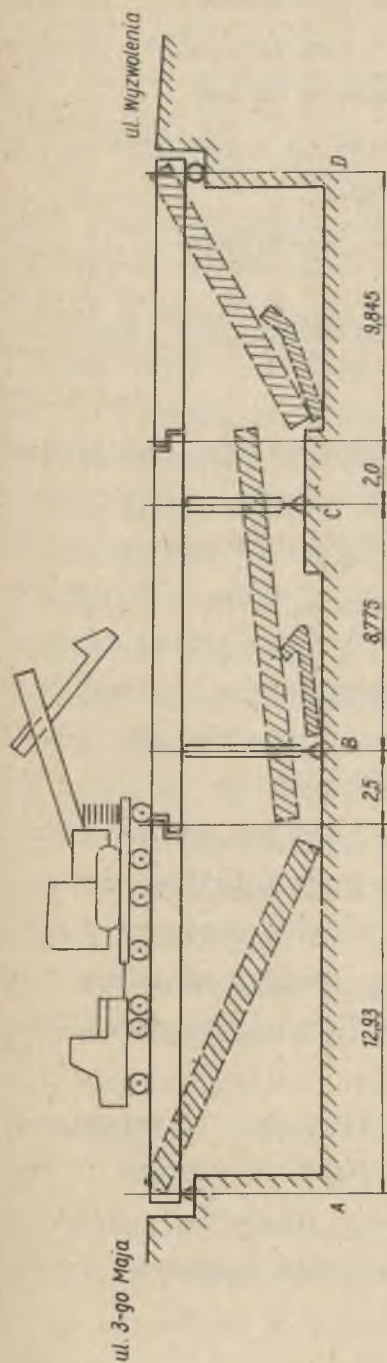
Katastrofa ta nie została dotychczas omówiona w prasie technicznej. Ponieważ o przyczynach tej katastrofy były bardzo różnorodne i błędne wypowiedzi, przeto wskazanym jest naświetlenie jej prawdziwych przyczyn. Przemawiają zatem również względy dydaktyczne, gdyż popełnione błędy lub niedociągnięcia służą najlepszym materiałem pouczającym dla techników i inżynierów.

1. KRÓTKI OPIS TECHNICZNY WIADUKTU

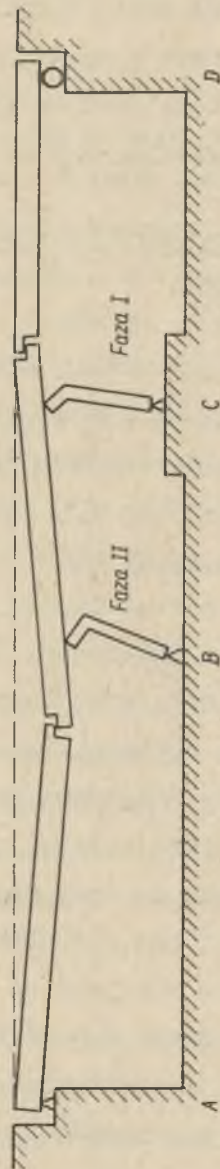
Wiadukt pokazany szkicowo na rys. nr 1 był wykonany w konstrukcji stalowej i składał się z trzech przęseł: środkowego dwuwspornikowego oraz dwóch przęseł skrajnych. Każde przęsło składało się z sześciu głównych belek podłużnych powiązanych w kilku miejscach poprzecznymi pionowymi przeponami na całej wysokości belek. W poziomie górnych pasów belek zastosowano prefabrykowane płyty żelbetowe powiązane z konstrukcją stalową przęseł. W ten sposób każde przęsło tworzyło sztywną płytę poziomą.

Przęsło środkowe spoczywało na dwóch podporach wahadłowych. Przęsła skrajne były oparte jednym końcem na przyczółku, drugim na wsporniku belki środkowej. Na przyczółku "A" od ulicy 3 Maja znajdowały się łożyska stałe, na przyczółku "D" od ulicy Wyzwolenia łożyska ruchome jednorolkowe. Przeguby na wspornikach wykonane były z płyt i trzpieni pionowych ograniczających przesuw poziomy. Dwie podpory wahadłowe wykonano o ustroju ramowym w kierunku poprzecznym wiaduktu. Każda podpora składała się z rozporcy i dwóch szupów. Belki podłużne przęsła środkowego oparto na łożyskach stycznych nieprzesuwanych umieszczonych na rozporach podpór wahadłowych. Szupy ram spoczywały na łożyskach kulistych opartych na fundamentach.

W konstrukcji wiaduktu zastosowano następujące łożyska: na przyczółku "A" łożysko stałe (styczne), na przyczółku "D" łożysko ruchome rolkowe, na podporach wahadłowych "B" i "C" łożyska stałe styczne nieprzesuwane umieszczone na rozporach ram, na wspornikach przęsła środkowego przeguby trzpieniowe.



Rys. 1. Stan przed 1 po katastrofie



Rys. 2. Początkowe fazy katastrofy

We wszystkich łożyskach stycznych nieprzesuwność podpór zapewniono występami na górnych płytach łożyskowych o wysokości zaczepu około 8 mm i długości zaczepu 60 mm.

Nawierzchnia wiaduktu posiadała spadek 2% w kierunku ul. Wyzwolenia i 1,15% w kierunku ul. 3 Maja.

Na nawierzchni ułożone były dwa tory tramwajowe.

2. STAN WIADUKTU PO ZAWALENIU SIĘ I PRZYPUSZCZALNY PRZEBIEG KATASTROFY

Zawalenie konstrukcji wiaduktu nastąpiło w czasie przejazdu po nim ciągnika z koparką łyżkową. Koparka była umieszczona na platformie czteroosiowej i transportowana za pomocą trójosiowego ciągnika z ul. Wyzwolenia na ul. 3 Maja. Transport odbywał się prawą stroną wiaduktu tuż przy krawężniku jezdni. Katastrofa nastąpiła, gdy ciągnik znajdował się w odległości około 3 m od przyczółka "A", a platforma z koparką nad przegubem wspornika przy podporze "B" (patrz rys. nr 1). Stan po katastrofie pokazany jest na rys. nr 1. Skrajne przęsła wiaduktu opadły podporami przegubowymi na tory kolejowe opierając się drugimi końcami o przeczółki. Przęsło środkowe opadło prawie płasko na tory kolejowe i peron. Podpora wahadłowa "B" znalazła się pod przęsłem środkowym, a podpora wahadłowa "C" pod przęsłem skrajnym od ul. Wyzwolenia.

Na elementach konstrukcji stalowej wiaduktu stwierdzono następujące uszkodzenia: ścięcie wszystkich 12 sworzni na przegubach wsporników przęsła środkowego, złamanie środnika rozpory ramy wahadłowej "B" oraz wyboczenie środnika rozpory ramy "C".

Z położenia koparki w chwili katastrofy i z wzajemnego położenia elementów konstrukcji stalowej wiaduktu po katastrofie, można odtworzyć poszczególne fazy wypadku, jak to przedstawiono na rys. nr 2.

Przy wjeździe koparki na wiadukt od ulicy Wyzwolenia nastąpiło lekkie wygięcie się środniczki rozpory wahadłowej "C", z częściowym naderwaniem blachy środniczki. Głowica podpory wahadłowej, z umieszczonymi na niej łożyskami stycznymi, musiała przyjąć ukośne położenie na skutek wygięcia osi pionowej podpory. Wskazują na to wstępne wygięcia środniczki, ślady uszkodzeń na płytkach oporowych łożysk oraz zgniot nakrętek śrub podtrzymujących górne płyty łożysk na przęsle środkowym. W tej fazie podpora wahadłowa prawdopodobnie nie posiadała już zabezpieczenia na przesuw poziomy, gdyż obrzeża górnej płyty łożyskowej podniosły się nad płytką oporową, umieszczoną na rozporze podpory wahadłowej "C".

Gdy ciągnik z koparką znajdował się nad drugą podporą "B", nastąpiło bardzo silne wygięcie się blachy środniczki rozpory ramy "B" i jej złamanie prawie na całej długości rozpory. Nastąpiło obniżenie się tej podpory i przechylenie przęsła skrajnego i środkowego. W tym momencie musiało nastąpić ścięcie wszystkich trzpieni pionowych na przegubach wsporników i wypchnięcie podpory wahadłowej "C" w stronę ul. Wyzwolenia pod skrajne przęsło "C-D".

Najsłabszym elementem w konstrukcji nośnej wiaduktu okazały się środniczki rozpór podpór wahadłowych. Z charakteru wygięcia środniczki i położenia podpór po katastrofie wynika bez żadnych wątpliwości, że te odkształcenia nastąpiły w pierwszej fazie katastrofy i nie są skutkiem wtórnym po upadku konstrukcji.

3. PRZYCZYNY KATASTROFY

3.1. Usterki projektu techniczno-roboczego.

Sprawdzenie projektu techniczno-roboczego wykazało, że obliczenie statyczne i rysunki robocze przęsła wiaduktu zostały wykonane starannie i poprawnie. Stwierdzono natomiast poważne usterki i niedociągnięcia w obliczeniu statycznym i rysunkach roboczych wahadłowych ram podporowych a mianowicie:

3.1.1. Nie wykonano obliczenia węzłów ram. Zagadnienie dokładnego obliczenia węzłów ram nie jest jeszcze w literaturze technicznej rozwiązane i z tego powodu stosowane są sposoby przybliżone, które mają na celu uzyskanie wytycznych umożliwiających poprawne konstruowanie węzłów.

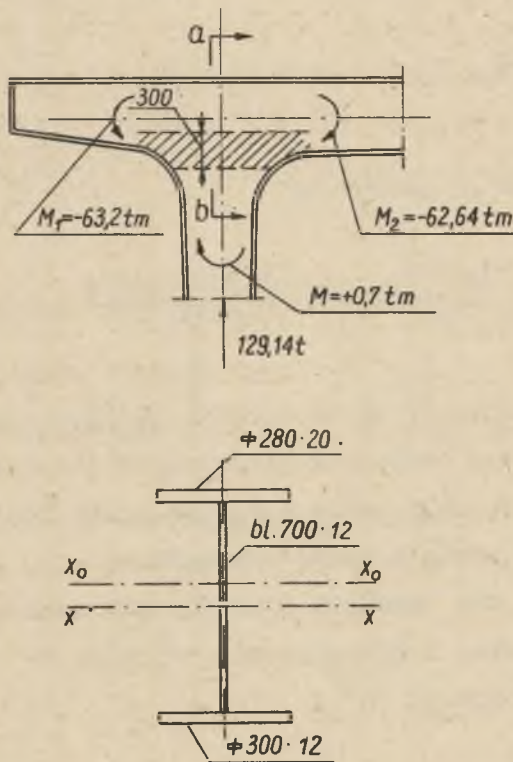
Poniżej podano przybliżone sprawdzenie węzła ramy podporowej omawianego wiaduktu. Zastosowano wzory podane przez F. Bleicha w II tomie "Stahlhochbauten". Obliczenie wykonano przy obciążeniach przyjętych w projekcie wiaduktu, przy czym siły osiowe i momenty gnące podane na rys. nr 3 wzięto z obliczenia statycznego tego projektu.

Obciążenie symetryczne momentami

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = - \frac{63,20 + 62,64}{2} = - 62,92 \text{ tm}$$

Przy obciążeniu symetrycznym sprawdzono przekrój a-b przyjmując fikcyjny dolny pas jako część środnika o szerokości 300 mm

Przekrój: $F = 28,0 \cdot 2,0 + 30,0 \cdot 1,2 + 70,0 \cdot 1,2 = 56,0 + 36,0 + 84,0 = 176,0 \text{ cm}^2$.



Rys. 3

Moment statyczny

$$S_x = 56,0 \cdot 36,0 - 36,0 \cdot 35,6 = 2015 - 1280 = 735 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{735}{176} = 4,18 \text{ cm}$$

$$J_x = \frac{1}{12} \cdot 1,2 \cdot 70^3 + 2015 \cdot 36,0 + 1260 \cdot 35,6 = 152300 \text{ cm}^4$$

$$J_{x_0} = 152300 - 176,0 \cdot 4,18^2 = 149230 \text{ cm}^4$$

$$W_{xd} = \frac{149230}{40,38} = 3450 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_d = \frac{6292000}{3450} = 1820 > 1300 \text{ kg/cm}^2$$

Obciążenie antysymetryczne

$$- \frac{M_1 - M_2}{2} = - \frac{63,20 - 62,64}{2} = - 0,56 \text{ tm}$$

Ponieważ momenty od obciążenia antysymetrycznego są bardzo małe przeto ten przypadek sprawdzenia nie wymaga.

Sprawdzenie naprężenia w dolnym pasie wężła od strony rozporu jak dla pręta o dużej krzywiznie.

$M_2 = - 62,64 \text{ tm}$. Przekrój fikcyjny jak na rys. nr 4.

Ponieważ promień krzywizny osi obojętnej "r" jest większy od wysokości przekroju "h"

$$89,0 > 64,0$$

więc "Z" obliczono wzorem przybliżonym

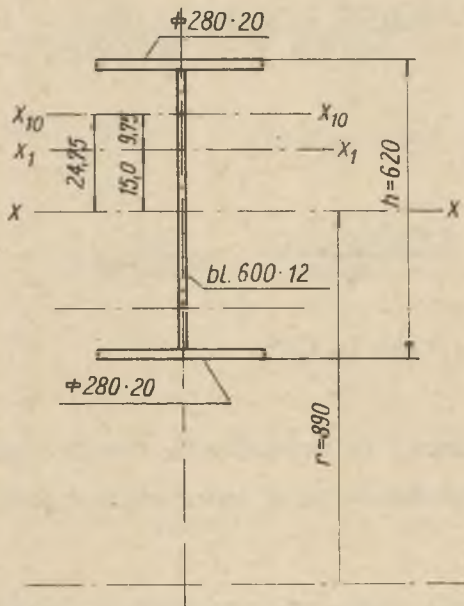
$$Z = J + \frac{F_d \cdot v_d^3}{r_d} - \frac{F_g \cdot v_g^3}{r_g}$$

$$F_d = F_g = 28,0 \cdot 2,0 + 30,0 \cdot 1,2 = 56,0 + 36,0 = 92,0 \text{ cm}^2$$

Moment statyczny połowy przekroju względem osi X,

$$S = 56,0 \cdot 16,0 = 896,0 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{896,0}{92,0} = 9,75 \text{ cm}$$



Rys. 4

$$V_d = V_g = 15,0 + 9,75 = 24,75 \text{ cm}$$

$$r_g = 89,0 + 24,75 = 113,75 \text{ cm}$$

$$r_d = 89,0 - 24,75 = 64,25 \text{ cm}$$

Moment bezwładności całego przekroju względem osi X

$$J_x = 125700 \text{ cm}^4$$

$$Z = 125700 + 92,0 \cdot 24,75^3 \left(\frac{1}{64,25} - \frac{1}{113,75} \right) = 146300 \text{ cm}^4$$

$$\sigma = \frac{M_2}{r \cdot F} + \frac{M_2}{Z} \cdot v \cdot \frac{F}{r+v}$$

$$\sigma_g = \frac{6264000}{89,184,0} + \frac{6264000 \cdot 32,0}{146300} \cdot \frac{89}{89 + 32} =$$

$$= + 1392 > 1300 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_d = \frac{6264000}{89,184,0} - \frac{6264000 \cdot 32,0}{146300} \cdot \frac{89}{89 - 32} =$$

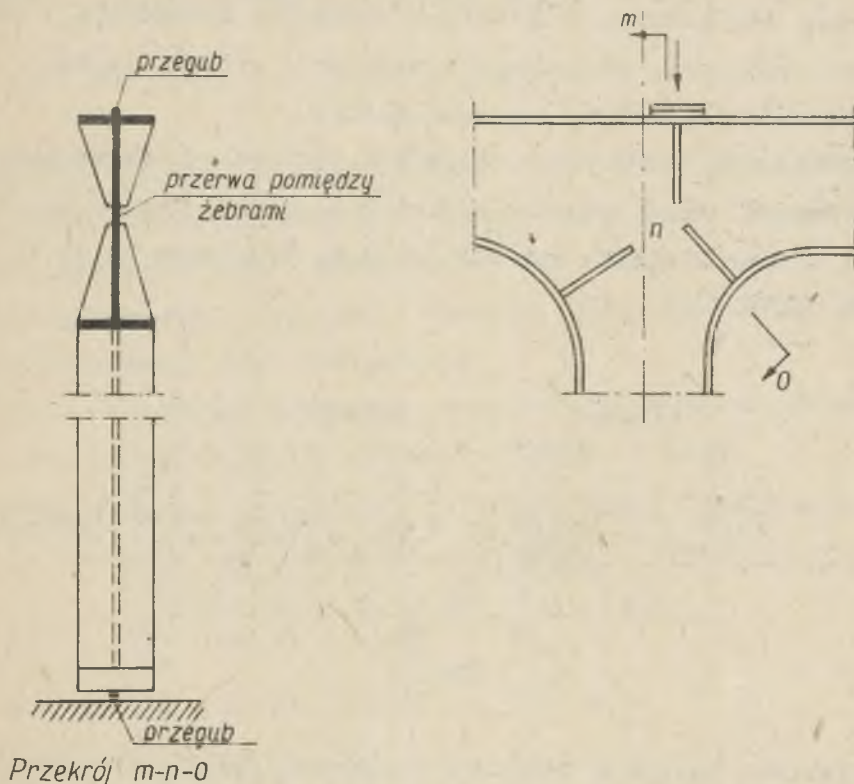
$$= - 1758 > 1300 \text{ kg/cm}^2$$

Z powyższego wynika, że naprężenia w węźle ramy przekraczają naprężenia dopuszczalne przy przyjętym w projekcie obciążeniu ruchomym.

3.1.2. Wadliwie wykonano konstrukcję węzłów ram, w których zastosowano krótkie żebra usztywniające przerwane w środkowej partii węzła (patrz rys. nr 5).

Przy takim rozwiązaniu żebra nie usztywniają należycie środka, obciążonego bezpośrednio siłą skupioną od głównej belki podłużnej oraz siłą osiową słupa ramy.

Na rys. nr 5 pokazano przekrój łamany po linii m-n-o, który obrazuje niedostateczne usztywnienie węzła ramy.



Rys. 5

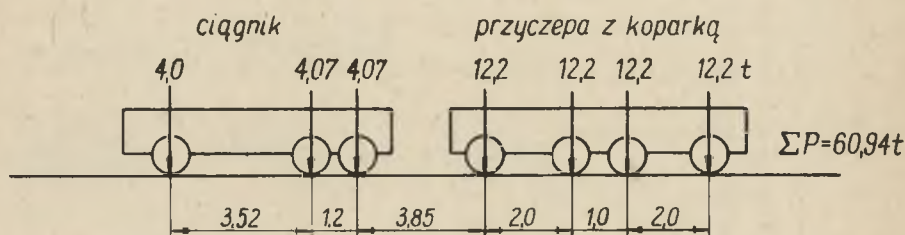
Przerwa pomiędzy żebrami stwarza dodatkowy przegub, gdyż moment bezwładności blachy o grubości 12 mm względem własnej osi jest bardzo mały.

Ponieważ przy dużych naprężeniach w pasach i w środku węzła krótkie żebra nie zabezpieczają stateczności środka, przeto w przerwie pomiędzy żebrami nastąpiła utrata stateczności środka, która spowodowała katastrofę.

4. SPRAWDZENIE RAMY WAHADŁOWEJ "R" NA OBCIĄŻENIE, KTÓRE SPOWODOWAŁO KATASTROFĘ

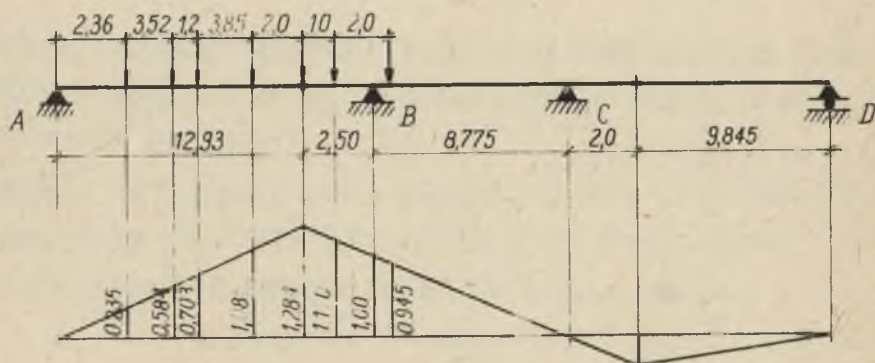
Ponieważ obciążenie, przy którym nastąpiła katastrofa, różni się od obciążenia przyjętego w projekcie, przeto zaszła potrzeba zbadania wpływu tego obciążenia.

Obciążenie stanowiły - ciągnik i przyczepa z załadowaną na niej koparką M6-2. Schemat nacisków na osie pokazano na rys. nr 6. Ciężar ciągnika wynosił 12,14 t, przyczepy 12,10 t, koparki 36,70 t.



Rys. 6

Najniekorzystniejsze ustawienie ciężarów ruchomych pokazano na linii wpływowej podpory "B" wiaduktu (rys. nr 7).



Rys. 7

Największa reakcja:

$$B = 4,0 \cdot 0,235 + 4,07 \cdot (0,584 + 0,703) + 12,2 \cdot (1,085 + 1,284 + 1,170 + 0,945) = 60,83 \text{ t.}$$

Ponieważ w chwili katastrofy na jezdni i chodnikach była bardzo mała liczba przechodniów, przeto obciążenie tłumem ludzi w wysokości 400 kg/m^2 pominięto.

Pominięto również obciążenie wiatrem, który był bardzo słaby i wpływ którego jest nieistotny.

Rozkład obciążenia ruchomego na poszczególne belki główne obliczono za pomocą linii wpływowych (rys. nr 8).

Reakcje belek głównych ze współczynnikiem dynamicznym 1,3.

$$B'_3 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,351 = 27,8 \text{ t}$$

$$B'_2 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,280 = 22,1 \text{ t}$$

$$B'_1 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,204 = 16,1 \text{ t}$$

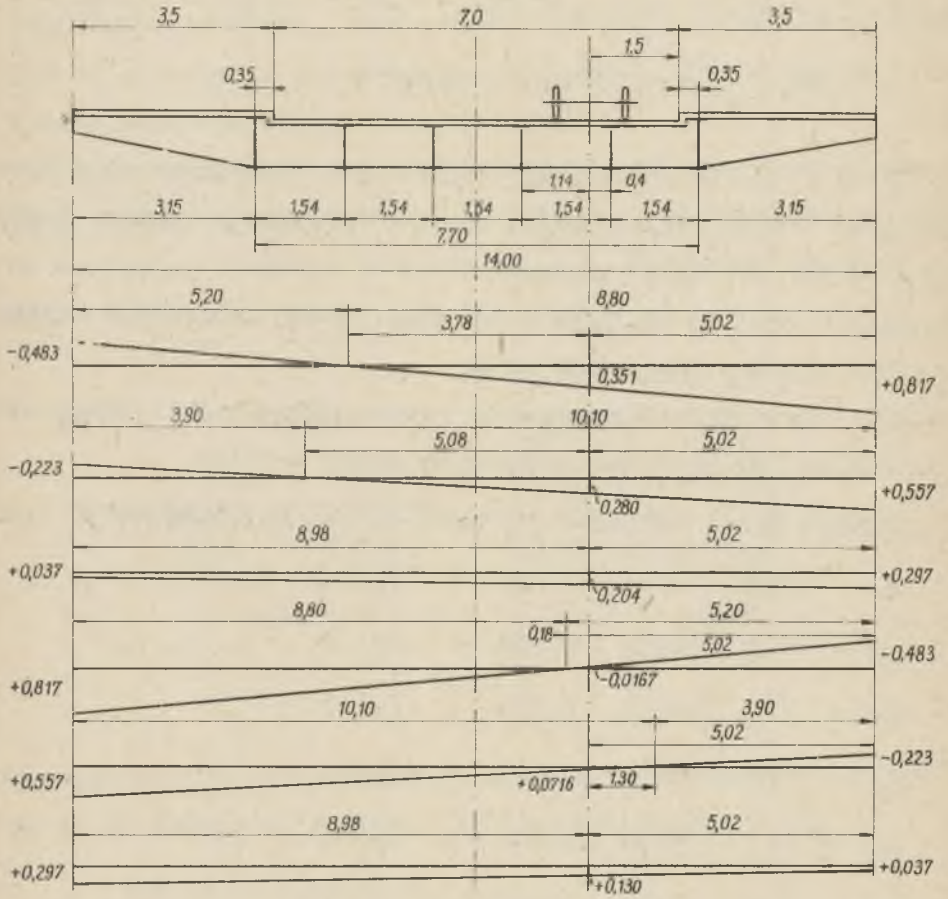
$$B_1 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,130 = 10,3 \text{ t}$$

$$B_2 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,0716 = 5,6 \text{ t}$$

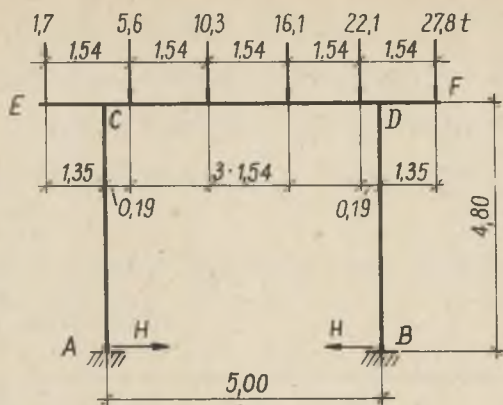
$$B_3 = 1,3 \cdot 60,83 \cdot 0,0167 = 1,7 \text{ t}$$

Na rys. nr 9 podano wymiary i obciążenie siłami skupionymi od obciążenia ruchomego ramy podporowej "B", a na rys. nr 10 wykres momentów i reakcje podporowe od tego obciążenia.

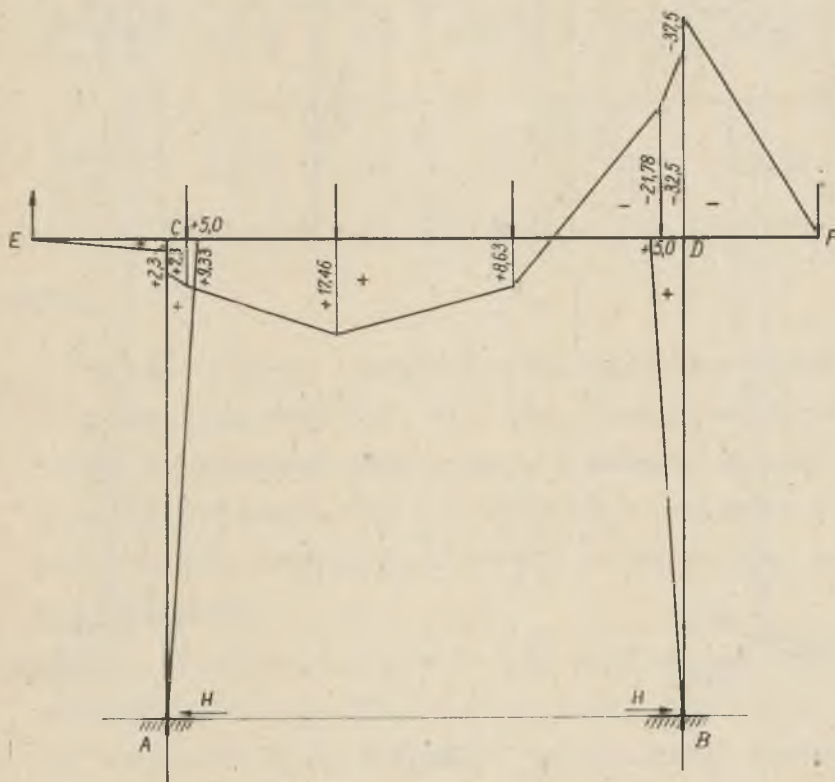
Wykres momentów i reakcje od obciążenia ruchomego i obciążenia stałego podano na rys. nr 11. Momenty i reakcje od obciążenia stałego wzięto z projektu technicznego.



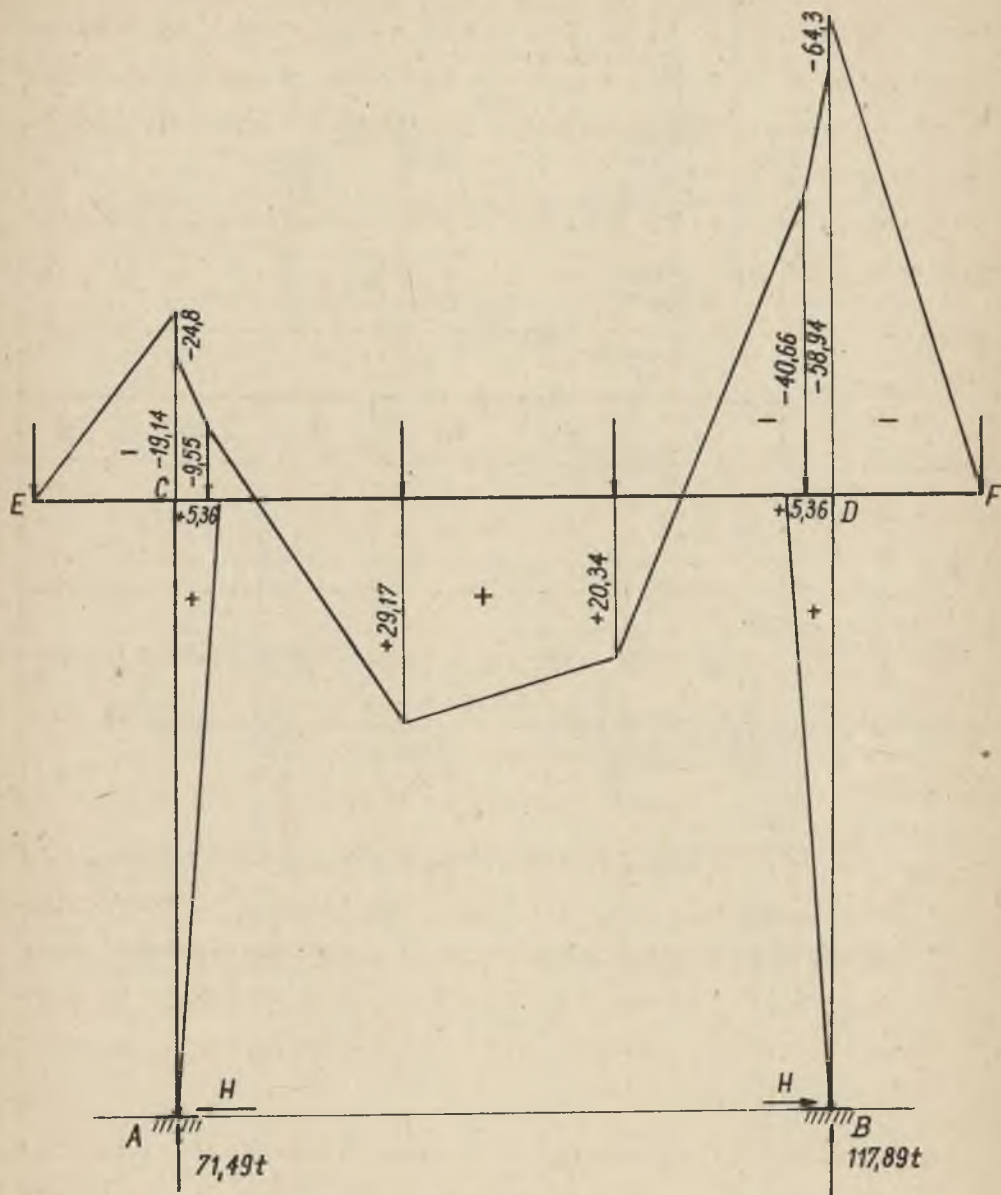
Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11

Poniżej zestawiono wyniki obliczeń ramy "B" przy przyjętych w projekcie obciążeniach normatywnych oraz przy obciążeniach, przy których nastąpiła katastrofa. W porównaniu tym reakcje i momenty obliczone są z jednakowym współczynnikiem dynamicznym 1,3.

W zestawieniu cyfry z projektu przy obciążeniach normatywnych przyjęto jako 100%.

Obliczenie przy	reakcja B		M_{DF}		M_{DE}	
	t	%	tm	%	tm	%
obc. normatywnych	129,14	100	- 63,2	100	- 62,64	100
obc. awaryjnych	117,89	91	- 64,3	102	- 58,94	94

5. WNIOSKI

5.1. Z podanego powyżej zestawienia porównawczego wynika, że przyczyną katastrofy nie było przeciążenie wiaduktu ciągnikiem i przyczepą, gdyż reakcje i momenty węzłowe przy obciążeniach normatywnych przyjętych w projekcie i przy obciążeniach, przy których nastąpiła katastrofa, są prawie identyczne.

5.2. Istotną przyczyną katastrofy było niewłaściwe podejście teoretyczne do zagadnienia pracy węzła ramy i złe rozwiązanie konstrukcyjne, które nie zabezpieczało stateczności środka tego węzła.

АНАЛИЗ ПРИЧИН ОБРУШЕНИЯ ГОРОДСКОГО ВИАДУКА НАД ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПОЛОТКОМ В ГОРОДЕ ЗАБЖЕ

Резюме

Обрушение виадука в г. Забже произошло при проезде трактора и платформы загруженной ложковим багром. Анализ статического расчета выявил, что не было существенной разницы между нагрузкой принятой в проекте и нагрузкой, которая имела место во время обрушения виадука. Выявлено, что причиной обрушения виадука было плохое конструктивное решение узлов качающейся рамной опоры.

ÜBER DIE URSACHEN DES EINSTURZES EINES VIADUKTES IN ZABRZE

Zusammenfassung

Während der Durchfahrt eines Traktors und einer mit Bagger beladenen Plattform ist die Zerstörung des Viaduktes in Zabrze eingetroffen. Aus der Untersuchung geht hervor, dass zwischen der Belastung die in der statischen Berechnung angenommen wurde und der die den Zusammenbruch hervorgerufen hat fast kein Unterschied war. Es wurde bewiesen, dass die Zerstörung infolge mangelhaft ausgebildeter Rahmenecken der Pendelstützenrahmen eingetreten ist.