

## **Wpływ sił hamowania na przemieszczenia zintegrowanych konstrukcji mostowych**

**Jakub Jarosz**

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

**Streszczenie:** W referacie przedstawione zostały wyniki analizy numerycznej poziomych przemieszczeń żelbetowego, jednoprzęsłowego mostu zintegrowanego (posadowionego na palach), wywołanych przez siły hamowania pojazdu normatywnego klasy A. Następnie rezultaty te zostały zestawione z analogicznymi przemieszczeniami wywołanymi oddziaływaniem składowej równomiernego rozkładu temperatury.

Zmiennymi parametrami geometrycznymi mostu były: rozpiętość i wysokość konstrukcyjna przęsła oraz długość i średnica pali. Dodatkowo porównano wyniki przemieszczeń dla dwóch przypadków zamocowania głowic pali (w pierwszym pale utwierdzono bezpośrednio w płycie przęsła, natomiast w drugim – za pośrednictwem oczepu) oraz dla dwóch wariantów uwarstwienia podłoża (w pierwszym wariancie przyjęto warstwy mocno zagęszczonego piasku średniego i gliny piaszczystej, a w drugim warstwy słabo zagęszczonego piasku średniego i iltu).

Współpracę gruntu z palami zamodelowano wykorzystując metodę uogólnioną, polegającą na rozmieszczeniu układu podpór sprężystych wzdłuż pobocznic pała oraz w jego podstawie. Moduły reakcji poziomych wzdłuż pobocznic obliczono na podstawie założonej technologii wykonywania, rozstawu, kształtu i liczby rzędów pali, stopnia zagęszczenia i plastyczności gruntu oraz modułu odkształcenia ogólnego ośrodka gruntowego.

Przemieszczenia wywołane oddziaływaniem sił hamowania, w analizowanych przypadkach, stanowią 5% - 25% całkowitych, poziomych przemieszczeń konstrukcji. Z badań przedstawionych w referacie wynika, że głównymi czynnikami decydującymi o tych przemieszczeniach są średnica pali oraz rodzaj otaczających je gruntów, a najmniejszą rolę odgrywa długość pali.

**Słowa kluczowe:** mosty zintegrowane, siły hamowania, przemieszczenie pała, metoda uogólniona

### **1. Wprowadzenie**

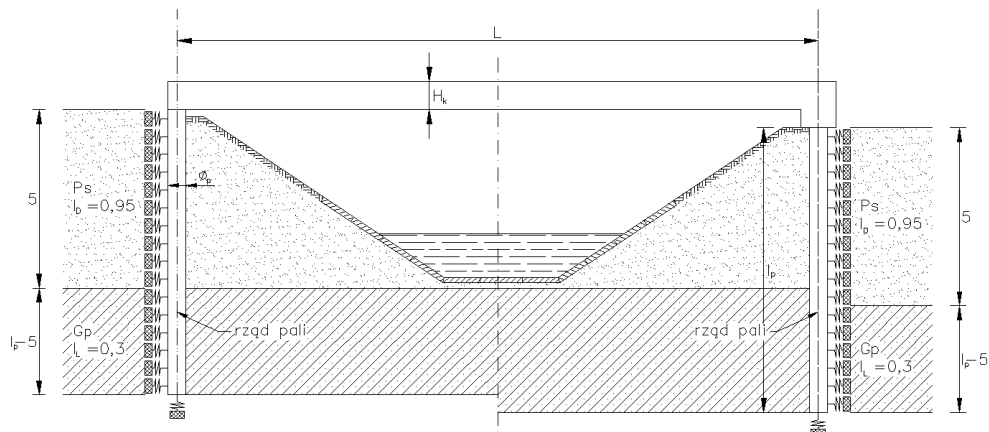
Jedną z najbardziej rozwijanych i stosowanych w ostatnich latach form konstrukcyjnych w mostownictwie, zwłaszcza betonowym, są tzw. mosty zintegrowane. Ich cechą charakterystyczną jest to, że między przęsłami i przyczółkami nie występują względne przemieszczenia poziome i brak jest jakichkolwiek elementów łączących przęsła z nasypem; nawierzchnia na jezdni mostu stanowi więc continuum z nawierzchnią poza nim. Mosty zintegrowane są zwykle jednoprzęsłowe i wykonywane najczęściej jako monolityczne konstrukcje betonowe. Mogą to być jednak – choć relatywnie rzadziej – konstrukcje ciągłe kilkuprzęsłowe. Niekiedy – bez względu na ich liczbę – przęsła mostów zintegrowanych mogą być realizowane jako konstrukcje stalowe lub zespolone typu „stal-beton” lub „beton-beton”.

Sama idea wykonywania mostów zintegrowanych nie jest nowa – budowano je już na początku XX wieku, a bardziej licznie, także w Polsce, w latach międzywojennych [1] a także powojennych [2]. Niemniej rozwój technologii, w tym także dostęp do nowych rozwiązań materiałowych z jednej strony oraz rozwój metod analiz i narzędzi obliczeniowych z drugiej strony, spowodowały, zwłaszcza w ostatniej dekadzie, wzrost zainteresowania tego rodzaju mostami i zwiększenie skali ich wykonywania. Głównym tego powodem jest ekonomiczność mostów zintegrowanych.

Dokładną i najbardziej obszerną w polskim piśmiennictwie naukowo-technicznym charakterystykę mostów zintegrowanych oraz sposobów ich konstruowania i obliczania znaleźć można w monografii [3]. Można w niej również znaleźć opisy stosowanych rozwiązań dotyczących nasypów, sprężystości współpracujących z konstrukcją obiektu mostowego w przenoszeniu przemieszczeń wywołanych obciążeniami, spowodowanymi zmianami temperatury. Uwzględnianie przemieszczeniowych efektów zmian temperatury jest dość powszechnie uznawane za podstawowy element projektowania mostów zintegrowanych. Jednak w niniejszym opracowaniu, w analizach wzięto pod uwagę efekty wywołane siłami hamowania taboru drogowego, co jest poszerzeniem zakresu badań ujętych w [4]. Następnie porównano ich wpływ na przemieszczenia konstrukcji zintegrowanych z efektami wywołanymi oddziaływaniem temperatury.

## 2. Założenia i dane wyjściowe przyjęte do analiz

Do analiz przyjęto żelbetowy, jednoprzęsłowy most zintegrowany o pomoście płytowym szerokości 10 m, opartym po obu stronach na czterech palach ustawionych w jednym rzędzie, o poprzecznym rozstawie osiowym pali równym 3m. Schemat tego obiektu pokazano na rys. 1 wraz z rozpatrywanym, wyidealizowanym ośrodkiem gruntowym.



Rys. 1. Schemat mostu zintegrowanego przyjęty do analizy – po lewej stronie model z palami zamocowanymi bezpośrednio w ryglu (przęśle), po prawej – z palami zamocowanymi w ocpieju, pogrubionej części rygla (przęśla)

Zmiennymi parametrami geometrycznymi, charakteryzującymi ten schemat były: rozpiętość przęsła  $L$  i jego wysokość konstrukcyjna  $H_k$  oraz długość pala  $l_p$  i jego średnica  $\phi_p$ . Ich wartości zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wartości parametrów przyjętych do analizy

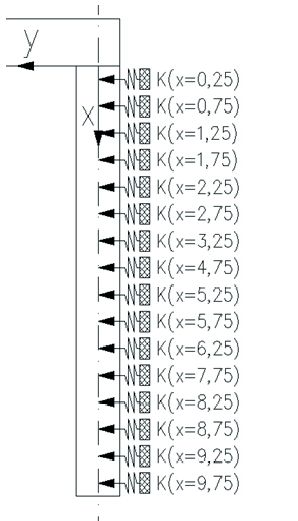
Parametr	Wartości [m]
Rozpiętość przęsła, $L$	5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 18; 25
Wysokość konstrukcyjna przęsła, $H_k$	0,35; 0,50; 0,87*; 1,00
Długość pala, $l_p$	3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12; 14; 16
Średnica pala, $\phi_p$	0,60; 0,80; 1,00; 1,20

\*wysokość konstrukcyjna przęsła rzeczywistego (istniejącego) mostu zintegrowanego

Do modelowania współpracy ośrodka gruntowego z palami, zastosowano metodę uogólnioną, która polega na rozmieszczeniu układu podpór sprężystych wzdłuż poboczniczy pala oraz w jego podstawie [5].

Tablica 2. Sztywności poziomych podpór sprężystych wzdłuż poboczniczy przyjęte w analizowanym schemacie

Rodzaj gruntu	x [m]	K(x) [kN/m]	
		φ60/80/100	φ120
Piaszek średni (Ps)	0,25	13,9	12,5
	0,75	19,45	17,5
	1,25	25	22,5
	1,75	30,55	27,5
	2,25	36,1	32,5
	2,75	41,65	37,5
	3,25	47,2	42,5
	3,75	52,75	47,5
	4,25	55,5	50
Głina piaszczysta (Gp)	4,75	55,5	50
	5,25	4,15	3,74
	5,75	4,15	3,74
	6,25	4,15	3,74
	6,75	4,15	3,74
	7,25	4,15	3,74
	...		
	15,75	4,15	3,74



Utworzono model parametryczny konstrukcji przestrzennej o przyczółkach posadowionych na 4 palach, rozstawionych w jednym rzędzie co 3m. Ponadto rozpatrzono dwa przypadki zamocowania ich głowic. W pierwszym pale utwierdzono bezpośrednio w ryglu (płytcie przesła), natomiast w drugim – za pośrednictwem oczepu (pogrubionej części płyty przesła – por. rys 1).

W celu wyznaczenia przemieszczeń poziomych w głowicach pali, konstrukcję obciążono siłami od hamowania pojazdu normatywnego klasy A wg [6] oraz, aby określić wpływ tych sił na sumaryczne przemieszczenia rozpatrywanych konstrukcji zintegrowanych, wprowadzono oddziaływanie składowej równomiernego rozkładu temperatury na płytę pomostu, przyjętej na podstawie map ekstremalnych temperatur mostów betonowych zamieszczonych w pracy [7] – założona więc amplituda zmian temperatury była równa 50°C (-10°C do +40°C). O ile wymieniony efekt termiczny jest uznawany za najbardziej istotny w projektowaniu mostów zintegrowanych i dlatego powszechnie uwzględniany [3], o tyle przemieszczenia tych konstrukcji spowodowane działaniem sił hamowania są zwykle pomijane.

### 3. Analiza wpływu sił hamowania na przemieszczenia głowicy pala

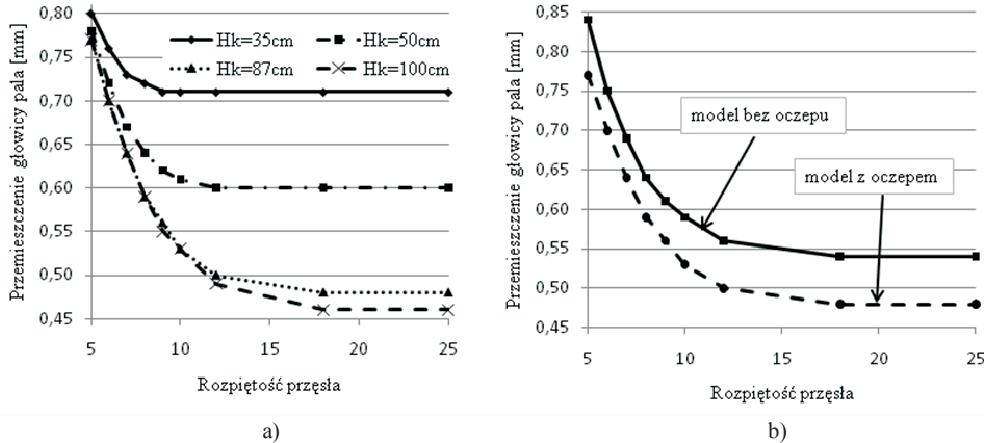
#### 3.1. Przemieszczenia głowicy pala w zależności od wysokości konstrukcyjnej $H_k$ i rozpiętości przesła $L$

Na rys. 2a) zamieszczono syntetycznie ujęte zależności pomiędzy przemieszczeniami głowicy pala o długości 10m i średnicy  $\phi 60$ cm, oraz rozpiętością i wysokością konstrukcyjną przesła ( $H_k = 35$ cm, 50cm, 87cm, 100cm). Z kolei na rys. 2b) porównano owe przemieszczenia dla modelu z palami zamocowanymi w oczepie (pogrubionej części przesła) oraz modelu z palami zamocowanymi bezpośrednio w przesła, przy stałej wysokości konstrukcyjnej  $H_k = 87$ cm.

W przypadku każdej rozpatrywanej wysokości konstrukcyjnej  $H_k$  przemieszczenia głowicy pala maleją wraz ze wzrostem rozpiętości przesła, aż osiągną pewną minimalną wartość. Dla rozpiętości przesła większych, niż rozpiętość dla której przemieszczenie osiągnęło minimum, przemieszczenia te są praktycznie stałe. W razie bardzo krótkich przesła, grubość płyty wpływa nieznacznie na przemieszczenie głowicy pala. Natomiast, jeśli rozpiętość przesła jest stosunkowo duża, różnice w przemieszczeniach w zależności od wysokości konstrukcyjnej mogą sięgać nawet kilkudziesięciu procent.

Z punktu widzenia wpływu sił hamowania na przemieszczenia mostowych

konstrukcji zintegrowanych istotne jest uwzględnienie w modelu obliczeniowym elementu „spinającego” pale z przęsłem, czyli oczepu. Jak pokazano na rys. 2b), przemieszczenia głowic pali w przypadku modelu z palami zamocowanymi bezpośrednio w przęsle, są większe o ok. 10% niż w przypadku analogicznego modelu, ale z palami utwierdzonymi w poprzecznicę podporowej (oczepie).

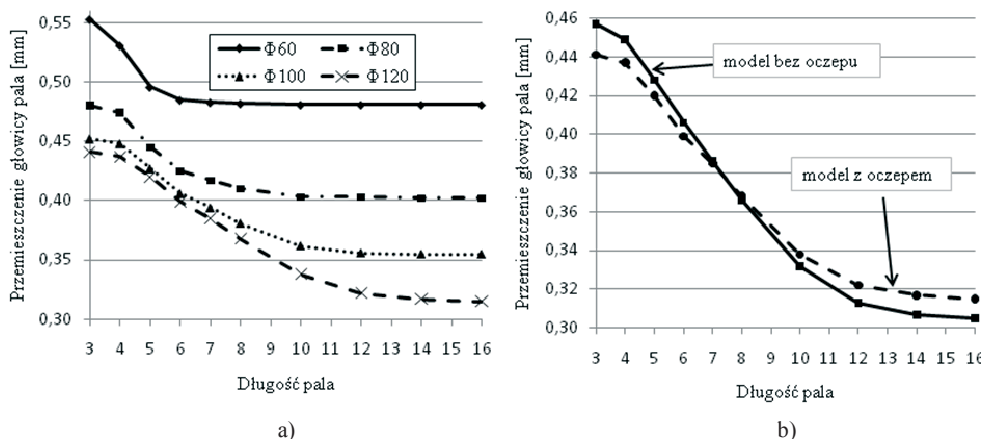


Rys. 2. Przemieszczenia głowicy pala o średnicy  $\phi 60$  cm i długości 10 m w zależności od a) wysokości konstrukcyjnej  $H_k$  i rozpiętości przęsła  $L$ , b) rozpiętości przęsła  $L$  i dla stałej wysokości konstrukcyjnej  $H_k = 87$  cm

### 3.2. Przemieszczenia głowicy pala w zależności od jego długości $L_p$ i średnicy $\Phi_p$

Na rys. 3a) przedstawiono zależności pomiędzy przemieszczeniami głowicy pali oraz ich średnicą ( $\Phi_p = 60$  cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm) i długością ( $L = 3$  m – 16 m). Wykresy wykonano dla stałych grubości konstrukcyjnej  $H_k = 87$  cm i rozpiętości przęsła  $L = 25$  m oraz dla modelu z palami zamocowanymi w oczepie. Przedstawione na nich przemieszczenia w początkowym zakresie długości pala maleją wraz ze wzrostem tej długości (zwiększenie zagłębienia pala w gruncie powoduje usztywnienie obiektu) i stają się praktycznie stałe od głębokości, dla której można uznać, że pal jest utwierdzony w podstawie. O ile jest dość oczywiste, że im pale mają większą średnicę, tym przemieszczenia poziome głowicy są mniejsze, o tyle ciekawy może wydawać się fakt, iż największe różnice w przemieszczeniach spowodowanych różną średnicą pala występują wtedy, gdy osiągną te przemieszczenia swoje minima.

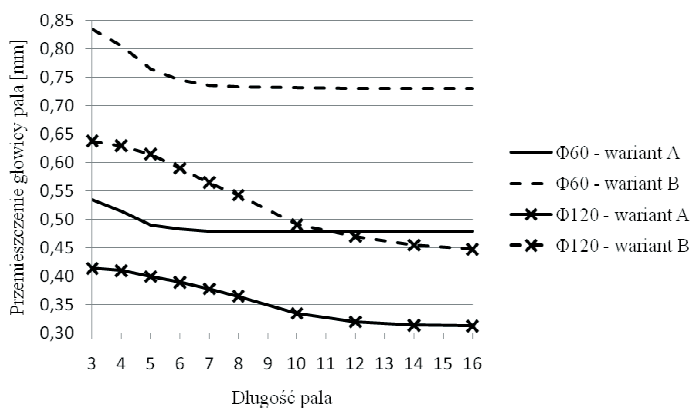
Na rys. 3b) zamieszczono z kolei porównanie przemieszczeń poziomych głowicy pala dla modeli obliczeniowych z palami zamocowanymi bezpośrednio w przęsle oraz z palami zamocowanymi w oczepie (poprzecznicę podporowej). Zestawienie wykonano dla modelu z palami o średnicy  $\Phi_p = 120$  cm oraz wysokości konstrukcyjnej  $H_k = 87$  cm i rozpiętości przęsła  $L = 25$  m. Nie da się jednoznacznie określić wpływu uwzględnienia oczepu na przemieszczenia poziome wywołane siłami hamowania, pod kątem zależności tych przemieszczeń od długości pala. W przypadku krótkich pali, w modelach bez oczepu, przemieszczenia te są większe niż w razie analogicznego modelu z oczepem. W przypadku długich pali jest odwrotnie.



Rys. 3. Przemieszczenia głowicy pala (przy stałych wysokości konstrukcyjnej  $H_k = 87\text{cm}$  i rozpiętości przęsła  $L = 25\text{m}$ ) w zależności od a) średnicy pala  $\Phi_p$  i długości pala  $L_p$ , b) długości pala  $L_p$  i dla średnicy pala  $\Phi_p = 120\text{cm}$

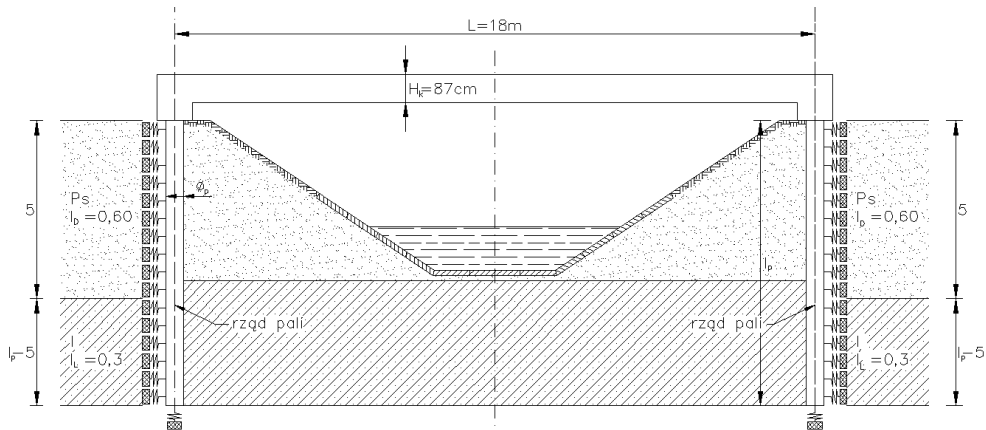
### 3.3. Przemieszczenia głowicy pala w zależności od rodzaju otaczającego gruntu

Na rys. 4 zamieszczono porównanie poziomych przemieszczeń głowic pali, wywołanych siłami hamowania, w różnych warunkach gruntowych. Zestawiono wyniki dla modeli z palami o średnicach  $\Phi_p = 60\text{cm}$  i  $120\text{cm}$  oraz zamocowanymi w oczepie, dla rozpiętości przęsła  $L = 18\text{m}$  i wysokości konstrukcyjnej  $h_k = 0,87\text{m}$ .



Rys. 4. Porównanie przemieszczeń głowicy pali  $\Phi 60$  i  $\Phi 120$  w różnych warunkach gruntowych

Przyjęto dwa warianty uwarstwienia podłoża. W pierwszym przypadku założono uwarstwienie podłoża takie, jak w modelach z poprzednich podrozdziałów (wariant A), w drugim zaś przyjęto jako górną warstwę piasek średni o wskaźniku zagęszczenia  $I_D = 0,6$ , zalegający do głębokości  $5\text{m}$ , a jako dolną łął (wariant B, rys. 5).



Rys. 5. Schemat mostu zintegrowanego przyjęty do analizy – wariant B

Podobnie, jak dla wariantu A, dla wariantu B sztywności podpór sprężystych obliczono na podstawie wzorów podanych w [5] i zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Sztywności poziomych podpór sprężystych wzdłuż poboczniczy przyjęte w wariantcie B

Rodzaj gruntu	x [m]	K(x) [kN/m]	
		φ60/80/100	Φ120
Piasek średni (Ps)	0,25	5,84	5,26
	0,75	8,17	7,36
	1,25	10,5	9,5
	1,75	12,83	11,55
	2,25	15,16	13,64
	2,75	17,49	15,74
	3,25	19,82	17,84
	3,75	22,16	19,94
	4,25	23,3	20,99
Il (I)	4,75	23,3	20,99
	5,25	2,1	1,89
	5,75	2,1	1,89
	6,25	2,1	1,89
	6,75	2,1	1,89
	7,25	2,1	1,89
	...		
	15,75	2,1	1,89

Poziome przemieszczenia w przypadku wariantu B są większe niż w razie wariantu A. Jest to spowodowane większą sprężystością poziomej reakcji gruntu ilowego oraz piasku średniego o niskim stopniu zagęszczenia. Różnice między poziomymi przemieszczeniami długich pali są bardzo małe, ale są tym większe, im pale są bardziej sztywne, tj. przy danej długości mają większe średnice.

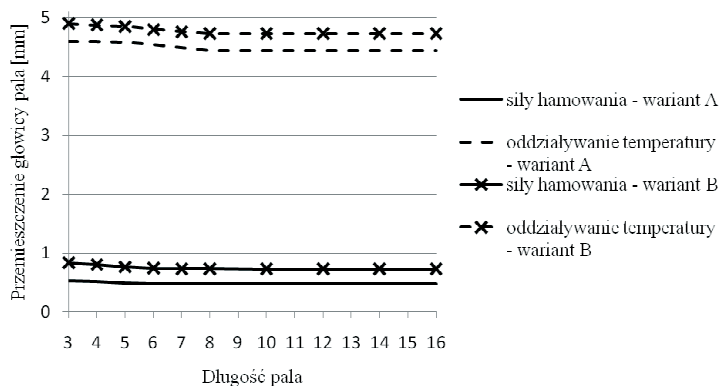
### 3.4. Porównanie przemieszczeń wywołanych siłami hamowania i oddziaływaniem temperatury

Z poznawczego punktu widzenia interesujące jest porównanie poziomych przemieszczeń głowic pali, wywołanych zmianami temperatury oraz siłami hamowania taboru drogowego. Jak wspomniano na wstępie, ten drugi czynnik jest zwykle pomijany w obliczeniach projektowych mostów zintegrowanych (por. np. [3]). Porównanie takie przedstawiono na rys. 6.

Zestawienie na rys. 6 wykonano w odniesieniu do modeli z ocpem, średnicy pali  $\phi 60\text{cm}$  oraz rozpiętości  $L = 18\text{m}$  i wysokości konstrukcyjnej przęsła  $H_k = 0,87\text{m}$ . Ponadto

porównano wyniki przemieszczeń dla dwóch wariantów uwarstwienia podłoża – A i B (jak w poprzednim podrozdziale).

Okazuje się, że w przypadku rozpiętości przęsła  $L = 18\text{m}$  przemieszczenia wywołane siłami hamowania taboru samochodowego stanowią ok. 10% - 20% całkowitych przemieszczeń poziomych głowicy pala. Zatem dość powszechne pomijanie sił hamowania w obliczeniach poziomych przemieszczeń mostów zintegrowanych można uznać za uzasadnione tylko w pewnych przypadkach.



Rys. 6. Porównanie przemieszczeń głowicy pali wywołanych zmianami temperatury oraz siłami hamowania w różnych warunkach gruntowych

Warto również zauważyć, jak stosunkowo niewielki jest wpływ długości pali na przemieszczenia głowicy pala. Głównymi czynnikami decydującymi o tych przemieszczeniach są średnica pali oraz rodzaje otaczających je gruntów.

#### 4. Wnioski i uwagi końcowe

Przedstawione w referacie rezultaty otrzymane poprzez symulacje numeryczne zamierza się zweryfikować doświadczalnie, na obiektach istniejących. Weryfikacja ta będzie stanowić przedmiot oddzielnej publikacji. Mimo to, już na tym etapie badań, można sformułować następujące wnioski:

1. Przemieszczenia poziome wywołane siłami hamowania, w przypadku mostów zintegrowanych o rozpiętości przęseł do 25m i palach zamocowanych w poprzecznicach podporowej, stanowią 5% - 25% całkowitych przemieszczeń poziomych konstrukcji.
2. Udział przemieszczeń wywołanych siłami hamowania w całkowitych przemieszczeniach poziomych konstrukcji zwiększa się wraz ze zmniejszaniem rozpiętości przęsła, sztywności pali (średnicy pali) oraz modułu reakcji poziomej gruntu.
3. Największy wpływ na przemieszczenia spowodowane oddziaływaniem sił hamowania mają rozpiętość i wysokość konstrukcyjna przęsła, sztywność pali (średnica pali) oraz rodzaj otaczającego je gruntu. Stosunkowo mały wpływ na owe przemieszczenia ma długość pali.
4. Jeżeli w konstrukcji mostu występuje ocep zwieńczający pale, to należy uwzględnić go w obliczeniach. Wynika to ze stosunkowo dużych różnic w przemieszczeniach poziomych modeli z palami zamocowanymi bezpośrednio w przęsle oraz z palami utwierdzonymi w poprzecznicach podporowej (oczeplie).

## Literatura

- 1 Wasiutyński Z. Pale żelazobetonowe jako podpory małych mostów, w: Pisma, t. IV, Mosty i konstrukcje budowlane. (ed. Bzymek Z.) Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985, s. 131 – 142.
- 2 Wytyczne projektowania i budowy mostów drogowych na podporach z pali betonowych. Niepublikowane opracowanie
- 3 Furtak K., Wrana B. Mosty zintegrowane. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005
- 4 Radomski W., Jarosz J. Analiza numeryczna przemieszczeń mostowych konstrukcji zintegrowanych. Inżynieria i Budownictwo (w druku)
- 5 Kosecki M. Statyka ustrojów palowych. Szczeciński Oddział Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, Szczecin 2006
- 6 PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
- 7 Zobel H. Naturalne zjawiska termiczne w mostach. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003

## The effect of braking forces on displacement of integral bridges

Jakub JAROSZ

*The Chair of Geotechnic and Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology, e-mail: kubajarosz87@gmail.com*

**Abstract:** The paper presents the results of numerical analyses of the lateral displacement for reinforced concrete and single span integral bridge with foundations constructed on piles. The lateral displacement due to braking forces was analysed. Then, the results were compared to analogical displacement caused by the temperature increase.

The following changeable bridge parameters were assumed: span length, deck height, piles length and piles diameter. The results of the lateral displacements were compared on concerning the fixing of the pile top. In the first case, the piles were fixed by pile cap, and in the second one, the piles were fixed directly to the deck. Moreover, two options of soil were considered. The first option in which soil was composed of sand and sandy silt, and the second one in which soil was composed of sand and clay.

In the analysed cases, the displacement caused by braking forces accounts for 10% - 20% of the total lateral displacement of the construction. The research presented in this paper shows that the main determinants of the lateral displacement of integral bridges are piles diameters and the type of surrounding ground. Pile length is of small importance.

**Keywords:** integral bridges, braking forces, pile displacement, general method