

BADANIA SZCZELNOŚCI OBUDOWY GŁĘBOKIEGO WYKOPU METODĄ TERMOMONITORINGU

Paweł Popielski¹, Krzysztof Radzicki², Jürgen Dornstädter³

¹Politechnika Warszawska, Warszawa

²Politechnika Krakowska, Kraków

³GTC Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe, Niemcy

Streszczenie. Obecnie bardzo często wykonanie fundamentów budynków wymaga realizacji głębokiego wykopu. Niekontrolowany dopływ wody gruntowej do głębokiego wykopu, przecieki jego konstrukcji oraz wywołane nimi procesy erozyjne są kluczowymi zagrożeniami dla bezpieczeństwa głębokich wykopów i budowli z nimi sąsiadujących. Ich pojawienie się może wygenerować istotne dodatkowe koszty budowy. Najskuteczniejszą metodą detekcji przecieków w hydrotechnice i obudowy głębokich wykopów jest metoda termomonitoringu [ICOLD 2013]. Metoda ta została zweryfikowana i z powodzeniem jest stosowana od ponad dwudziestu lat na zachodzie Europy. W ostatnich latach wprowadzana jest do użytku w Polsce [Radzicki i in. 2015]. W artykule opisano problem niekontrolowanego dopływu wody gruntowej do głębokiego wykopu. Omówiono schemat prac przy wykonaniu ścian szczelinowych oraz typowe przyczyny ich nieszczelności. Na podstawie swoich doświadczeń zawodowych autorzy przedstawili metodę termomonitoringu oraz możliwości jej wykorzystania do lokalizacji nieszczelności obudowy wykopu przed jego wykonaniem. Przedstawiono również przykład aplikacji tej metody do detekcji przecieków konstrukcji jednej ze stacji metra w Europie.

Słowa kluczowe: głęboki wykop, termomonitoring, przeciek, erozja wewnętrzna, bezpieczeństwo konstrukcji

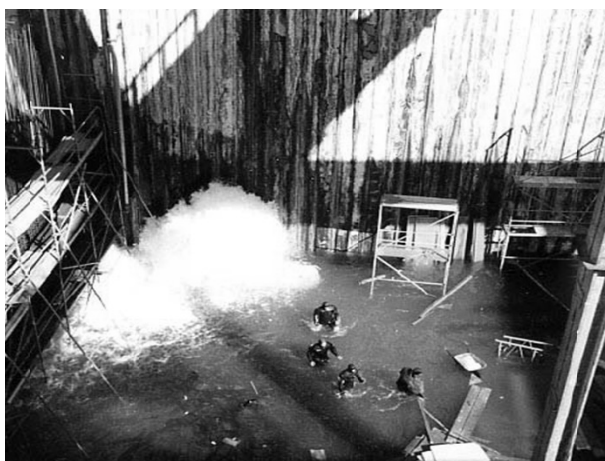
WSTĘP

Fundamenty i elementy konstrukcyjne podziemnych części budowli są wykonywane w głębokich wykopach poniżej poziomu wody gruntowej. Obudowy głębokich wykopów mogą stanowić elementy podziemnej konstrukcji budynku (np. ściany szczelinowe), ale na pewno muszą zapewnić stateczność ścian wykopu i zabezpieczyć wykop przed napływem wody gruntowej. Jeśli obudowa jest nieszczelna, to głębienie wykopu połączone

Adres do korespondencji – Corresponding author: Paweł Popielski, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: pawel.popielski@is.pw.edu.pl

z odwodnieniem gruntu w obrysie ograniczonym ścianami obudowy może doprowadzić do gwałtownego napływu wód gruntowych do jego wnętrza. Jest to proces mogący spowodować wymycie gruntu przez napływającą spoza obudowy do wykopu wodę gruntową, tym samym zniszczenie jego struktury przez zjawisko erozji i sufozji, które może doprowadzić do powstania przebicia hydraulicznego, a w końcowej sytuacji do awarii obudowy wykopu oraz odkształceń gruntu na zewnątrz wykopu.

Uszkodzenia obudowy, zalanie wykopu przez wodę (rys. 1 – widać intensywny napływ wody do wykopu na skutek przebicia hydraulicznego w dnie), skutkuje dodatkowymi pracami budowlanymi, ich wydłużeniem, a nawet koniecznością zmiany projektu obiektu. Natomiast odkształcenia gruntu na zewnątrz wykopu mogą uszkodzić okoliczne budynki lub infrastrukturę podziemną (rys. 2) i prowadzić do procesów odszkodowawczych.



Rys. 1. Przebicie hydrauliczne i intensywny napływ wody przez dno wykopu fundamentowego (fot. Jens Mittag)

Fig. 1. Backward erosion – piping in the bottom of the deep excavation



Rys. 2. Zniszczenia w rejonie zalanego wykopu fundamentowego (fot. <http://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/1,34889,12626718>)

Fig. 2. Destruction in the area of flooded deep excavation

Nasilona filtracja, przecieki oraz powiązane z nimi procesy erozyjne są obecnie podstawowymi zjawiskami, które mogą zagrozić bezpieczeństwu oraz znacząco wpłynąć na koszty eksploatacji budowli piętrzących, takich jak zapory ziemne, wały kanałów lub wały przeciwpowodziowe [ICOLD 2013]. Stanowią one również istotne zagrożenie przy realizacji głębokich wykopów dla konstrukcji wykopu oraz budowli sąsiadujących i mogą bardzo znacząco podnieść koszt wykonania inwestycji [Popielski 2012, Słowikowski 2013, Kłosiński 2014].

Z powyższych powodów dokładna detekcja nieszczelności obudowy wykopu, zanim będzie on wykonany, umożliwiająca przeprowadzenie precyzyjnego doszczelnienia obudowy, ma bardzo istotne znaczenie celem uniknięcia powyższych problemów. W tym zakresie sprawdzoną metodą jest termomonitoring przecieków i procesów erozyjnych, stosowany od kilku dekad w różnych dziedzinach geotechniki i hydrotechniki. Metoda wykorzystuje w badaniach relację w procesach transportu ciepła i wody, które są procesami sprzężonymi. W pierwotnych założeniach metoda została rozwinięta do monitoringu przecieków i procesów erozyjnych w obiektach piętrzących, jak zapory i wały [Dornstädter 1997]. Do tego celu jest obecnie rekomendowana przez ICOLD (International Commission on Large Dams) [ICOLD 2013]. Wybrane narzędzia tej metody zostały zaadaptowane z bardzo dobrym efektem do detekcji przecieków obudów głębokich wykopów [Dornstädter i Huppert 1998]. Termomonitoring oferuje wiele możliwości, w tym innowacyjne metody pomiarów temperatury oraz szereg zaawansowanych algorytmów i modeli analizy danych, które przedstawił Radzicki [2009, 2011].

Metodą termomonitoringu zostało do tej pory przebadanych ponad 170 głębokich wykopów, zwłaszcza w Niemczech, a obecnie technologia ta jest również wprowadzana na rynek Polski [Radzicki i in. 2015].

W artykule w pierwszej kolejności omówiono możliwe przyczyny powstania nieszczelności obudowy i skutki generowane przez procesy filtracyjno-erozyjne dla głębokich wykopów. W dalszej części artykułu przedstawiono przykład aplikacji metody termomonitoringu.

ZAGROŻENIA I KONSEKWENCJE ZWIĄZANE Z NIESZCZELNOŚCIĄ OBUDÓW GŁĘBOKICH WYKOPÓW

W samej Warszawie znajduje się obecnie w różnych etapach realizacji około 100 budynków mających ponad 55 m wysokości i kilkukondygnacyjne części podziemne. Fundamenty i elementy konstrukcyjne części podziemnych budynków są wykonywane w głębokich wykopach, zazwyczaj poniżej poziomu wody gruntowej, i mogą oddziaływać na obiekty sąsiednie i środowisko wodno-gruntowe [Nazarewicz i Popielski 2010]. Powszechnie stosowaną metodą zabezpieczenia wykopu są obudowy, które równocześnie mogą stanowić elementy podziemnej konstrukcji budynku (np. ściany szczelinowe). Muszą one zapewnić stateczność ścian wykopu i zabezpieczyć wykop przed napływem wody gruntowej [Popielski 2012, Siemińska-Lewandowska 2010].

Potencjalny napływ do wykopu wody gruntowej stanowi istotną przeszkodę w planowym wykonaniu prac budowlanych, a w konsekwencji zagrożenie dla bezpieczeństwa wykopu oraz sąsiadujących z nim budowli i infrastruktury podziemnej (rys. 2). W ana-

lizie przyczyn nieszczelności obudowy głębokiego wykopu można rozróżnić dwie podstawowe grupy [Popielski 2012]. Pierwsza z nich to błędy wykonania obudowy wykopu, w tym:

- zła długość ściany, wynikająca z niewystarczającego zagłębienia jej w warstwę nieprzepuszczalną, lub brak połączenia z przesłoną zawieszoną,
- niepoprawna geometria elementów ściany (paneli, pali, kolumn), przemieszczenia względne,
- błędy w składzie lub we wprowadzaniu mieszanki,
- błędy wynikające z niewłaściwej instalacji zbrojenia,
- złe uszczelnienia lub brak uszczelnień połączeń pomiędzy elementami ściany,
- niedokładność w wykonaniu kolejnych elementów przesłony zawieszonej, obryw gruntu.

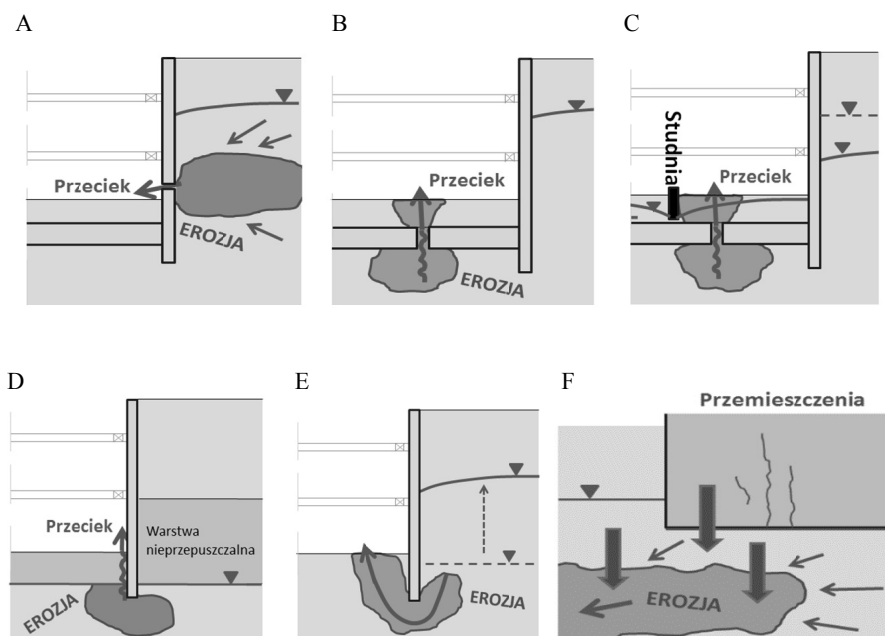
Drugą grupę stanowią błędy w rozpoznaniu podłoża, w tym:

- źle określone położenie stropu warstwy nieprzepuszczalnej,
- źle określone miąższość i ciągłość warstwy nieprzepuszczalnej,
- źle określone ciśnienie wody w warstwach poniżej warstwy nieprzepuszczalnej,
- źle określony układ warstw w podłożu,
- źle określone parametry gruntowe.

Najczęściej do rozpoznania podłoża stosuje się odwierty geotechniczne stanowiące punktowe rozpoznanie podłoża. Takie rozpoznanie może być powodem niedostatecznego rozpoznania przestrzennego układu stropu warstw nieprzepuszczalnych oraz ich miąższości [Popielski i Siemińska-Lewandowska 2016]. Na skutek tego może dojść do przebiccia przez ścianę cienkiej warstwy nieprzepuszczalnej lub nieodcięcie wszystkich okien filtracyjnych i opływanie ściany szczelnej przez filtrującą wodę oraz przez nieciągłość warstwy szczelnej znajdującej się w podłożu. Dlatego duże znaczenie ma wykorzystanie metod geofizycznych, jako badań wstępnych, przed badaniami geotechnicznymi, pozwalającymi odpowiednio je zaplanować [Mieszkowski i in. 2014, Pacanowski i in. 2014, Kowalczyk i in. 2015].

Rysunek 3 przedstawia przypadki wystąpienia przecieków lub przebic w rejonie głębokiego wykopu, omówione przez Clough i O'Rourke [1990], Popielskiego [2012] oraz Kłosińskiego [2014]. Schemat A przedstawia przeciek przez ściany obudowy, schematy B i C – nieszczelności przesłony poziomej, schemat D – przeciek po obrysie konstrukcji (uprzywilejowana droga filtracji), schemat E – przebicie hydrauliczne spowodowane spiętrzeniem wody przez wykonaną ścianę wykopu, a schemat F – scenariusz rozwoju procesu erozyjnego w konsekwencji zaistnienia przecieku. Przypadek F schematycznie przedstawia proces erozji wewnętrznej, mogący zaistnieć nawet w znaczącej odległości od wykopu, związany z nasileniem przepływu wody gruntowej i zjawisk erozyjnych w kierunku wykopu, który to proces również może wpłynąć na warunki posadowienia budynków i infrastruktury (np. rurociągów).

Wystąpienie wymienionych przecieków i procesów erozyjnych może skutkować: podtopieniem lub zatopieniem wykopu, deformacją obudowy wykopu, zniszczeniem dna wykopu, awarią obudowy wykopu, zmianą warunków wodno-gruntowych otoczenia wykopu i warunków posadowienia sąsiadujących budowli, osiadaniem gruntu poza obudową wykopu, zapadnięciem gruntu [Popielski 2012]. Możliwe konsekwencje tych zdarzeń to z kolei: wydłużenie czasu budowy, naprawa i/lub konieczność wykonania wzmoc-



Rys. 3. Typowe schematy nieszczelności wykopu oraz scenariuszy rozwoju procesu erozyjnego
 Fig. 3. Typical leakage schemes of deep excavation and scenarios of internal erosion

nienia obudowy wykopu, przeprojektowanie wykonywanej budowli z uwagi na zmiany zaistniałe w podłożu gruntowym wokół wykopu, odszkodowania z tytułu uszkodzeń sąsiadujących z wykopem budynków oraz infrastruktury.

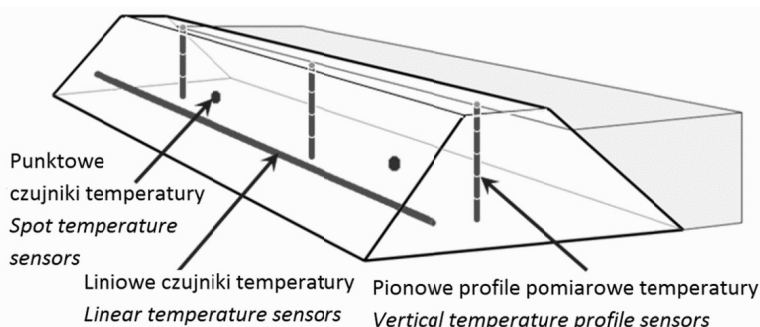
Celem sprawnego i planowego wykonania części podziemnej budowli i uniknięcia wspomnianych powyższych problemów bardzo istotne znaczenie ma dokładna detekcja wszelkich nieszczelności obudowy zaplanowanego wykopu, zanim głębienie wykopu zostanie rozpoczęte. Potencjalną strefą nieszczelności są ściany obudowy wykopu połączone z istniejącą w podłożu poziomą warstwą nieprzepuszczalną gruntu lub, jeśli jej brak, wykonaną w jej miejsce poziomą przesłoną szczelną (np. wykonaną technologią iniekcji strumieniowej *jet grouting*). W konsekwencji pozwala to na precyzyjne uszczelnienie nieszczelności z powierzchni terenu i dopiero po jego wykonaniu bezpieczne głębienie wykopu.

METODYKA TERMOMONITORINGU PROCESÓW FILTRACYJNO-EROZYJNYCH

Metoda termomonitoringu bazuje na sprzężonym transporcie ciepła i wody. Zmiana wilgotności gruntu znacząco wpływa na prędkość transportu ciepła w gruncie w procesie przewodzenia ciepła. Pojawienie się przepływu wody, w tym wystąpienie przecieku, lub zwiększenie prędkości jej przepływu generuje intensywny, adwekcyjny transport ciepła w gruncie, proporcjonalny do prędkości przepływu. Na przepływ wody w grun-

cie wpływają procesy erozyjne, które w charakterystyczny sposób oddziałują na pole temperatury w gruncie [Guidoux 2008, Radzicki i Bonelli 2010, 2012a, Beguin 2011]. W konsekwencji metoda termomonitoringu pozwala na detekcję i analizę procesów filtracyjnych oraz erozyjnych [Radzicki i in. 2015].

W metodzie termomonitoringu stosuje się kilka rodzajów czujników temperatury, których rodzaje schematycznie przedstawiono na rysunku 4. Jednym z kluczowych są liniowe czujniki temperatury umożliwiające pomiar temperatury w sposób ciągły lub quasi-ciągły na całej długości opomiarowanego odcinka.



Rys. 4. Rodzaje czujników temperatury stosowane w termomonitoringu
Fig. 4. The types of temperature sensors used in thermal monitoring

Liniowe czujniki temperatury zmieniły jakościowo monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych w budownictwie wodnym w porównaniu z dotychczasowymi pomiarami punktowymi w oddalonych od siebie przekrojach. Czujniki liniowe stosuje się również do wykonywania pionowych profili temperatury korpusu i podłoża. Metoda ta znalazła szczególne zastosowanie w termomonitoringu szczelności głębokich wykopów.

Czujniki liniowe umożliwiają zastosowanie na budowach piętrzących oraz w monitoringu głębokich wykopów koncepcji monitoringu quasi-trójwymiarowego zaproponowaną i omówioną szczegółowo przez Radzickiego [2015]. Technologia ta ma szereg istotnych zalet, ale również kilka ograniczeń [Radzicki i in. 2015]. Jednym z rodzajów czujników liniowych są czujniki wielopunktowe, które składają się z ciągu pojedynczych punktów pomiarowych, ale zlokalizowanych na tyle gęsto, że umożliwiają quasi-ciągłość pomiarów w przestrzeni. Tego typu technologią pomiarów temperatury, pozwalającą wykonywać profile pionowe temperatury gruntu, jest między innymi technologia rozwinięta przez GTC Kapellmayer w latach 90. XX wieku [Dornstädter i Huppert 1998]. Pomiary są wykonywane przy zastosowaniu segmentowych rurek o wąskiej średnicy, wbijanych w grunt, z zamieszczonymi w nich łańcuchami czujników temperatury, rozmieszczonymi na całej długości rurki w odstępach co 1 m. Pozwala ona na relatywnie niedrogie wykonywanie pomiarów pionowych profili temperatury w gruncie do 40 m głębokości. Technologia ta zastosowana została do detekcji przecieków na kilkudziesięciu obiektach piętrzących i jest kluczowym narzędziem w termomonitoringu przecieków głębokich wykopów [Dornstädter i Huppert 1998, Radzicki i in. 2011].

METODYKA BADANIA SZCZELNOŚCI OBUDOWY GŁĘBOKICH WYKOPÓW METODĄ TERMOMONITORINGU

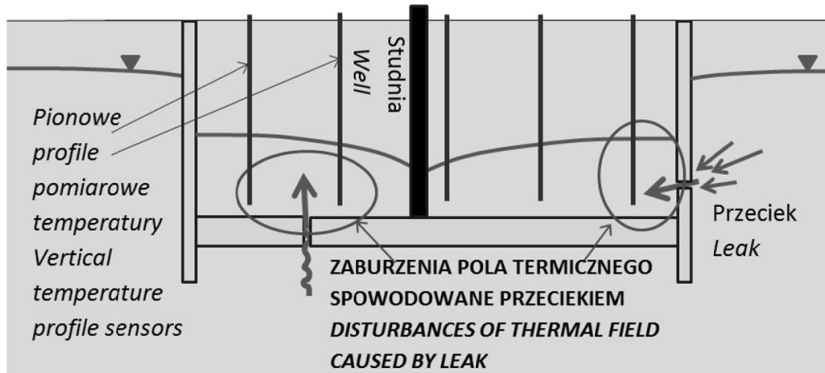
Najpowszechniej stosowaną i najbardziej ekonomiczną metodą termomonitoringu głębokich wykopów jest metoda pasywna, wykorzystująca naturalną temperaturę badanego ośrodka. W konstrukcji obudów głębokich wykopów wykorzystuje się materiały na bazie cementu w konstrukcji elementów szczelnych i nośnych zabezpieczających głęboki wykop (np. ściany szczelinowe). Podczas wiązania cementu jest wydzielane ciepło hydratacji, które powoduje wzrost temperatury podłoża w sąsiedztwie elementów uszczelniających. Ze względu na małą przewodność cieplną gruntu temperatura w podłożu pozostaje podwyższona przez długi czas. Woda przepływająca poprzez nieszczelności obudowy wykopu wywołuje nasilony, adwekcyjny napływ zewnętrznego ciepła (chłodniejszej wody gruntowej spoza obudowy), prowadzący do lokalnego, szybkiego obniżenia temperatury podgrzanego gruntu w pobliżu nieszczelności. Ciepło hydratacji, w zależności od przypadku, może być wykorzystane nawet do kilku tygodni po zakończeniu wykonywania obudowy do detekcji przecieków. Metodą tą wykrywa się nieszczelności dla przepływu wody o prędkościach już rzędu $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [ICOLD 2013]. W przypadku gdy nastąpiło ustanie hydratacji i rozproszenie powstałego ciepła lub wykonano obudowę wykopu z materiału nieemitującego ciepła (np. ścianek szczelnych), stosuje się aktywną metodę termomonitoringu [Radzicki 2011]. W tym przypadku montowane są w gruncie rurki pomiarowe z czujnikami temperatury zintegrowanymi z mikrogrzałkami, którymi ogrzewa się grunt w bezpośrednim otoczeniu czujnika. Analiza charakterystyki odprowadzania ciepła wygenerowanego przez grzałki pozwala na detekcję przecieków.

Wykonanie wykopu, z weryfikacją przecieków metodą termomonitoringu, realizowane jest w następujących etapach:

- wykonanie obudowy planowanego wykopu (ścian szczelinowych),
- instalacja pionowych profili pomiarowych temperatury wewnątrz obrysu planowanego wykopu, studni odwadniających i piezometrów,
- odpompowywanie wody z wnętrza obudowy wykopu, co generuje różnice ciśnień pomiędzy zewnętrznym a wewnętrznym poziomem wody i jej przepływ w miejscach nieszczelności obudowy,
- kontrola wartości wydatku wody ze studni oraz poziomów wody w piezometrach za ścianą (obudowa) i w obrysie wykopu,
- detekcja metodą termomonitoringu zaburzeń pola temperatury gruntu spowodowanych przeciekami,
- precyzyjne uszczelnienie z powierzchni wykrytych nieszczelności (np. metodą iniekcji),
- wykonanie wykopu.

Badanie przeprowadza się opisanymi w poprzednim rozdziale wbijanymi w grunt czujnikami do wykonywania pionowych profili temperatury gruntu.

Schemat zastosowania metody termomonitoringu do detekcji przecieków konstrukcji zaplanowanego głębokiego wykopu przedstawia rysunek 5.



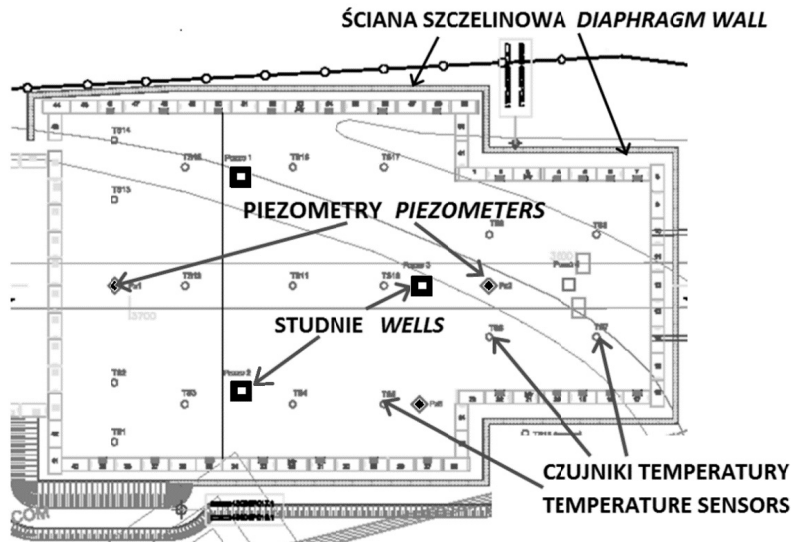
Rys. 5. Schemat zastosowania metody termomonitoringu do detekcji przecieków konstrukcji zaplanowanego głębokiego wykopu

Fig. 5. Scheme of the thermal monitoring method application for leak detection of underground construction of planned deep excavation

WYNIKI BADAŃ SZCZELNOSCI OBUDOWY WYKOPU NA PODSTAWIE DETEKCJI PRZECIEKÓW METODĄ TERMOMONITORINGU

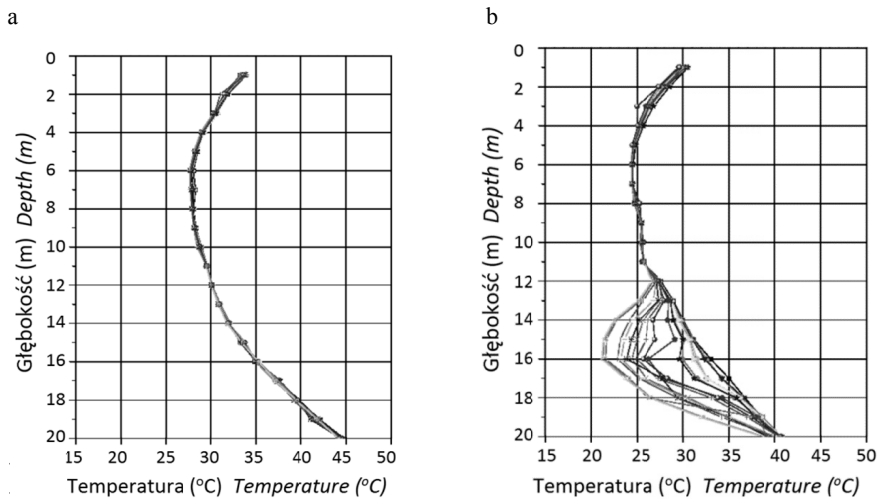
Jako przykład aplikacji metody termomonitoringu do detekcji przecieków obudowy wykopu przedstawiono badania w rejonie stacji metra. Zabezpieczenie wykopu przed wodą gruntową zostało wykonane w formie szczelnych ścian i szczelnej przesłony poniżej dna wykopu. Ściany zrealizowano metodą ścian szczelinowych, a poziomą przesłonę wewnątrz obrysu planowanego wykopu – metodą iniekcji strumieniowej. Do badania zastosowano 17 czujników do wykonywania pionowych profili temperatury gruntu. Czujniki te wbito w grunt do rzędnej przesłony poziomej uszczelniającej dno wykopu. Zainstalowano je wzdłuż ścian oraz wzdłuż osi wykopu w celu badania szczelności zarówno ścian, jak i dna wykopu. Rysunek 6 przedstawia ich lokalizację, zarys obudowy wykopu oraz położenie 4 studni odwadniających i piezometrów otwartych.

Pomiary temperatury wykonywano w trakcie odwodnienia wykopu za pomocą pompowania wody ze studni. Temperatura gruntu niezaburzona wpływem wykonania obudowy wykopu wynosiła kilkanaście stopni Celsjusza. Temperatura gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie wykonanych ścian szczelinowych tuż przed rozpoczęciem pompowania wahała się od 35,6 do 45,7°C, w zależności od chwili wykonania i lokalizacji czujnika. Pomiar zerowy przed rozpoczęciem pompowania pokazywał typowy rozkład temperatury gruntu w profilu pionowym, charakterystycznym dla wykonywania obudowy wykopu opisaną technologią. Wzdłuż całej wysokości ściany z powodu wydzielanego przez nią ciepła hydratacji temperatura gruntu była podwyższona w stosunku do temperatury tła, gruntu i wody poza wykopem. Ponadto temperatura przy powierzchni terenu i w pobliżu płyty dennej była dodatkowo podwyższona, co było spowodowane odpowiednio wpływem promieniowania słonecznego oraz ciepłem hydratacji przesłony iniekccyjnej. Opisany rozkład temperatury pozostawał niezmienny przez cały okres pomiarów w strefach, gdzie nie było przecieków. Przykład takich pomiarów przedstawia rysunek 7a. Jednocze-



Rys. 6. Plan wykopu z zaznaczoną lokalizacją czujników do termomonitoringu (kółka), studni (kwadraty) i piezometrów (romby) (rys. GTC Kapelmayer)

Fig. 6. Excavation view with the location of thermal monitoring sensors (circles), wells (squares) and piezometers (diamonds) (by GTC Kapelmayer)

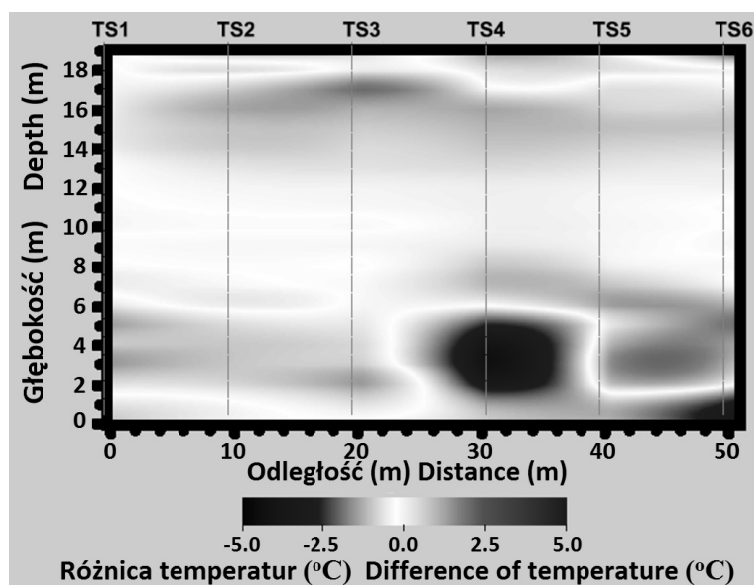


Rys. 7. Profile pionowych wartości temperatury w kolejnych dniach pompowania mierzone czujnikami zlokalizowanymi w pobliżu ściany szelinowej: a – dla przypadku braku przecieku, b – w strefie przecieku (rys. GTC Kapelmayer)

Fig. 7. Vertical profiles of temperature carried out on consecutive days of pumping by sensors located in the vicinity of the diaphragm wall: a – in the absence of a leak, b – measured in the leak zone (by Kapelmayer GTC).

śnie obniżenie zwierciadła wody w gruncie wewnątrz obrysu obudowy planowanego wykopu spowodowało napływ chłodniejszej wody z zewnątrz przez nieszczelności obudowy i narastające wychładzanie gruntu i wody w ich sąsiedztwie. Rysunek 7b przedstawia profile pionowe temperatury mierzone w kolejnych dniach czujnikiem zlokalizowanym w pobliżu przecieku. W dolnej części wykresu wyraźnie widać szybkie wychładzanie się gruntu spowodowane przeciekiem, pozwalające na jego detekcję i dokładną lokalizację.

Na rysunku 8 przedstawiono przekrój przez profile pomiarowe zlokalizowane wzdłuż ściany szczelinowej. Prezentowana jest różnica temperatur pomiędzy początkiem a końcem badania, pozwalająca na dokładną lokalizację przecieku na powierzchni wykonanej ściany szczelinowej. Tak zlokalizowany przeciek może być skutecznie uszczelniony za pomocą technik iniekcyjnych.



Rys. 8. Różnica temperatur pomiędzy początkiem i końcem badania (rys. GTC Kapelmayer)

Fig. 8. The temperature difference between the beginning and end of the test (by Kapelmayer GTC)

WNIOSKI I STWIERDZENIA

1. Metoda termomonitoringu jest użytecznym i sprawdzonym narzędziem do detekcji i analizy procesów filtracyjnych, w tym przecieków oraz procesów erozyjnych.

2. Technologia termomonitoringu jest stosowana od dziesięcioleci i została zweryfikowana w licznych aplikacjach w budownictwie wodnym oraz w geo- i hydrotechnice przy wykonywaniu głębokich wykopów.

3. Metoda termomonitoringu stanowi skuteczne narzędzie w detekcji nieszczelności obudowy wykopów wykonywanych w osłonie ścian szczelinowych.

4. Szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa głębokich wykopów ma wczesna i dokładna detekcja przecieków oraz procesów erozyjnych w celu zapobiegania awariom

spowodowanych przez oddziaływanie wody na ośrodek gruntowy (poprzez sufozję, erozję wewnętrzną i przebicie hydrauliczne).

5. Dokładana lokalizacja miejsca przecieku umożliwia wykonanie skutecznego uszczelnienia i ograniczenia kosztów realizacji głęboko posadowionych budynków oraz bezpiecznego zrealizowania konstrukcji.

PIŚMIENNICTWO

- Beguín, S. (2011). Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre. Praca doktorska.
- Clough, G., O'Rourke, T. (1990). Construction induced movements of in situ walls. Proc. of Conf "Design and Performance of Earth Retaining Structures", New York.
- Dornstädter, J. (1997). Detection of internal erosion in embankment dams. XIX ICOLD Congress, Q73 R.7, Florence, 87–101.
- Dornstädter, J., Huppert, F. (1998). Thermische Leckortung an Trogbaugruben mit tiefliegenden Sohlen, Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V, 179–187.
- Guidoux, C. (2008). Développement et validation d'un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuite dans les digues en terre. Praca doktorska.
- ICOLD (2013). Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundation. Bulletin 164, 1: Internal erosion processes and engineering assessment, 151.
- Kłosiński, B. (2014). Sprawdzanie stateczności dna głębokich wykopów. *Geoinżynieria – Drogi. Mosty, Tunele*, (46), 38–44.
- Kowalczyk, S., Zawrzykraj, P., Mieszkowski, R. (2015). Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. *Geological Quarterly*, 59 (2), 367–372.
- Mieszkowski, R., Kowalczyk, S., Barański, M., Szczepański, T. (2014). Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych oraz wyznaczenia stref rozluźnienia w korpusie zapory ziemnej. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN*, 86, 167–180.
- Mittag, J. (2009). Technische Risiken bei Grundwasserhaltungen und Grundwasserentspannungen für tiefe innerstädtische Baugruben. Oktober, Potsdam.
- Nazarewicz, M., Popielski, P. (2010). Analiza oddziaływania czasowego odwodnienia w trakcie realizacji głębokich wykopów fundamentowych na budynki sąsiednie. *Czasopismo Techniczne, Środowisko*, 107 (1-Ś) (14), 1–18.
- Pacanowski, G., Czarniak, P., Bąkowska, A., Mieszkowski, R., Welc, F. (2014). The role of geophysical ERT method to evaluate the leak proofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the construction of retail and office complex in Lublin, Poland. *Studia Quaternaria*, 31 (2), 91–99.
- Popielski, P. (2012). Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Prace Naukowe Inżynieria Środowiska* 61, OWPW, Warszawa.
- Popielski, P., Sieminska-Lewandowska, A. (2016). Zakres rozpoznania i dobór parametrów podłoża do opracowania modeli numerycznych głęboko posadowionych obiektów budowlanych – doświadczenia i wnioski. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, w druku.
- Radzicki, K. (2009). Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites. Praca doktorska. AgroParisTech, Paryż.
- Radzicki, K. (2011). Bezpieczeństwo zapór – nowe wyzwania. Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowach piętujących. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.

- Radzicki, K. (2015). Innowacyjne, instrumentalne systemy pomiarowe quasi-3D monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych oraz odkształceń w zaporach i wałach. *Ceramic Materials*, (67), 81–87.
- Radzicki, K., Bonelli, S. (2010). A possibility to identify piping erosion in earth hydraulic works using thermal monitoring. 8h ICOLD European Club Symposium, Innsbruck, 618–623.
- Radzicki, K., Bonelli, S. (2012a). Monitoring of the suffusion process development using thermal analysis performed with IRFTA model. 6th ICSE, Paryż, 593–600.
- Radzicki, K., Bonelli, S. (2012b). Physical and parametric monitoring of leakages in earth dams using analysis of fibre optic distributed temperature measurements with IRFTA model, Q. 95 – R. 7, 24th ICOLD Congress, Kioto, 93–112.
- Radzicki, K., Siudy, A., Stoliński, M. (2015). An innovative 3D system for thermal monitoring of seepage and erosion processes and an example of its use for upgrading the monitoring system at the Kozłowa Góra dam in Poland. Q. 99 – R. 7, 25th International Congress on Large Dams, Stavanger, 85–101.
- Siemińska-Lewandowska, A. (2010). Głębokie wykopki – projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Słowikowski, D. (2013). Likwidacja przebieg hydraulicznych w podłożu gruntowym – praktyczne doświadczenia z realizacji. *Geoinżynieria – Drogi, Mosty, Tunele*, (4), 60–64.

THERMAL MONITORING OF LEAKS OF DEEP EXCAVATION CONSTRUCTION

Abstract. Currently very often, the execution of the foundations of buildings requires to perform of deep excavations. Uncontrolled groundwater flow into the deep foundation, leaks and, caused by them, internal erosion processes are among the keys threats to the safety of deep excavations and nearby buildings. The presence of these processes can generate significant additional construction costs of building. The most effective method of detection of leaks of deep excavations is thermal monitoring method. This method has been verified and successfully used for over twenty years in western Europe. In recent years, it is introduced into implementation in Poland. The paper shows firstly a comprehensive analysis of the uncontrolled groundwater flow into the deep foundation. The scheme of works performed to construct the slurry walls as well as typical causes of leakage were discussed. Secondly, the authors, basing on their professional experience present the basic issues concerning the thermal monitoring method and the possibilities of its using to leakage detection of deep excavation construction before its performing. Finally, an example of thermal monitoring method application for the detection of leaks of deep excavation construction of one of subway station in Europe is presented.

Key words: deep excavation, thermal monitoring, leakage, internal erosion, construction safety

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Popielski, P., Radzicki, K., Dornstädter, J. (2016). Badania szczelności obudowy głębokiego wykopu metodą termomonitoringu. *Acta. Sci. Pol. Architectura* 15 (3), 127–138.