

# Wirówka geotechniczna – historia, modelowanie i współczynniki skali

Mgr inż. Jakub Konkol

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Badania modelowe od zawsze towarzyszyły procesowi projektowemu w inżynierii lądowej. Za przykład mogą służyć badania modelowe mostu Akashi Kaikyo mające za cel ustalenie jego odporności na działanie wiatru [20]. W zagadnieniach geotechnicznych modelowanie ośrodka gruntowego powoduje podstawową trudność. Grunt jest materiałem nieliniowym i zależność naprężenie-odkształcenie w modelu w skali nie może być ekstrapolowana w sposób jednoznaczny na pełnowymiarowy prototyp. Inna sztywność podłoża gruntowego w modelu i prototypie zmusza w tradycyjnych badaniach laboratoryjnych do uwzględniania, często skomplikowanych, efektów skali. Rozwiązaniem tego problemu stało się użycie wirówki geotechnicznej. W polskiej literaturze problem był poruszany niezwykle rzadko [32, 34, 35]. Celem tej pracy jest przedstawienie historii urządzenia i genezy zależności korelacyjnych model-prototyp z możliwie najszerszej perspektywy.

Badanie w wirówce geotechnicznej polega na wykorzystaniu modelu w skali i poddaniu go polu grawitacyjnemu będącemu wielokrotnością przyspieszenia ziemskiego. Schemat takiego badania przedstawiono na rys. 1.

Rozwijając ideę wirówki zilustrowaną na rys. 1, można zapisać równanie:

$$a = \omega^2 \cdot R \quad (1)$$

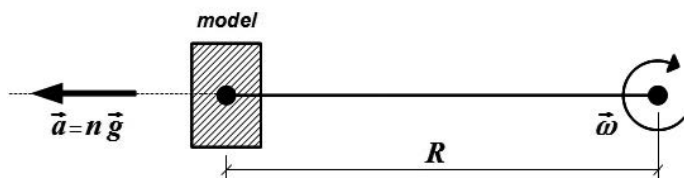
gdzie:

$a$  – przyspieszenie odśrodkowe [ $\text{m/s}^2$ ],

$\omega$  – prędkość kątowna [ $1/\text{s}$ ],

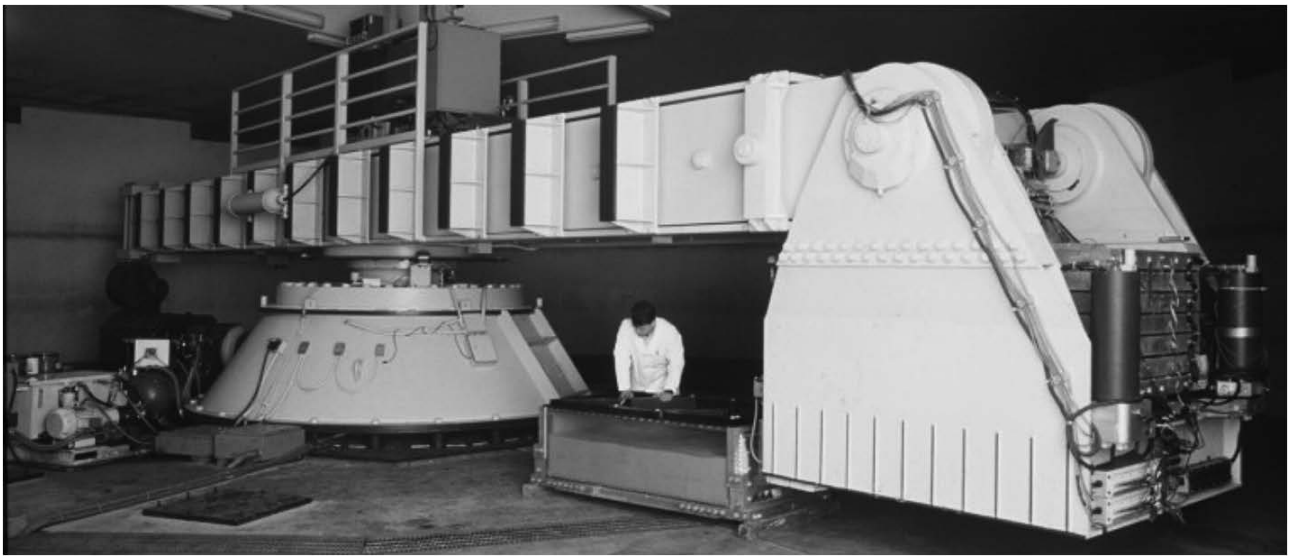
$R$  – promień wirówki [ $\text{m}$ ].

Konsekwencją takiej zależności jest fakt, że aby otrzymać odpowiednio duże przyspieszenie, potrzebny jest duży promień przy mniejszych prędkościach kątowych lub mniejszy promień przy większych prędkościach kątowych. Dlatego obecnie są wykorzystywane dwa rodzaje wirówek: promieniowa i bębnowa. W wirówkach promieniowych (rys. 2) promień osiąga nawet 9,0 m, a ciężar, jaki mieści się na platformie dochodzi do 60 kN. W urządzeniach tych można badać większe modele i wykonywać na nich prace w czasie rzeczywistym za pomocą zdalnie sterowanych robotów [13, 21]. Do badań „w locie” zaliczają się, między innymi, badania miniaturowych sond CPT [4] czy wbijania pali [12]. Platforma w tych wirówkach jest na tyle duża, że umożliwia także montaż generatora drgań, za pomocą którego można modelować zjawiska dynamiczne, takie jak trzęsienia



Rys. 1. Idea badania w wirówce geotechnicznej

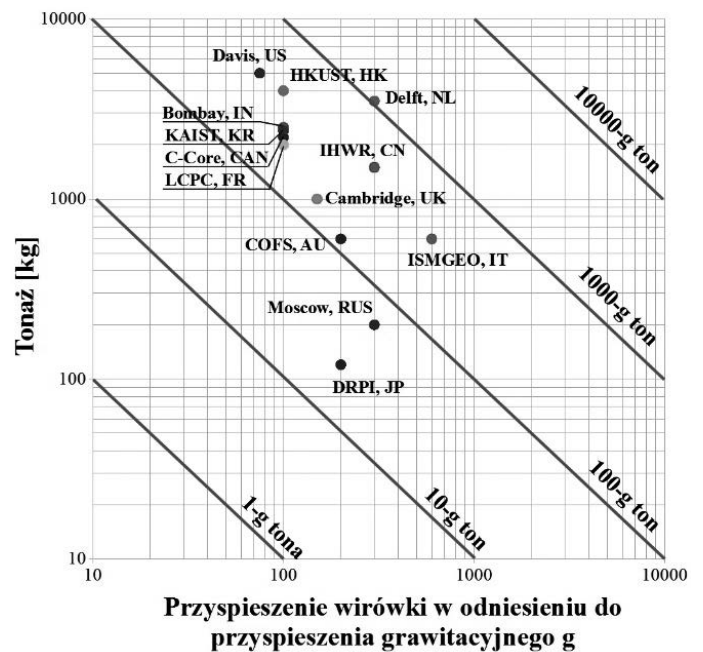
$a$  – przyspieszenie odśrodkowe,  $g$  – przyspieszenie grawitacyjne,  
 $n$  – współczynnik skali,  $\omega$  – prędkość kątowna wirówki,  $R$  – promień wirówki



Rys. 2. Wirówka promieniowa, University of California, Davis [15; licencja CC BY-SA 3.0]



Rys. 3. Wirówka bębnowa, Centre for Offshore Foundation Systems (COFS), University of Western Australia, Perth [6; za zgodą COFS]



Rys. 4. Nośności wybranych wirówek geotechnicznych na świecie (zmodyfikowane za [13, 22])

w nich stosować mniejsze modele o masie do kilkudziesięciu kilogramów. Występujące podczas badania błędy modelowe są za to znacznie większe i częściej wpływają na wyniki pomiarów [30]. Do porównania jakościowego urządzeń służy pojęcie nośności wirówki, czyli iloczynu maksymalnej masy i odpowiadającego mu przyspieszenia. Wykres porównujący nośności wirówek geotechnicznych na świecie przedstawiono na rys. 4.

## WIRÓWKA GEOTECHNICZNA W CZERWIE, DZISIAJ I JUTRO

Pierwszym badaczem, który wysunął koncepcję wykorzystania wirówki do badań modelowych był Eduard Phillips. Ten francuski badacz, inżynier górnictwa i wykładowca na Ecole Polytechnique w Paryżu zajmował się w początkowej fazie

ziemi [18]. Przyspieszenia wirówek promieniowych mieszczą się zazwyczaj w przedziale  $100 \div 300g$ .

Wirówki bębnowe (rys. 3) mają małe średnice (do około 2,0 m) i duże przyspieszenia (do  $500g$ ). Dzięki temu można

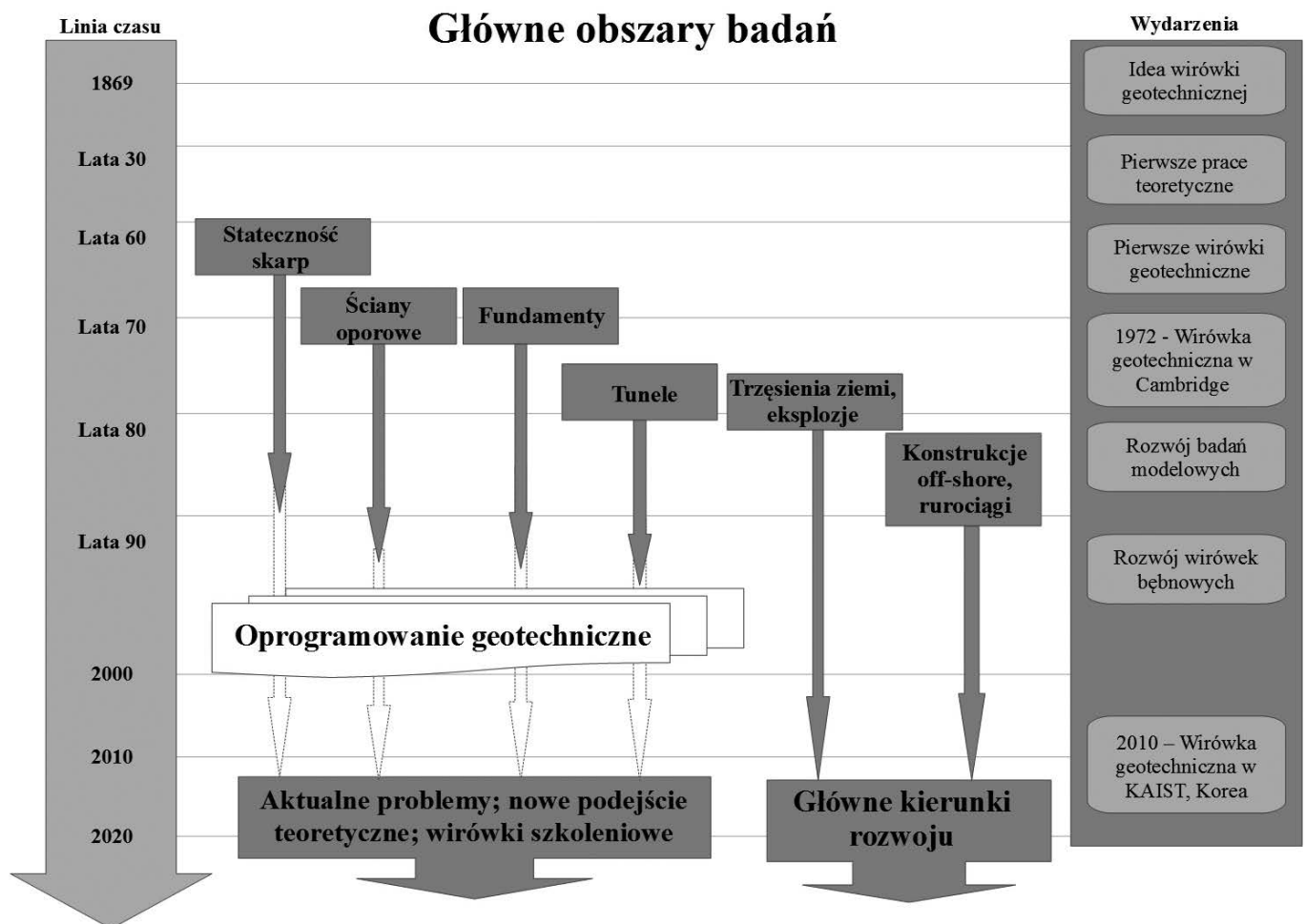
kariery zagadnieniami mostowymi. Problemy przy budowie mostów, jakie napotykali inżynierowie brytyjcy podczas rozbudowy imperialnej sieci kolejowej, pozwoliły wysunąć mu koncepcję wirówki i jej zastosowania do badań modelowych. Pomysł opisany w pracy pt.: „De l'équilibre des solides élastiques semblables” [23] wydanej w 1869 roku był jeszcze niemożliwy do zrealizowania w erze rewolucji przemysłowej i miał pozostać na papierze przez blisko 60 lat.

W 1931 roku na Uniwersytecie Columbia Philp Bucky zaprezentował pracę [5], w której drążona próbka skały poddana przyspieszeniu grawitacyjnemu może być dobrym modelem do badań stateczności tuneli górniczych. Niezależnie od Bucky'ego, w 1932 roku, dwaj badacze radzieccy: Davidienkov i Pokorovsky także dowiedli możliwości wykorzystania wirówki do badań geotechnicznych [8, 25]. Swoją publikację [26] przedstawili środowisku naukowemu w Harvardzie na I Międzynarodowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania.

W ZSRR, zaraz po wojnie, rozpoczęto prace nad wirówką geotechniczną w celu wykorzystania jej do celów militarnych. To Rosjanie pierwsi przeprowadzali badania eksplozji na powierzchni modelu i badania wpływu propagacji fali uderzeniowej na obiekty podziemne. Wirówkę jednak równie szybko zaadoptowano do zastosowań cywilnych [7]. Na „zachodzie” koncepcja wirówki geotechnicznej powróciła dopiero w latach sześćdziesiątych XX wieku. Pierwszą wirówkę zbudował prof. Mikasa na Uniwersytecie w Osace. Było to proste urzą-

dzenie umożliwiające badanie konsolidacji glin miękkoplastycznych [19]. W Wielkiej Brytanii, po zapoznaniu się z pracami uczonych radzieckich, prof. Schofield rozpoczął tamtejszy program badań, początkowo wykorzystując wirówkę RAF-u. Równocześnie podobny program prowadził prof. Rowe [7] na Uniwersytecie w Manchesterze. Badania, podobnie jak te prowadzone w Japonii, dotyczyły procesów konsolidacji i stateczności zbroczy [7]. Wyniki pierwszych badań były prezentowane przez badaczy japońskich, radzieckich i angielskich na konferencjach Mechaniki Gruntów i Fundamentowania w Meksyku w 1969 roku i Moskwie w 1973 roku.

Lata siedemdziesiąte i początek osiemdziesiątych XX wieku stanowił na świecie okres silnego rozwoju modelowania geotechnicznego w wirówkach. W 1984 roku na sympozjach odbywających się w Manchesterze, Tokio i Davis wyniki prezentowało 20 grup z 10 różnych krajów [30]. Lata osiemdziesiąte XX wieku to również rozwój możliwości obliczeniowych komputerów. Rozwój metod numerycznych i badań modelowych postępował równolegle. Uniwersytety w Stanach Zjednoczonych, Japonii i Wielkiej Brytanii stały się wiodącymi ośrodkami geotechnicznymi na świecie. Pod koniec lat osiemdziesiątych i na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku nadal budowano wirówki, choć z nieco mniejszą intensywnością. Powstawało wtedy wiele wirówek bębnowych, na przykład urządzenie w Politechnice w Zurychu [27]. Z nowo wybudowanych urządzeń można wymienić wirówkę w Hong-Kongu po-



Rys. 5. Kierunki w rozwoju badań modelowych w wirówce geotechnicznej na przestrzeni lat (na podstawie [30])

wstała w 1999 roku [22] oraz w KAIST w Korei uruchomiona w 2010 roku [13].

Kierunek rozwoju badań w wirówkach, a także samych urządzeń, był i jest ściśle powiązany z ogólnymi trendami w badaniach modelowych. Schemat, w którym zaprezentowano zasadnicze obszary badań w poszczególnych latach, zamieszczono na rys. 5. Można zauważyć, że największy wpływ na badane zagadnienia miał rozwój oprogramowania geotechnicznego i wykorzystanie metod numerycznych.

Badania modelowe zawsze towarzyszyły próbie zrozumienia zjawisk, które były słabo znane pod względem teoretycznym lub nie miały łatwego rozwiązania analitycznego. Badania stateczności zboczy, które zaczęto prowadzić w latach sześćdziesiątych XX wieku były częściowo konsekwencją sprawdzania metod projektowych proponowanych przez Bishopa (lata pięćdziesiąte) czy Morgensterna (lata sześćdziesiąte). Możliwość analizy przemieszczeń w modelach skarp stanowiło nowe i cenne źródło wiedzy. Wkrótce rozszerzono badania na ściany oporowe, fundamenty i tunele. Badania prowadzono w różnych warunkach gruntowych. Kiedy w latach dziewięćdziesiątych XX wieku pojawiło się komercyjne oprogramowanie geotechniczne, zmniejszyła się potrzeba wielu badań w wirówkach geotechnicznych. Opisy numeryczne wykorzystane w oprogramowaniu doskonale potwierdzały wyniki badań modelowych. Za przykład może służyć praca Boltona i Powriego z 1987 roku [3]. Badanie dotyczyło przemieszczeń gruntu przy wykonywaniu wykopu w obudowie ze ścian szczelinowych. Podłoże gruntowe stanowiła glina, a projekt badania umożliwiał symulację głębienia wykopu w czasie. To samo obecnie można wykonać wykorzystując oprogramowanie geotechniczne. Drugim powodem zaprzestania części badań były przyczyny finansowe i czasowe. Model numeryczny jest tańszy i szybszy w przygotowaniu chociaż trudnością może być dobór właściwego modelu obliczeniowego oraz wiarygodnych parametrów podłoża. Od tego momentu badania w wirówkach skupiły się na innowacjach, nowym podejściu teoretycznym oraz nowych zagadnieniach geotechnicznych. Jako przykład mogą służyć badania sond CPT [4] czy modelowanie geosyntetyków w latach dziewięćdziesiątych XX wieku [36], jak również konstrukcji *off-shore* obecnie [11]. Z drugiej strony z powodu trudności opisu numerycznego nadal prowadzi się modelowe symulacje trzęsień ziemi [18]. W konsekwencji wyłoniły się dwa rodzaje ośrodków. W pierwszej grupie są te uniwersytety, które mają wirówki szkoleniowe. Są to wirówki o małych średnicach (maksymalnie 1 m) i o przyspieszeniach 100 ÷ 200g, które służą przede wszystkim celom edukacyjnym. To w nich demonstruje się na przykład utratę stateczności zbocza czy zagadnienie nośności stóp fundamentowych. W efekcie studenci geotechniki zdobywają materiał do porównania z obliczeniami numerycznymi lub z rozwiązaniami empirycznymi [2]. Koszty budowy takiego urządzenia nie są duże i mieszczą się w granicach kilkudziesięciu tysięcy dolarów. W drugiej grupie są ośrodki, które mają wirówki o dużych średnicach lub wirówki bębnowe o dużych przyspieszeniach. Koszt budowy takiego urządzenia to już przedział od kilkuset tysięcy do kilku milionów dolarów. Wirówka bębnowa w Politechnice w Zurychu powstała za 800 000 franków szwajcarskich [27]. Przebudowa i modernizacja wirówki w Davis w latach 2000-2004 pochłonęła prawie 5 mln dolarów [33].

Interesujące pod względem kosztów są również badania dla przemysłu. Bardzo często projekty odpowiedzialnych konstrukcji są sprawdzane w badaniach laboratoryjnych, w ściśle określonych warunkach brzegowych i początkowych. Koszty serii badań modelowych w wirówkach geotechnicznych wraz z analizą wyników i proponowanym rozwiązaniem mieszczą się w zakresie dziesiątków tysięcy dolarów. Sprawdzenie najtańszego i najefektywniejszego sposobu zabezpieczenia nasypów w projekcie London Underground Limited wymagało środków w wysokości 40 000 funtów [17]. Badanie wyboczeń rurociągów gazowych to koszty rzędu 30 000 funtów [17]. Badania posadowienia kesonu zlokalizowanego na wybrzeżu Egiptu kosztowały 20 000 funtów i były wykonane w ciągu 2 tygodni [17]. Należy pamiętać, że koszty badań modelowych i tak są niewielkie w stosunku do kosztów całej inwestycji, a często pomagają uzupełnić obliczenia numeryczne.

## ZASADY MODELOWANIA W WIRÓWCE GEOTECHNICZNEJ

W celu poprawnego wymodelowania zjawiska geotechnicznego należy wygenerować w modelu takie same stany naprężenia jak w prototypie. Inaczej należy uwzględniać efekty skali. Zgodność naprężenia i odkształcenia w modelu w wirówce i w prototypie można udowodnić w bardzo prosty sposób. Rozważmy eksperyment przedstawiony na rys. 6. Załóżmy, że prototyp jest nasypem o wysokości  $h$ , wykonanym z materiału o gęstości objętościowej  $\rho$ .

Składowa pionowa naprężenia  $\sigma_{vp}$  w podstawie nasypu wyniesie:

$$\sigma_{vp} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Odształcenie pionowe  $\varepsilon_{vp}$  w rozważanym obszarze podłoża gruntowego wyniesie:

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\Delta H}{H} \quad (3)$$

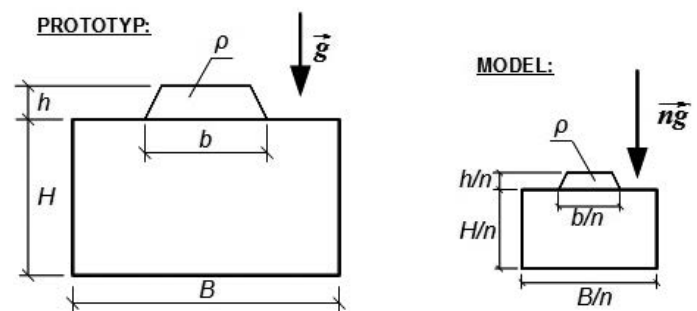
gdzie:

$\Delta H$  – przemieszczenie pionowe,

$H$  – przyjęta do analizy głębokość podłoża gruntowego.

Teraz rozważmy model nasypu w skali 1:n wykonany z tego samego materiału co prototyp, poddany przyspieszeniu  $ng$  w wirówce geotechnicznej. Składowa pionowa naprężenia  $\sigma_{vm}$  w podstawie nasypu – modelu wyniesie:

$$\sigma_{vm} = \rho \cdot ng \cdot \frac{h}{n} = \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$



Rys. 6. Prototyp i odpowiadający mu model w wirówce

Odształcenie pionowe  $\epsilon_{vm}$  w modelu podłoża gruntowego wyniesie odpowiednio:

$$\epsilon_{vm} = \frac{\frac{\Delta H}{n}}{\frac{H}{n}} = \frac{\Delta H}{H} \quad (5)$$

Wynika z tego, że wykorzystując wirówkę geotechniczną można w bezpośredni sposób przełożyć stany naprężenia i odkształcenia pomierzone w modelu na prototyp. Otrzymanie całego zestawu praw wiążących wartości pomierzone w modelu i w prototypie nie jest już jednak takie proste.

Każdy eksperyment prowadzony w skali powinien spełniać określone warunki podobieństwa [16]: podobieństwo geometryczne, kinematyczne i dynamiczne. Podobieństwo geometryczne wiąże wymiary modelu i prototypu przez określoną skalę modelowania  $n$ . Podobieństwo kinematyczne zapewnia korelacje między polami prędkości w modelu i prototypie. Jeśli pola sił w modelu i prototypie są podobne, to otrzymujemy podobieństwo dynamiczne. Jeśli wszystkie trzy podobieństwa są spełnione otrzymujemy podobieństwo pełne. W przeciwnym razie mamy do czynienia z podobieństwem częściowym i należy

Tabl. 1. Zależności korelacyjne model-prototyp do badań w wirówce geotechnicznej

Rodzaj badania	Parametr	Jednostka	Oznaczenie	Zależność model – prototyp
Wszystkie	Długość	m	$L^*$	$1/n$
	Powierzchnia	m <sup>2</sup>	$A^*$	$1/n^2$
	Objętość	m <sup>3</sup>	$V^*$	$1/n^3$
	Gęstość	kg/m <sup>3</sup>	$\rho^*$	1
	Masa	kg	$m^*$	$1/n^3$
	Przyspieszenie grawitacyjne	m/s <sup>2</sup>	$g^*$	$n$
	Ciężar objętościowy	N/m <sup>3</sup>	$\gamma^*$	$n$
	Naprężenie	N/m <sup>2</sup>	$\sigma^*$	1
	Odształcenie	–	$\epsilon^*$	1
	Siła (statyczna)	N	$F^*$	$1/n^2$
Dynamika	Przemieszczenie	m	$u^*$	$1/n$
	Energia	J	$E^*$	$1/n^3$
	Moment zginający	Nm	$M^*$	$1/n^3$
	Czas	s	$t^*$	$1/n$
	Prędkość	m/s	$v^*$	1
	Przyspieszenie	m/s <sup>2</sup>	$a^*$	$n$
	Częstotliwość	s <sup>-1</sup>	$f^*$	$n$
Konsolidacja	Czas	s	$t^*$	$1/n^2$
	Prędkość filtracji	m/s	$v_{f^*}$	$n$
	Współczynnik filtracji	m/s	$k^*$	$n$

brać pod uwagę efekty skali. Pomocą w rozwiązaniu wymiennych problemów podobieństwa jest wykorzystanie twierdzenia Buckinghama i analizy wymiarowej. Twierdzenie Buckinghama brzmi następująco: *Każdą funkcję  $n$  parametrów wymiarowych  $a_p$ , z których  $k$  ma wymiary podstawowe, można przedstawić w postaci funkcji  $n-k$  parametrów bezwymiarowych  $\Pi$* . Jeżeli parametry bezwymiarowe  $\Pi$  będą takie same dla zjawiska rzeczywistego i modelowanego, to będą one podobne. Podstawowym równaniem mechaniki budowli i geotechniki jest równanie równowagi momentów, zwane również równaniem Naviera:

$$\text{div}(\bar{\sigma}) + \bar{\rho} \cdot \left( \bar{g} - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (6)$$

gdzie:

$\sigma$  – tensor naprężenia [kg/(ms<sup>2</sup>)],

$\rho$  – wektor gęstości [kg/m<sup>3</sup>],

$g$  – wektor przyspieszenia grawitacyjnego [m/s<sup>2</sup>],

$u$  – wektor przemieszczeń [m],

$t$  – czas [s],

$x$  – wektor położenia [m].

Wykonanie analizy wymiarowej [14] pozwoli zapisać równanie Naviera w postaci bezwymiarowej:

$$f\left(\frac{\sigma}{x \cdot g \cdot \rho}, \frac{g \cdot t^2}{x}, \frac{u}{x}\right) = 0 \quad (7)$$

Wykorzystując równanie (7) można przeprowadzić analizę podobieństwa dla modelowanego zadania, a także wyznaczyć zależności model-prototyp [14]. Z tego samego równania można korzystać zarówno do badania w warunkach 1g, jak i do badań w wirówce. Listę zależności korelacyjnych model-prototyp, z uwzględnieniem zjawisk dynamicznych i konsolidacji, przedstawiono w tabl. 1. Podstawową korzyścią wykorzystania wirówki jest bardzo proste przeliczenie wartości parametrów z modelu na prototyp.

## PRZEGLĄD WYBRANYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW SKALI

Podstawowym założeniem w modelowaniu w wirówce jest stosowanie tego samego gruntu w modelu i w prototypie. Założenie to powoduje jednak pewien problem. Co z wielkością ziaren? Czy zastosowanie współczynnika skali  $n = 100$  powoduje, że piasek w prototypie odpowiada żwirowi w modelu? W rozwiązaniu tej niejednoznaczności pomoże inaczej postawione pytanie. Czy piaskom w prototypie odpowiadają pyły i łyły w modelu? Odpowiedź naturalnie brzmi: nie. Przyczyną stosowania tych samych gruntów jest konieczność otrzymania w modelu materiału o takiej samej wytrzymałości, sztywności i historii obciążenia, jaki istnieje w prototypie [30]. Najprościej jest to uzyskać stosując ten sam grunt. Należy jedynie tak dobrać wielkości modelu fundamentu, by wpływ stosunku wymiaru modelu do średnicy ziaren można było pominąć [9, 10].

Z drugiej strony stosowanie tego samego gruntu wpływa na parametry, które decydują o filtracji i konsolidacji. Stąd wynika zasadniczy konflikt skal modelowania dla czasu i prędkości filtracji w momencie równoległego wystąpienia obciążenia dynamicznego i konsolidacji, przedstawiony w tabl. 1. Podstawowym parametrem w procesie konsolidacji jest współczynnik filtracji  $k$  [m/s], który można zapisać [21]:

$$k = K \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (8)$$

gdzie:

$K$  – przepuszczalność hydrauliczna [ $m^2$ ],  
 $\rho$  – gęstość objętościowa gruntu [ $kg/m^3$ ],  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],  
 $\mu$  – dynamiczny współczynnik lepkości [ $Pa \cdot s$ ].

Stosując ten sam grunt, nie mamy wpływu na gęstość objętościową gruntu i przepuszczalność hydrauliczną ośrodka, która jest funkcją uziarnienia. Jedynym parametrem, który możemy zmodyfikować, jest dynamiczny współczynnik lepkości przepływającej cieczy. Ponieważ konsolidacja przebiega  $n$  razy szybciej niż jakikolwiek proces dynamiczny, w modelach stosuje się olej silikonowy lub metylcelulozę [28].

Problemem jest również przyjęcie zależności model-prototyp dla współczynnika filtracji. Zgodnie z prawem Darcy'ego prędkość filtracji  $v_f$  [ $m/s$ ] można zapisać [31]:

$$v_f = k \cdot i \quad (9)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji [ $m/s$ ],  
 $i$  – gradient hydrauliczny [–].

Gradient hydrauliczny  $i$  [–] jest bezwymiarowy, co powoduje, że zależność model-prototyp dla współczynnika filtracji wynosi  $n$ . Wielu badaczy stosuje właśnie to podejście [31]. Zamieszczono je również w tabl. 1. Jednakże współczynnik filtracji jest jedną z charakterystyk ośrodka gruntowego, a ten jest taki sam w modelu i prototypie. Z tego spostrzeżenia, jak i bezpośrednio ze wzoru (8) wynika, że współczynnik filtracji w prawie Darcy'ego zależy od grawitacji. Tu pojawia się problem. Przepływ każdej cieczy w gruncie zależy od gradientu ciśnienia, który grawitacja może co najwyżej wywołać. Jeśli istnieje gradient to istnieje przepływ. Brak gradientu oznacza brak przepływu. Ten argument był postawiony po raz pierwszy przez Taylora [29]. Powróćmy więc do wzoru (8) przedstawionego przez Muskata w 1937 roku. W tej zależności jest wyraźnie oddzielony wpływ grawitacji od przepuszczalności gruntu. Powyższe rozważanie szerzej przedstawili Thusyanthan i Madabhushi w 2003 roku [31] i potwierdzili testami w wirówce geotechnicznej. Jednocześnie zaproponowano, aby zamiast tradycyjnego sformułowania prawa Darcy'ego używać:

$$v_f = \frac{K}{\mu} \times \frac{\Delta[P + z\rho g]}{\Delta L} \quad (10)$$

gdzie:

$v_f$  – prędkość filtracji [ $m/s$ ],  
 $K$  – przepuszczalność hydrauliczna [ $m^2$ ],  
 $\rho$  – gęstość objętościowa gruntu [ $kg/m^3$ ],  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $m/s^2$ ],  
 $\mu$  – dynamiczny współczynnik lepkości [ $Pa \cdot s$ ],  
 $\Delta P$  – różnica ciśnień cieczy [ $Pa$ ],  
 $\Delta L$  – długość drogi filtracji [ $m$ ],  
 $\Delta z$  – różnica poziomów piezometrycznych.

W zależności określonej wzorem (10) wyraźnie rozdziela się przepuszczalność hydrauliczną od gradientu energii wymuszającej przepływ, na który składa się gradient ciśnienia i gradient wywołany działaniem siły grawitacyjnej.

Przepuszczalność hydrauliczną można obliczyć z wzorów podanych przez Kozeny'ego w 1927 roku lub z rozwinięcia równania przedstawionego przez Carmana w 1937 roku. Formuła Kozeny'ego ma postać [31]:

$$K = \frac{c \cdot n^3}{s^2} \quad (11)$$

gdzie:

$c$  – stała Kozeny'ego, zależna od kształtu kapilary,  
 $n$  – porowatość,  
 $s$  – powierzchnia właściwa ośrodka porowatego ( $1/m^2$ ).

Równanie Kozeny-Carmana można przedstawić następująco [31]:

$$K = \frac{d_m^2}{180} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (12)$$

gdzie:

$d_m$  – charakterystyczna średnica ziaren [ $m$ ],  
 $n$  – porowatość.

Modelowanie w wirówce wymaga uwzględnienia także innych aspektów: niejednorodności sztucznego pola grawitacyjnego w modelu [30], wpływu ścianek i dna kontenera [24] oraz innych efektów skali [1, 9]. Wykaz praw korelacyjnych, analizę aktualnych pytań o podobieństwo w modelowaniu i dyskusję o efektach skali można znaleźć w publikacji komitetu TC2 [10], będącego częścią ISSMGE.

## PODSUMOWANIE

Wirówka geotechniczna jest potężnym narzędziem badawczym. Może być szeroko wykorzystywana zarówno w edukacji, jak i w przemyśle. Umożliwia zmierzenie się z aktualnymi problemami geotechnicznymi i ich analizę bez wykonywania badań w skali naturalnej. Badania modelowe w wirówce umożliwiają kontrolę podejścia numerycznego i często są impulsem do poprawy lub stworzenia nowego oprogramowania komercyjnego. Umożliwiają także analizę oraz weryfikację trudnych i odpowiedzialnych przypadków projektowych, a są wręcz niezbędne, gdy konstrukcja narażona będzie na wielokrotne trzęsienia ziemi lub inne zbyt skomplikowane w opisie teoretycznym wpływy dynamiczne.

## LITERATURA

- Balachowski L.: Size Effects in Centrifuge Cone Penetration Tests. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 54(3), 2007, 161-181.
- Black J., Clarke S.: The development of a small-scale geotechnical teaching centrifuge. In: Enhancing Engineering Higher Education. Royal Academy of Engineering, 2012, 37-41.
- Bolton M., Powrie W.: The collapse of diaphragm walls retaining clay. Geotechnique, 37(3), 1987, 335-353.
- Bolton M., Gui M. i Phillips R.: Review of miniature soil probes for model tests. Proceedings 11th South-east Asian Geotechnical Conference, Singapore 1993, 85-90.
- Bucky P.: The use of models for the study of mining problems. Technical Publication 425. New York: Am. Inst. Of Min. & Met. Engng, 1931.
- COFS. <http://www.cofs.uwa.edu.au/>. Pobrano 01 14, 2014 z lokalizacji [http://www.cofs.uwa.edu.au/\\_data/assets/image/0007/2168251/drum.jpg](http://www.cofs.uwa.edu.au/_data/assets/image/0007/2168251/drum.jpg)
- Craig W.: The Seven Ages of Centrifuge Modelling. Proceedings of Workshop on Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes, Monte Verità, Ascona 2001, 165-174.

8. Davidenkov N.: The new method of the application of models to the study of equilibrium of soils. *J. Tech. Physics* 3, 1933, 131-136.
9. Foray P., Bałachowski L., Rault G.: Scale effect in shaft friction due to the localisation of deformations. *Centrifuge 98*, Tokyo: Kimura et al., 1998, 211-216.
10. Garnier J., Gaudin C., Springman S., Culligan P., Goodings D., Konig D., Kutter B., Phillips R., Randolph M. F. i Thorel L.: Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 3(3), 2007, 1-23.
11. Gaudin C., Cassidy M., Bienen, B., Hossain M.: A review of the contribution made by geotechnical centrifuge modelling to the understanding of jack-up spudcan behaviour. *Ocean Engineering*, 38(7), 2011, 900-914.
12. Hölscher P., van Tol A., Huy N.: Rapid pile load tests in the geotechnical centrifuge. *Soils and Foundations*, 52(6), 2012, 1102-1117.
13. Kim D.-S., Kim N.-R., Choo Y., G.-C., C.: A Newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(1), 2013, 77-84.
14. Konkol J.: Derivation of scaling laws used in geotechnical centrifuge technology-application of dimensional analysis and Buckingham II theorem. *Technical Sciences* 17(1), 2014, 31-44.
15. Kutter B.: Geotechnical centrifuge at the University of California. 1998. Pobrano 01 14, 2014 z lokalizacji [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geotechnical\\_centrifuge\\_at\\_the\\_University\\_of\\_California,\\_Davis.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geotechnical_centrifuge_at_the_University_of_California,_Davis.png)
16. Langhaar H.: *Dimensional Analysis and Theory of Models*. New York: John Wiley and Sons, 1951.
17. Madabhushi S.: Application of centrifuge modeling. TNA Workshop on Centrifuge Modelling, 3-4 March 2011. Pobrano 01 14, 2014 z lokalizacji <http://www.series.upatras.gr/sites/default/files/7.Application%20of%20centrifuge%20modeling.pdf>
18. Madabhushi S., Schofield A.: Centrifuge modelling of tower structures on saturated sands subjected to earthquake perturbation. *Geotechnique*, 43(4), 1993, 555-565.
19. Mikasa M., Takada N. i Yamada K.: (1969). Centrifugal model test of a rockfill dam. *Proc. 7th Int. Conf. Soil Mechanics & Foundation Engineering* 2, 1969. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 325-333.
20. Miyata T., Tada K., Sato H., Katsuchi H., Hikami T.: New findings of coupled-flutter in full model wind tunnel tests on the Akashi Kaikyo Bridge. *Symp. on Cable-Stayed and Suspension Bridges*, Deuville, France, 1994, 163-170.
21. Muskat M.: *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. New York: McGraw- Hill, 1937.
22. Ng C., Van Laak P., Tang W., Li X. i Shen C.: The Hong Kong Geotechnical Centrifuge and Its Unique Capabilities. *Sino-Geotechnics*, no. 83, 2001, 5-12.
23. Phillips E. (1869). *De l'équilibre des solides elastiques semblables*. *C. R. Acad. Sci., Paris* 68, 75-79.
24. Phillips R. i Valsangkar A.: An experimental investigation of factors affecting penetration resistance in granular soils in centrifuge modelling. *CUED/DTR210*. 1, 1987.
25. Pokrovsky G.: On the application of centrifugal force for modelling earth works in clay. *J. Tech. Physics* 3, 1933, 537-539.
26. Pokrovsky G. i Fedorov I. S.: *Studies of soil pressures and soil deformations by means of a centrifuge*. *Proc. 1st Int. Conf. On Soil Mechanics & Foundation Engineering* 1: 70. Cambridge, Massachusetts: Harvard University: P.C. Rutledge & J.D. Watson, 1936.
27. Springman S., Laue J., Boyle R., White J, Zweidler A.: The ETH Zurich Geotechnical Drum Centrifuge. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 1, 2001, 59-70.
28. Steward D. C.: Experience with the use of methyl cellulose as a viscous pore fluid in dynamic centrifuge models. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 21(4), 1998, 365-369.
29. Taylor R.: Discussion on Tan & Scoot (1985). *Geotechnique*, 37(1), 1987, 131-133.
30. Taylor R.: *Geotechnical Centrifuge Technology*. Blackie Academic & Professional, 1995.
31. Thusyanthan N. I., M. S.: *Scaling of Seepage Flow Velocity in Centrifuge Models*. Cambridge: CUED/D-SOILS/TR326, University of Cambridge, Department of Engineering, 2003.
32. Werno M.: Geotechniczne badania modelowe w polu dużych przyspieszeń. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/1994, 73-76.
33. Wilson D. W., Boulanger R. W., Feng X., Hamann B., Jeremic B., Kutter B. L., Ma K.-L., Santamarina C., Sprott K. S., Velinsky S. A., Weber G. H., Yoo S. J. B.: The NEES geotechnical centrifuge at UC Davis. *Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, 1-6 August 2004.
34. Zadroga B.: Zastosowanie wirówki do badań modelowych w geomechanice. *Inżynieria Morska*, nr 1/1987, 14-22.
35. Zadroga B.: Badania w wirówce stateczności budowli morskich posadowionych bezpośrednio obciążonych statycznie lub cyklicznie. *Inżynieria Morska*, 1/1990, 23-31.
36. Zornberg J., Mitchell J., Sitar N.: Testing of Reinforced Slopes in a Geotechnical centrifuge. *Geotechnical Testing Journal*, American Society of Testing and Materials, 20(4), 1997, 470-480.