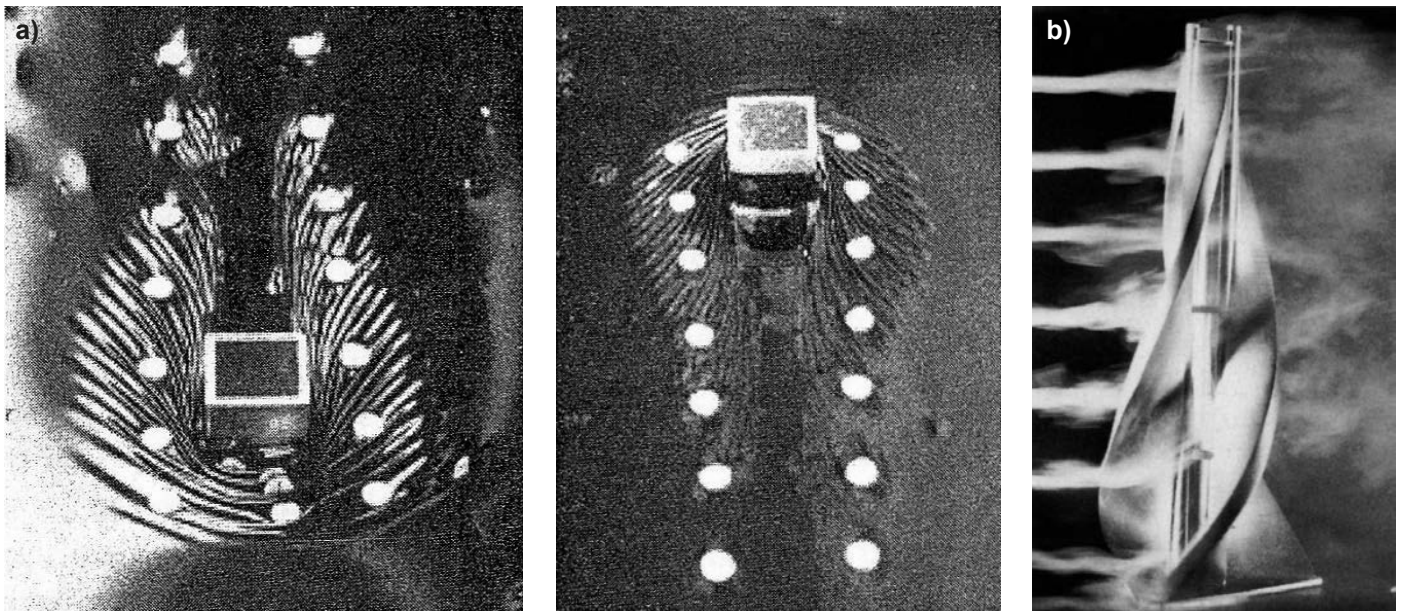


## **Wpływ przezroczystej przegrody na wyniki pomiarów przemieszczeń w badaniach modelowych**

**Mgr inż. Karol Daliga, dr hab. inż. Zygmunt Kurałowicz, prof. nadzw. PG  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Pomiary przemieszczeń budowli inżynierskich w skali 1 : 1 *in situ* oraz w trakcie badań modelowych są bardzo ważnym elementem dociekań naukowych w wielu dyscyplinach naukowych, w tym w budownictwie. Podczas badań terenowych mierzy się rzeczywiste przemieszczenia, tzn.: zmianę położenia obranych punktów na obiekcie względem przyjętego układu odniesienia i następnie oblicza wektor przemieszczenia albo rzeczywiste od-

kształcenie/deformację – zmianę formy niezdylatowanej części wybranej budowli lub jej elementów bez naruszenia jej ciągłości materialnej, w zależności od kierunku, rodzaju i wartości obciążenia, np. [14]. W badaniach modelowych poza pomiarem przemieszczeń można dodatkowo zarejestrować i rozpoznać zjawiska fizyczne zachodzące wokół modeli konkretnych budowli lub różnego rodzaju fundamentów narażonych na parcie

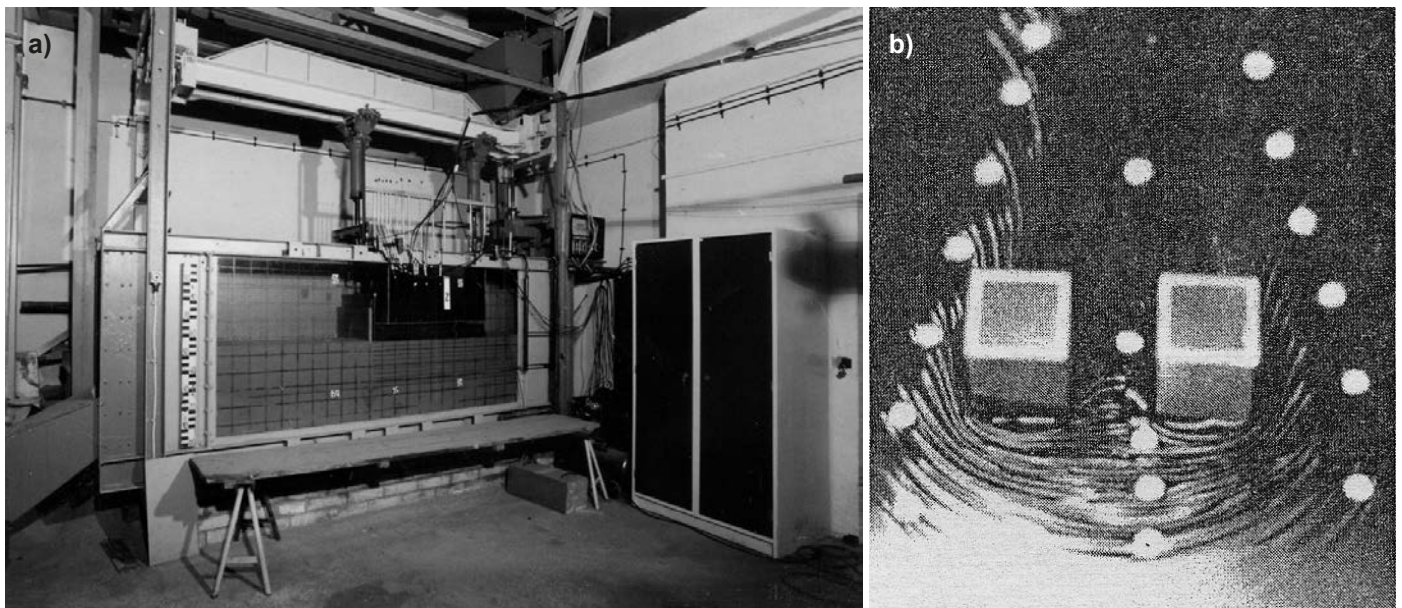


Rys. 1. Widok pomiaru strug cieczy napływającej: (a) na pale w różnym układzie [7] oraz (b) strugi powietrza opływające i rozpraszane na modelu wieżowca w kształcie helisy [2]

gruntu opisane m.in. w pracach [1, 4, 5, 7, 8, 11, 13]. Innym przykładem mogą być badania obiektów poddanych obciążeniu symulującemu trzęsieniem ziemi [6]. Odrębną grupę badań modelowych stanowią badania modeli zanurzonych w cieczy o różnej lepkości, w specjalnych kanałach albo tunelach. Prowadząc pomiary, można zarejestrować tworzące się strugi lub fale oraz inne zjawiska hydrauliczne i aerodynamiczne, wywołane napływającą cieczą i powietrzem na przeszkodę (rys. 1). Zjawiska mogą być rejestrowane poprzez szklane przegrody albo z pozycji wewnętrznej równoległej lub ukośnej do lustra cieczy i modelu, np. pali, podpory [7, 9].

W badaniach modelowych w geotechnice najczęściej rejestruje się jednocześnie przemieszczenia modelu i gruntu wywołane obciążeniem o charakterze statycznym lub powtarzalnym w układzie przestrzennym albo płaskim. Badania są realizowane

w stanowiskach badawczych w postaci specjalnych skrzyń lub studni badawczych. Typowe stanowiska badawcze składają się z kilku ścian, z których jedną stanowi przezroczysty ekran ze szkła albo z plexiglasu (rys. 2). Ekran obserwacyjny stanowi przezroczystą przegrodę czyli przeszkodę stanowiącą dodatkowy element na ścieżce od rejestratora lub impulsu pomiarowego do celu za ekranem (obranego punktu na modelu albo w gruncie). Grubość i rodzaj materiału, z którego jest wykonany ekran, ma wpływ na dokładność pomiaru położenia mierzonego punktu za ekranem. Zarówno model, jak i grunt, w układzie płaskim albo przestrzennym, w trakcie badania ma kontakt ze ścianami skrzyni badawczej, na styku z którymi siły tarcia wywołują dodatkowe zaburzenia w swobodnym przemieszczaniu się układu model-grunt. Jeżeli badania są wykonywane w gruncie suchym, to w celu poznania zjawiska w gruncie, w sąsiedztwie modelu



Rys. 2. Stanowisko w skali półtechnicznej z ekranem szklanym w Katedrze Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego WILiŚ PG do badania przemieszczeń modeli i deformacji podłoża gruntowego (a) oraz wynik rejestracji upłynnionego gruntu obciążającego pale (b) [7]

można użyć materiału analogowego, np. w postaci wałeczków z duraluminium. Przy stosunkowo niewielkich wymiarach modelu i stanowiska oraz formowanego stosu materiału analogowego obserwacje przemieszczeń można wykonać bez dodatkowego zabezpieczenia w postaci przezroczystego ekranu (przeszkody) i wówczas pomiar przemieszczeń ma charakter bezpośredni. Jest to również korzystne ze względu na wyeliminowanie sił tarcia w kontakcie modelu i analogowego gruntu z przegrodą.

Wyniki badań modelowych stanowią podstawę rozwiązań niektórych problemów inżynierskich w postaci wzorów empirycznych lub półempirycznych. Jednocześnie rezultaty tych badań mogą być stosowane do weryfikacji założeń przyjętych w analizach i rozwiązaniach teoretycznych oraz w modelach obliczeniowych, np. [5, 8, 13].

### ISTOTA BADAŃ PRZEMIESZCZEŃ PUNKTÓW PRZEZ PRZEZROCZYSTĄ PRZEGRODĘ W UKŁADZIE PŁASKIM

W wielu laboratoriach naukowych, w kraju i zagranicą, od kilkudziesięciu lat są realizowane nietypowe badania modelowe w różnej skali w układzie płaskim albo przestrzennym. Obszerne opisy badań modelowych wykonywanych w stanowiskach badawczych przedstawiono m.in. w pracach [1, 4, 5, 7, 8, 13]. Widok stanowiska z ekranem szklanym do rejestracji wielkości i charakteru przemieszczeń układu model – grunt pokazano na rys. 2. Przemieszczenia modelu fundamentu oraz gruntu (osiadanie fundamentu i wyparcie gruntu) są wymuszone obciążeniem skupionym albo ciągłym, o wartości przewidzianej w programie badań, na podstawie analizy obciążeń zaprojektowanych do danej budowli lub jej części, np. fundamentu. Ostatecznie jednak, wyniki badań modelowych wymagają interpretacji z uwzględnieniem efektu skali. Konstrukcja stanowiska badawczego jest wykonana w taki sposób, aby nie ulegała deformacji podczas prowadzonych badań. Jednak w celu wyeliminowania wątpliwości dotyczących „sztywności” stanowiska badawczego należy rejestrować charakterystyczne połączenia i ugięcia elementów nośnych stanowiska badawczego oraz przezroczysty ekran wykonany ze szkła albo plexi.

Przygotowanie i przebieg badania zależy od programu badawczego wynikającego z celu badania, dlatego zarówno wymiary modelu i wielkości obciążeń decydują o wielkości stanowiska badawczego i jego usytuowaniu. W konkretnych badaniach oczekiwane przemieszczenia wynoszą od kilku do kilkunastu milimetrów, w zależności od fazy obciążenia. Model i punkty pomiarowe muszą być od strony obserwatora odpowiednio oznaczone, tak, aby można było zarejestrować zmiany położenia konkretnych, charakterystycznych punktów i całego modelu. W gruncie również muszą być umieszczane odpowiednie znaczniki bezpośrednio za ekranem, które po przyłożeniu obciążenia wraz z modelem i gruntem zmieniają swoje położenie (rys. 2a). W przypadku cieczy oprócz znaczników używa się odpowiedniego barwnika tak, aby można było zarejestrować charakterystyczne strugi opływające model albo tworzące się zawirowania cieczy wokół przeszkody (rys. 2b).

W przypadku metod opartych na analizie obrazu jest możliwe, w niektórych przypadkach (np. zróżnicowanie barwy oraz uziarnienia gruntu), niestosowanie znaczników. Jest to możliwe

przy zastosowaniu techniki PIV (*Particle Image Velocimetry*) [12]. W technice tej analizowane jest przemieszczenie się grupy ziaren na podstawie kolejno wykonanych zdjęć.

Inną możliwością jest zastosowanie promieniowania rentgenowskiego, zamiast widzialnego, do obrazowania przemieszczeń [10]. Cechą promieniowania rentgenowskiego jest jego dobra przenikalność przez materiały. Oznacza to, że w przypadku pomiaru przemieszczeń warstw gruntu, jest wymagane zastosowanie znaczników oraz modelu fundamentu, wykonanego z materiału pochłaniającego to promieniowanie lepiej niż zasyp gruntowy oraz skrzynia stanowiska pomiarowego [12].

### BADANIA I ANALIZA WPŁYWU PRZEZROCZYSTEJ PRZEGRODY NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU PRZEMIESZCZENIA PUNKTU

W celu wykonania analizy wpływu przezroczystej przegrody na wyniki pomiaru położenia i przemieszczenia punktów, zbudowano specjalne stanowisko (w małej skali), które:

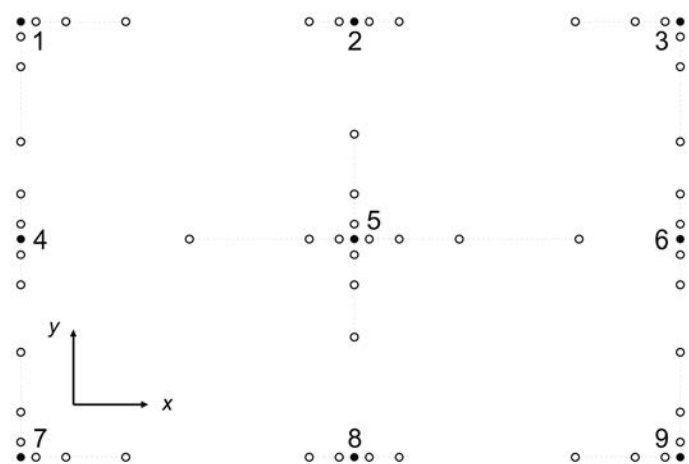
- było wyposażone w przezroczystą przegrodę o grubości 17 mm (odpowiadającą szklanym ekranom w typowych stanowiskach badawczych),
- umożliwiło pomiar położenia punktów bez i za przezroczystą przegrodą

oraz

- punkty pomiarowe miały wstępnie zdefiniowane wartości „przemieszczenia”, a „przemieszczenie” odbywało się tylko w jednej płaszczyźnie,
- punkty pomiarowe były dobrze widoczne przy zastosowaniu przezroczystej przegrody oraz bez niej.

Powyższe wymagania były spełnione przez zastosowanie tablicy testowej zamocowanej do stelaża, z zaznaczonymi punktami (rys. 3). Stelaż umożliwiał ustawienie przezroczystej przegrody przed tablicą testową.

Na tablicy testowej, po obwodzie i w środku, zlokalizowano 9 zbiorów punktów o średnicy 2 mm (rys. 3). Każdy zbiór punktów składał się z punktu „początkowego” (od nr. 1 do nr. 9, zaznaczone kolorem czarnym na rys. 3) i od 4 do 13 dodatkowych punktów symulujących kolejne położenia punktu począ-



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia punktów na tablicy testowej

kowego – po przemieszczeniu punktu „początkowego” o zadaną wartość i zwrot. Na rys. 3 cienką przerywaną linią zaznaczono przyjęte kierunki „przemieszczania się” punktów początkowych, a zaznaczony układ współrzędnych przedstawia kierunki układu współrzędnych przyjętego w tabl. 1 i 2. Do każdego punktu „początkowego”, w poszczególnych zbiorach, przyjęto lokalny układ współrzędnych. Początek układu współrzędnych dla każdego zbioru punktów znajduje się w punkcie „początkowym”. Do pomiaru położenia punktów „początkowych” oraz dodatkowych, i na tej podstawie obliczenia przemieszczenia, zastosowano współczesne metody pomiaru, tzn. z zastosowaniem tachimetru oraz metodę fotogrametryczną.

Poniżej opisano zastosowane metody pomiarów oraz pomiar zmiany położenia punktów/znaczników metodą kalkowania, polegającą na odrysowywaniu punktów bezpośrednio na przegrodzie albo z podświetlonej kliszy dużych wymiarów.

### ANALIZA WARUNKÓW POMIARU PRZEMIESZCZENIA PUNKTÓW METODĄ TACHIMETRYCZNĄ

W metodzie tachimetrycznej zastosowano tachimetr Leica TPS 1201 (dokładność pomiaru bezlustrowego 2 mm, dokładność pomiaru kierunku 1”) ustawiony 4,0 m od tablicy testowej. Stosując metodę tachimetryczną, pomierzono położenie punktów „początkowych” oraz dodatkowych, w przypadku braku i obecności przegrody transparentnej. Współrzędne punktów obliczono w przyjętym układzie współrzędnych (rys. 4), stosując równania (1) ÷ (3):

$$x = D \cdot \sin(V) \cdot \sin(Hz) \quad (1)$$

$$y = D \cdot \cos(V) \quad (2)$$

$$z = D \cdot \sin(V) \cdot \cos(Hz) \quad (3)$$

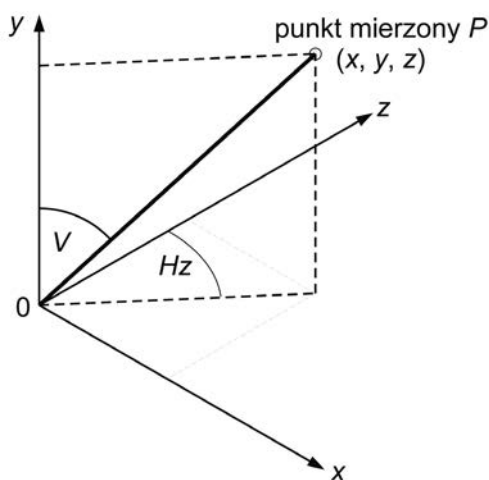
gdzie:

$D$  – odległość skośna od tachimetru do punktu,

$V$  – kąt pionowy,

$H_z$  – kierunek poziomy.

Znając współrzędne punktów w przestrzeni trójwymiarowej, obliczono odległość między punktem „początkowym” i punktami dodatkowymi. Odległość tę można interpretować jako prze-



Rys. 4. Układ współrzędnych przyjęty do obliczenia współrzędnych punktów

mieszczenie się punktu „początkowego” w położenie punktu dodatkowego. Odległość obliczono, stosując następującą zależność:

$$S = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (4)$$

gdzie:

$x_0, y_0, z_0$  – współrzędne punktu „początkowego” dla danej grupy punktów,

$x_i, y_i, z_i$  – współrzędne punktu dodatkowego dla danej grupy punktów.

Do przeprowadzonych pomiarów oraz obliczonej odległości między punktami przeprowadzono analizę niepewności pomiaru. Przyjęto poziom ufności równy około 95%.

### Wyniki pomiarów przemieszczeń punktów metodą tachimetryczną

Wyniki pomiarów „przemieszczenia” punktów pomierzonych metodą tachimetryczną, w przypadku braku przezroczystej przegrody oraz pomiarów wykonanych przez przegrodę, zestawiono w tabl. 1.

Z pomiarów wynika, że obliczone „przemieszczenie” punktu początkowego jest prawie identyczne jak odległość między punktami na tablicy testowej, niezależnie od tego, czy pomiar wykonano przez przezroczystą przegrodę (szybę), czy bez niej. Wynika to z charakterystyki pomiarów różnicowych – przy pomiarach różnicowych błędy systematyczne wzajemnie znoszą się. Należy pamiętać, że w przypadku pomiarów przez przezroczystą przegrodę błąd systematyczny występuje, gdy kąt padania wiązki światła zmienia się w niewielkim zakresie. Można przyjąć, że „niestałość” błędu systematycznego spowodowanego obecnością przezroczystej przegrody wystąpi przy zmianach kąta padania o więcej niż około 30° (kąt ten zmienia się w zależności od grubości przegrody oraz materiału, z którego jest wykonana przegroda).

Porównując położenie tych samych punktów pomierzonych z i bez przezroczystej przegrody, można stwierdzić, że odległość między nimi jest rzędu połowy grubości przegrody. Wynika to z wystąpienia załamania światła na granicy dwóch ośrodków oraz z różnej szybkości fali światła w powietrzu i przezroczystej przegrodzie.

Niepewności pomiaru na poziomie 1 mm do 2 mm wynikają głównie z dokładności pomiaru odległości przez dalmierz tachimetru. W czasie pomiarów stwierdzono, że dokładność celowania w punkt o średnicy 2 mm, z odległości 4,0 m (typowej podczas badań modelowych) wynosi około 0,5 mm.

### ANALIZA WARUNKÓW POMIARU PRZEMIESZCZENIA PUNKTÓW METODĄ FOTOGAMETRYCZNĄ

W metodzie fotogrametrycznej zastosowano aparat cyfrowy Canon EOS 350D (matryca światłoczuła o rozdzielczości 8 MPix) z obiektywem o ogniskowej 17 ÷ 85 mm. W pomiarach użyto ogniskową 85 mm oraz tryb manualnego ustawiania ostrości. Podczas badania aparat usytuowano w odległości 1,7 m od tablicy testowej i wykadrowano tak, aby tablica znajdowała się w centralnej części kadru. Tablica testowa znajdowała się w obszarze, gdzie deformacja obrazu (dystorsja) spowodowana układem optycznym obiektywu była najmniejsza.

Metoda fotogrametryczna polegała na odfotografowaniu tablicy testowej bez przezroczystej przegrody oraz z tą prze-

Tabl. 1. Porównanie wyników pomiaru tachimetrem „przemieszczeń” punktów początkowych, bez oraz z przezroczystą przegrodą

Nr punktu początkowego (według rys. 3)	Różnica położenia rzeczywistego		Różnica położenia zmierzonego bez przegrody		Różnica położenia zmierzonego z przegrodą	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	5,0	-5,0	5,2 ± 2,0	-5,1 ± 0,8	4,9 ± 1,8	-5,1 ± 0,8
	15,0	-15,0	15,1 ± 1,8	-15,4 ± 0,8	14,9 ± 1,8	-15,0 ± 0,7
	35,0	-35,0	35,2 ± 1,7	-35,4 ± 0,7	34,9 ± 1,8	-35,1 ± 0,7
2	-15,0		15,1 ± 1,7		-14,9 ± 1,8	
	-5,0		5,1 ± 1,7		-5,0 ± 1,9	
	5,0		5,1 ± 1,9		5,1 ± 1,7	
	15,0		15,1 ± 1,8		15,1 ± 1,8	
3	-35,0	-5	-35,2 ± 1,7	-5,1 ± 0,8	-35,0 ± 1,7	-5,1 ± 0,8
	-15,0	-15	-15,0 ± 1,7	-15,2 ± 0,7	-14,9 ± 1,7	-15,1 ± 0,7
	-5,0	-35	-5,0 ± 1,6	-35,3 ± 0,7	-4,9 ± 1,6	-35,2 ± 0,7
4		15,0		15,0 ± 0,7		14,9 ± 0,7
		5,0		5,0 ± 0,7		5,0 ± 0,7
		-5,0		-5,2 ± 0,8		-5,2 ± 0,8
		-15,0		-15,3 ± 0,7		-15,2 ± 0,7
5	-75,0		-75,5 ± 1,8		-75,1 ± 1,8	
	-35,0	35,0	-35,1 ± 1,7	35,3 ± 0,7	-35,0 ± 1,8	35,2 ± 0,7
	-15,0	15,0	-15,1 ± 1,8	15,0 ± 0,7	-16,3 ± 1,8	15,0 ± 0,7
	-5,0	5,0	-5,4 ± 2,2	5,1 ± 0,7	-5,0 ± 1,7	4,9 ± 0,8
	5,0	-5,0	5,2 ± 1,9	-5,0 ± 0,7	5,1 ± 1,7	-5,1 ± 0,8
	15,0	-15,0	15,2 ± 1,8	-15,1 ± 0,7	15,1 ± 1,8	-15,2 ± 0,7
	35,0	-35,0	35,3 ± 1,8	-35,4 ± 0,7	35,1 ± 1,8	-35,3 ± 0,7
	75,0		75,6 ± 1,8		75,3 ± 1,8	
6		15,0		15,7 ± 0,9		14,8 ± 0,7
		5,0		5,7 ± 1,3		4,8 ± 0,8
		-5,0		-5,5 ± 1,0		-5,1 ± 0,8
		-15,0		-15,1 ± 0,8		-15,2 ± 0,7
7	5,0	35,0	5,0 ± 1,8	35,4 ± 0,7	5,0 ± 1,8	35,1 ± 0,7
	15,0	15,0	15,0 ± 1,8	15,1 ± 0,8	15,0 ± 1,8	15,1 ± 0,8
	35,0	5,0	34,9 ± 1,8	5,4 ± 1,3	35,1 ± 1,8	5,1 ± 0,8
8	-15,0		-15,0 ± 1,7		-15,0 ± 1,8	
	-5,0		-5,0 ± 1,7		-5,0 ± 1,7	
	5,0		5,1 ± 1,9		5,1 ± 1,7	
	15,0		15,1 ± 1,8		15,1 ± 1,8	
9	-35,0	35,0	-35,0 ± 1,8	35,5 ± 0,8	-35,1 ± 1,7	35,7 ± 0,8
	-15,0	15,0	-15,0 ± 1,8	15,3 ± 0,8	-15,1 ± 1,7	15,0 ± 0,8
	-5,0	5,0	-5,0 ± 1,9	5,2 ± 0,8	-5,1 ± 1,6	4,9 ± 0,8

Tabl. 2. Porównanie wyników pomiaru „przemieszczeń” punktów metodą fotogrametryczną, bez oraz z przegrodą przezroczystą

Nr punktu początkowego (według rys. 3)	Różnica położenia rzeczywistego		Różnica położenia zmierzonego bez przegrody		Różnica położenia zmierzonego z przegrodą	
	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	5,0	-5,0	5,0 ± 0,2	-5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	-5,0 ± 0,2
	15,0	-15,0	14,9 ± 0,2	-15,1 ± 0,2	15,0 ± 0,2	-15,0 ± 0,2
	35,0	-35,0	35,0 ± 0,3	-35,0 ± 0,2	35,1 ± 0,3	-35,3 ± 0,2
2	-15,0		-15,1 ± 0,2		-15,0 ± 0,2	
	-5,0		-5,0 ± 0,2		-5,0 ± 0,2	
	5,0		5,0 ± 0,2		5,0 ± 0,2	
	15,0		15,1 ± 0,2		15,0 ± 0,2	
3	-35,0	-5,0	-35,5 ± 0,3	-5,1 ± 0,2	-35,4 ± 0,3	-5,1 ± 0,2
	-15,0	-15,0	-15,2 ± 0,2	-15,4 ± 0,2	-15,1 ± 0,2	-15,2 ± 0,2
	-5,0	-35,0	-5,1 ± 0,2	-35,4 ± 0,2	-5,1 ± 0,2	-35,3 ± 0,2
4		15,0		14,8 ± 0,2		14,9 ± 0,2
		5,0		4,8 ± 0,2		5,0 ± 0,2
		-5,0		-5,0 ± 0,2		-5,0 ± 0,2
		-15,0		-15,1 ± 0,2		-15,0 ± 0,2
5	-75,0		-74,6 ± 0,4		-74,7 ± 0,4	
	-35,0	35,0	-34,8 ± 0,3	35,0 ± 0,2	-34,8 ± 0,3	35,0 ± 0,2
	-15,0	15,0	-14,9 ± 0,2	14,8 ± 0,2	-14,9 ± 0,2	14,9 ± 0,2
	-5,0	5,0	-4,8 ± 0,2	5,0 ± 0,2	-5,0 ± 0,2	4,8 ± 0,2
	5,0	-5,0	5,0 ± 0,2	-5,0 ± 0,2	5,1 ± 0,2	-5,0 ± 0,2
	15,0	-15,0	14,9 ± 0,2	-15,1 ± 0,2	14,9 ± 0,2	-15,0 ± 0,2
	35,0	-35,0	35,0 ± 0,3	-35,0 ± 0,2	35,0 ± 0,3	-35,0 ± 0,2
	75,0		75,2 ± 0,4		75,0 ± 0,4	
6		15,0		14,9 ± 0,2		15,0 ± 0,2
		5,0		5,0 ± 0,2		5,0 ± 0,2
		-5,0		-5,0 ± 0,2		-4,8 ± 0,2
		-15,0		-15,1 ± 0,2		-14,9 ± 0,2
7	5,0	35,0	5,0 ± 0,2	34,8 ± 0,2	5,0 ± 0,2	34,7 ± 0,2
	15,0	15,0	14,9 ± 0,2	14,9 ± 0,2	14,9 ± 0,2	15,0 ± 0,2
	35,0	5,0	34,8 ± 0,3	5,0 ± 0,2	34,8 ± 0,3	5,1 ± 0,2
8	-15,0		-14,9 ± 0,2		-14,9 ± 0,2	
	-5,0		-5,0 ± 0,2		-5,0 ± 0,2	
	5,0		5,0 ± 0,2		5,0 ± 0,2	
	15,0		14,9 ± 0,2		14,7 ± 0,2	
9	-35,0	35,0	-35,1 ± 0,3	34,8 ± 0,2	-35,1 ± 0,3	34,8 ± 0,2
	-15,0	15,0	-15,1 ± 0,2	14,9 ± 0,2	-15,0 ± 0,2	15,0 ± 0,2
	-5,0	5,0	-5,1 ± 0,2	5,0 ± 0,2	-5,0 ± 0,2	5,0 ± 0,2

grodą, z jednego stanowiska aparatu cyfrowego (fotogrametria jednoobrazowa). Najpierw ostrość obrazu wyregulowano dla przypadku bez przegrody i zastosowano również przy pomiarze z przegrodą. W każdym z przypadków określono skalę zdjęcia, posługując się znaną rzeczywistą odległością między skrajnymi punktami oraz znaną odległością na zdjęciu. Odległości stosowane do ustalenia skali zdjęcia nie były używane w dalszych obliczeniach. Ze zdjęcia odczytano współrzędne środka punktów, a następnie obliczono odległość między punktem „początkowym” i dodatkowym dla danego zbioru punktów. Korzystając z określonej wcześniej skali zdjęcia, przeliczono odległość ze zdjęcia na odległość rzeczywistą. Tak jak w przypadku pomiaru tachimetrycznego, odległość między punktem „początkowym” a dodatkowym zinterpretowano jako przemieszczenie punktu „początkowego”. Następnie do obliczenia odległości między punktami przeprowadzono analizę niepewności pomiaru, przyjmując poziom ufności równy około 95%.

### Wyniki badań przemieszczeń punktów metodą fotogrametryczną

Wyniki pomiarów „przemieszczenia” punktów początkowych do metody fotogrametrycznej, w przypadku braku przezroczystej przegrody i pomiarów wykonanych przez przezroczystą przegrodę, zestawiono w tabl. 2.

Z pomiarów wynika, że obliczone „przemieszczenie” punktu jest prawie identyczne jak odległość punktów między punktami na tablicy testowej, niezależnie, czy pomiar wykonano przez przezroczystą przegrodę, czy bez niej. W przypadku pomiarów fotogrametrycznych zastosowano również pomiar różnicowy.

W przypadku metody fotogrametrycznej ważne jest, aby zdjęcie nie było zdeformowane oraz prawidłowo określono skalę zdjęcia. Deformacje zdjęcia są głównie powodowane charakterystyką obiektywu kamery lub aparatu cyfrowego oraz obecnością przegrody przezroczystej. Innym istotnym czynnikiem jest odpowiednia ostrość obrazu oraz obecność obrazu odbitego od szyby. Pewną redukcję obrazów odbitych od szyby można uzyskać przez zastosowanie filtrów polaryzacyjnych.

Redukcja deformacji geometrii zdjęcia i ustalenie jego skali musi być przewidziana, zanim będzie wykonany zasyp stanowiska badawczego. Obecnie stosowane oprogramowanie do opracowań fotogrametrycznych posiada możliwość redukcji deformacji geometrii zdjęcia za pomocą kalibracji. W przypadku, gdy kalibracja dotyczy kamery, obiektywu oraz przegrody przezroczystej (jako całego stanowiska do pomiarów), tablicę kalibracyjną należy ustawić za przegrodą przezroczystą (czyli przymocować do „szyby” po wewnętrznej stronie stanowiska). W ten sposób można przeprowadzić kalibrację oraz ustalić skalę zdjęcia. Po ustaleniu skali zdjęcia nie można jednak przestawić stanowiska aparatu cyfrowego. Po wykonaniu kalibracji i określeniu skali zdjęcia można wyjąć tablicę kalibracyjną i rozpocząć wykonywanie zasypu.

Niepewność pomiaru na poziomie 0,2 mm do 0,5 mm wynika głównie z dokładności określenia położenia środka mierzonego punktu. Przyjęto, że dokładność wyznaczenia położenia środka punktu wynosiła 1 piksel, którego wartość na zdjęciu odpowiada około 0,15 mm na tablicy testowej. Przy zastosowaniu oprogramowania umożliwiającego określenie położenia środka

punktu z dokładnością podpikselową, dokładność obliczenia przemieszczenia punktu będzie większa.

### ANALIZA WARUNKÓW POMIARU PRZEMIESZCZEŃ PUNKTÓW METODĄ KALKOWANIA

Kolejną analizowaną przez Autorów metodą pomiaru przemieszczenia punktów jest, dawniej dość powszechnie stosowana, metoda kalkowania, polegająca na ręcznym kalkowaniu – zaznaczaniu za pomocą cienkopisu położenia punktu bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni przegrody przezroczystej w stanowisku badawczym, np. na szybie lub na przyklejonej kalce technicznej do szyby (stosowanej często w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku) albo z powiększonej kliszy fotograficznej. Ideowo, metoda ta polega na patrzeniu na punkt (znacznik w gruncie) bezpośrednio za przegrodą tak, aby oś optyczna oka była jak najbardziej prostopadła do powierzchni szyby, a następnie zaznaczeniu kolejnego położenia punktu w dalszych fazach obciążenia zasypu gruntowego. Następnie mierzy się odległość między zaznaczonymi punktami i poddaje analizie przemieszczeń z zastosowaniem odpowiednich programów komputerowych. Ponieważ najczęściej, podczas tej tradycyjnej rejestracji – metodą kalkowania, nie stosowano lunetki, obserwatorowi trudno było zachować niezbędne warunki odczytu, polegające na „prostopadłym patrzeniu” do powierzchni szyby. Z tego powodu widziane położenie punktu jest przesunięte względem rzeczywistego położenia na skutek załamania światła na granicy ośrodków (powietrze – szyba, przy założeniu, że obserwowany punkt pomiarowy – znacznik styka się z powierzchnią szyby). Przebieg pomiaru metodą kalkowania schematycznie przedstawiono na rys. 5.

Zakładając jednorodność materiału przegrody przezroczystej oraz równoległość jej powierzchni względem siebie, odległość między punktem „widzianym” a punktem „rzeczywistym”  $\Delta$  można obliczyć, stosując zależność:

$$\Delta = d \cdot \operatorname{tg} \left[ \arcsin \left( \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{n_2} \right) \right] \quad (5)$$

gdzie:

$d$  – grubość przegrody przezroczystej,

$n_1$  – współczynnik załamania światła w powietrzu,

$n_2$  – współczynnik załamania światła przegrody przezroczystej,

$\alpha$  – kąt padania wiązki światła na powierzchnię przegrody przezroczystej.

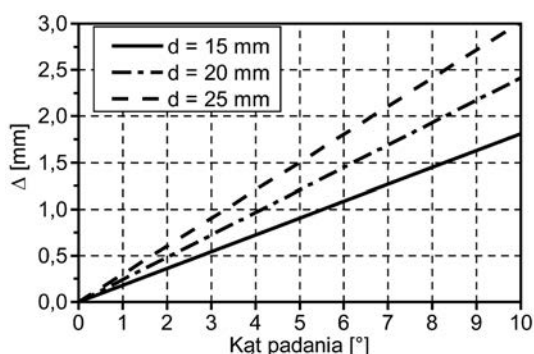
Zakładając, że przegroda ma współczynnik załamania światła  $n_2 = 1,45$ , a powietrze  $n_1 = 1,00$ , stosując zależność (5), obliczono, jak zmienia się odległość  $\Delta$  między punktem „widzianym” i „rzeczywistym”. Wynik obliczeń dla trzech grubości przezroczystej przegrody (szyby), w zależności od kąta padania, przedstawiono na rys. 6.

Na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 6 widać, że już dla kąta padania światła w zakresie  $4 \div 5^\circ$  pozorne przesunięcie punktu wynosi 1 mm. Warto zaznaczyć, że dla przegród przezroczystych o większym współczynniku załamania światła, wpływ „nieprostopadłego patrzenia” jest mniejszy niż dla materiałów o mniejszym współczynniku załamania światła (5).

Równanie (5) opisuje odległość  $\Delta$  dla dowolnego kąta padania  $\alpha$  wiązki światła na powierzchnię. Zależność odległości  $\Delta$  od kąta padania  $\alpha$ , przedstawiona na rys. 6 jest w przybliżeniu liniowa. Dzieje się tak, ponieważ dla małych wartości kątów, wartości



Rys. 5. Schemat załamania światła na granicy powietrze – przegroda przezroczysta stanowiąca jedną ze ścian stanowiska badawczego



Rys. 6. Wykres zależności odległości  $\Delta$  punktu „widzianego” i „rzeczywistego” w zależności od kąta padania i grubości przegrody przezroczystej

funkcji trygonometrycznych sinus i tangens, przyjmują wartość tego kąta, wyrażonego w mierze łukowej (radianach). Wówczas równanie (5) można przybliżyć następującym równaniem:

$$\Delta \approx d \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \alpha \quad (6)$$

gdzie:

$d$  – grubość przegrody przezroczystej;

$n$  – współczynnik załamania światła w powietrzu;

$n_2$  – współczynnik załamania światła przegrody przezroczystej;

$\alpha$  – kąt padania wiązki światła na powierzchnię przegrody przezroczystej wyrażony w radianach.

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że metodą tachimetryczną i fotogrametryczną można określić względne przemieszczenie punktów pomiarowych z dokładnością około 0,5 mm, chociaż teoretycznie obliczona dokładność może być mniejsza. W przypadku metody kalkowania, uzyskanie takiej dokładności jest teoretycznie możliwe, ale w praktyce trudne do uzyskania. Zatem wyniki tych pomiarów wymagają większej ostrożności przy ich interpretacji.

W każdej z metod pomiarów rozpatrywanych przez Autorów jest wymagane oznaczenie punktów badawczych w taki sposób, aby były one bardzo dobrze rozpoznawalne w czasie trwania pełnego cyklu pomiarów. W przypadku metody fotogrametrycznej zastosowanie punktów, np. w kształcie okrągłym, umożliwia

określenie położenia środka punktu z dokładnością podpixelową, przy zastosowaniu programów do obróbki fotogrametrycznej.

Wykonując pomiary położenia punktów znajdujących się za przegrodą przezroczystą, należy mieć zawsze na uwadze, że to co rejestrujemy („widzimy”), nie musi odpowiadać rzeczywistemu położeniu punktu, jednak ze względu na to, że przy pomiarach różnicowych (metodą tachimetryczną lub fotogrametryczną), jeśli błąd systematyczny spowodowany obecnością przezroczystej przegrody będzie stały, obliczone przemieszczenia punktów będą pozbawione wpływu przegrody. Należy również pamiętać, że na wyniki pomiarów wykonywanych podczas badań modelowych może mieć wpływ zapylenie oraz rodzaj i konfiguracja oświetlenia stanowiska. Zapylenie oraz złe oświetlenie może uniemożliwić wykonanie pomiaru metodą fotogrametryczną oraz zafałszować wyniki pomiarów metodą tachimetryczną. Szerzej problem niepewności i błędów pomiarowych występujących podczas pomiarów tachimetrami elektrooptycznymi opisano w pracy [3].

## LITERATURA

1. Bolt A. i inni: O metodach badań modelowych nośności podłoża. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 255, Budownictwo Wodne 19, 1976.
2. Capanna A., Francaviglia M., Lorenzi M. G.: Architecture, Form, Expression: The Helicoidal Skyscraper's Geometry, Bridges 2012: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture (archive.bridgesmathart.org/2012/bridges2012-349.pdf).
3. Daliga K.: Analiza wybranych niepewności i błędów pomiarowych występujących podczas pomiarów tachimetrami elektrooptycznymi stosowanymi w budownictwie. Inż. Mor. i Geot. 2/2013.
4. Dembicki E., Bolt A., Zadroga B.: Pomiar przemieszczeń ośrodka gruntowego w badaniach modelowych stateczności fundamentów bezpośrednich. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej nr 52. Seria Konferencje nr 24, Wrocław 1987.
5. Gwizdała K. i inni: Nośność oraz przemieszczenia pali i fundamentów palowych w złożonych warunkach gruntowych. Projekt Badawczy KBN Warszawa. Wyk. PG WIŚ, Umowa 7 S1030 23 04 T I-III Gdańsk, 1993-1995.
6. Jankowski R.: Badania dynamiczne modeli konstrukcji budowlanych na stole wstrząsowym, Czasopismo Techniczne, t.104, z.6, 2007 (2-B/2007), 29-37.
7. Kurałowicz Z.: Boczne obciążenie pali. Politechnika Gdańska, Monografie, nr 45. 2004.
8. Krasiński A.: Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niesopistym podłożem gruntowym. Politechnika Gdańska, Monografie, nr 134. 2013.
9. Szydłowski M.: Modelowanie fal powodziowych na terenach zabudowanych. Politechnika Gdańska, Monografie, nr 86. 2013.
10. Tejchman A.: Radiograficzne badania przemieszczeń gruntu w skali modelowej. Archiwum Hydrotechniki. Tom XIV, z. 4, 1967.
11. Trojnar K.: Stateczność fundamentów hybrydowych obciążonych poziomo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. 2009.
12. Zadroga B., Malesiński K.: Nowe techniki pomiaru przemieszczeń podłoża gruntowego w badaniach modelowych stateczności fundamentów. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2005.
13. Zadroga B., Malesiński K.: Stateczność fundamentów bezpośrednich. Badania modelowe i analizy numeryczne. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2010.
14. Widerski T., Kurałowicz Z.: Geodesic monitoring of tower and mast structures. Raports of Geodesy, Warszawa 2009.