

Fundamenty na palach. Część I

Posadowienie na palach uzasadnione jest na ogół wtedy, gdy grunt wytrzymały leży głęboko, gdy niewskazane jest znaczniejsze osiadanie budowli, lub nie można inaczej ochronić fundamentów przeciw rozmyciu. Pal (niem. Pfahl; ang. pile; franc. pieu, palplanche, pilot, pilotis; ros. swaja, koł; wł. palo; hiszp. estaca, palo, polote) może być drewniany, z żelaza lanego, z żelaza walcowanego, żelbetowy gotowy (prefabrykowany), z betonu i z betonu zbrojonego formowanego w gruncie. Praca pala, zależnie od rodzaju warstw gruntu, polega na tym, że jego koniec opierając się na skale, ilach trzyczęściowych lub grubych żwirach, przenosi na nie ciężar budowli. W innym przypadku może być on zawieszony w gruncie słabszym, a oporem tarcia przenosi ciężar budowli i swój przez przebite warstwy na warstwę leżącą pod jego końcem. Wówczas obciążenie nie wywoła już w gruncie naprężeń ścinających, przekraczających wytrzymałość gruntu. W pierwszym przypadku pal pracuje jak słup, nie ulegając wyboczeniu, gdyż jest pograżony całkowicie w gruncie. Natomiast wytrzymałość pali zawieszonych w gruncie zależna jest od powierzchni ich płaszcza, od współczynnika oporu tarcia na jednostkę pola rozwiniętej powierzchni płaszcza, od siły poziomej nacisku gruntu na tę powierzchnię, a także od nacisku pala pod jego końcem. Współczynniki tarcia przyjmowane są: 0,1 – w płynnych namulach; 0,2 – w mokrych glinach i ilach; 0,3 – w mokrym piasku i wilgotnym ile; 0,4 – w suchych glinach i ilach, wilgotnym ostrym piasku i żwirze; 0,5–0,7 – w suchych piaskach i żwirach.

Siła pozioma działająca na powierzchnię płaszcza jest biernym oporem gruntu, gdyż wbijany i obciążany pal stara się wypchnąć grunt na zewnątrz. Siła ta wzrasta wraz z głębokością, podobnie jak hydrostatyczne parcie wody, i jest zależna od kąta tarcia wewnętrznego, ulegając zwiększeniu wraz z tym kątem. Do uwag Pomianowskiego [12] na ten temat, warto dodać opinię Rychtera [18] o zagęszczaniu gruntu podczas wbijania pali: „Opór pali zależy od gęstości pokładu, a ta powiększa się przez bicie pali – w stosunku do objętości przez nie wypchniętej. Wyzyskujemy lepiej tę własność pali, otaczając naprzód obszar fundamentu palisadą i bijąc pale wewnątrz palisady. Najwięcej zyskują wtedy pale wewnątrz obwodu”. To, że „gęstość gruntu wzrasta, a tym samym wzrasta i opór tarcia tak, iż jeśli pierwsze pale wchodzi w grunt łatwo, następne wchodzi coraz trudniej – ostrzega Pomianowski [13] – nie można wnosić, iż przez zabicie pali wzrasta wytrzymałość gruntu, gdyż cała grupa pali może zatonać na swym obwodzie, jeśli wytrzymałość gruntu pod końcami pali jest za mała dla przyjęcia obciążenia budowla. Obwód grupy pali mnożony przez współczynnik wewnętrznego tarcia gruntu powinien więc mieć wartość równą lub większą od wartości współczynnika tarcia na obwodach pali mnożonego przez sumę obwodu pali, jeśli cała grupa pali nie ma zatonać, a nie opiera się końcami bezpośrednio o warstwę wytrzymałą. Co

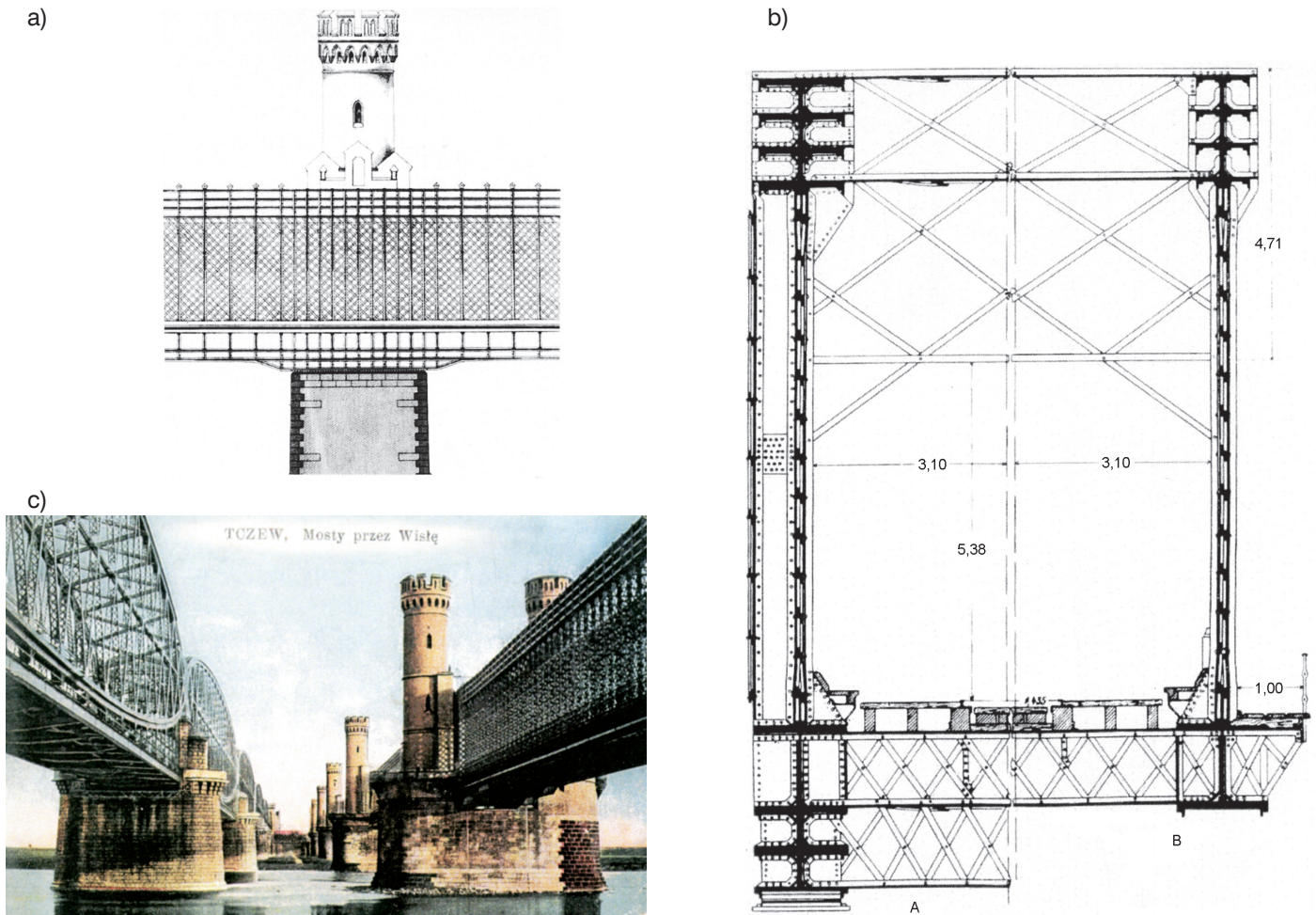
więcej – jeśli zarys przyszłego fundamentu otoczmy ścianką szczelną i wewnątrz niej będziemy bili pale, na skutek zagęszczenia gruntu wewnątrz ścianek i wytłoczenia z niego wody pale będą w grunt wchodziły coraz trudniej, lecz jeśli naprężenie jednostkowe gruntu pod końcami pali będzie przekraczało wytrzymałość jego na tej głębokości na siły ścinające, cały fundament wraz z palami zatonać wzdłuż linii zabitych ścianek szczelnych i to tym łatwiej, że na gładkiej powierzchni ścianek opór tarcia będzie mniejszy niż opór wewnętrznego tarcia gruntu. Taki wypadek zdarzył się w swoim czasie przy fundowaniu przyczółka mostowego na namulach rzecznych w Egipcie, gdzie pale wchodziły coraz trudniej w grunt w przestrzeni otoczonej ścianką, wytrzymałość gruntu zagęszczonego była więc określana na coraz większą, aż w pewnym momencie całość przyczółka wraz ze ściankami szczelnymi nagle zatonała w mule.”

Posadowienie na palach jest jednym z najstarszych i właściwie jednym z najprostszyc sposobów budowy fundamentów. Opierano na nich murowane filary i przyczółki zarówno średnich, jak i dużych mostów, i to w tym czasie, gdy zaczęła się rozwijać technika posadowienia pod sprężonym powietrzem [22]. Sześcioprzęsłowy most pod Tczewem (pisano wówczas: „pod Czczewem”), projektu inżyniera Lentze'go z 1860 r., oparto na dwóch przyczółkach i pięciu filarach. Pod każdą z podpór wbito 257 pali w obrębie powierzchni 437,73 m², otoczonej ścianką szczelną szpunt palową grubości 12” (30,5 cm). Pale oczepione były skratowaniem drewnianym na głębokości 3,13 m poniżej zera Wisły. Był to jeden z największych wówczas mostów żelaznych (rys. 1), o przeznaczeniu kolejowo-drogowym. Przęsła rozpiętości 130,79 m w osi filarów, z jazdą dołem, miały kratę wielokrotną. Kratownice były ciągle, dwuprzęsłowe.

Dwa lata później oddano do użytku most kratowy na Bzurze o znacznie mniejszej rozpiętości przęsła (17,3 m), przy czym przęsła tych było tyle samo, opartych na podporach z kamienia i cegły. Pod filary i przyczółki wbito 376 pali na głębokość 7,55 m, a na nich ułożono ruszt z belek 12 × 12”.

Jeżeli warstwa, w którą są wbite pale, nie ma odpowiedniej gęstości, by zapewnić budowli stateczność, powiększa się ją przez wbicie pali pochyłych (np. pod przyczółek mostu obrotowego w Hamburgu), narzut z kamieni (bulwar w Bostonie) lub warstwę betonu, wypełniającą miejsca między palami (według Debauve'a).

Można spotkać się z określeniem pali wysokich i niskich, całkowicie pograżonych w ziemi. Pale wysokie wystają nieraz sporo ponad gruntem. Stosowane są raczej do budowli o mniejszych obciążeniach, względnie lekkich jak bulwary nadmorskie czy nadrzeczne. Dają one spore oszczędności w murach. Pod przyczółki mostów łukowych, szczególnie kamiennych czy betonowych, w których wypadkowa sił działających na fundament jest pochyła, pale winny być wbijane w kie-



Rys. 1. Most przez Wisłę pod Tczewem. a) Fragment elewacji w miejscu podpory; b) przekrój pionowy przęsła; c) z prawej strony most omawiany w tekście. Z lewej strony późniejszy most o dźwigarach systemu Pauli

runku wypadkowej, jak np. pod przyczółkiem mostu na Dunaju pod Munderkingen (1894 r.). W przypadku małego odchylenia wypadkowej od pionu daje się tylko część pali pochyłych.

W poglądach na pracę pali występowały i występują pewne różnice. I mimo wielowiekowej tradycji posadowienia różnych budowli na palach, w dalszym ciągu, *mutatis mutandis*, aktualny jest osąd Józefa Fedorowicza [5], że na określenie nośności pali mamy tylko wzory przybliżone. Tym niemniej oceny stawały się coraz bardziej uściślone i z czasem wyłoniły się cztery wyraźnie różne metody określania nośności pali P – empiryczna, dynamiczna, analityczna (inaczej zwana statyczną) i obciążeń próbnych. Metoda dynamiczna przysporzyła nauce niemało wzorów, jak np. F. Redtenbachera, J. Weisbacha, J.A.Eytelweina:

$$P = \frac{E \cdot w \cdot e}{L} + \sqrt{\left(\frac{E \cdot w \cdot e}{L}\right)^2 + \frac{2 \cdot Q^2 \cdot h \cdot E \cdot w}{L \cdot (Q + q)}} \quad (1)$$

$$P = \left(\frac{E \cdot w \cdot e}{L}\right) \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot Q \cdot h \cdot L}{E \cdot w}}\right) \quad (2)$$

$$P = \frac{h \cdot Q^2}{e \cdot (Q + q)} + Q + q \quad (3)$$

w których: E – oznacza współczynnik sprężystości pala, w – pole przekroju pala, L – długość pala, h – wysokość spadku młota w mm, e – wpęd pala pod ostatnim uderzeniem w mm (zwykle jest to średnia z ostatnich uderzeń młota), Q – ciężar młota, q – ciężar pala.

Najbardziej popularnym był wzór Brixsa:

$$P = \frac{q \cdot Q^2 \cdot h}{e \cdot (q + Q)} \quad (4)$$

We wzorze Brixsa stosowano współczynnik pewności 2–4. Według Fedorowicza [5] należało przyjmować współczynnik pewności 4. Wartości otrzymywane ze wzorów (1)–(3) były znacznie większe od otrzymywanych ze wzoru Brixsa. Np. według wzoru Redtenbachera (1) iloraz wynosił 2,4; według Eytelweina (3) – 2,9; według Weisbacha (2) – 3,3. Zbliżonym do

wzoru Brixsa był wzór Jankowskiego: $P = \frac{1}{6} \cdot \frac{Q \cdot h}{e}$. Wzór stosowa-

wany w Stanach Zjednoczonych daje wartość $P = \frac{n \cdot Q \cdot h}{e \cdot k}$, przy czym n – liczba uderzeń młota, k – współczynnik.

Wszystkie wzory wyprowadzono w odniesieniu do pali drewnianych, gdy do ich wbicia używano zwykłych młotów, a nośność pala była w pewnej proporcji do ciężaru i wysoko-