

Idea mostu z przeciwwagami

Dr inż. arch. Stefan Niewitecki, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

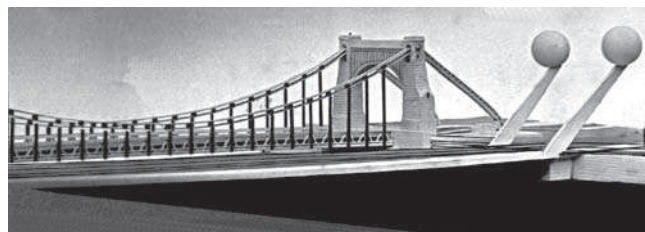
Jedną z cech rozwoju techniki jest poszukiwanie nowych rozwiązań, także w technice mostowej. Dzięki temu nastąpił rozwój podwieszanych mostów wantungowych o wielu różnych konfiguracjach, co pozwoliło na dużą różnorodność rozwiązań architektonicznych mostów. Zawsze jednak dąży się do zmniejszenia momentów zginających w przęśle mostu, co najprościej można osiągnąć, podwieszając to przęsło do want, najczęściej z odciągami kotwionymi poza przepław. Autor pokazuje w artykule inne możliwości zbudowania mostu. Możliwości te polegają na zmniejszeniu momentów zginających w przęśle mostu za pomocą ukośnych, specjalnie obciążonych słupów lub na likwidacji odciągów i wprowadzeniu zamiast nich obciążenia na końcach ukośnych słupów podtrzymujących wanty. Rozwiązania takie, zdaniem autora, są ciekawsze architektonicznie i bardziej ekonomiczne od typowych rozwiązań mostów.

2. Pierwzór mostu z przeciwwagami

Pierwzorem tej idei był jeden z wariantów Drugiego Mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu, który autor przygotował na konkurs architektoniczny na wyżej wymieniony most. Było to w bardzo zamierzczłych czasach, bo w drugiej połowie lat siedemdziesiątych XX wieku. Drugiego Mostu Grunwaldzkiego nie zbudowano do dzisiaj – może i lepiej, bo ten pierwszy stanowi jedną z głównych atrakcji turystycznych Wrocławia, dlatego warto krótko przypomnieć jego historię. Most Grunwaldzki we Wrocławiu to most wiszący przez rzekę Odrę o konstrukcji stalowej, o rozpiętości 112,5 m i szerokości 18 m. Ciężna mają bardzo ciekawą budowę,

ponieważ są to pakiety blach nitowanych między sobą. Wsparte są na pylonach murowanych z cegły i oblicowanych granitem, o wysokości około 20 m (rys. 1). Most został zbudowany w latach 1908–1910 w ramach budowy nowej trasy (obecnego pl. Grunwaldzkiego) stanowiącej diagonalne połączenie między centrum miasta a projektowanymi osiedlami na północnym wschodzie. Początkowo nazywany był mostem Cesarskim (*Kaiserbrücke*), później mostem Wolności (*Freiheitsbrücke*). Projektantem architektury mostu był miejski radca budowlany Richard Plüddemann, wykonawcą firma Beuchelt u. Co. z Zielonej Góry. Most otwarto 10 października 1910 r. w obecności cesarza Wilhelma II. W czasie II wojny światowej most uległ częściowemu zniszczeniu. Po odbudowie został oddany do użytku w 1947 roku. W 1976 roku Most Grunwaldzki został wpisany do rejestru zabytków. W 2005 roku dokonano remontu jezdni i chodników. [5].

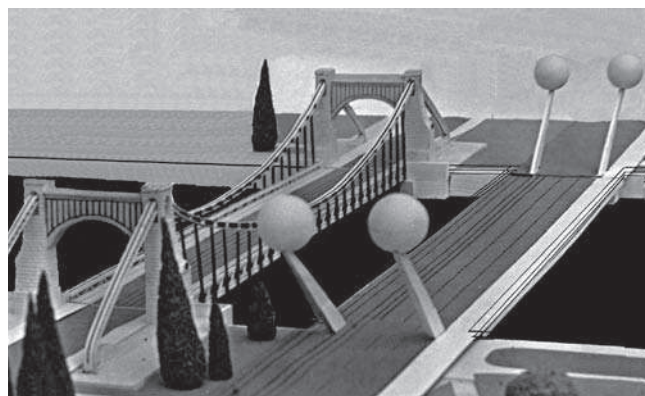
Wracając do idei Drugiego Mostu Grunwaldzkiego – autora urzekła prostota konstrukcji takiego mostu. Ponieważ most ten nie był długi (rozpiętość przęsła 112,5 m) zastosowano same przeciwwagi, bez want, na ukośnych słupach (rys. 2, 3). Konstrukcja mostu miała być stalowa,



Rys. 2. Most z przeciwwagami jako propozycja drugiego Mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu, widok w stronę jednego z najazdów i w stronę Placu Grunwaldzkiego



Rys. 1. Most Grunwaldzki we Wrocławiu, widok ogólny [1]



Rys. 3. Most z przeciwwagami jako propozycja drugiego Mostu Grunwaldzkiego we Wrocławiu, widok ogólny

a ciężar przeciwwag był tak dobrany, aby ujemne momenty zginające na podporach równoważyły dodatni moment zginający w środku przęsła mostu. Osiągnięto dzięki temu znaczne zmniejszenie wysokości konstrukcyjnej przęsła mostu w środku jego rozpiętości. Poprawiłoby to zdecydowanie zdolności żeglugi – pod środkową częścią mostu mogłyby przepływać wyższe jednostki pływające.

3. Schemat statyczny mostu z przeciwwagami

Wyróżniono trzy poniższe schematy.

1. Belka wolnopodparta z dwoma wspornikami wygiętymi w górę pod kątem 60–75° do poziomu. W tym schemacie połączenie słupa z belką musi być wykonane jako bezprzegubowe, sztywne, przenoszące moment zginający (rys. 4).

2. Belka wolnopodparta z jednym ukośnym słupem wygiętym w górę pod kątem 60–75° do poziomu i wantami łączącymi górę słupa z belką. W tym schemacie połączenie słupa z belką może być wykonane jako przegubowe (rys. 5).

3. Belka wolnopodparta z dwoma ukośnymi słupami wygiętymi w górę pod kątem 60–75° do poziomu i wantami łączącymi górę słupów z belką. W tym schemacie połączenie słupa z belką może być także wykonane jako przegubowe (rys. 6).

Ad.1) Moment zginający w środku przęsła mostu od jego pełnego obciążenia powinien być zbliżony do zera (rys. 5, 6), aby wysokość przęsła w środku rozpiętości była jak najmniejsza, co umożliwi przepływanie wyższych statków pod środkową częścią mostu. Wtedy moment zginający w środku przęsła mostu od jego ciężaru własnego jest ujemny i wynosi około $-0,125 \cdot g \cdot l^2$, co oznacza, że całe przęsło jest rozciągane górami. Z rysunku 1 wynika, że $R_A = R_B = P + 0,5ql$, stąd moment zginający w środku przęsła $M = 0,125ql^2 - Pa$. Przyrównując to do zera, otrzymamy wzór na ciężar przeciwwagi, dla założenia, że przęsło jest zawsze rozciągane górami:

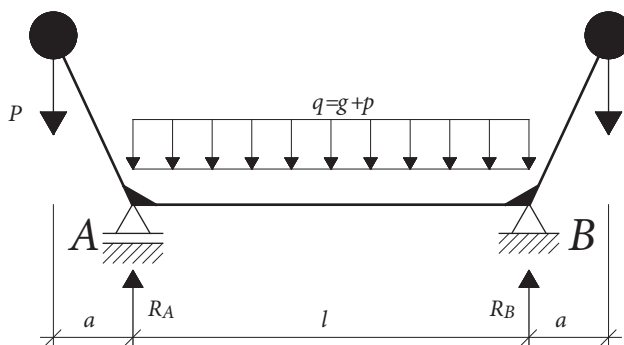
$$P = 0,125ql^2/a \tag{1}$$

Przykładowo dla mostu o rozpiętości $l = 120$ m, szerokości połowy jezdni $b = 6$ m i obciążeniu $q = 10$ kN/m², dla wysokości słupów $h = 40$ m i ich nachyleniu do poziomu $\alpha = 60^\circ$, otrzymamy:

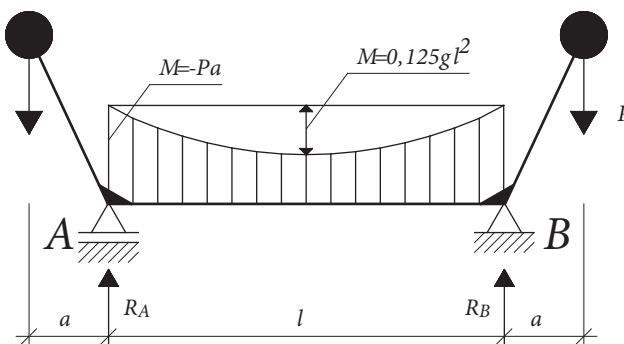
$$a = h \cdot ctg\alpha = 40 \cdot 0,57735 = 23,09 \text{ m} \tag{2}$$

$$P = 0,125 \cdot (6 \cdot 10) \cdot (120)^2 / 23,09 = 4677,35 \text{ kN} \tag{3}$$

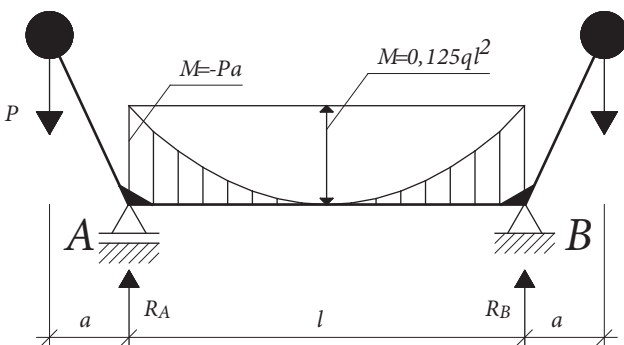
Przyjmując przeciwwagi w formie kul żelbetowych, przy założeniu ciężaru żelbetu $g = 24$ kN/m³, otrzymamy objętość kuli V ze wzoru:



Rys. 4. Most z przeciwwagami, belkowy, schemat statyczny



Rys. 5. Most z przeciwwagami, belkowy, wykres momentów zginających w przęsle od obciążenia stałego g



Rys. 6. Most z przeciwwagami, belkowy, wykres momentów zginających w przęsle od obciążenia stałego i zmiennego $q = g + p$. Wielkości ciężarów P dobrano tak, aby przęsło było tylko rozciągane górami

$$V = P / (0,9g) = 4677,35 / (0,9 \cdot 24) = 216,5 \text{ m}^3 \tag{4}$$

gdzie 0,9 to współczynnik bezpieczeństwa

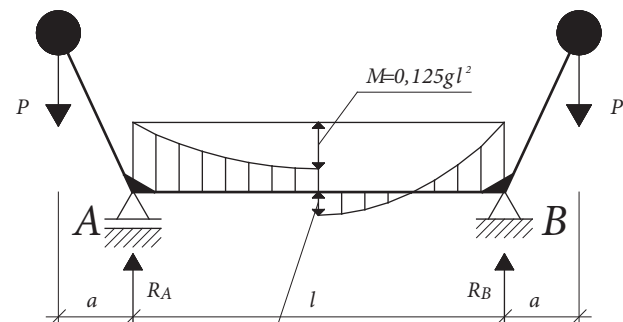
Stąd otrzymamy promień kuli ze wzoru:

$$V = (4/3) \pi r^3 = 216,5 \text{ m}^3 \tag{5}$$

$$r = 3,726 \text{ m}, D = 7,45 \text{ m} \tag{6}$$

Dla kuli w postaci powłoki stalowej wypełnionej piaskiem (najbardziej ekonomiczna wersja przeciwwag) jej średnica wyniesie, bez uwzględnienia ciężaru blachy:

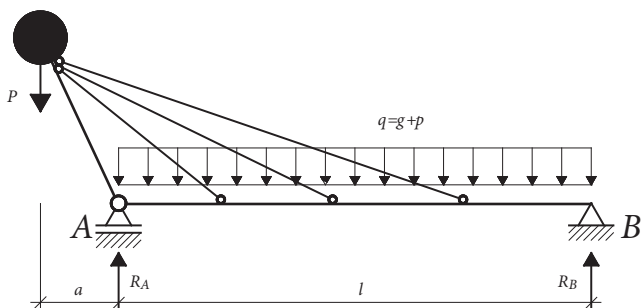
$$D_i = 7,45 \cdot (24/18) = 9,93 \text{ m} \quad (7)$$



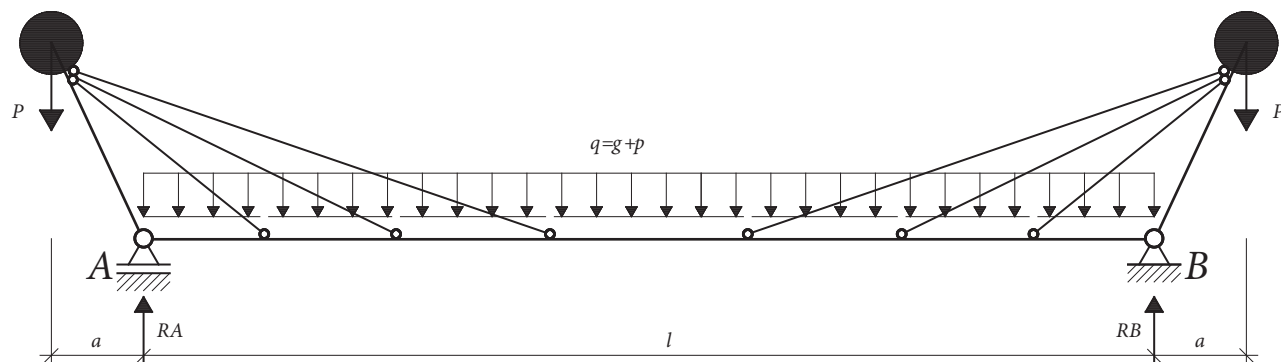
$$M = 0,5 \cdot (0,125ql^2 - 0,125gl^2)$$

$$= M = 0,5 \cdot 0,125pl^2$$

Rys. 7. Most z przeciwwagami, belkowy, wariant optymalny obciążenia przeciwwagami. Z lewej strony wykres momentów zginających w przęśle od obciążenia stałego, z prawej wykres momentów zginających w przęśle od obciążenia stałego i zmiennego $q = g + p$. Wielkości ciężarów P dobrano tak, aby przęśło miało w środku rozpiętości jak najmniej moment zginający



Rys. 8. Most z przeciwwagami, z wantami, niesymetryczny, schemat statyczny



Rys. 9. Most z przeciwwagami, z wantami, symetryczny, schemat statyczny

Uwzględniając ciężar blachy w przeciwwadze np. dla grubości blachy 50 mm, otrzymuje się:

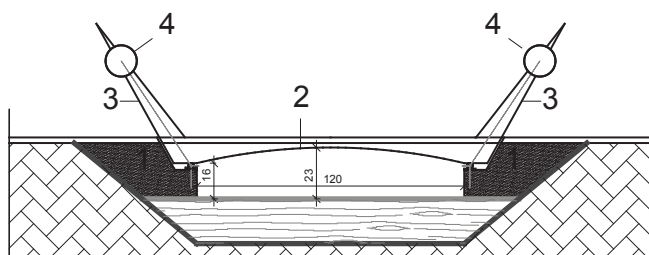
$$4677,35 = (4/3) \pi r_i^3 \cdot 18 + 4\pi r_i^2 \cdot 0,05 \cdot 78,5$$

$$\rightarrow \text{metodą prób } r_i = 3,75 \text{ m } (D_i = 7,50 \text{ m}) \quad (8)$$

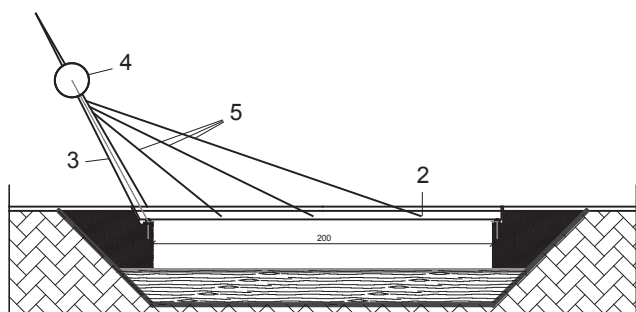
Należy zauważyć, że przęśło rozciągane górą tylko dla obciążeń stałych g , a dla obciążeń stałych i zmiennych $q = g + p$ rozciągane dołem nie zawsze musi być korzystne, np. dla mostów żelbetowych, dla których lepszy może być wariant pokazany na rysunkach 5 i 6.

Ad.2) Warunkiem koniecznym dla zastosowania schematu statycznego jak na rysunku 8, a w szczególności słupa połączonego przegubowo z jezdnią jest to, aby moment zginający $P \cdot a$ był zawsze większy od sumy momentów zginających od sił w wantach, gdzie punktem obrotu jest podpora A (rys. 8). Otwarta pozostaje kwestia połączenia słupów z belkami mostu – przyjęte przez autora połączenie przegubowe wcale nie musi być najlepsze dla wszystkich przypadków mostów wantungowych bez odciągów. Dopiero analiza komputerowa każdego indywidualnego przypadku będzie mogła określić, jaki schemat statyczny będzie dla tego przypadku najlepszy. Połączenie przegubowe przyjęto głównie z powodu ułatwienia montażu – słupy z pustymi kulami stalowymi można łatwiej montować położone na poziomie terenu, a dopiero po ich podniesieniu mocować wanty i napełniać kule piaskiem.

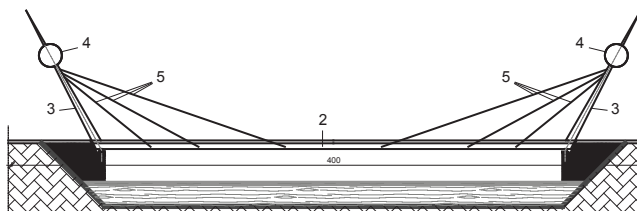
Ad.3) Warunkiem koniecznym dla zastosowania schematu statycznego jak na rysunku 9, a w szczególności słupów połączonych przegubowo z jezdnią jest to, aby wartość bezwzględna momentu zginającego $P \cdot a$ była zawsze większa od sumy momentów zginających od sił w wantach, gdzie punktem obrotu jest podpora A dla „lewej” strony mostu lub podpora „B” dla jego „prawej” strony (rys. 9). Podobnie, jak w przypadku mostu niesymetrycznego – otwarta pozostaje kwestia połączenia słupów z belkami mostu. Połączenie przegubowe przyjęto głównie z powodu ułatwienia montażu – słupy z pustymi kulami stalowymi można łatwiej montować położone



Rys. 10. Most z przeciwwagami, belkowy, widok z boku: 1 – przyczółki, 2 – przęsło, 3 – słupy ukośnie, 4 – przeciwwagi wypełnione piaskiem



Rys. 11. Most z przeciwwagami, z wantami, niesymetryczny, widok z boku: 1 – przyczółki, 2 – przęsło, 3 – słupy ukośnie, 4 – przeciwwagi wypełnione piaskiem, 5 – wanty



Rys. 12. Most z przeciwwagami, z wantami, symetryczny, widok z boku: 1 – przyczółki, 2 – przęsło, 3 – słupy ukośnie, 4 – przeciwwagi wypełnione piaskiem, 5 – wanty

na poziomie terenu, a dopiero po ich podniesieniu mocować wanty i napełniać kule piaskiem.

4. Konstrukcja mostów z przeciwwagami

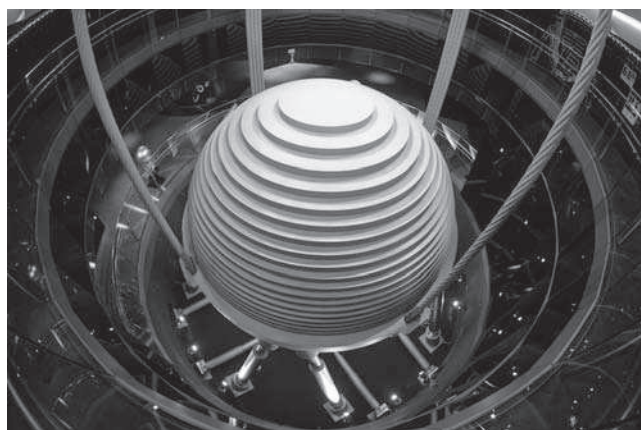
Pod względem konstrukcyjnym wyróżniono trzy poniższe rodzaje mostów.

1. Most bez want w postaci belki wolnopodpartej z dwoma wspornikami wygiętymi w górę pod kątem 60–75° do poziomu przy każdej podporze mostu. W tym przypadku połączenie każdego z czterech słupów z belkami głównymi mostu musi być wykonane jako bezprzegubowe, przenoszące moment zginający (rys. 2, 3 i 10).

2. Most wantowy, niesymetryczny w postaci belki wolnopodpartej z dwoma ukośnymi słupami z jednej strony mostu, wygiętymi w górę pod kątem 60–75° do poziomu



Rys. 13. Budynek Taipei 101 na Tajwanie [4]



Rys. 14. Tłumik drgań harmonicznym zamontowany w budynku Taipei 101 [4]

i wantami łączącymi górę słupów z belkami głównymi mostu. W tym schemacie połączenie każdego z dwóch słupów z belką mostu może być wykonane jako przegubowe (rys. 11).

3. Most wolnopodparty z dwoma ukośnymi słupami przy każdej podporze mostu, wygiętymi w górę pod kątem 60–75° do poziomu i wantami łączącymi górę słupów z belkami głównymi mostu. W tym schemacie połączenie każdego z czterech słupów z belkami głównymi mostu może być takie jak w p.2 tzn. przegubowe (rys. 12).

5. Zalety mostów z przeciwwagami

Zastosowanie samych przeciwwag na ukośnych słupach, bez want, wymusza sztywne połączenia słupów z konstrukcją głównych belek mostowych, co w znaczny sposób zmniejsza moment zginający w środku przęsła

mostu (moment ten można zmniejszyć praktycznie do zera). Zwiększona zostaje tym samym funkcjonalność przeprawy, ponieważ pod przęsłem o znacznie zmniejszonej w środku wysokości konstrukcyjnej mogą przepływać wyższe statki. Pokazano to na rysunku 10, gdzie dla mostu o rozpiętości 120 m osiągnięta dzięki przeciwwagom różnica wysokości przęsła przy podporze i w środku rozpiętości wynosi 7 m.

W przypadku mostów wantowych z przeciwwagami ich zaletą, oprócz znacznego odciążenia przęsła, jest brak odciągów. Nie występuje więc bardzo uciążliwa konieczność ich kotwienia w dużych blokach kotwiących lub zespołach pali. Cała konstrukcja mostu mieści się w zasadzie w granicach przeprawy i przyczółków. Dotyczy to zarówno mostów niesymetrycznych (rys. 11), jak i symetrycznych (rys. 12).

6. Wady mostów z przeciwwagami

Największą wadą tego rodzaju mostów jest konieczność umieszczenia przeciwwag o ogromnym ciężarze na znacznej wysokości, w odpowiedniej fazie budowy mostu. Rozwiązać ten problem można na dwa sposoby.

Pierwszy z nich polega na wykonaniu przeciwwag w postaci pełnych kul stalowych spawanych warstwowo w miejscu montażu z płyt o grubości np. 10 cm. Płyty te transportowane są w górę pojedynczo. Warto w tym miejscu przypomnieć kulę o średnicy 5,5 m i wadze 660 ton zmontowaną z 41 płyt stalowych o grubości 125 mm między 89 a 92 piętrem w jednym z najwyższych budynków świata – 509-metrowym Taipei 101, który w 2004 roku stanął w stolicy Tajwanu (rys. 13). Odchylenia kuli amortyzują ruchy budynku, wywołane uderzeniami huraganu lub ruchami skorupy ziemskiej (rys. 14). Konstrukcja obiektu ma wytrzymać trzęsienia ziemi o sile do 7 stopni w skali Richtera. Ciekawostką jest fakt umieszczenia kuli bezpośrednio nad restauracją. [4].

Drugi sposób wykonania przeciwwag, który autor uważa za znacznie lepszy od poprzedniego, polega na tym, że na ukośnych słupach mocuje się puste stalowe kule zaopatrzone w odpowiednie przepony w środku, spawane w całość na miejscu montażu (w górnej części słupa). W momencie kiedy mają one zacząć odciążać przęsło lub obciążać wanty mostu, zostają wypełnione betonem lub (w tańszej wersji) piaskiem stabilizowanym cementem w odpowiedniej ilości, wynikającej z obliczeń statycznych mostu.

7. Problemy techniczne i ich rozwiązania

Pomimo prostoty konstrukcji budowa mostu z przeciwwagami może tworzyć pewne problemy, wynikające przede wszystkim z braku doświadczenia w realizacji tego typu konstrukcji. Niewątpliwie największym problemem technicznym związanym z realizacją mostu z przeciwwagami (jak już wspomniano wyżej) jest wykonanie kul lub walców samej przeciwwagi. Prostsze technicznie byłoby wykonanie

walców (lub nawet wręcz prostopadłościanów), ale kule są zdecydowanie ładniejsze i to one powinny być używane na przeciwwagi ze względów architektonicznych, pomimo trudności ich wykonania. Zasadą powinno być także wykonywanie kul o konstrukcji stalowej, pustych w środku, zaopatrzonych w odpowiednią liczbę przepon usztywniających, z otworami w tych przeponach dla umożliwienia wsypania do nich odpowiedniej ilości piasku, bo to on powinien stanowić główny ciężar przeciwwagi z powodu jego niskiej ceny i łatwości zasypywania. Problemem będzie także odporność konstrukcji na huraganowe wiatry. Znaczny ciężar przeciwwag wynoszący wg wzoru (3) nawet kilka tysięcy (lub więcej) ton, przy ich stosunkowo niewielkich wymiarach – średnicy, zgodnie ze wzorem (6) i (8), wynoszącej przykładowo 7,5 m dla żelbetu i dla piasku w kuli stalowej, oznacza, że konstrukcja ich będzie bardzo odporna nawet na bardzo silne wiatry.

8. Podsumowanie

Okazuje się, że zastosowanie samych przeciwwag na ukośnych słupach bez want w znaczny sposób zmniejsza moment zginający w środku przęsła mostu, co zwiększa jego funkcjonalność, ponieważ pod przęsłem o zmniejszonej w środku wysokości mogą przepływać wyższe statki. Ograniczeniem stosowania mostów z przeciwwagami jest jedynie opłacalna rozpiętość przęsła głównego, która zdaniem autora niniejszego opracowania może wynosić dla mostu bez want do 120 m, dla mostu z wantami niesymetrycznego do 150 – 200 m¹. Oznacza to, że w przypadku zastosowania pylonów po obu stronach przeprawy jej szerokość może wynosić bez podpór pośrednich, nawet 300–400 m. Opłacalność stosowania przeciwwag w mostach to nie tylko ściśle wyliczenia ekonomiczne, ale i uzyskane dzięki przeciwwagom bardzo ciekawe efekty architektoniczne i krajo- brazowe, a także widoczne z daleka sygnały dla kierowców, że zbliżają się do mostu, co na pewno ma pewne znaczenie dla bezpieczeństwa podróży.

Referat był wygłaszany na

VII Ogólnopolskiej Konferencji Mostowców – Wisła 2015 r.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A&B architektura & biznes kwiecień 2013, Piotr Brzoza, Architektura inżynierska Santiago Calatravy
- [2] <https://maps.google.com/maps? ll=51.109613,17.052283&spn=0.00312,0.004823&t=h&z=18>
- [3] <http://www.mostypolskie.pl/mosty-calatravy-sundial-puente-de-la-mujer,318,1.html>
Krzysztof Dąbrowski, Mosty Calatravy dostęp dn. 05.05.2015 r.
- [4] https://pl.wikipedia.org/wiki/Taipei_101. Taipei 101 dostęp dn. 07.11.2014 r.
- [5] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Most_Grunwaldzki_\(Wroc%C5%82aw\)](https://pl.wikipedia.org/wiki/Most_Grunwaldzki_(Wroc%C5%82aw)) dostęp dn. 07.11.2014 r.
- [6] Zgłoszenie patentowe P nr 386419 Dachy ciągnowe bezodciążowe o wielkich rozpiętościach

¹ Most niesymetryczny Alamillo w Sewilli o rozpiętości 200 m ukończony w 1992 r. projektu Santiago Calatravy ma pylon o dużym ciężarze, który równoważy siły w wantach [1].