



System monitorowania procesu hydrokompakcji na przykładzie modelu fizycznego

Robert Kaczmarczyk¹, Jakub Czurczak¹, Marta Kumorowska¹



R. Kaczmarczyk



J. Czurczak



M. Kumorowska

Hydrocompaction process monitoring system exemplified by a physical model. Prz. Geol., 66: 629–635; doi: 10.7306/2018.9

Abstract. Loess constitutes a building site for over 6% area of Poland. Almost the entire area of its occurrence undergoes construction development. In the event of their sudden irrigation, a rapid reduction in the volume of the soil occurs. This process is known as hydrocompression. It is particularly dangerous in urban areas, where there is bulk land next to loess. The increase in humidity of these soils results in large changes in strength and deformation characteristics. At present, most construction damages caused by the phenomenon of hydrocompression are not the result of typical long-term moistening of soils by rainwater, but especially by

errors in development: leaky sewerage, rainwater discharge to the ground or waterworks failure. The project encompassed the test of an original subsidence monitoring system in a specially designed physical model fit for this purpose. The aforementioned system was created on the basis of the ARDUINO platform that enabled monitoring of subsidence with an accuracy of 0.2 mm.

Keywords: subsidence dips, bulk land, dust, monitoring system



Cechą niektórych gruntów jest ich zdolność do zmiany objętości pod wpływem wahań wilgotności. Wystąpienie tych procesów w podłożu jest uzależnione od rodzaju gruntu oraz od czynników zewnętrznych, które inicjują zmianę jego wilgotności. Grunty ilaste wraz ze wzrostem wilgotności zwiększają swoją objętość (pęcznieją), natomiast pyły oraz niektóre grunty nasypowe wykazują podatność na osiadanie zapadowe. Procesy te powodują odpowiednio podniesienie i osiadanie podłoża pod fundamentami, prowadząc do uszkodzeń budynków.

Przeciwdziałanie powstawaniu uszkodzeń obiektów budowlanych zawsze wymaga dokładnego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych. W każdym przypadku konieczna jest obserwacja rozwoju szkód i ocena ich wpływu na bezpieczeństwo dalszego użytkowania budowli. Określenie zmian rozwarcia spękań w czasie jest zazwyczaj bardzo przydatne podczas oceny zagrożenia stanu bezpieczeństwa obiektu budowlanego. Powstawanie zarysowań lub niewielkich spękań ścian konstrukcji murowanych jest sto-

sunkowo częstym zjawiskiem, zwłaszcza w początkowej fazie użytkowania budynków. W zdecydowanej większości zdarzeń zarysowania i pęknięcia ścian budynków, będące wynikiem odkształceń skurczowych, termicznych lub konsolidacji gruntów pod fundamentami, są wadą wizualną i nie wpływają na uszkodzenia elementów nośnych, a wraz z upływem czasu zmniejszają się i zanikają. Większy problem stanowi użytkowanie obiektów budowlanych posadowionych na gruntach podatnych na zmiany objętościowe. W takim przypadku uszkodzenia często pojawiają się po kilku, niekiedy kilkudziesięciu latach od rozpoczęcia użytkowania budynku. Wówczas podjęcie jednoznacznych decyzji o stanie bezpieczeństwa obiektu nie jest łatwe. Szczególną trudność, z uwagi na często gwałtowny przebieg procesu, stanowi zagrożenie wywołane osiadaniami zapadowym (hydrokompakcją).

Celem badań jest ocena możliwości zastosowania autorskiego systemu monitorowania przemieszczeń podłoża gruntowego w warunkach wystąpienia hydrokompakcji.

ZARYS PROBLEMU

Problematyka osiadania zapadowego rodzimych gruntów makroporowatych, szczególnie lessów, została stosunkowo dobrze rozpoznana i szeroko opisana (Dmitruk, 1962; Dudley, 1970; Malinowski, 1971; Barden, 1973; Grabowska-Olszewska, 1983, 1988; Myślińska, 1984). Pomimo pewnych rozbieżności w opisie wyjaśnienia przebiegu samego zjawiska (Woźniak, 2009), większość badaczy jest zgodna, że wystąpienie osiadania zapadowego

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; rkaczmar@op.pl; kubusp51@gmail.com; martakumorowska@gmail.com

może powstać w gruntach o dużej porowatości, z niestabilną strukturą środka cementującego lub stabilizującego grunt w warunkach nasycenia go wodą.

Podatność na osiadanie w wyniku zawodnienia jest kojarzona zazwyczaj z lessami. Pomimo że lessy stanowią podłoże budowlane na ok. 20 tys km² powierzchni Polski, a niemal cały obszar ich występowania jest terenem intensywnego rozwoju budownictwa, obecnie stosunkowo rzadko spotyka się przypadki klasycznego osiadania zapadowego lessów, będącego wynikiem czynników naturalnych, np. długotrwałych i intensywnych opadów atmosferycznych. Wyniki badań prowadzonych przez zespół geologów inżynierskich z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie wskazują, że zdecydowana większość rodzimych lessów występujących w podłożu budowlanym nie wykazuje podatności na to zjawisko.

W ostatnich latach problem uszkodzeń różnego rodzaju obiektów budowlanych związany z gwałtownym i niekontrolowanym osiadaniami podłoża ma coraz częściej źródło antropogeniczne. Zmniejszanie się objętości gruntu w wyniku wzrostu wilgotności przy niezmiennym obciążeniu jest szczególnie groźne na obszarach miejskich, gdzie obok lessów występują nieprawidłowo zagęszczane grunty nasypowe. Podatność gruntów wbudowanych w nasypy na hydrokompakcję było i jest niedoceniane lub niejednokrotnie marginalizowane (Woźniak, 2009).

Znaczna część gruntów antropogenicznych występujących w przypowierzchniowej części terenu obszarów miejskich nie spełnia wymagań dla poprawnie wykonanych nasypów budowlanych. W przeszłości zasyпки wykopów były stosunkowo rzadko zagęszczane w sposób prawidłowy i odpowiednimi gruntami. W nasypy takie (zwłaszcza stare) są wbudowane grunty organiczne lub (i) pylaste, które nie nadają się do dobrego zagęszczenia.

Także współcześnie zdarzają się przypadki formowania nasypów przy wilgotności odbiegającej od optymalnej. Roboty ziemne są najczęściej prowadzone przy braku opadów oraz podczas słonecznej pogody. Skutkuje to obniżeniem wilgotności materiału podczas urabiania i transportu. Odpowiednie zagęszczanie przesuszonych i twardych brył jest trudne i nawet przy użyciu dużej energii ubijania nie daje oczekiwanych rezultatów. Grunty te pozostając w zwartym stanie konsystencji, cechują się wysokimi wartościami parametrów wytrzymałościowych i niewielką ścisłością, pozornie stanowią więc korzystne podłoże budowlane. Pozornie, ponieważ względnie duże przestrzenie międzybryłowe ułatwiają infiltrację wód opadowych, co pociąga za sobą zmiany strukturalne i pogorszenie właściwości mechanicznych. Przy wzroście wilgotności ryzyko wystąpienia znacznych i często nierównomiernych osiadań jest bardzo duże (Kaczmarczyk i in., 2014).

Współcześnie większość szkód budowlanych spowodowanych przez zjawisko osiadania zapadowego i hydrokompakcji jest skutkiem błędów w gospodarowaniu danym terenem, np. odprowadzaniem wód opadowych oraz ścieków do gruntu lub awarią infrastruktury (nieszczelną kanalizacją, awarią wodociągów, korozją rur, rynien), a także uchybieniami w rozwiązaniach geotechnicznych prowadzącymi do zmian zwierciadła wód podziemnych w trakcie robót ziemnych. Znane są przypadki nadmiernego, niekontrolowanego osiadania nasypów budowlanych wywołane zbytnią dbałością o zieleń miejską przez stałe zraszanie

roślin, np. katastrofalne, dochodzące do 45 cm osiadania osiedli mieszkaniowych w Kalifornii (Brandon i in., 1990).

Niejednokrotnie w badaniach geotechnicznych na obszarach miejskich problem stanowi prawidłowa identyfikacja nasypów. W przypadkach, gdy warstwy nasypów są zbudowane z jednorodnych litologicznych gruntów pylastych bez domieszki materiału antropogenicznego (np. w otoczeniu kombinatu w Krakowie Nowej Hucie), po kilkudziesięciu latach od uformowania, jednoznaczna identyfikacja genezy materiału jest trudna.

W obrębie starej zabudowy wielu miast (np. Krakowa, Rzeszowa, Sandomierza, Lublina) miąższość nasypów przekracza z reguły kilka metrów. W centrum dominują stare, wielowiekowe, niekontrolowane nasypy zbudowane z gruntów mineralnych z różną zawartością humusu, gruzu, cegły, drewna oraz pozostałości bytowych człowieka. Niejednokrotnie spotyka się zasypane stare rowy kanalizacyjne, doły kloaczne, piwnice itp. Tereny te są w sposób szczególnie narażone na ryzyko niekontrolowanego osiadania. W przypadku zawodnienia, zachodzi szybka redukcja objętości i znaczące, sięgające kilkudziesięciu centymetrów osiadanie powierzchni (ryc. 1).

Ocena wielkości przemieszczeń podłoża, a zatem również ryzyka powstawania szkód w infrastrukturze, wymaga zastosowania systemu monitorowania zagrożeń. Najtańsze i najczęściej stosowane systemy oparte na płytkach szklanych sprawdzają się w przypadku ryzyka wystąpienia niewielkich i powolnych zmian. Ponieważ szkło jest materiałem kruchym i nawet minimalna zmiana rozwarcia rysy (w zakresie poniżej 0,1 mm) powoduje natychmiastowe pęknięcie płytki, system taki jest dalece niewystarczający w przypadku możliwości wystąpienia poważniejszych lub bardziej gwałtownie przebiegających procesów. Informacja, że pęknięcie zmieniło swoją rozwartość może świadczyć zarówno, że mamy do czynienia z postępującą katastrofą budowlaną, jak i zupełnie niegroźnym zdarzeniem. W konsekwencji może dojść do sytuacji, w której nadzór budowlany nie zezwala na zamieszkanie w budynku, ponieważ potencjalne uszkodzenia mogą stanowić niebezpieczeństwo dla użytkowników. W praktyce do oceny zagrożeń potrzebna jest informacja z pomiaru, zatem z czujnika, a nie wskaźnika.



Ryc. 1. Przykład hydrokompakcji w starym zasypanym kanale w centrum Krakowa. Fot R. Kaczmarczyk

Fig. 1. Example of subsidence in the old backfilled channel in the center of Crakow. Photo by R. Kaczmarczyk

Nowoczesne zaawansowane systemy monitoringu konstrukcji budowlanych, takie jak: czujniki światłowodowe, interferometryczne SOFO, czujniki Bragga, systemy bazujące na rozpraszaniu Brillouina, czujniki GPS i Robovec wchodzące w skład systemu monitorowania trójwymiarowych deformacji, pozwalają uzyskać ogromną ilość informacji, jednak z uwagi na wysokie koszty znajdują zastosowanie tylko w wybranych ważnych obiektach, m.in.: tunelach, mostach, wiaduktach, budynkach wysokich itp.

Pomysł na zastosowanie systemu monitorowania osiadania zapadowego powstał po sporządzeniu przez autorów opinii geotechnicznych dla dwóch przypadków wystąpienia tego zjawiska w Krakowie i jednego w Warszawie (domy jednorodzinne w gęstej zabudowie miejskiej). Z uwagi na fakt, że w opisywanych sytuacjach sprawa znalazła swój finał w sądzie, w artykule pominięto dokładną lokalizację obiektów. W analizowanych przez autorów zdarzeniach wystąpienia hydrokompakcji szczególnie niekorzystne były te, w których dopływ wody wystąpił z jednej strony budynku, prowadząc do nierównomiernych osiadań podłoża. W takich warunkach ryzyko wystąpienia katastrofalnych szkód jest największe.

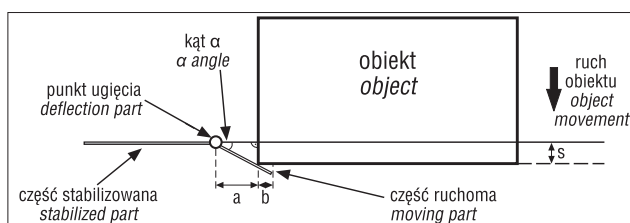
OPIS AUTORSKIEGO SYSTEMU POMIARU PRZEMIESZCZEŃ

W proponowanym rozwiązaniu celem systemu jest pomiar przemieszczeń podłoża gruntowego w obrębie obiektu objętego monitoringiem. W założeniach system umożliwia zarówno wykonanie pomiaru wielkości przemieszczeń, jak i określenie dokładnego czasu, w którym ono nastąpiło.

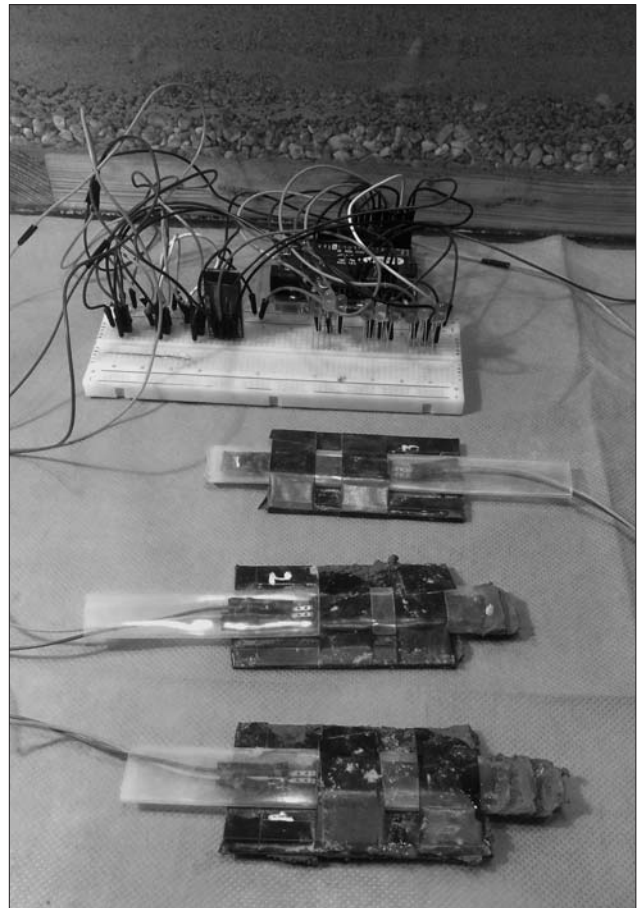
Sercem systemu jest autorski, prototypowy czujnik ugięcia pozwalający na pomiar przemieszczeń kątowych. Czujnik składa się z trzech części (ryc. 2): części stabilizowanej (nieruchomej), punktu ugięcia i części ruchomej. Urządzenie wysyła informację, która po odpowiednich przetworzeniach, pozwala uzyskać dokładną wartość jego ugięcia w stosunku do pozycji wyjściowej i w konsekwencji w prosty sposób (za pomocą funkcji trygonometrycznych) umożliwia przeliczenie wartości przemieszczeń.

Do odbioru i przetwarzania danych została wykorzystana platforma ARDUINO. W skład samego prototypu wchodzi: płytka bazowa, czujniki ugięcia, płytka stykowa, moduł bluetooth, szereg części elektronicznych umożliwiających efektywne podłączenie czujników do układu, diody LED potrzebne do zobrazowania danych wysyłanych przez system oraz przewody łączące wszystkie elementy. Prototyp jest przedstawiony na rycinie 3.

Do obsługi i wizualizacji danych zostało stworzone oprogramowanie, które steruje całym systemem, odbiera



Ryc. 2. Schemat działania czujnika przemieszczeń
Fig. 2. The scheme of the displacement sensor



Ryc. 3. Czujniki ugięcia (elektryczne) zamontowane w systemie monitoringu. Fot. J. Czurczak
Fig. 3. Deflection (electrical) sensors installed in the monitoring system. Photo by J. Czurczak

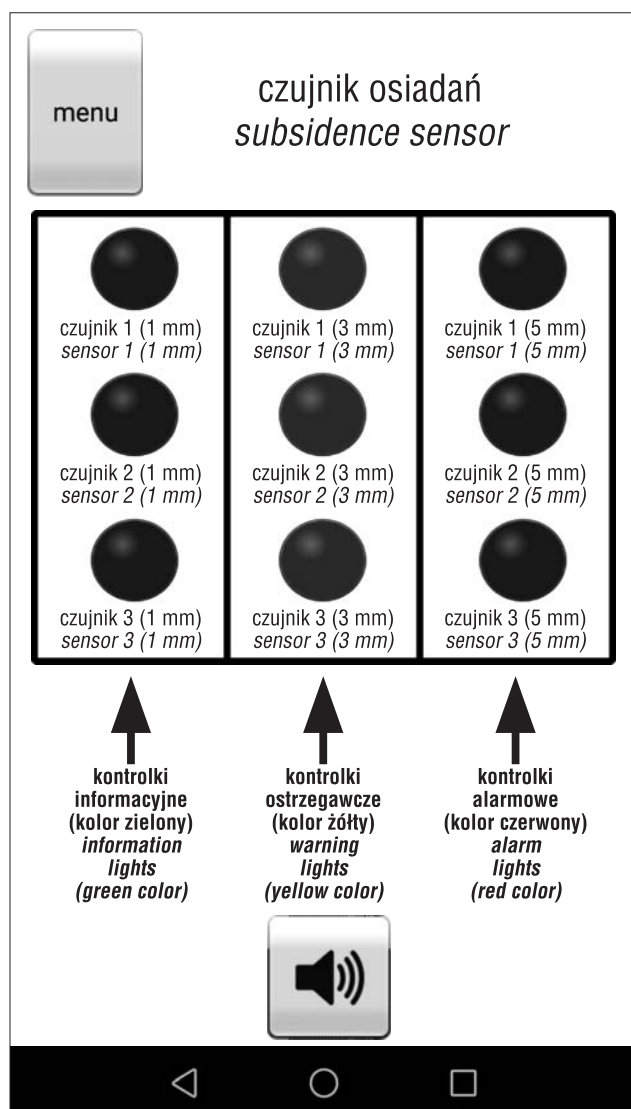
informacje, a następnie w zależności od zapotrzebowania zapisuje je lub/i przekazuje dalej przez odpowiednie łącze np. WiFi. Ponadto została stworzona aplikacja na telefon z systemem operacyjnym android, która obrazuje dane o potencjalnych przemieszczeniach. Aplikacja została opracowana w taki sposób, aby informacja o zagrożeniu była czytelna także dla osób, które nie są specjalistami z zakresu geologii inżynierskiej lub budownictwa, co stwarza możliwość komercjalizacji rozwiązania. Oprogramowanie samego systemu pozwala na odbiór oraz zapis informacji z czujnika w ściśle określonych odstępach czasu (w zależności od zapotrzebowania może to być co 1 sekundę, 5 minut, godzinę itp.), możliwa jest także zmiana okresu zapisywania informacji już podczas jego eksploatacji.

Software umożliwia również określenie wartości ostrzegawczych wykrywających ruch oraz alarmowych, jeśli zostanie przekroczona założona wartość graniczna przemieszczenia (osiadania) (ryc. 4). W przypadku braku możliwości podłączenia zasilania można także wykonywać okresowe pomiary odształceń.

System składa się z grupy czujników, z których każdy dostarcza niezależne informacje. Ich liczba może być różna i jest związana m.in. z wielkością monitorowanego obiektu, oczekiwaną dokładnością pomiarów, przewidywanym okresem trwania monitorowanego procesu, ryzykiem potencjalnych możliwości uszkodzeń mechanicznych poszczególnych czujników itp.

Z uwagi na testowy charakter pomiarów oraz ograniczone finansowanie, test systemu wykonano w małej skali na własnoręcznie zbudowanym modelu fizycznym.

W modelu zamontowano zbudowany prototyp systemu, który posłużył do sprawdzenia założeń teoretycznych



Ryc. 4. Przykładowy widok ekranu z aplikacji wraz z opisem kontrolki

Fig. 4. An example of a screen view from the application with a description of the controls

Tab. 1. Wartości efektywnych parametrów fizyko mechanicznych badanych gruntów
Table 1. Effective values of physical and mechanical parameters of the studied soils

Rodzaj gruntu Type of soil	Gęstość objętościowa Bulk density ρ [Mg/m ³]	Gęstość objętościowa szkieletu Bulk density skeleton ρ_d [Mg/m ³]	Kat tarcia wewnętrznego Internal friction angle ϕ [°]	Spójność Cohesion c [kPa]	Współczynnik filtracji Filtration coefficient k [m/s]	Wilgotność Humidity w_n [%]	Granica płynności Limit liquidity w_L [%]	Granica płynności Limit plasticity w_p [%]
Pył Dust	1,58	1,42	19	13	$8,10 \times 10^{-6}$	10,79	38,4	22,10
Piasek Sand	1,80	1,76	32	0	$3,86 \times 10^{-4}$	2,82	–	–
Żwir drobny Fine gravel	1,92	1,86	38	0	$1,65 \times 10^{-3}$	2,10	–	–
Żwir gruby Coarse gravel	1,95	1,90	46	0	$2,54 \times 10^{-3}$	2,50	–	–

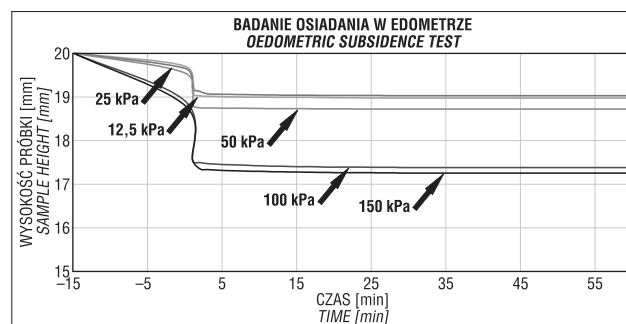
w warunkach zbliżonych do realnych. W obecnej postaci system monitoringu jest przeznaczony dla obiektów, w których podłożu występują utwory podatne na osiadanie. Może być on także stosowany do pomiaru przemieszczeń w wyniku pęcznienia lub skurczu, a w przyszłości, po modyfikacji, także monitorowania ruchów osuwiskowych.

OPIS MODELU

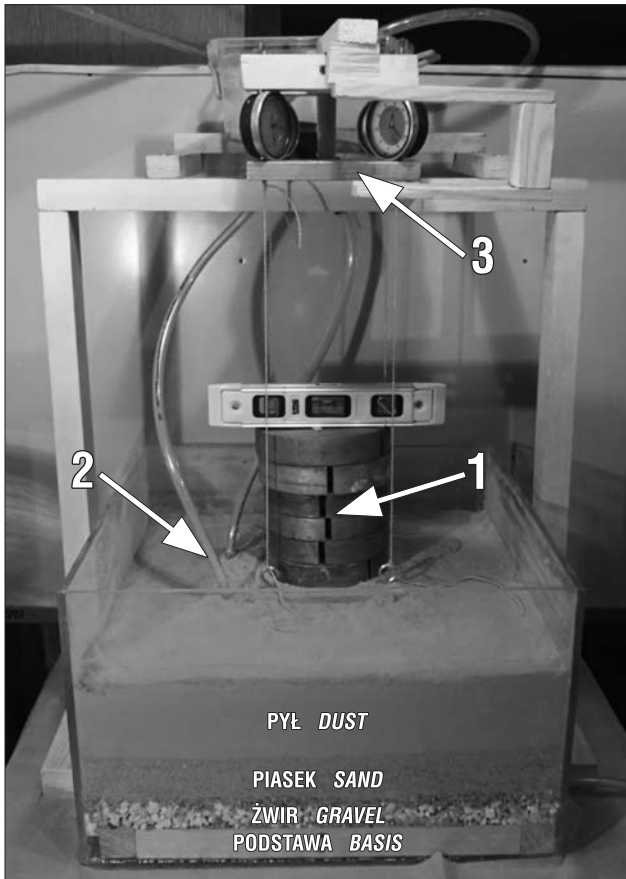
Model fizyczny, na którym zostały przeprowadzone symulacje osiadania zapadowego, samodzielnie wykonali autorzy projektu. W przybliżeniu odwzorowuje on (w skali ok. 1 : 50) układ warstw budowy geologicznej terenu, na którym nastąpiło uszkodzenie budynku – w rejonie ronda Grunwaldzkiego w Krakowie. Model zbudowano w akwarium z plexiglasu o wymiarach 40 × 40 × 25 cm. Uformowano w nim cztery warstwy gruntów, w kolejności były to:

- 2-centymetrowa warstwa żwiru o średnicy ziaren ok. 6 mm,
- powyżej jednocentymetrowa warstwa żwiru, w którym przeciętna średnica ziaren wynosiła 2 mm,
- następnie 6-centymetrowa warstwa piasku
- oraz 7-centymetrowa warstwa pyłu.

Grunt zagęszczano statycznie, warstwami o miąższości ok. 5 cm, konsolidując je przez ok. 12–15 godzin przy obciążeniu 50 kPa. Wilgotność gruntów była o ok. 3–5 % niższa od wilgotności optymalnej. Warstwy gruntowe zostały wbudowane w taki sposób, żeby woda filtrująca w głąb modelu nie powodowała wymywania cząstek, prowadząc do sufozji. Podstawowe parametry geotechniczne warstw wbudowanych w model oznaczono laboratoryjnie, wyniki przedstawiano w tabeli 1. Wytrzymałość na ścina-

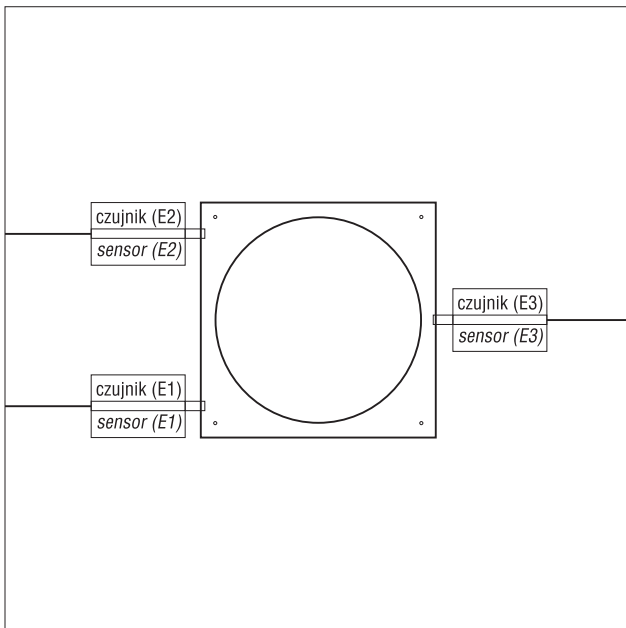


Ryc. 5. Wykres zbiorczy osiadania zapadowego próbek pyłu
Fig. 5. Summary graph of dust hydro compaction



Ryc. 6. Model przed rozpoczęciem symulacji. 1 – obciążenie (12 kPa); 2 – system nawadniający; 3 – zespół czujników odkształceń. Fot. J. Czurczak

Fig. 6. Model before starting simulation. 1 – weight (12 kPa); 2 – watering system; 3 – group of deformation sensors. Photo by J. Czurczak



Ryc. 7. Schemat rozmieszczenia czujników elektrycznych
Fig. 7. Diagram of the distribution of electrical sensors

nie oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach 6×6 cm i wysokości próbki 2,5 cm. Próbkę konsolidowano w skrzynce aparatu przy wilgotności natu-

ralnej i obciążeniu 200 kPa. Konsolidację i ścinanie próbek przeprowadzono przy naprężeniach normalnych o wielkości 50, 100, 150 i 200 kPa. Prędkość ścięcia wynosiła $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jako kryterium ścięcia przyjęto maksymalną wartość naprężeń ścinających. Uzyskane parametry należy traktować jako efektywne, takie zaprezentowano w tabeli 1.

Podatność na osiadanie zapadowe pyłów oznaczone w edometrze, przy 5-stopniowym obciążeniu: 12,5, 25, 50, 100, 150 kPa, zamieszczono na wykresach (ryc. 5).

Wygląd modelu przed rozpoczęciem symulacji przedstawiono na rycinie 6. W opisywanym modelu, w obrębie warstwy pyłów, umieszczono:

- system nawadniający – zaznaczony jako 2,
- zespół czujników odkształceń – 3,
- oraz w centralnej części modelu stalowe obciążniki na płytce, które przekazują na podłoże obciążenie ok. 12 kPa, symulujące obiekt budowlany – 1.

System nawadniania został zaprojektowany, tak żeby można było precyzyjnie kontrolować ilość wody dostarczonej do gruntu. Poniżej warstw gruntowych umieszczono perforowaną płytę z plexiglasu na drewnianej konstrukcji, umożliwiającą swobodny odpływ wody poza model. Przezroczyste ścianki pozwalały na obserwację przebiegu procesu osiadania oraz infiltracji wody w głąb ośrodka.

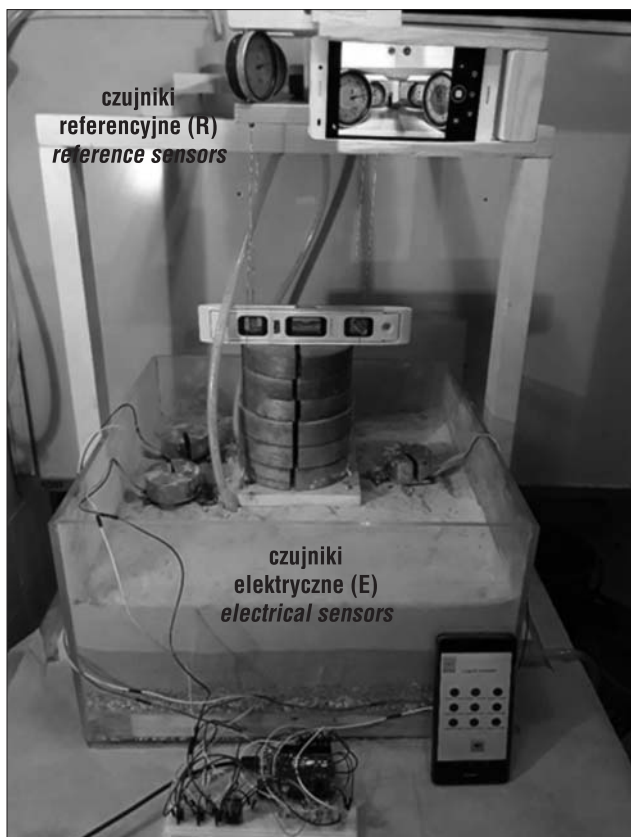
SYMULACJA OSIADANIA ZAPADOWEGO Z ZAINSTALOWANYM SYSTEMEM MONITOROWANIA

W analizowanym modelu do pomiaru przemieszczeń zostały wykorzystane trzy czujniki elektryczne, ich lokalizację w stosunku do obiektu przedstawiono na rycinie 7.

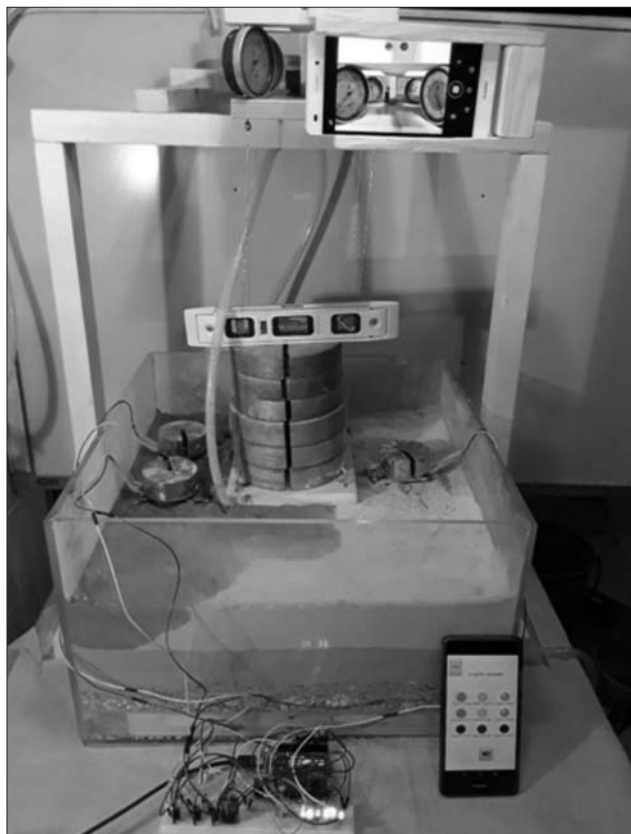
Takie rozmieszczenie czujników wynikało z założenia jednostronnego zawodnienia modelu symulującego awarię kanalizacji. Od strony dopływu wód, tam gdzie spodziewano się wystąpienia największych osiadań, zainstalowano dwa czujniki, a po przeciwnej stronie obiektu symulującego budynek jeden czujnik. Dodatkowo w celu wykluczenia wpływu potencjalnego osiadania czujników wraz z obiektem zarówno przed symulacją, jak i po niej za pomocą dalmierza laserowego zmierzono odległość czujników od ramy drewnianej znajdującej się nad modelem. Różnica odległości przed i po symulacji mieściła się w granicach błędów pomiarowego, co potwierdza, że same czujniki nie uległy osiadaniu. W warunkach terenowych ich położenie można kontrolować metodami geodezyjnymi. Autorski model fizyczny posłużył do przetestowania czujników oraz zastosowanej metody monitoringu osiadań. Z uwagi na ograniczenia wynikające z rozmiarów akwarium zastosowano trzy czujniki. W przypadku zastosowania metody w warunkach rzeczywistych ilość, lokalizacja oraz położenie czujników będzie dostosowana indywidualnie do wymiarów konkretnej obiektu budowlanego, w którego obrębie zostanie zainstalowany system.

Na potrzeby symulacji wartości ostrzegawcze dla osiadań zostały ustalone na 3 mm, a alarmowe na 5 mm.

Dla kontroli uzyskanych przemieszczeń model wyposażono w cztery dodatkowe, referencyjne (zegarowe) czujniki odkształceń umieszczone centralnie nad obiektem, pozwalające na pomiar przemieszczeń z dokładnością do 0,01 mm, oraz poziomice. Czujniki połączone z podstawą



Ryc. 8. Widok modelu w trakcie symulacji z uwzględnieniem czujników referencyjnych oraz elektrycznych
Fig. 8. Model view during simulation including reference and electrical sensors



Ryc. 9. Widok modelu po zakończeniu symulacji. Ryc. 8 i 9 fot. J. Czurczak
Fig. 9. Model view after the simulation accomplishment. Figs 8 and 9 photo by J. Czurczak

obiekty metalową linką odpowiednio naprężoną, co eliminowało opóźnienia w czasach rejestracji ich wskazań (ryc. 8 i 9).

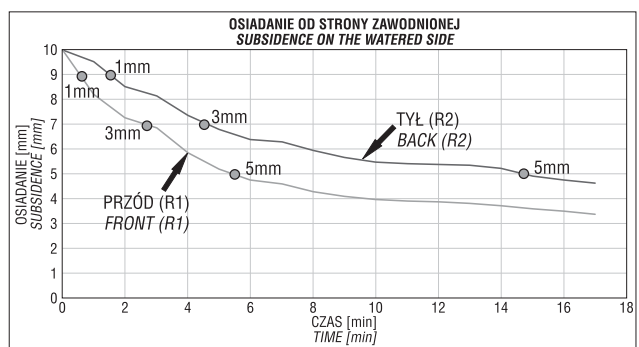
REZULTAT SYMULACJI

Cały przebieg symulacji był rejestrowany przez dwie kamery, co pozwoliło na dokładny zapis przebiegu eksperymentu. W modelu przebieg osiadań zakończył się po ok. 2 dobach, lecz zasadnicze zmiany przemieszczeń nastąpiły w czasie kilkunastu minut (ryc. 10).

W czujniku referencyjnym R1 osiadanie wynoszące 1 mm zanotowano w czujniku elektrycznym (E1) po 1 min i 48 s, 3 mm – po 4 min i 32 s, a 5 mm – po 14 min i 43 s. W czujniku elektrycznym (E2) analogiczne osiadania zanotowano po 30 s, 2 min i 40 s oraz 5 min i 30 s. Czujnik elektryczny (E3) zamontowany po przeciwnej stronie analizowanego obiektu nie wysłał informacji o przekroczeniu żadnej z założonych wartości granicznych. Czujniki referencyjne (R3 i R4) również wykazały niewielkie osiadania, nieprzekraczające 1 mm (ryc. 11 i 12).

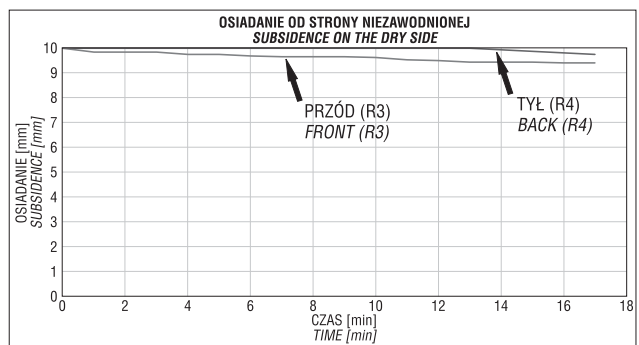
W miarę upływu czasu przechyl budynku był znaczny i wyraźnie widoczny makroskopowo (ryc. 9), a wokół niego pojawiły się spękania.

Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły wstępne założenia. W modelu przemieszczenia powierzchni zaobserwowano bezpośrednio po pojawieniu się pierwszych śladów zawodnienia (ryc. 9). Czujniki przemieszczeń (zarówno elektroniczne, jak i referencyjne) zamontowane od strony zadawania wody zareagowały równocześnie, a rejestrowane



Ryc. 10. Wykres przemieszczeń podłoża odczytany z czujników referencyjnych od strony zawodnionej wraz z zaznaczonym czasem przekroczenia wartości granicznych: 1, 3, 5 mm

Fig. 10. Floor displacement graph read from reference sensors on the irrigated side with the time of exceeding limit values: 1, 3, 5



Ryc. 11. Wykres przemieszczeń podłoża odczytany z czujników referencyjnych od strony niezawodnionej

Fig. 11. The ground displacement graph read from reference sensors on the non-hydrated side

wartości przemieszczeń dla każdej pary czujników były niemal identyczne. Korelując wskazania czujników prototypowych z odczytami kontrolnymi, referencyjnymi czujników odkształceń, średnie różnice wskazań dla poszczególnych wartości granicznych nie przekraczały 0,2 mm. Zdjęcia modelu z zainstalowanymi czujnikami osiadań zarówno z przed, jak i po symulacji zostały przedstawione na rycinach 8 oraz 9.

WNIOSKI

Powstanie i rozwój zmian objętościowych w gruncie jest najczęściej rezultatem naruszenia stanu równowagi warunków wodnych w podłożu. Wahanie wilgotności mogą być wywoływane przez czynniki naturalne oraz antropogeniczne. Zjawisko to może powodować przemieszczenia podłoża w otoczeniu fundamentów, prowadząc do spękań i zarysowań ścian budynków. Znaczna część tego typu uszkodzeń nie wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo użytkowania budowli, niemniej jednak w każdym przypadku jest konieczna obserwacja rozwoju procesu.

Zbudowany przez autorów prototyp systemu monitoringu przemieszczeń podłoża gruntowego pozwala na ciągły i dokładny pomiar wielkości odkształceń. System pozwala także na określenie wartości ostrzegawczych wykrywających ruch oraz alarmowych, jeśli zostanie przekroczona założona wartość graniczna przemieszczenia.

Test prototypu systemu w małej skali na własnoręcznie zbudowanym modelu fizycznym w pełni potwierdził założenia teoretyczne, obecnie są planowane testy systemu w skali rzeczywistej.

W obecnej postaci system monitoringu jest przeznaczony dla obiektów, w podłożu których występują utwory podatne na osiadania wynikające z hydrokompakcji, może być on także stosowany do pomiaru przemieszczeń w wyniku pęcznienia lub skurczu, a w przyszłości po modyfikacji także monitorowania ruchów osuwiskowych.

Praca została częściowo sfinansowana na podstawie umowy AGH nr 11.11.140.649. Autorzy dziękują Recenzentom za cenne wskazówki, które przyczyniły się do podniesienia poziomu merytorycznego pracy.

LITERATURA

- BARDEN L., MC GOWN A., COLLINS K. 1973 – The collapse mechanism in partly saturated soil. *Eng. Geol.*, 7 (1): 49–60
- BRANDON T.L., DUKAN J.M., GARDNER W.S. 1990 – Hydrocompression settlement of deep fills. *J. J. Eotech. Eng.*, 116 (10): 1536–1548.
- DUDLEY J.H. 1970 – Review of collapsing soils. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 96 (SM 3): 925–947.
- DMITRUK S. 1962 – Lessy Chin północno-zachodnich. *Arch. Hydrotechniki T. X*, z1.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1983 – Osiadanie zapadowe lessów w świetle badań mikrostrukturalnych. *Prz. Geol.*, 31 (3): 162–165.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1988 – Engineering-geological problems of loess In Poland. *Eng. Geol.*, 25: 177–199.
- KACZMARCZYK R., OLEK B., STANISZ J., WOŹNIAK H., PILECKI Z. 2014 – Wpływ gruntów nasypowych na powstanie i rozwój osuwiska. *Prz. Geol.*, 62 (10/2): 594–600.
- MALINOWSKI 1971 – Badania geologiczno-inżynierskie lessów. *Wyd. Geol.*, Warszawa
- MYŚLIŃSKA E. 1984 – Ścisłość i zapadowość lessów. *Tech. Poszuk. Geol.*, 5–6: 16–20.
- WOŹNIAK H. 2009 – Osiadanie gruntów zwałowych w świetle badań modelowych. *Studia, rozprawy, monografie. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.*

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2018 r.

Akceptowano do druku 6.09.2018 r.