

Doświadczalna weryfikacja modelu obliczeniowego zintegrowanego obiektu mostowego

Jakub Jarosz

Katedra Geotechniki i Budowli Inżynierskich, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail: kubajarosz87@gmail.com

Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki badań polegających na pomiarze przemieszczeń konstrukcji zintegrowanego mostu żelbetowego w ciągu łącznika drogi ekspresowej S8. Zaprezentowano wartości ugięć pionowych w środku rozpiętości przęsła oraz wielkości przemieszczeń poziomych korpusu przyczółka. Analizowano zachowanie konstrukcji w przypadkach obciążenia pojazdami hamującymi oraz ustawionymi nieruchomo na ryglu lub klinie odłamu. Ponadto zbadano wpływ początkowej prędkości hamowania na wielkość przemieszczeń poziomych.

Wyniki porównano z rezultatami symulacji numerycznych. Rozpatrzono dwa typy modelu obliczeniowego – w pierwszym pominięto współpracę rygla z podłożem gruntowym i nawierzchnią drogową, a w drugim przeciwnie. W obu przypadkach przyjęto takie same właściwości geotechniczne nasypu za przyczółkiem oraz posadowienia. Przewidywane wg obu modeli ugięcia pionowe zestawiono ze sobą.

Zwiększenie sztywności przęsła w wyniku współpracy konstrukcji z warstwami drogowymi uwzględniono poprzez zwiększenie grubości żelbetowej płyty pomostu. Przekrój rzeczywisty, niejednorodny materiałowo, sprowadzono do przekroju homogenicznego. Warstwy drogowe przeliczono na ekwiwalentne warstwy żelbetowe. Obliczono położenie osi obojętnej przekroju sprowadzonego, sprowadzony moment bezwładności oraz odpowiadającą mu wysokość konstrukcyjną rygla.

Zilustrowano zmiany wielkości ugięć pionowych oraz przemieszczeń poziomych w czasie dla wariantów obciążenia pojazdami hamującymi. Porównano wpływ hamowania na przęsła oraz w strefie klina odłamu. Przeprowadzono analizę aktywacji przemieszczenia wywołanego obciążeniem pojazdami poruszającymi się, w odniesieniu do przemieszczenia spowodowanego ciężarem statycznym ustawionym na klinie.

Słowa kluczowe: mosty zintegrowane, obciążenie próbne, przekrój sprowadzony, współpraca konstrukcji z gruntem

1. Wprowadzenie

W przeszłości proces projektowania obiektów mostowych wymagał znacznie większego nakładu pracy niż dzisiaj. Było to spowodowane nie tylko ręcznym wykonywaniem rysunków w tuszu, ale również czasochłonnymi obliczeniami statycznymi i wytrzymałościowymi. W przeciwieństwie do aktualnych tendencji w projektowaniu, jeszcze dekadę temu starano się sprowadzać modele do jak najprostszych schematów prętowych. Aktualnie rozwój technologiczny pozwala na dokładną analizę każdego szczegółu konstrukcji, a mimo to – paradoksalnie - projektowanie trwa krócej.

Taki stan rzeczy niesie ze sobą pewne zagrożenia. Ze względu na to, że proces wykonywania obliczeń wytrzymałościowych sprowadza się zwykle do wypełnienia kilkunastu

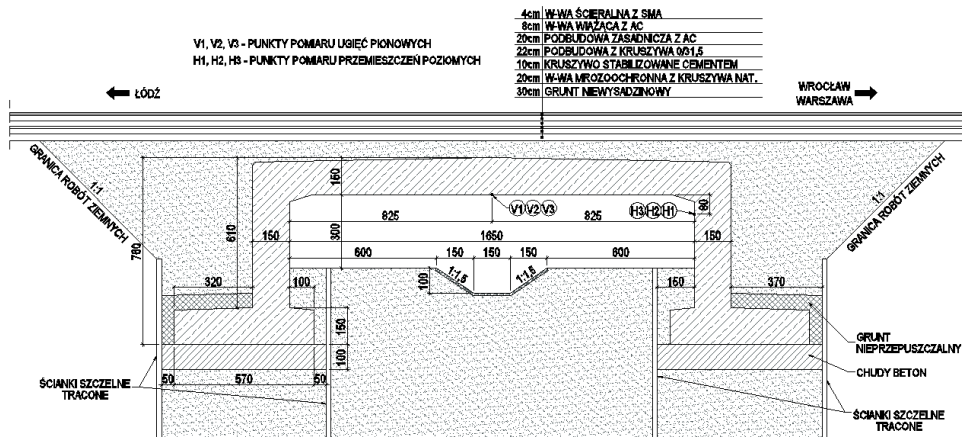
parametrów w oknie dialogowym programu, a modele obliczeniowe są edytowalne, często nie przykładają się do nich należytej uwagi. Panuje przekonanie, że wprowadzenie ewentualnych zmian w modelu nie wpłynie istotnie na nakład pracy.

Pierwotnie przyjęty model może okazać się nieadekwatny do rzeczywistego zachowania konstrukcji. Uwzględnienie pozornie nieistotnych czynników może być kluczowe dla prawidłowego przewidzenia pracy budowli. Na szczególony należy szczególnie zwracać uwagę, gdy mamy do czynienia z obiektami współpracującymi z gruntem lub otoczonych wysokim nasypem.

W referacie przedstawiono wyniki badań zachowania ramowego mostu zintegrowanego. Wyniki te porównano z rezultatami symulacji numerycznych dla dwóch wariantów modelu obliczeniowego – uproszczonego oraz uwzględniającego współpracę ryglu z podłożem i warstwami drogowymi. Wnioski z pracy mogą stanowić swego rodzaju przestrożę dla projektantów bagatelizujących wpływ elementów niekonstrukcyjnych na pracę obiektu.

2. Charakterystyka badań

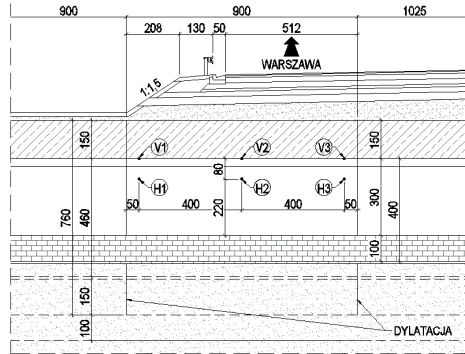
Badania przeprowadzono na przejściu PZ-S-7-150 dla średnich zwierząt pod łącznikiem drogi ekspresowej S8 w km 78+765,00. Obiekt składa się z sześciu żelbetonowych ram posadowionych bezpośrednio na gruncie z gliny zwięzłej, o rozpiętości teoretycznej 18m oraz szerokościach 9m i 10,25m. Zasypkę inżynierską wykonano z zagęszczonego piasku średniego. Przekrój podłużny przez segment, który został wykorzystany do badań pokazano na rys. 1, a przekrój poprzeczny na rys. 2.



Rys. 1. Przekrój podłużny przez badany segment przejścia PZ-S-7-150 dla średnich zwierząt oraz lokalizacja punktów pomiaru przemieszczeń

Badania polegały na pomiarze czujnikami indukcyjnymi ugięć pionowych w środku rozpiętości przęsła oraz przemieszczeń poziomych w narożu ramy. Pomiarów dokonano w punktach położonych w osi i przy krawędziach segmentu. Jednostką odpowiedzialną za prawidłowe wykonanie pomiarów był Instytut Badawczy Dróg i Mostów – filia w Kielcach.

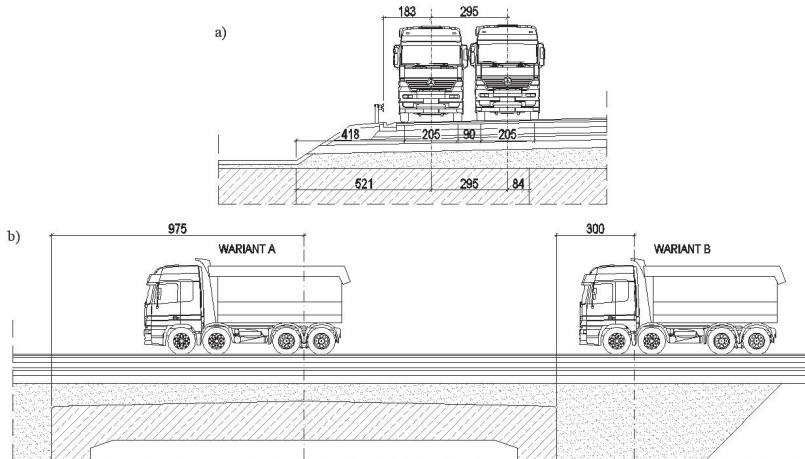
Z uwagi na to, że spodziewano się bardzo małych wartości przemieszczeń, należało zapobiec wszelkim niepożądanym efektom, które mogłyby zaburzyć prawidłowe odczyty. Za jeden z takich efektów uznano przemieszczanie się wraz z gruntem rusztowań, na których zainstalowano czujniki. W celu minimalizacji ryzyka wystąpienia tego zjawiska, rusztowania umieszczono w polu ograniczonym przez wewnętrzne ścianki szczelne.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez badany segment oraz lokalizacja punktów pomiaru przemieszczeń

Przemieszczenia wywoływano działaniem dwóch pojazdów ciężarowych marki Mercedes Actros 4141 ze skrzyniami wypełnionymi humusem. Łączna masa wywoitek wynosiła 103,9t. Pomiarów dokonano w następujących wariantach obciążenia:

- pojazdy ustawiono nieruchomo w środku rozpiętości przęsła (wariant A),
- pojazdy ustawiono nieruchomo za przyczółkiem - na klinie odłamu (wariant B),
- kierowcom pojazdów nakazano hamować na długości przęsła z prędkościami początkowymi wynoszącymi 20km/h, 30km/h, 40km/h oraz 50km/h (warianty C-20, C-30, C-40 i C-50),
- kierowcom pojazdów nakazano rozpocząć hamowanie w odległości 15m od przyczółka z prędkościami początkowymi wynoszącymi 20km/h, 30km/h, 40km/h oraz 50km/h (warianty D-20, D-30, D-40 i D-50).



Rys. 3. Ustawienie pojazdów dla wariantów obciążenia: a) A, B, C i D w przekroju poprzecznym, b) A i B w przekroju podłużnym

3. Analiza wyników

3.1. Porównanie ugięcia pionowego rygla konstrukcji rzeczywistej i modelu współpracującego z zasypką od obciążenia wg wariantu A

Pierwotnie przyjęty model numeryczny obiektu zakładał interakcję między gruntem a ścianami przednimi przyczółków. Współpracę zasypki inżynierskiej z konstrukcją

odzwierciedlono poprzez sprężyste podparcie korpusów w kierunku poziomym. Współczynnik podatności bocznej podłoża przyjęto równy 1600kN/m^3 [1].

Pionowy nacisk na podłoże gruntowe w poziomie posadowienia, od obciążeń stałych, wynosi 289kPa . Natomiast nacisk wywołany przez ciężar pojazdów podczas badań to $7,6\text{kPa}$. Konsolidacja gruntu spowodowana działaniem obciążeń stałych oraz występujących podczas procesu budowy była na tyle duża, że obciążenie pojazdami nie powodowało mierzalnych osiadań. Jest to tym bardziej uzasadnione ze względu na fakt, iż fundament został wykonany w obudowie ze ścianek szczelnych – można uznać, że w podłożu występował jednoosiowy stan odkształcenia.

W omawianym przypadku konstrukcję zamodelowano elementami powłokowymi zgodnie z rzeczywistymi wymiarami obiektu. Ze względu na znaczne grubości zasypki gruntowej nad rygłem oraz warstw nawierzchni drogowych, obciążenie od pojazdów zadano jako równomiernie rozłożone na polu wyznaczonym przez linie rozchodzenia się naprężeń – w nawierzchni drogowej pod kątem 45° oraz w zasypce pod kątem 7° [2].

Teoretyczne przewidywania wartości ugięć znacznie odbiegały od rzeczywistych wyników pomiarów. Przemieszczenia pionowe wynikające z modelu numerycznego były ok. 2-krotnie większe od wartości przemieszczeń faktycznych.

Tabela 1. Wartości ugięć teoretycznych i rzeczywistych dla przypadku obciążenia pojazdami ciężarowymi w środku rozpiętości przęsła

Punkt	Ugięcie rzeczywiste [mm]	Ugięcie teoretyczne [mm]	$\frac{\text{ugięcie teoretyczne}}{\text{ugięcie rzeczywiste}} \cdot 100\%$
V1	0,143	0,295	206,3%
V2	0,183	0,360	196,7%
V3	0,214	0,442	206,5%

3.2. Porównanie ugięcia pionowego rygła konstrukcji rzeczywistej i modelu współpracującego z zasypką oraz nawierzchnią drogową od obciążenia wg wariantu A

Ze względu na niezadowalającą zgodność wyników pomiarów z rezultatami teoretycznymi wynikającymi z pierwotnie przyjętego modelu, postanowiono obliczyć ugięcia pionowe dla przypadku, w którym wzięto pod uwagę współpracę między rygłem a zasypką i nawierzchnią drogową. Wpływ zasypki gruntowej i nawierzchni drogowej na sztywność przęsła uwzględniono poprzez zwiększenie wysokości konstrukcyjnej żelbetowej płyty pomostu. W tym celu przekrój niejednorodny materiałowo sprowadzono do przekroju homogenicznego. W pierwszej kolejności, warstwy zasypki gruntowej i nawierzchni drogowych przeliczono na ekwiwalentne warstwy żelbetowe, dzieląc pola przekrojów przez odpowiednie stosunki modułów sprężystości [3].

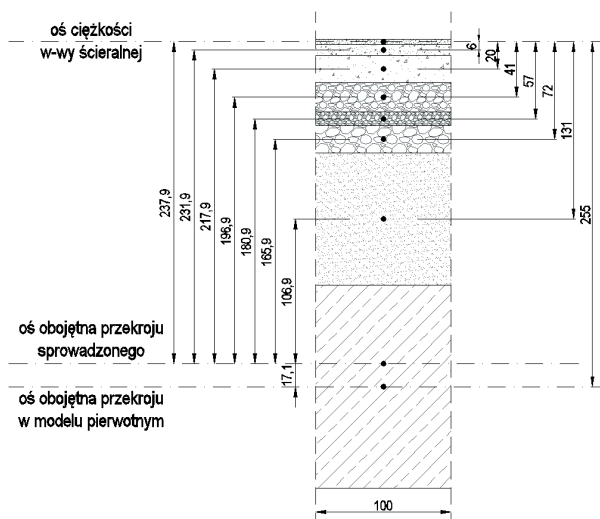
Następnie, na podstawie warunku równości momentów statycznych przekrojów poszczególnych warstw i przekroju całkowitego względem osi przechodzącej przez środek ciężkości warstwy ścieralnej obliczono położenie osi obojętnej przekroju sprowadzonego. Przesunięcie osi względem modelu pierwotnego wyniosło $17,1\text{cm}$, a sprowadzony moment bezwładności był równy $0,884\text{m}^4$.

Ostatecznie obliczono wysokość konstrukcyjną żelbetowego rygła, która odpowiadała momentowi bezwładności przekroju sprowadzonego. Tą wysokość, równą $2,2\text{m}$, uwzględniono w modelu numerycznym i sprawdzono wartości ugięć. Okazało się, że rezultaty w tym przypadku są zdecydowanie bliższe wynikom rzeczywistym. Różnica przemieszczeń mieściła się w przedziale $4,9\% - 11,9\%$.

Tablica 2. Wartości przyjętych do obliczeń parametrów poszczególnych warstw [4]

Rodzaj materiału	Moduł sprężystości E [MPa]	$\alpha = \frac{E_{B35}}{E}$	Rzeczywista grubość w-wy [cm]	Sprowadzona grubość w-wy [cm]
beton asfaltowy w-wy ścieralnej	10300	3,107	4	1,3
beton asfaltowy w-wy wiążącej	10100	3,168	8	2,5
beton asfaltowy podbudowy	9600	3,333	20	6
kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie	400	80	22	0,3
kruszywo stabilizowane cementem	4500	7,111	10	1,4
kruszywo naturalne stabilizowane mechanicznie	200	160	20	0,1
podłoże gruntowe pod nawierzchnią	120	266,667	98	0,4

* E_{B35} – moduł sprężystości betonu klasy B35 równy 32000MPa



Rys. 4. Przekrój przez warstwy składowe oraz wymiary wykorzystane do obliczenia sprowadzonego momentu bezwładności

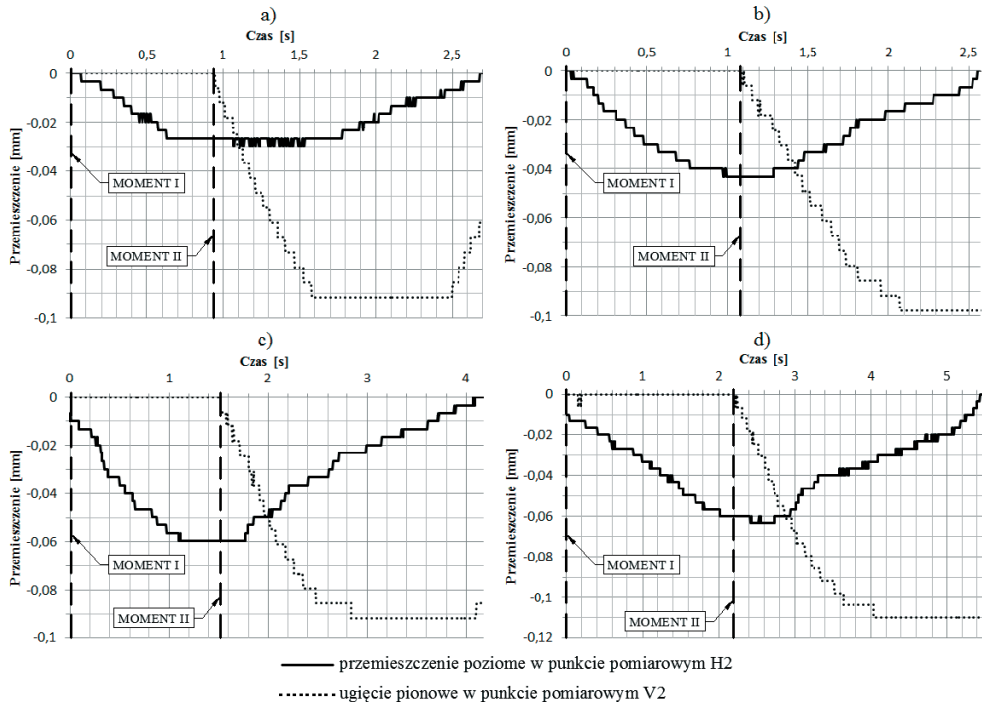
Tablica 3. Wartości ugięć teoretycznych i rzeczywistych dla przypadku obciążenia pojazdami ciężarowymi w środku rozpiętości przęsła

Punkt	Ugięcie rzeczywiste [mm]	Ugięcie teoretyczne [mm]	$\frac{\text{ugięcie teoretyczne}}{\text{ugięcie rzeczywiste}} 100\%$
V1	0,143	0,160	111,9%
V2	0,183	0,192	104,9%
V3	0,214	0,234	109,3%

3.3. Analiza wyników pomiarów przemieszczeń poziomych

Na rys. 5 zilustrowano graficznie zmiany wielkości przemieszczenia poziomego i ugięcia pionowego w czasie, dla przypadków obciążeniawg wariantów C-20, C-30, C-40

i C-50. Zamieszczone wykresy dotyczą punktów pomiarowych V2 i H2, czyli położonych w osi mostu (zilustrowanych na rys. 1 i rys. 2). Punkty na osiach czasu oznaczone jako „MOMENT I” to przybliżone chwile najazdu pojazdów na klin odłamu, natomiast punkty oznaczone jako „MOMENT II” to przybliżone chwile najazdu na płytę pomostu.



Rys. 5. Wykresy zmian wielkości przemieszczeń w czasie dla wariantów obciążenia: a) C-50, b) C-40, c) C-30, d) C-20

Rezultaty pomiarów mogą wydawać się zaskakujące. Wynika z nich bowiem, że przemieszczenia poziome są tym większe, im prędkość początkowa hamowania jest mniejsza. W tym przypadku jednak taka zależność jest uzasadniona, gdyż maksymalne przemieszczenia poziome zostały pomierzone już przed najazdem pojazdów na przęsło. Oznacza to, że przemieszczenia te były wywołane parciem gruntu od ciężaru wywrotek przejeżdżających po klinie odłamu, a ich hamowanie na przęsle praktycznie nie wywołało mierzalnych przesunięć. Im prędkość pojazdów była większa, tym obciążenie na klinie działało w krótszym czasie i przemieszczenia poziome osiągały mniejsze wartości.

Pomiary przemieszczeń punktu H2 uzyskane podczas obciążania wg wariantów C porównano z analogicznym pomiarem wywołanym ciężarem pojazdów ustawionych na klinie odłamu (wariant B). Okazuje się, że parcie gruntu od ruchomego naziomu mobilizuje się stosunkowo szybko, gdyż już po czasie 1,5 sekundy wartość przemieszczenia poziomego osiągnęła ponad 80% wartości maksymalnego przemieszczenia wywołanego obciążeniem statycznym.

Wartości przemieszczeń poziomych wywołanych obciążeniem wg wariantów C okazały się większe niż w przypadku obciążenia wg wariantów D. Wydaje się to niezgodne z intuicją, gdyż:

- obciążenie wg wariantów D działa 2 razy dłużej na klin odłamu, niż obciążenie wg wariantów C;

- w przypadku obciążenia wg wariantów D działa siła pozioma powodująca dodatkowe parcie gruntu.

Logicznym uzasadnieniem takiego zachowania może być hipoteza, że mobilizacja parcia od ciężaru pionowego naziomu dokonuje się wolniej przy działaniu dodatkowej siły poziomej. Możliwe, że zjawisko występuje tylko przy odpowiednio dużej wysokości zasypki gruntowej.

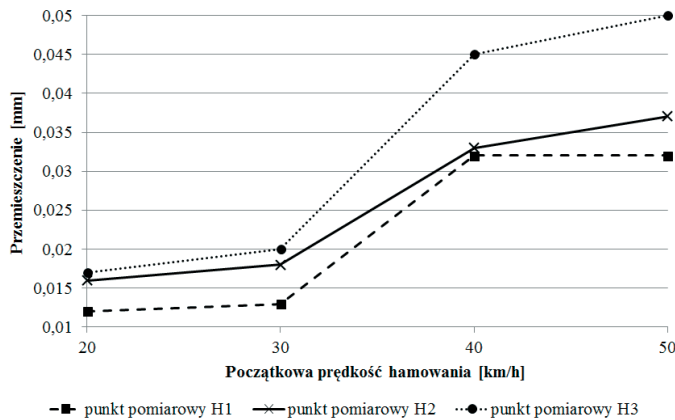
Tablica 4. Przesunięcia poziome punktu pomiarowego H2 (zilustrowanym na rys. 1 i rys. 2)

Wariant obciążenia	Max. przesunięcie poziome p_c [mm]	Czas działania obciążenia na klin odłamu [s]		
C-50	0,030	0,9	41,1%	35,3%
C-40	0,043	1,1	58,9%	50,6%
C-30	0,060	1,5	82,2%	70,6%
C-20	0,063	2,3	86,3%	74,1%

* p_B – maksymalne przesunięcie poziome punktu H2 dla wariantu B obciążenia, $p_B = 0,073\text{mm}$

* p_{MB} – przesunięcie punktu H2 wg modelu obliczeniowego dla wariantu B obciążenia, $p_M = 0,085\text{mm}$

Z wykresów przedstawionych na rys. 6 wynika, że udział przesunięcia wywołanego siłami hamowania, działającymi na klinie odłamu, w całkowitym przesunięciu poziomym jest kluczowy. Przesunięcie znacznie wzrasta wraz ze zwiększeniem początkowej prędkości hamowania.



Rys. 6. Wykresy zależności przesunięcia poziomego od początkowej prędkości hamowania w przypadku obciążenia wg wariantów D

4. Wnioski i uwagi końcowe

Na podstawie badań można sformułować następujące wnioski:

1. Modele numeryczne mostów zintegrowanych powinny uwzględniać współpracę rygla z warstwami drogowymi. Jest to szczególnie ważne, gdy warstwy nawierzchni oraz podłoża gruntowego mają znaczną grubość, przez co istotnie oddziałują na sztywność konstrukcji. Współpracę tą można odzwierciedlić poprzez obliczenie charakterystyk geometrycznych żelbetowego przekroju sprowadzonego, czyli takiego, którego wysokość została zwiększona adekwatnie do wpływu nawierzchni. Różnice między ugięciami modeli nie uwzględniających współpracy konstrukcji z warstwami drogowymi, a modelami uwzględniającymi ją – przy takich samych właściwościach gruntowych, mogą sięgać nawet 100% przesunięcia rzeczywistego.

2. O wielkości przemieszczeń poziomych decyduje parcie gruntu wywołane obciążeniem naziomu na klinie odłamu.
3. Przemieszczenia poziome spowodowane siłami hamowania można uznać za pomijalne tylko w przypadku działania tych sił na przęśle. Przemieszczenia wywołane hamowaniem pojazdów w strefie klina odłamu powodują parcie gruntu, które powinno się uwzględniać w obliczeniach.
4. Zależności przedstawione w referacie dotyczą badanego mostu. Można przypuszczać, że badania przeprowadzone na innych obiektach podobnego typu wykazałyby jakościowo porównywalne wyniki. Największy wpływ na rezultaty miała grubość podłoża gruntowego oraz warstw drogowych nad ryglem, zatem dalsze badania i analizy będą skoncentrowane na obiektach równie mocno pogrążonych w nasypie.

Literatura

- 1 Siemińska-Lewandowska A. Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
- 2 PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- 3 Furtak K. Mosty zespolone. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Kraków 1999
- 4 Dz. U. 1999 nr 43 poz. 430 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.

Experimental verification of numerical model of integral bridge

Jakub Jarsz

The Chair of Geotechnic and Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology, e-mail: kubajarsz87@gmail.com

Abstract: The paper presents the results of analyses of displacements for a real reinforced concrete integral bridge. The research consisted of the measurement of vertical displacement in the middle of the span and lateral displacement of the abutment. Ten load cases were considered. Two of them concerned vehicles placed motionlessly, the rest ones – braking vehicles. Moreover, the influence of initial braking velocity was analysed.

The results of research were compared with numerical simulations. Two options of numerical models were considered. In the first case, cooperation between construction of span and road layers was ignored, but in the second one it was not. In the both options, the same soil conditions were assumed.

Cooperation between construction and road layers was taken into consideration by the increase of stiffness of span. A real heterogeneous cross section was reduced to homogeneous one. Road layers were converted to equivalent concrete layers. Neutral axis, moment of inertia and thickness were calculated for a reduced cross section and applied into model.

Relations between displacements and duration were presented for load cases with braking vehicles. Displacements due to braking forces and static load were compared.

Keywords: integral bridges, test loading, reduced cross section, cooperation between structure and soil