

GEOTECHNICZNE ODDZIAŁYWANIA OBIEKTÓW W PRZESTRZENI PODZIEMNEJ – REDEFINICJA WYMAGAŃ

Witold Bogusz, Tomasz Godlewski✉

Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą oddziaływań geotechnicznych od obiektów realizowanych w przestrzeni podziemnej (ang. underground space). W krajowej praktyce dla oceny oddziaływania inwestycji na obiekty sąsiednie najczęściej wykorzystywana jest metoda przedstawiona w Instrukcji ITB nr 376/2002 (Wysokiński i Kotlicki, 2002). Artykuł omawia dodatkowe czynniki, takie jak wpływ związany z odprężaniem dna wykopu czy też konieczność uwzględnienia wzrostu sżywności gruntu z głębokością, jako elementy dodatkowe, niezbędne w celu dokładniejszej prognozy przemieszczeń w przypadku realizacji głębokich wykopów oraz zagadnień związanych z tunelowaniem.

Słowa kluczowe: strefa oddziaływania, przestrzeń podziemna, przemieszczenia, modelowanie MES

WSTĘP

Budowa nowych obiektów wykorzystujących w całości lub częściowo przestrzeń podziemną (ang. underground space) wymaga rozwiązywania skomplikowanych problemów geotechnicznych, w tym trudnej niekiedy oceny oddziaływania na otoczenie. Wykonanie podziemnych robót budowlanych w mieście niesie ze sobą liczne zagrożenia. Są to przemieszczenia powierzchni terenu w wyniku wydobywania urobku z wykopów czy drążenia tuneli, drgania i wstrząsy, zmiany poziomów wód gruntowych wywołane odwodnieniem, hałas wywołany budową itp. Do największych, czasem katastrofalnych zagrożeń należą jednak towarzyszące niekiedy robotom uszkodzenia budynków w wyniku nadmiernych przemieszczeń powierzchni terenu. W dużych aglomeracjach miejskich z uwagi na deficyt miejsca i nieustanny rozwój infrastruktury (realizacja budynków z wielokondygnacyjnym podziemiem, budowa linii metra, tuneli kolejowych czy drogowych) oceny w zakresie wzajemnego oddziaływania obiektów w przestrzeni podziemnej stają się codzienną praktyką i koniecznością wynikającą z przepisów (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. 75, poz. 690 z późn. zm.), zobowiązując inwestora, projektanta i wykonawcę do przeanalizowania sposobu posadowienia i realizacji oraz oceny wpływu nowej inwestycji na obiekty sąsiednie. Nowe doświadczenia uzyskane z budowy II linii metra, w tym z zastosowaniem nowej (w polskich warunkach) technologii drążenia tuneli tarczami zmechanizowanymi (TBM), powodują konieczność rewizji dotychczasowych ustaleń i częściowej redefinicji wymagań w kierunku aktualizacji zaleceń podanych w Instrukcji ITB (Wysokiński i Kotlicki, 2002) w kontekście realizacji głębokich wykopów oraz zagadnień związanych z tunelowaniem.

✉t.godlewski@itb.pl

GEOTECHNICZNA OCENA ODDZIAŁYWANIA

Ocena wzajemnego oddziaływania obiektów w przestrzeni podziemnej to zadanie wymagające analizy czynników wpływu wynikających z geometrii i charakterystyki konstrukcji budowanej i istniejącej w kontekście warunków gruntowo-wodnych. Poprawność takiej oceny oraz prognozy zasięgu i zakresu tych oddziaływań wymagają znajomości zagadnień zarówno z zakresu konstrukcji, jak i geotechniki oraz wiedzy opartej na wykorzystaniu zebranych już doświadczeń i obserwacji z monitoringu. Ustalanie strefy oddziaływań bezpośrednich i pośrednich oraz ocenę wartości przemieszczeń dopuszczalnych wykonuje się na podstawie doświadczeń porównywalnych, tj. udokumentowanych wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych przy wykonywaniu podobnych wykopów, w podobnych warunkach gruntowych.

Dotychczasowe doświadczenia w tym zakresie, zdobyte głównie w czasie budowy I i II linii metra, pozwoliły na wyróżnienie podstawowych czynników wpływających na zasięg i stopień wpływu metra na sąsiednią zabudowę miejską i obiekty budowlane. Są to przede wszystkim: rodzaj wyrobiska (wykop otwarty czy tunel), technologia prac (ściany szczelinowe, palościanki, tarcza TBM itd.), głębokość wykopu lub przebiegu tunelu oraz warunki geologiczne, geotechniczne i hydrogeologiczne. Podobnie jak w analizie stanów granicznych dla oceny oddziaływania inwestycji można wykorzystać różne modele obliczeniowe, w tym modele: analityczne, półempiryczne (np. model z Instrukcji ITB nr 376/2002) czy numeryczne (np. oparte na metodzie elementów skończonych). O ile wstępna ocena (jakościowa) oddziaływania, oparta na modelu półempirycznym, pozwala na poprawne, choć konserwatywne (bezpieczne z punktu widzenia otoczenia) określenie zasięgu stref wpływu wykopu i wskazanie, które obiekty są potencjalnie zagrożone i należy je objąć monitoringiem, to już w kwestii prognozy wielkości przemieszczeń w strefie wpływu może skutkować nadmiernie konserwatywnym projektem konstrukcji. W takich przypadkach najczęściej zalecane jest dodatkowe przeprowadzenie analizy ilościowej. Analizę tę należy traktować jako jeden ze stanów granicznych użyteczności (SGU), związanych z projektowanym obiektem. Pierwszym krokiem tej analizy, związanej z identyfikacją zagrożeń, powinno być określenie dopuszczalnych wartości przemieszczeń dla sąsiednich obiektów z uwagi na ich stan techniczny, rodzaj konstrukcji, poziom posadowienia oraz ewentualne dodatkowe wymagania z powodu zachowania ich użyteczności (np. przemieszczenie torów dla środków komunikacji szynowej).

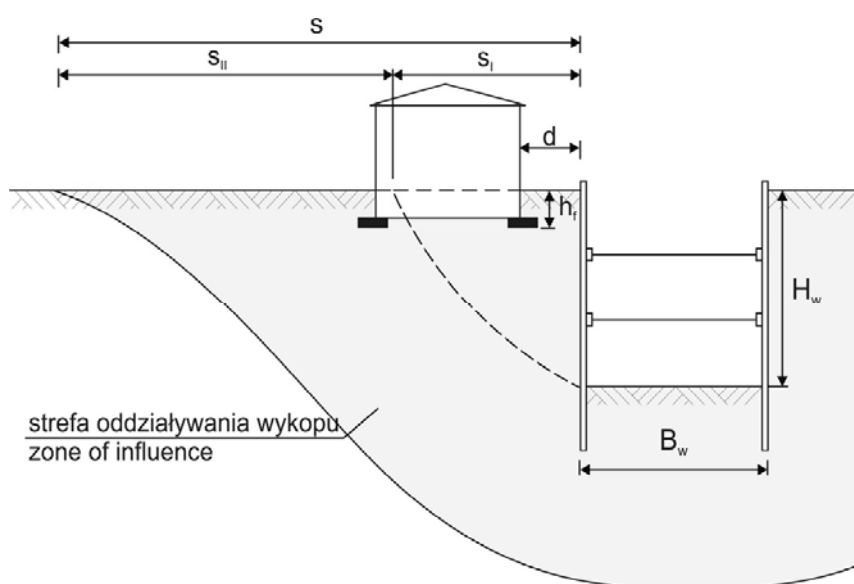
W praktyce krajowej dla oceny oddziaływania inwestycji na obiekty sąsiednie najczęściej wykorzystywana jest metoda przedstawiona w Instrukcji ITB nr 376/2002 (Wysokiński i Kotlicki, 2002). Z uwagi jednak na realizację zarówno coraz bardziej skomplikowanych inwestycji, jak i konieczność jak najdokładniejszej prognozy przemieszczeń, np. w sąsiedztwie obiektów metra, występuje konieczność zastosowania metod numerycznych. Modele półempiryczne mogą służyć wstępnej ocenie zasięgu strefy zagrożenia, ale z uwagi na swoje uproszczenia są często niewystarczające dla przeprowadzenia ilościowej oceny z wystarczającą dokładnością.

OCENA ODDZIAŁYWANIA W OPARCIU O MODEL PÓLEMPIRYCZNY

Metodyka oceny oddziaływania podana w Instrukcji ITB nr 376/2002 (Wysokiński i Kotlicki, 2002) z uwagi na brak innych, bardziej szczegółowych wymagań normatywnych w tym zakresie i względną prostotę określania zarówno zasięgu, jak i przewidywanych przemieszczeń związanych z realizacją głębokich wykopów, jest obecnie powszechnie stosowana. Oceniając bezpieczeństwo obiektów według tej Instrukcji, rozróżnia się generalnie dwie strefy zagrożenia z uwagi na oddziaływania statyczne: pierwszą, w której powstające wartości przemieszczeń mogą zagrozić nośności konstrukcji, oraz drugą, w której przemieszczenia są mniejsze i uszkodzenia mogą oddziaływać na warunki użytkowania obiektów, lecz najczęściej nie zagrażając ich nośności czy stateczności.

Należy zauważyć, że początki założeń filozofii wyznaczania stref oddziaływania można znaleźć w warunkach technicznych stosowanych przy budowie I linii metra warszawskiego (lata 80. i 90.), gdzie podane były dwie strefy oddziaływania R1 i R2, bez definiowania ich wymiarów (Godlewski i Wysokiński, 2012). Strefę R1 wyznaczał teoretyczny zasięg klina odłamu gruntu jako obszar, w którym mogą wystąpić przemieszczenia podłoża powodujące powstanie w obiektach uszkodzeń zagrażających nośności konstrukcji. Strefa R2 to obszar mierzalnych przemieszczeń, w którym mogły powstać przemieszczenia powodujące uszkodzenia utrudniające użytkowanie obiektów, lecz niezagrażające nośności konstrukcji. Strefę R2 w przypadku dobrych i średnich warunków gruntowych w terenie płaskim ustalano na 40 m. Na potrzeby tunelowania w tamtym czasie wyników było jeszcze zbyt mało i nie było eksperymentalnej możliwości ustalenia zasięgów. Uważano na podstawie pojedynczych pomiarów, że wartość osiadań to maksymalnie około 30 mm i strefa pod kątem 30°. W 2002 roku ITB podsumowało dotychczasowe obserwacje ze stacji i wykopów w Warszawie, co pozwoliło na sprecyzowanie dwóch stref oddziaływania wykopów (S_I i S_{II}) – rysunek 1.

Rodzaj gruntów Soil type	Strefa oddziaływań Zone of influence	
	S_I	S_{II}
Piaski Sands	$0,5 H_w$	$2,0 H_w$
Gliny Glacial tills	$0,75 H_w$	$2,5 H_w$
Iły Clays	$1,0 H_w$	$3+4 H_w$



Objaśnienia – Legend:

H_w i B_w – głębokość i szerokość wykopu – depth and width of excavation

S – zasięg strefy oddziaływania wykopu – range of influence zone

S_I – zasięg strefy bezpośredniego oddziaływania – range of active zone influence

S_{II} – zasięg strefy wpływów wtórnych – range of vigilance zone influence

d – odległość budynku od obudowy – distance of the structure from the excavation

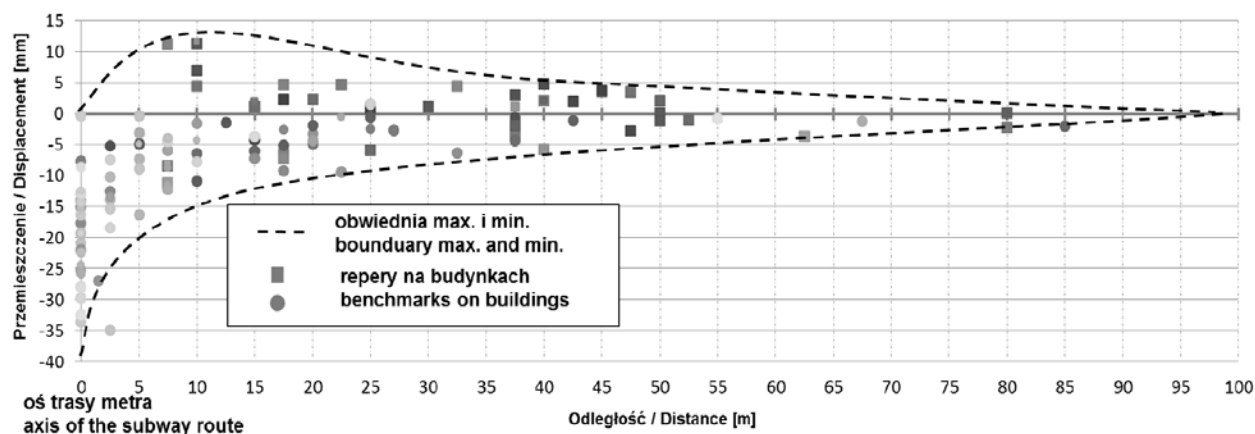
h_f – głębokość posadowienia budynku – foundation depth

Rys. 1. Głęboki wykop i strefa jego oddziaływania według Instrukcji ITB nr 376/2002 (Wysokiński i Kotlicki, 2002)

Fig. 1. Deep excavation and the zone of its influence according to ITB Recommendations No. 376/2002 (Wysokiński and Kotlicki, 2002)

Zasięg stref uzależniono od rodzajów gruntów oraz głębokości wykopu (H_w), bez uwzględnienia systemu rozparcia, lecz traktując, że rozparcie będzie zadowalające, tj. niedopuszczające do nadmiernego odkształcenia obudowy. W razie potrzeby należy uwzględniać też inne czynniki, które mogą mieć istotny wpływ na zasięg występowania przemieszczeń podłoża, jak rozmiary rzutu wykopu, obniżanie zwierciadła wody gruntowej na czas robót, zasięg kotew gruntowych podtrzymujących obudowę. W wyniku obserwacji stwierdzono duże różnice w strefach zasięgu oddziaływania wykopu w piaskach i iłach.

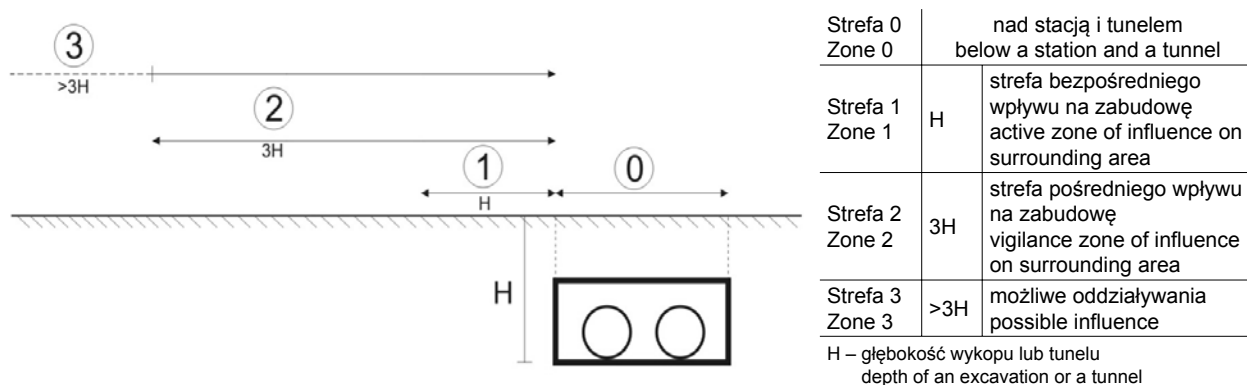
W Instrukcji (Wysokiński i Kotlicki, 2002) wyraźnie wskazano na konieczność ustalania zasięgu stref oddziaływania wykopu w zależności od odkształcalności gruntów zalegających w podłożu oraz głębokości wykopu. Pomocnicze są tu zasięgi ustalone empirycznie, zebrane w tabeli (rys. 1) dla wykopów w jednolitych rodzajach typowych kompleksów gruntów (piaski, gliny, ropy). Jednocześnie autorzy Instrukcji ITB (nr 376/2002) zastrzeżli potrzebę weryfikowania i ewentualnej korekty stref oddziaływań wykopu na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń dla podobnych warunków na danym terenie. Wyznaczenie stref zasięgu oddziaływań jest konieczne z uwagi na wytypowanie budynków do obserwacji i wdrożenia monitoringu. Dla warunków warszawskich, uogólniając profile geologiczne, można podać następujące granice stref oddziaływania dla metra (stacje, tunele): ropy – $3,5H$, gliny zwałowe – $2,0-2,5H$, piaski – $1,5H$, gdzie H to głębokość posadowienia konstrukcji. Zasięg dotychczasowej strefy oddziaływań (S) na odcinku I linii metra (od B1 do A11) wynosił około 35–63 m od osi konstrukcji. W przypadku doświadczeń z II linii metra, przyjmując wartość $3H$ dla odcinka centralnego, jest to przedział około 37–84 m (co znajduje potwierdzenie w pomiarach z monitoringu – rys. 2).



Rys. 2. Przemieszczenia reperów na wybranych budynkach wzdłuż trasy zachodniej części odcinka centralnego II linii metra na podstawie danych udostępnionych w ramach opracowania ITB/Metroprojekt (2014)

Fig. 2. Displacements of leveling pins on selected buildings along western part of the central section of the II Metro line based on data released for documentation ITB/Metroprojekt (2014)

Na potrzeby rozszczeń, potrzeb administracyjnych (warunki zabudowy), a głównie do projektowania II linii metra przyjęto uproszczone granice stref oddziaływania (uśrednione warunki w podłożu) podane przez ITB (Prace własne ITB-NG-903/P/06, 2006) – rysunek 3. Należy zauważyć, że krajowe doświadczenia w zakresie ustalania zasięgu stref oddziaływań (Wysokiński i Kotlicki, 2002; Siemińska-Lewandowska, 2010; Popielski, 2012) biorą pod uwagę głębokość wykopu/posadowienia obiektu z uwzględnieniem warunków gruntowych. Jak wskazują doświadczenia lokalne zebrane przy budowie metra w Warszawie, ma to swoje uzasadnienie i potwierdzenie w wynikach z monitoringu.



Rys. 3. Określenie granic stref oddziaływania stacji i tuneli na potrzeby II linii metra (ITB-NG-903/P/06, 2006)

Fig. 3. Definition of the limits of the zones of influence for stations and tunnels of the II Metro (ITB-NG-903/P/06, 2006)

Różnice w wielkości zasięgu stref oddziaływań statycznych są szczególnie wyraźne w przypadku porównania gruntów gruboziarnistych (piaski) i drobnoziarnistych (iły). Wytyczne ITA-AITES (2014), oparte na doświadczeniach światowych, podają zakres stref oddziaływania jedynie w funkcji głębokości wykopu lub jako wartość ustaloną (wybiera się wartość większą) – zestawienie w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie stref oddziaływania wykopu według różnych autorów (Godlewski, 2016) w kontekście wytycznych ITA-AITES (2014)

Table 1. Comparison of the zones of influence according to different authors (Godlewski, 2016) in light of ITA-AITES recommendations (2014)

Źródło Source	Clough i O'Rourke (1990)		Instrukcja ITB nr 376 (Kotlicki i Wysokiński 2002)				Wytyczne (ITA-AITES, 2014)	
	piaski sands	iły i gliny clays and tills	piaski sands	iły clays			bez względu na rodzaj podłoża despite subsoil type	
Zasięg strefy oddziaływań Range of zones of influence	$1,5 \div 2 H$	$2 \div 4 H$	S_I $0,5 H$	S_{II} $2 H$	S_I $1 H$	S_{II} $3 \div 4 H$	S_I (active zone) stacje – stations: $1 H$ lub $50 m$ tunele – tunnels: $1 H + 1/2 D$ lub $50 m$	S_{II} (vigilance zone) stacje i tunele – stations and tunnels: $2 H$ lub $100 m$

Objaśnienia – Explanations:

H – głębokość wykopu lub posadowienia – depth of excavation or foundation level [m];

D – średnica tunelu – tunnel diameter [m].

Z jednej strony jest to podejście bezpieczne z punktu widzenia zakresu prowadzonych obserwacji w tym sensie, że monitoringiem objęty jest znaczny obszar, co ma zapewnić wychwycenie wszelkich zmian w otoczeniu realizowanego obiektu. Z drugiej strony jest to podejście, które może znacząco podnieść koszty prowadzenia monitoringu, a w przypadkach wykopów zagłębionych do $20 \div 25 m$ (zwłaszcza w korzystnych warunkach grun-

towych) może być wręcz ekonomicznie nieuzasadnione w warunkach zwartej zabudowy miejskiej. Oczywiście autorzy wytycznych (ITA-AITES, 2014) zastrzegają, że są to ogólne zalecenia w przypadku braku innych przesłanek. Jednak brak odniesienia do warunków gruntowych, które bazując na doświadczeniach lokalnych, mogą znacząco ograniczyć strefę oddziaływań, wydaje się zbyt dużym uproszczeniem.

OCENA ODDZIAŁYWANIA NA PODSTAWIE ANALIZ NUMERYCZNYCH

Możliwości obliczeń

Dla obiektów budownictwa podziemnego, gdzie dominują oddziaływania związane z otaczającym podłożem, powszechnie akceptowane jest konserwatywne podejście do wymiarowania konstrukcji, szczególnie ścian szczelinowych, z uwagi na stan graniczny nośności (SGN). Projektanci świadomi ryzyka związanego z projektem często unikają nadmiernej optymalizacji tych elementów. Jest to w dużym stopniu efekt zarówno słabego rozpoznania warunków podłoża, zwykle zleconego przez inwestora w fazie przedprojektowej, jak i ograniczonego budżetu dającego niewielkie możliwości realizacji badań uzupełniających. Takie bardzo asekuracyjne podejście projektowe sprawia, że nawet słabe rozpoznanie rzadko ma katastrofalne skutki, jednak często złudne oszczędności poczynione w fazie projektowej potęgują wydatki związane z samą realizacją, np. konieczność dodatkowego wzmocnienia fundamentów czy podłoża, konieczność realizacji dodatkowego rozparcia obudowy czy późniejszą naprawę uszkodzeń obiektów w strefie wpływu inwestycji.

Optymalizacja rozwiązań, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa (element świadomego zarządzania ryzykiem), daje na etapie projektowym (istnieje więcej możliwości minimalizacji ryzyka na różnych etapach procesu inwestycyjnego) możliwość wykorzystania przy analizach oddziaływania coraz bardziej nowoczesnych narzędzi w postaci programów bazujących na metodach numerycznych, z zaimplementowanymi zaawansowanymi modelami podłoża. Zwiększająca się dostępność tego typu oprogramowania, zarówno wśród instytucji naukowych, jak i firm komercyjnych, wpływa na wzrost zainteresowania dokładniejszymi prognozami zachowania konstrukcji oraz obiektów zlokalizowanych w sąsiedztwie. Jest to też efekt związany ze wzrostem stopnia skomplikowania projektowanych obiektów podziemnych, często posadawianych w równie skomplikowanych warunkach gruntowych. W tych wypadkach uproszczone analizy mogą być niewystarczające dla ostatecznego rozstrzygnięcia kwestii zagrożeń związanych z realizacją. W przypadku analiz, gdzie dodatkowo należy uwzględnić wytrzymałość strukturalną obiektu (np. tunele) w skomplikowanych warunkach podłoża (zmiennoscie przestrzennej warstw), konieczne staje się stosowanie modelowania 3D. Główną zaletą modelowania przestrzennego jest wiarygodniejsze odzwierciedlenie zachowania konstrukcji w przypadku złożonego układu jej elementów.

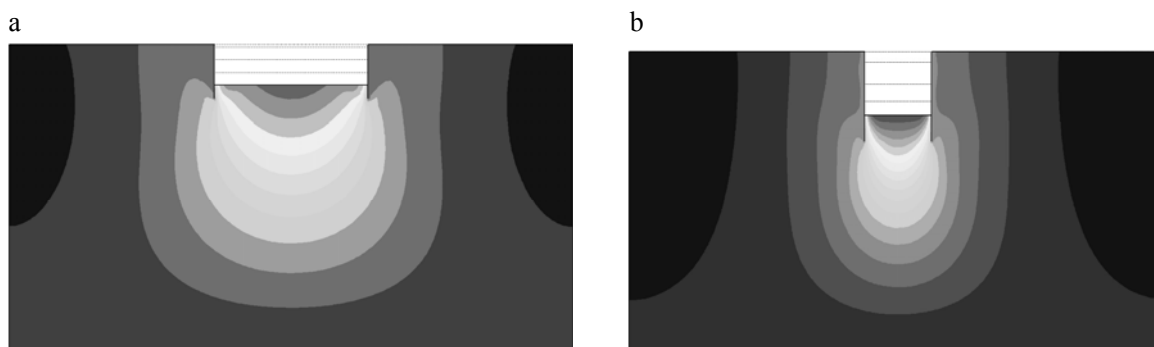
Metoda elementów skończonych jest jedną z dokładniejszych metod umożliwiających obliczanie wartości przemieszczeń podłoża w sąsiedztwie głębokiego wykopu, jest również jedną z nielicznych metod ustalania odprężenia dna wykopu (Godlewski, 2006; Popielski, 2012; Mitew-Czajewska, 2016). Poprawność wyników tej metody należy weryfikować na podstawie pomiarów bezpośrednich. Dotyczy to głównie kalibracji parametrów odkształceniowych podłoża gruntowego.

Wpływ odprężenia wykopu

Ocena i analiza przemieszczeń dodatnich wynikających z odprężenia podłoża jest najczęściej słusznie pomijana (minimalne wartości), ponieważ mają one z reguły korzystny wpływ na warunki pracy konstrukcji budynku – redukują przemieszczenia ujemne. Niezbędne staje się uwzględnianie tego zjawiska w przypadkach, jeśli występują w podłożu prekonsolidowane grunty spoiste, głównie dotyczy to ilów neogeńskich, wykonywany jest obiekt o nieznacznych obciążeniach, dających dużo mniejsze naciski na grunt w poziomie posadowienia niż występujące tu naprężenia przed rozpoczęciem budowy (np. stacja metra) lub gdy podczas wykonywania obiektu przewiduje się nietypowo długi okres realizacji części podziemnej.

W praktyce najczęściej analiza odprężeń dotyczy tylko przypadku pierwszego, tzn. występowania prekonsolidowanych gruntów spoistych. W warunkach warszawskich głębokie wykopu bardzo często sięgają do podłoża zbudowanego z ilów mio-plioceńskich formacji poznańskiej. Grunty te wykazują wyraźną tendencję do odprężania i pęcznienia i obserwowane są w nich największe wartości wypiętrzeń dna i podnoszenia konstrukcji. Jeśli chodzi o przypadek drugi, to w 80% obciążenia od obiektu są zbliżone do wartości nacisków w poziomie posadowienia istniejących przed realizacją. Dotyczy to głównie obiektów o kilkunastu kondygnacjach nadziemnych. Poza tym można zminimalizować skutki odprężania, wykonując konstrukcję metodą *top & down*, czyli realizowanie równoległe kondygnacji podziemnych i nadziemnych. Sytuacja opisana w przypadku trzecim, gdzie przewidywany jest nietypowo długi okres realizacji wykopu, jest rzadko spotykana w praktyce. Tego rodzaju przypadki mogą dotyczyć sytuacji nietypowych związanych z awariami lub wstrzymaniem prac z powodów prawno-administracyjnych.

Warto zauważyć, że strefa wpływu odprężenia dna zaznacza się na powierzchni wokół wykopu. Natomiast strefa zasięgu tzw. warstwy aktywnej podłoża wartościami znaczącymi sięga dwukrotnej głębokości wykopu. Wartość maksymalnych przemieszczeń pionowych dla etapu wykonania wykopu docelowego, przed wykonaniem płyty dennej (wykop w ilach), dochodzi do kilkudziesięciu (50–70) milimetrów w środkowej części wykopu. Wyraźnie przekłada się to na zasięg i wielkość oddziaływania wokół wykopu (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład przemieszczeń pionowych (faza wykopu docelowego): a – dla szerokiego wykopu ($B_w = 60$ m), b – dla wąskiego wykopu ($B_w = 20$ m)

Fig. 4. Distribution of vertical displacements (the final stage of excavation): a – for “wide” excavation ($B_w = 60$ m), b – for narrow excavation ($B_w = 20$ m)

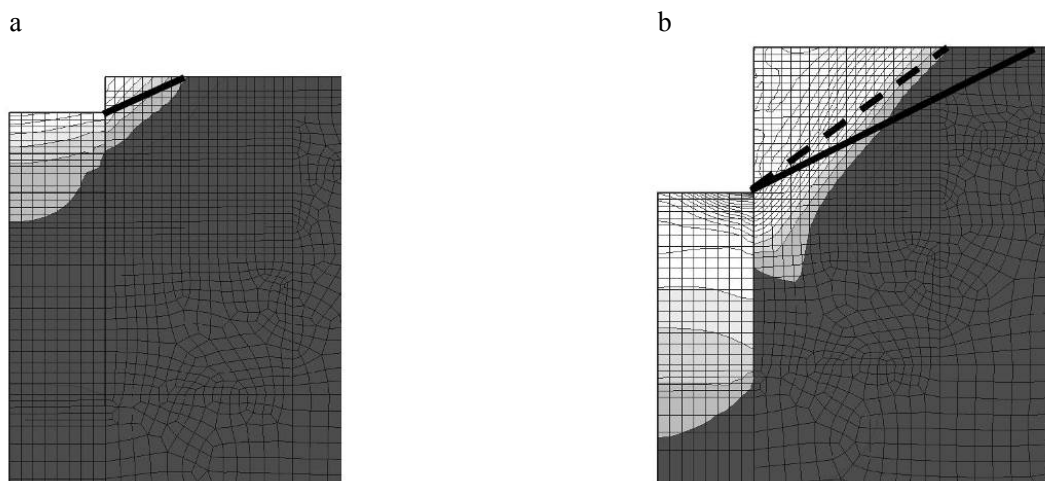
Czynnikami warunkującym jest tu, poza głębokością wykopu i rodzajem gruntów w podłożu, również geometria wykopu. Dla porównania zasięgu stref odprężenia gruntu poniżej przedstawiono rozkład przemieszczeń pionowych dla modelowych (parametry wykalibrowano na przypadku rzeczywistym) wykopów: „szerokiego” – $B_w = 60$ m (rys. 4a) i „wąskiego” – $B_w = 20$ m (rys. 4b), w podłożu ujednoliconym, zbudowanym z ilów „plioceńskich”, przy jednakowych założeniach dotyczących konstrukcji obudowy (Godlewski, 2006). Widać wyraźny większy wpływ, gdy jedyną zmienną w modelu jest geometria wykopu, to wielkość przemieszczeń i zasięg oddziaływania jest większy dla wykopu „szerokiego”.

Wpływ sztywności podłoża

Zapisy podane Eurokodzie 7 (PN-EN 1997-1 i 2:2008) wymagają, aby w obliczeniach przemieszczeń uwzględnić sztywność podłoża i elementów konstrukcyjnych oraz kolejność realizacji robót budowlanych. Ponadto

zaleca się stosowanie modeli obliczeniowych opisujących pełną zależność naprężenie – odkształcenie gruntu lub przyjęcie sztywności odpowiadającej przewidywanemu zakresowi odkształceń w przypadku zastosowania modeli liniowo-sprężystych. Warunki te są w pełni spełnione w przypadku analiz numerycznych MES, szczególnie gdy wykorzystywane są zaawansowane nieliniowo sprężyste modele konstytutywne, takie jak Hardening Soil with small strain stiffness (HSs) – Truty (2008). Możliwość zastosowania tego modelu dla oceny przemieszczeń terenu w sąsiedztwie konstrukcji oporowych ma potwierdzenie w bardzo bogatej literaturze tematu (Truty, 2008; Siemińska-Lewandowska, 2010; Popielski, 2012; Godlewski, Szczepański i Bogusz, 2015), gdzie wyniki analiz z modelem HSs zapewniają dobre dopasowanie do wartości rzeczywistych. Przed przystąpieniem do wykonywania badań należy zastanowić się nad warunkami pracy gruntu w zależności od rozpatrywanego zagadnienia.

Dobór modelu obliczeniowego określany jest rodzajem zadania (rodzajem konstrukcji), natomiast rodzaj modelu determinuje parametry niezbędne do obliczeń, co warunkuje metody badań w celu ich określenia. Jak widać na rysunku 5b, w przypadku modelu HSs uwzględnienie nieliniowej zależności naprężenie – odkształcenie oraz efektów związanych z historią naprężeń (np. odprężenie wykopu) pozwala na modelowanie zbliżonych do rzeczywistych zachowań konstrukcji (widoczny charakter odkształceń ściany szczelinowej ma potwierdzenie w obserwacjach i literaturze). W tym kontekście strefy podane w Instrukcji ITB są bezpieczne, ale mają charakter asekuracyjny – strefy prognozowanych wpływów są rozszerzone. To samo zadanie (rys. 5a) zasymulowane dla znacznie płytszego wykopu, gdzie wpływ wzrostu sztywności gruntu wraz z głębokością będzie mniej wyraźny, wskazuje na zasięg prognozowanej strefy wpływu, pokrywający się z zasięgiem wyznaczonym na podstawie metody półempirycznej, podanej w Instrukcji ITB (2002). Dodatkowo w tego rodzaju analizach efekt pominięcia zmian „sztywności” podłoża wraz z przyrostem odkształcenia przekłada się często na przeszacowaną (większą) prognozę przemieszczeń związanych z odprężeniem dna wykopu niż to ma miejsce w rzeczywistości.



Rys. 5. Rzeczywisty przykład analiz MES zakresu i wielkości oddziaływania głębokiego wykopu – izolinie przemieszczeń dla fazy wykopu docelowego, wynik dla modelu HSs (mat. ITB): a – wykop o gł. $H = 5$ m, b – wykop o gł. $H = 25$ m

Fig. 5. Real example of FEM analysis with the range and the values of displacements resulting from deep excavation – displacement isolines for the final stage of the excavation, results for HSs model (ITB materials): a – excavation depth $H = 5$ m, b – excavation depth $H = 25$ m

Oprócz rozważań teoretycznych opisany przypadek ma swoje wymierne konsekwencje w praktyce. W zależności od przyjętego modelu zmienia się zakres i wielkość oddziaływań, co przekłada się w ocenie oddziaływania na otoczenie na warunek dopuszczenia danego rozwiązania projektowego. W przypadku przekroczeń wartości dopuszczalnych, wskazanych w prognozie oddziaływania, konieczna jest zmiana założeń projektowych (np. dodatkowe rozparcia czy kotwienie), generując dodatkowe koszty.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzenie dokładnej ilościowej oceny przemieszczeń obiektów sąsiednich z wykorzystaniem zaawansowanych modeli obliczeniowych pozwala oszacować ryzyko związane z realizacją i efektywnie nim zarządzać. Znajomość przewidywanego rozkładu przemieszczeń daje nie tylko możliwość analizy stanu granicznego użyteczności dla sąsiadującej zabudowy i infrastruktury, ale również stanowi podstawę do określenia zakresu terenu i elementów, które należy objąć monitoringiem. Postęp związany z rozwojem metod badawczych w zakresie rozpoznania podłoża oraz narzędzi projektowych (programy bazujące na metodach numerycznych, np. MES 3D, z zaimplementowanymi zaawansowanym modelami obliczeniowymi) pozwala obecnie na wykonywanie skomplikowanych analiz z uwzględnieniem takich elementów, jak:

- skomplikowane warunki podłoża (zmiennosc przestrzenna warstw),
- wytrzymałość strukturalna obiektu (tunele, istniejące ściany szczelinowe),
- skomplikowanie konstrukcji nowo projektowanych obiektów i złożoność prac w fazie ich realizacji,
- możliwość odtworzenia stanu obecnego oraz prognozy zmian w czasie,
- oczekiwania odbiorców w zakresie spełnienia ustalonych wartości dopuszczalnych oddziaływań na obiektach istniejących.

Oceniając obecną praktykę projektową, należy zauważyć znaczną poprawę sytuacji w kontekście świadomości projektantów i wykonawców. Wraz z rosnącym stopniem skomplikowania realizowanych projektów na terenach zurbanizowanych w niektórych przypadkach metodyka podana w Instrukcji ITB (Wysokiński i Kotlicki, 2002) powinna stanowić jedynie wstęp do oceny ryzyka geotechnicznego związanego z realizacją. W przypadku występowania obiektów o skomplikowanej geometrii części podziemnej oraz w skomplikowanych warunkach gruntowych (3. kategoria geotechniczna) należy taką ocenę uzupełnić o szczegółowe analizy z wykorzystaniem bardziej zaawansowanych modeli obliczeniowych opartych na metodach numerycznych. Tego rodzaju podejście na terenie Warszawy jest już oczekiwane (np. z uwagi na wymagania podane w wytycznych Zarządcy metra z 2014 roku) w przypadku nowych realizacji w sąsiedztwie istniejących obiektów metra.

Nie należy też zapominać, że kompleksowe podejście do problemu oceny oddziaływań powinno odnosić się zarówno do wpływów statycznych, jak i dynamicznych, rozpatrywanych na poszczególnych etapach realizacji obiektu.

PIŚMIENNICTWO

- Clough, G. W. i O'Rourke, T. D. (1990). Construction Induced Movements of In-Situ Walls. Proc. ASCE Conf. on Des and Perf. of Earth Retaining Struct. *Geotech. Spec. Publ.*, 25, 439–470.
- Godlewski, T. (2006). *Monitoring odprężania gruntów w wyniku głębokich wykopów*. Materiały konferencyjne: Problemy rzeczoznawstwa budowlanego. (strony 159–168). Warszawa: ITB.
- Godlewski, T. (2016). Oddziaływanie w przestrzeni podziemnej obiektów w warunkach infrastruktury miejskiej, przykład z metra warszawskiego. *Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele*, 3 (56), 70–76.
- Godlewski, T. i Wysokiński, L. (2012). Tunelowanie w warunkach infrastruktury miejskiej na przykładzie metra w Warszawie. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 2, 21–28.
- Godlewski, T., Szczepański, T. i Bogusz, W. (2015). Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności (G_0) gruntów w praktyce geotechnicznej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 36 (3), 371–376.

- ITA-AITES Report (2014). *ITAttech Guidelines on Monitoring Frequencies in Urban Tunneling*. ITAttech Activity Group MONITORING, 20975 ITA Report No. 3.
- Mitew-Czajewska, M. (2016). Evaluation of hypoplastic clay model for deep excavation modelling. *Archives of Civil Engineering*, LXII, 73–86.
- PN-EN 1997-1 i 2:2008. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. Część 2: Badania podłoża gruntowego.
- Popielski, P. (2012). Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska*, 61.
- Prace własne ITB-NG-903/P/06 (2006). *Ustalenie stref wpływu budowy II linii metra dla odcinka śródmiejskiego od stacji „Nowy Świat” do stacji „Dworzec Wileński” w Warszawie na zabudowę terenu*. Warszawa: ITB.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, (Dz.U. 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami).
- Siemińska-Lewandowska, A. (2010). *Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Truty, A. (2008). Szywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego. *Czasopismo Techniczne*, 3-Ś, 107–126.
- Wymagania techniczne dla inwestycji projektowanych i realizowanych, mogących oddziaływać na obiekty metra* (2014). ITB, Biuro Projektów „Metroprojekt” Sp. z o.o., na zamówienie Metra Warszawskiego, Warszawa.
- Wysokiński, L. i Kotlicki, W. (2002). *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów*. Instrukcja ITB nr 376, Warszawa.

GEOTECHNICAL INTERACTION OF STRUCTURES IN UNDERGROUND SPACE – REDEFINITION OF THE REQUIREMENTS

ABSTRACT

The paper presents the problem of geotechnical interaction of structures constructed in underground space. The national practice in Poland is to use the ITB recommendations No. 376/2002 to assess the impact of a new investment. Nowadays, for more accurate prediction of displacements, the use of advanced numerical methods is necessary; they are taking into account the unloading of the ground, as well as the stress-dependence of stiffness. This and the new experiences from the construction of the II metro line, creates the need for revision of previous findings and partial review of requirements. The aim is to revise and update the ITB recommendations in the field of deep excavation execution and tunneling activities.

Key words: zone of influence, underground space, displacements, FEM