

# GŁĘBOKIE POSADOWIENIA BUDYNKÓW I METODY ICH ANALIZY STATYCZNEJ

**Damian SIWIK\***, **Czesław MIEDZIAŁOWSKI**

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono sposoby realizacji i metody obliczeń statycznych wykopów i konstrukcji w przypadku głębokich posadowień budynków. Przedstawiono aktualnie stosowane metody oraz rysujące się kierunki ich dalszego rozwoju preferując metodę elementów skończonych. Wskazano na podawane przez badaczy trudności i problemy w trakcie realizacji analiz obliczeniowych oraz braki w zakresie kompletności modeli w odniesieniu do faz realizacji inwestycji. Przedstawiono własny przykład obliczeniowy wpływu głębokiego posadowienia budynku w poszczególnych fazach realizacji na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy podłoża gruntowego i budynku w sąsiedztwie.

**Słowa kluczowe:** głębokie wykopy, głębokie posadowienia budynków, sąsiednia zabudowa, metody obliczeniowe, modele 3D i śledzące.

## 1. Wprowadzenie

Problematyka głębokich wykopów jest ważna w procesie projektowania i realizacji obiektów budowlanych z uwagi na znaczącą ingerencję w podłoże gruntowe i wpływ na zabudowę sąsiednią (Siemińska-Lewandowska, 2001, 2010; Szulborski i in., 2009).

Odkształcalność podłoża gruntowego w formie wypiętrzeń lub osiadań wpływa na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy obiektów (Michalak, 2009). Są to procesy wzajemnie zależne, czyli interakcyjne: podłoże gruntowe – „nowy” budynek – zabudowa istniejąca.

W artykule zostaną omówione sposoby realizacji i obliczenia obudowy głębokich wykopów, wykonawstwa głębokich posadowień oraz głównie modele do analizy statycznej wpływu głębokich posadowień na otoczenie wraz z podaniem pożądanych kierunków dalszych badań. Głębokie posadowienia budynków stosowane są zazwyczaj gdy istnieje konieczność przeniesienia znacznych obciążeń projektowych na nośne warstwy gruntu (budynki wysokie) lub gdy wymaga tego rodzaj realizowanego obiektu (podziemia budynków użyteczności publicznej, podziemne garaże i parkingi).

Głębokie wykopy są to realizacje o głębokości powyżej 3m, o ścianach pionowych zabezpieczonych obudową wykonaną w jednej z następujących technologii: ściana szczelinowa, obudowa berlińska, ściana z grodziec stalowych, palisada z pali lub mikropali, ściana z kolumn

wykonanych metodą iniekcji strumieniowej, ściana gwoździowana (Siemińska-Lewandowska, 2010). Jak podaje Michalak (2008) w procesie realizacji głębokich posadowień można wyróżnić następujące etapy realizacji: wykonanie obudowy wykopu, głębenie wykopu wraz z sukcesywnym podpieraniem jego ścian, obniżenie zwierciadła wody gruntowej, wykonanie konstrukcji części podziemnej budynku, wykonanie konstrukcji nadziemnej, rozpoczęcie eksploatacji budynku.

Jak wynika z analiz przeprowadzonych przez Szulborskiego i in. (2009), największy wpływ na wartości osiadań terenu przyległego do realizowanego wykopu mają: rodzaj podłoża gruntowego i zastosowanej obudowy, schemat statyczny ścian oraz technologia realizacji prac ziemnych i budowlanych w wykopie.

## 2. Metody realizacji głębokich wykopów

Wybór technologii obudowy wykopu oraz sposobów prowadzenia prac w wykopie zależy od wielu czynników, między innymi: od rodzaju gruntów, głębokości zalegania zwierciadła wód gruntowych oraz od zurbanizowania terenu w sąsiedztwie inwestycji.

Najczęściej stosowanymi technologiami zabezpieczenia ścian wykopu są: ściany szczelinowe, obudowa berlińska, ściany z grodziec stalowych (tak zwana ścianka szczelna).

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.siwik@pb.edu.pl

Ściana szczelinowa (rys. 1) wykonywana jest w technologii monolitycznej z betonu lub żelbetu. Beton tłoczony jest do wcześniej wykonanej szczeliny przez rurę wlewową pod osłoną cieczy bentonitowej lub polimerowej. Grubość ściany wynika z obliczeń statycznych, a także jest podyktowana szerokością chwyta.



Rys. 1. Zastosowanie metody stropowej przy budowie obiektu biurowo-usługowego w Warszawie (www.geotekst.pl)

Obudowę berlińską (rys. 2) i ściankę szczelną zaliczyć można do konstrukcji wiotkich. Ze względu na dość duże przemieszczenia poziome od gruntu zalegającego za obudową, rozwiązania te wymagają dodatkowych wzmocnień w postaci rozpór lub kotew gruntowych.



Rys. 2. Budowa Szybki Tramwaj w Krakowie – zastosowanie technologii obudowy berlińskiej (www.fundamenty.com.pl)

Z uwagi na niewielki wymiar poprzeczny ściany obudowy wykopu, jej sztywność na zginanie jest stosunkowo nieduża. Konieczne jest więc zastosowanie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych, dla zapewnienia stateczności i ograniczenia przemieszczeń obudowy (polepszenie schematu statycznego).

Do najbardziej rozpowszechnionych rozwiązań usztywniających ściany wykopu, zalicza się: wykop w obudowie wzmocnionej rozporami, wykop w obudowie kotwionej, metodę stropową (metoda stropowa klasyczna, metoda półstropowa, metoda „top&down”).

Miejsca podparcia obudowy wykopu, w przypadku technologii rozporowej i kotwionej wynikają bezpośrednio z analiz statycznych. Dodatkowo, przy wykopach w obudowie kotwionej, na etapie projektowania należy uwzględnić obniżenie zwierciadła wód gruntowych.

Metoda stropowa (rys. 1) i jej odmiany wykorzystywane są najczęściej w przypadku, gdy istnieje duże niebezpieczeństwo niekorzystnego oddziaływania wykopu na sąsiednią zabudowę. Stosowana jest wyłącznie w połączeniu z technologią ściany szczelinowej. Obudowa, w tym przypadku podparta jest sztywnymi tarczami poziomymi (stropy kondygnacji podziemnej).

Bardziej obszerny opis technologii wykonywania głębokich wykopów wraz fazowaniem robót oraz przykładami ich zastosowania znaleźć można w pracach, między innymi, Terlikowskiego i Dłużewskiego (2001) oraz Siemińskiej-Lewandowskiej (2010).

### 3. Metody analizy statycznej

Metody stosowane do analizy statycznej głębokich posadowień podzielić można na trzy podstawowe grupy: metody służące do obliczania przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie obudowy wykopu (metoda klasyczna, metoda modułu reakcji podłoża), metody analityczne służące do szacowania krzywej deformacji podłoża za ścianą obudowy wykopu, metody numeryczne (głównie metoda elementów skończonych), służące do kompleksowej analizy realizowanej inwestycji.

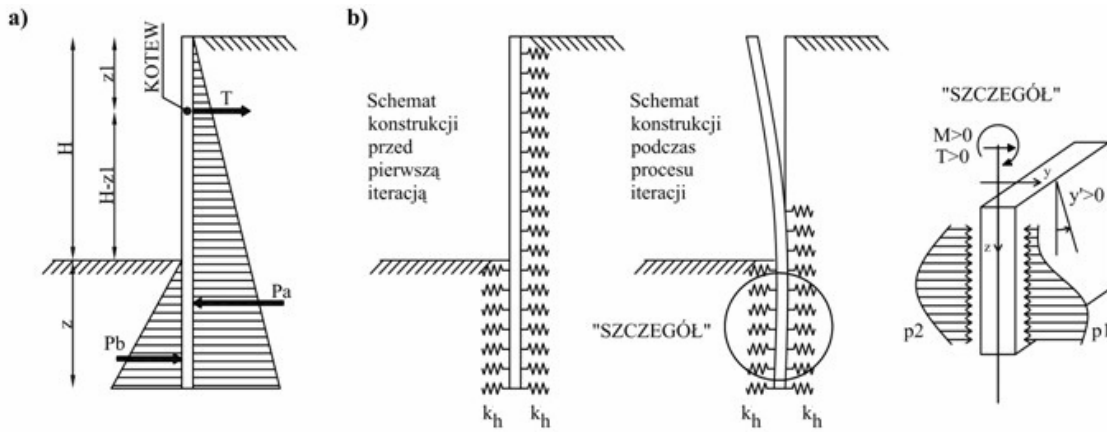
#### 3.1. Metody obliczania przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie obudowy wykopu

Metoda klasyczna (Siemińska-Lewandowska, 2010) opracowana została przez Pecka w 1969 roku (rys. 3a). Jako schemat statyczny ściany w metodzie tej, przyjmuje się ustrój prętowy obciążony parciem i odporem gruntu oraz siłami skupionymi reprezentującymi oddziaływanie kotew, rozpór lub stropów.

Metoda modułu reakcji podłoża (Siemińska-Lewandowska, 2010) sformułowana została przez Balaya w 1985 roku (rys. 3b). Metoda ta uwzględnia nieliniowe zachowanie gruntu oraz jego współpracę z obudową wykopu, poprzez zastosowanie iteracyjnego rozwiązywania równania równowagi. Jako model gruntu przyjmuje się model podłoża Winklera, którego oddziaływanie na ścianę wykopu można zastąpić układem sprężyn o sztywności  $k_h$ . Jako schemat statyczny ściany przyjmuje się belkę statycznie niewyznaczalną obciążoną parciem ośrodka i nieznaną reakcją podłoża gruntowego.

Równowaga jednostkowego elementu ściany (rys. 3b) na głębokości, opisana jest równaniem:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left( EJ(z) \frac{d^2 y}{dz^2} \right) + p_2(z) = p_1(z) + p_h(z) \quad (1)$$



Rys. 3. Model obliczeniowy ściany wykopu (Siemińska-Lewandowska, 2010): a) metoda klasyczna (rozkład parcia i odporu), b) metoda modułu reakcji podłoża

gdzie:  $EJ(z)$  jest sztywnością ściany na zginanie,  $p_1(z)$ ,  $p_2(z)$  są poziomym parciem gruntu po jednej oraz po drugiej stronie ściany, a  $p_h(z)$  jest różnicą parć hydrostatycznych.

Rozwiązaniem ogólnym równania (1) jest funkcja przemieszczeń obudowy wykopu  $y(z)$ , dla której warunki brzegowe sformułowane są w postaci:  $y(z = 0) \neq 0$  oraz  $y(z = h) = 0$ .

Metoda ta pozwala na wyznaczenie przemieszczeń i sił wewnętrznych w ścianie, na każdym etapie realizacji wykopu. Istnieje także możliwość zamodelowania kotew gruntowych, rozpór oraz stropów podpierających obudowę wykopu.

### 3.2. Metody analityczne służące do szacowania krzywej deformacji podłoża za ścianą obudowy wykopu

Metoda L. C. Jen do wyznaczania deformacji powierzchni osiadań gruntu za ścianą wykopu, bez uwzględnienia obciążenia naziomu (Jen, 1998) bazuje na zależnościach wyprowadzonych na podstawie analiz numerycznych i doświadczalnych, prowadzonych w okolicach Bostonu. Analizy numeryczne przeprowadzone zostały z wykorzystaniem systemu ABAQUS, bazującego na metodzie elementów skończonych. Podaną metodę opracowano dla gruntów gliniastych przyjmując, że wykop zabezpieczony jest ścianą o szerokości 0,9 m podpartą sztywnymi rozporami poziomymi co 2,5 m. Dla wykopów zabezpieczonych ścianą o innej szerokości,

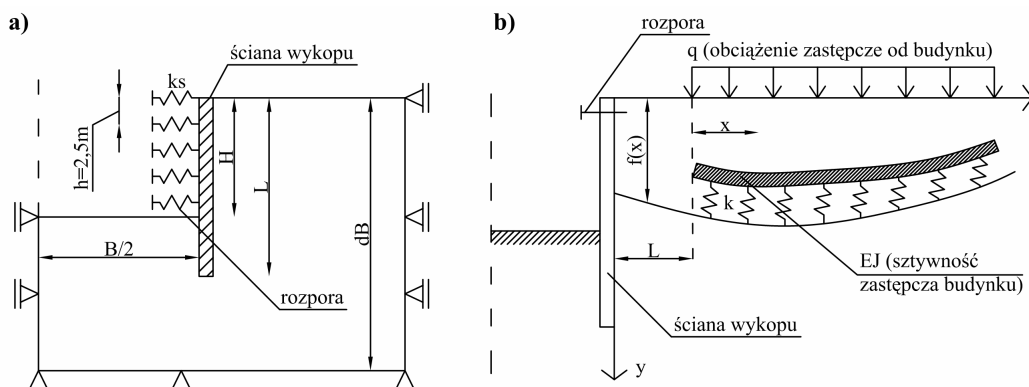
podpartą rozporami podatnymi należy zastosować współczynniki korekcyjne. Model do obliczania osiadań za ścianą wykopu przedstawiono na rysunku 4a.

Dla wykopów głębszych niż 7,5m przemieszczenia pionowe warstw podłoża gruntowego za ścianą wykopu  $\delta_v$  [cm] opisuje wzór:

$$\delta_v = \delta_{vmax} \frac{\left( e^{ax^2+bx} \right) \left( 1 + x^2 \right)^c}{\left( e^{ax_{max}^2+bx_{max}} \right) \left( 1 + x_{max}^2 \right)^c} \quad (2)$$

gdzie:  $x_{max}$  jest odległością od ściany wykopu, przy której występują maksymalne osiadań w m,  $\delta_{vmax} = \lambda \omega \delta_{vmax}^*$  jest maksymalną wartością osiadań gruntu za ścianą wykopu w cm,  $\delta_{vmax}^*$  oraz  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $\pi$ ,  $\omega$  są współczynnikami wyznaczanymi z odpowiednich procedur podanych przez Jena (1998), natomiast  $a$ ,  $b$ ,  $c$  są współczynnikami odczytywanymi bezpośrednio z wykresów opracowanych przez autorkę.

Metoda V. A. Il'icheva do wyznaczania deformacji powierzchni osiadań gruntu za ścianą wykopu, z uwzględnieniem obciążenia naziomu i sztywności budynku (Il'ichev i in., 2006) bazuje na modelu belki sprężystej na podłożu gruntowym Winklera oraz zależnościach wyprowadzonych na podstawie badań doświadczalnych przez Hannika i innych w 2003 roku (rys. 4b).



Rys. 4. Model obliczeniowy krzywej osiadań za ścianą wykopu: a) metoda L. C. Jen (1998), b) metoda V. A. Il'icheva (Il'icheva, 2006) – belka na podłożu sprężystym w pobliżu głębokiego wykopu)

Funkcję opisującą osiadanie budynku za ścianą wykopu wyraża krzywa spełniająca równanie:

$$EJ \frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} + ky(x) = q + k f_1 H_k e^{-\frac{\alpha}{H_k}(x+L)} \quad (3)$$

gdzie:  $H_k$  jest głębokością wykopu w m,  $\alpha$  oraz  $f_1$  są współczynnikami, odpowiednio:  $\alpha = 0,7552$ ,  $f_1 = (01-10,1)\% H_k$ ,  $EJ$  jest sztywnością zastępczą budynku na zginanie w  $\text{kNm}^2/\text{m}$ ,  $w(x)$  jest ugięciem belki, o sztywności  $EJ$  na podłożu Winklera, spowodowanym równomiernie rozłożonym obciążeniem zastępczym  $q$  w m,  $k$  jest współczynnikiem sprężystego osiadania belki, charakteryzującym grunt w  $\text{kN}/\text{m}^3$ , a  $q$  jest obciążeniem zastępczym od budynku w  $\text{kN}/\text{m}$ .

Metoda Michalak do wyznaczania przemieszczeń pionowych powierzchni terenu w sąsiedztwie nowo wznoszonych budynków (Michalak, 2009) opracowana została na podstawie pomierzonych wartości przemieszczeń pionowych oraz metody odkształceń trójosiowych gruntu (metoda analogu sprężystego) z wykorzystaniem programu GEO4.

Funkcje określające przemieszczenia terenu, dla podłoża uwarstwionego (sumowanie po  $i$ ) w sąsiedztwie nowo wznoszonych budynków głęboko posadowionych, zapisać można w postaci:

– dla wykopów realizowanych w podłożu niejednorodnym, gdy pod fundamentem budynku zalegają grunty piaszczyste:

$$V(x) = \left( -0,00883 \frac{x^2}{h^2} + 0,0482 \frac{x}{h} - 0,0655 \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q^* \Delta \omega_i B (1 - v_i^2)}{E_{0i}} \quad (4)$$

– dla wykopów realizowanych w podłożu niejednorodnym, gdy pod fundamentem budynku zalegają grunty ilaste:

$$V(x) = \left( -0,00614 \frac{x^2}{h^2} + 0,0454 \frac{x}{h} - 0,0652 \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q^* \Delta \omega_i B (1 - v_i^2)}{E_{0i}} \quad (5)$$

gdzie:  $x$  jest odległością od ściany wykopu,  $h$  jest głębokością wykopu,  $q^*$  jest ciężarem budynku, zmniejszonym o wartość obciążenia od części podziemnej,  $\omega$  jest współczynnikiem zależnym od kształtu i sztywności fundamentu,  $B$  jest szerokością fundamentu nowo wznoszonego budynku, a  $E_0$  jest modułem odkształcenia pierwotnego gruntu,  $v$  jest współczynnikiem Poissona gruntu.

### 3.3. Metody numeryczne

Z zakresu metod numerycznych wyróżnić można metodę różnic skończonych, metodę elementów brzegowych i metodę elementów skończonych. Największe

zastosowanie spośród podanych metod znalazła metoda elementów skończonych (MES), którą inżynierowie i naukowcy z różnych dziedzin nauki wykorzystują do analizy wielu zagadnień praktycznych i teoretycznych.

Ze względu na rozwój w ostatnich latach podstaw teoretycznych w dziedzinie teorii sprężystości i plastyczności, równań konstytutywnych i modeli ośrodków gruntowych, MES może być stosowana z powodzeniem w analizie głębokich wykopów. Jej główne zalety (Siemińska-Lewandowska, 2010) to możliwość: określenia stanu naprężenia i odkształcenia oraz wyznaczenia pola przemieszczeń w dowolny punkcie zamodelowanego obszaru, uwzględnienia w obliczeniach przepływu wody, temperatury oraz oddziaływań dynamicznych, uwzględnienia złożonych warunków geotechnicznych, analizy zagadnienia przestrzennego (3D) i płaskiego (2D) w zakresie sprężystym oraz uwzględnienia zależności nieliniowych, analizy statycznej całego wykopu wraz z przyległym terenem i sąsiadującą zabudową z uwzględnieniem technologii realizacji inwestycji.

Konieczność określenia parametrów gruntowych oraz dobór odpowiedniego modelu ośrodka gruntowego powodują pewne niedogodności przy stosowaniu metody elementów skończonych w zagadnieniach geotechnicznych. Parametry ośrodka powinny być przy tym wyznaczone we wszystkich analizowanych fazach pracy i przyjmowane do obliczeń jako wartości charakterystyczne, zweryfikowane na podstawie analiz wstecz, przeprowadzonych na podstawie obserwacji osiadań realizowanej inwestycji (Siemińska-Lewandowska, 2001, 2010; Kłosiński, 2010; Truty, 2009).

Sformułowanie zagadnienia metodą elementów skończonych prowadzi do macierzowego układu równań, w postaci  $K \cdot d = F$ . Ze względu na zmienny charakter procesu (etapowanie wykopu i zabudowy) oraz uwzględnienie w obliczeniach numerycznych problemów hydraulicznych i wszelkiego rodzaju nieliniowości najczęściej powyższe równanie zapisuje się w postaci przyrostowej:

$$K \cdot \Delta d = \Delta F \quad (6)$$

gdzie:  $K$  jest macierzą sztywności,  $\Delta d$  jest wektorem niewiadomych przemieszczeń węzłowych w zapisie przyrostowym, natomiast  $\Delta F$  jest wektorem obciążeń węzłowych w postaci przyrostowej.

Równanie (6) zapisać można w postaci macierzowego układu równań (Bentler, 1998):

$$\begin{bmatrix} K & K_v^T \\ K_v & \Delta t \cdot K_h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta d \\ \{\gamma_w h\}_{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{t+\Delta t} - F_t + K_v^T \cdot \{\gamma_w h\}_t \\ \Delta t \cdot (Q_{t+\Delta t} - Q_t) - \Delta t \cdot (1 - \theta) \cdot K_h \cdot \{\gamma_w h\}_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie:  $K_v$  jest macierzą sprzężoną,  $K_h$  jest macierzą filtracji (przepuszczania),  $Q$  jest wektorem przepływu,  $\{\gamma_w h\}$  jest wektorem naporu hydrodynamicznego płynu.

Pierwszy wiersz macierzowego układu równań (7) dotyczy zmiany sił wewnętrznych (siły powstałe od naprężeń rzeczywistych oraz naprężeń związanych z ciśnieniem porowym) spowodowanej zmianą sił zewnętrznych w określonym przedziale czasu. Drugi wiersz macierzowego układu równań (7) związany jest z filtracją wody.

Dodatkowo w przypadku głębokich wykopów konieczne jest zastosowanie odpowiedniej procedury symulującej proces technologiczny prowadzenia robót na budowie (Nogueira i in., 2009): model według Browna i Bookera z 1985 roku, model według Nogueiry z 1998 roku. Modele te pozwalają między innymi na uwzględnienia w obliczeniach numerycznych zjawiska odprężenia dna wykopu.

Stosowane programy komputerowe, bazujące na metodzie elementów skończonych wykorzystywane do analizy głębokich posadowień to między innymi: specjalistyczne programy do zagadnień geotechnicznych (Z\_Soil, GEO 4, GEO 5, MIDAS, PLAXIS, STAGE CRISP, HYDRO-GEO); systemy metody elementów skończonych: ABAQUS, ANSYS.

Programy MES, dla geotechniki zastosowane zostały między innymi w pracach: Bentlera (1998), Siemińskiej-Lewandowskiej (2001), Sorbjana i in. (2001), Gaszyńskiego i Poślajko (2003), Barańskiego i in. (2007), Michalak (2009).

Systemu ABAQUS użyto w pracy Oka i in. (2008), wykorzystując: metodę Browna i Bookera do symulacji wykopu oraz kryterium Coulomba-Mohra do zamodelowania ośrodka gruntowego. Systemu ANSYS użyto

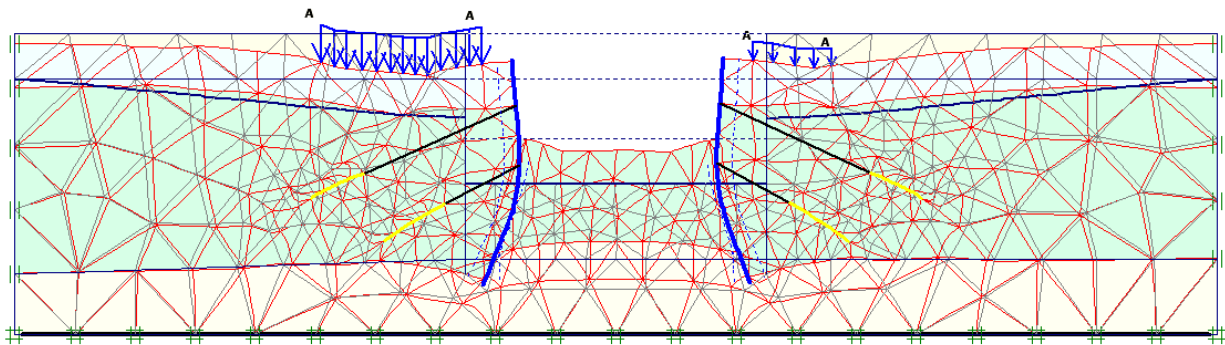
między innymi w pracach Qionga i in. (2006) oraz Weimina i Liminga (2011).

W systemie ANSYS, do symulacji wykopu wykorzystywane są często tak zwane elementy skończone „birth and death”. Dodatkowo ANSYS CivilFEM pozwala na analizę zagadnień związanych ściśle z budownictwem, między innymi zagadnień geoinżynierskich.

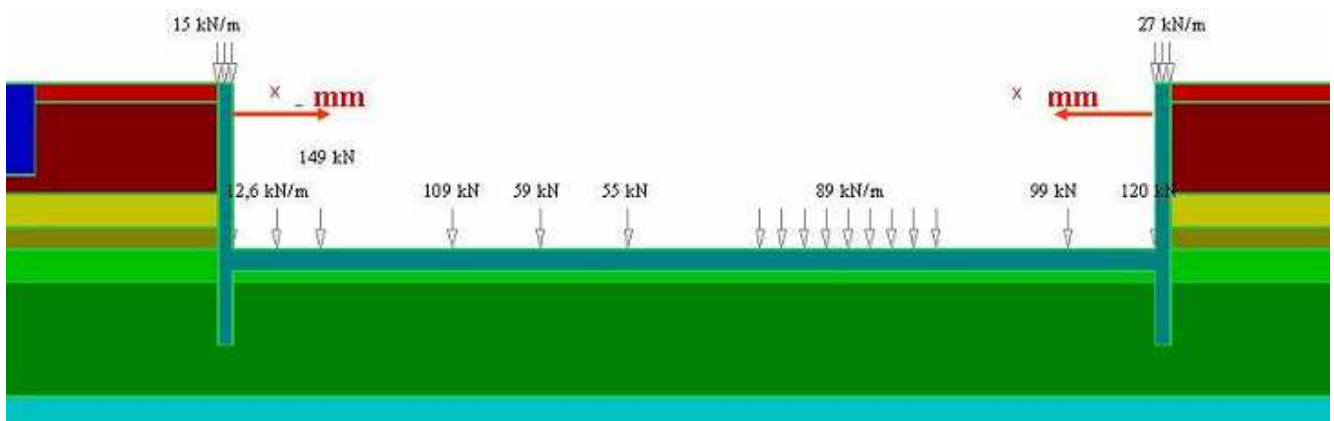
Modelowanie MES głębokiego wykopu i nowo wznoszonego budynku wraz z przyległą zabudową sprowadza się zazwyczaj do modelu 2D, w którym to model budynku głęboko posadowionego i budynku w sąsiedztwie ogranicza się jedynie do ich części podziemnej (w skrajnych przypadkach do zastosowania obciążenia zastępczego, symulującego interakcję konstrukcji z podłożem gruntowym). W przypadku obiektu nowo wznoszonego są to fundamenty, stropy i ściany poprzeczne. W przypadku sąsiednich budynków uwzględnia się zazwyczaj tylko ich fundamenty (Zaczek-Peplińska i Popielski, 2012) z pominięciem rzeczywistej geometrii i sztywności zabudowy.

Przykłady zastosowania modelu 3D do analizy głębokich wykopów, jak i problemy z tym związane, zarówno jeżeli chodzi o wielkość zadania, jak i dobór odpowiednich parametrów materiałowych podane zostały w pracach Trutego (2009) i Świecy (2011).

Na rysunku 5 przedstawiono przykładową dyskretyzację modelu wykopu w obudowie kotwionej, natomiast na rysunku 6 model MES głębokiego posadowienia budynku z uwzględnieniem sztywności jego fundamentu wraz z obciążeniem zastępczym (Barański i in., 2007).



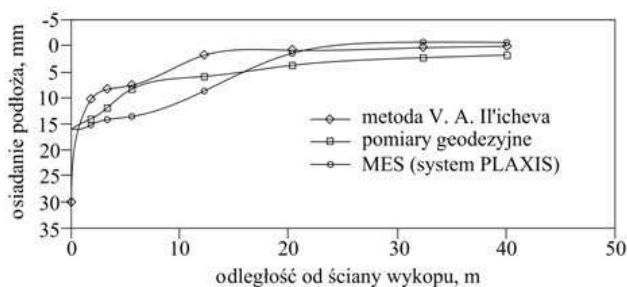
Rys. 5. Model dyskretny głębokiego wykopu z obciążonym naziemem w technologii kotwionej (www.plaxis.nl)



Rys. 6. Schemat modelu MES głębokiego wykopu z uwzględnieniem sztywności fundamentu nowo wznoszonego budynku (Barański i in., 2007)



Na rysunku 7 (Il'ichev i in., 2006) zestawiono wyniki przemieszczeń terenu za ścianą obudowy głębokiego wykopu, otrzymane na podstawie: metody elementów skończonych, metody V. A. Il'icheva i pomiarów geodezyjnych. Krzywe sporządzone na podstawie obliczeń różnią się od tej otrzymanej z pomiarów terenowych w sposób znaczący, między innymi ze względu na to, że zabudowę istniejącą, w obu przedstawionych modelach zastąpiono obciążeniem zastępczym zaniedbując rzeczywistą geometrię i sztywność obiektów w sąsiedztwie.



Rys. 7. Osiadanie podłoża za ścianą wykopu, przy uwzględnieniu obciążenia naziomu (Il'ichev i in., 2006)

#### 4. Uwzględnienie w analizie numerycznej geometrii i sztywności obiektu w sąsiedztwie. Badania własne

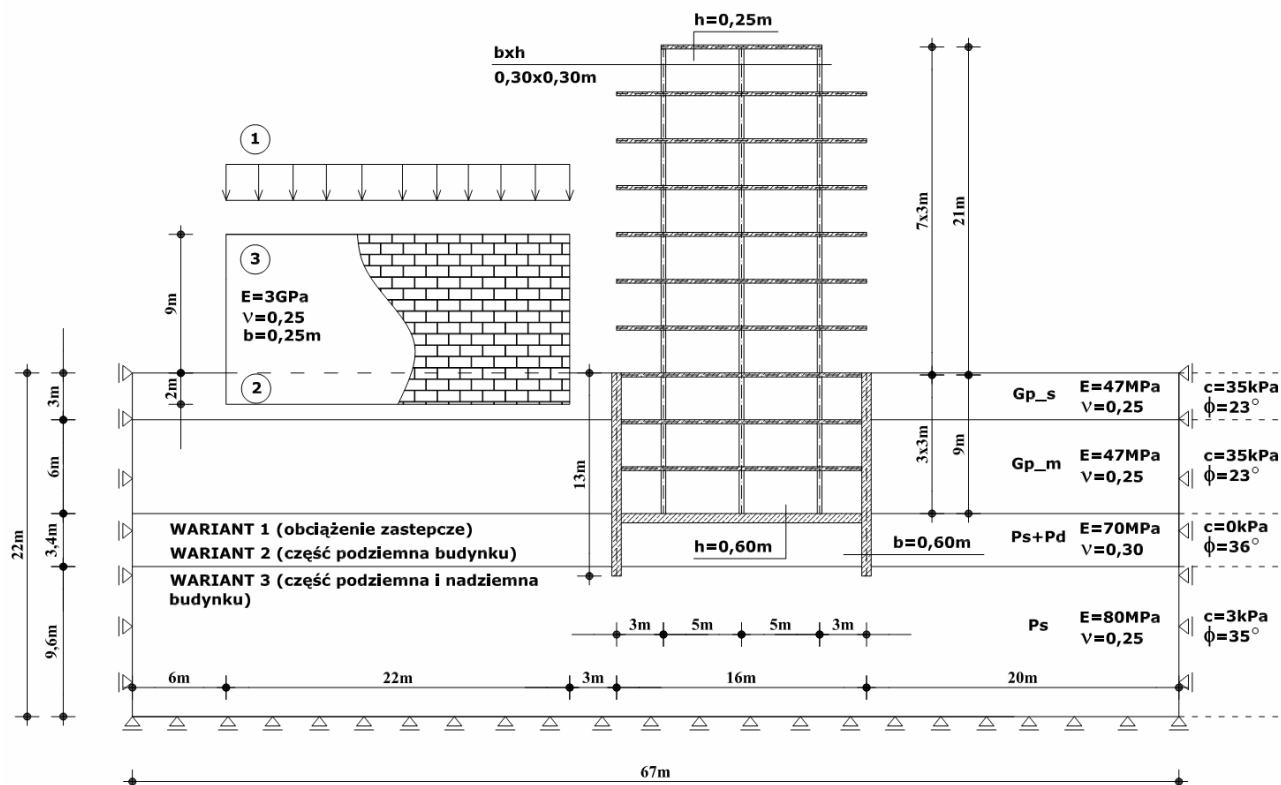
Stosując metodę elementów skończonych przeanalizowano wpływ głębokiego posadowienia budynku w poszczególnych fazach realizacji na stan naprężeniowo-

przemieszczeniowy podłoża gruntowego i modelowego budynku w sąsiedztwie.

Do analizy przyjęto następujące obiekty: realizowany 10-kondygnacyjny o konstrukcji płytowo-słupowej i w sąsiedztwie 4-kondygnacyjny o konstrukcji ścianowej w układzie podłużnym. Płaski schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 8.

Wpływ realizowanego obiektu na sąsiednią zabudowę przeanalizowano w trzech wariantach: wariant 1: zastępując sztywność budynku w sąsiedztwie obciążeniem zastępczym; wariant 2, 3: modelując budynek w sąsiedztwie jako tarczę w płaskim stanie naprężenia – PSN (przy czym, wariant 2 dotyczy tylko części podziemnej modelowego budynku).

Analizę przeprowadzono w zakresie sprężysto-plastycznym w przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia – PSO. Model ośrodka gruntowego przyjęto jako model sprężysto-idealnie plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra (podłoże uwarstwione o parametrach przyjętych na podstawie pracy Zaczek-Peplińskiej i Popielskiego, 2012). Ścianę modelującą budynek w sąsiedztwie przyjęto jako murowaną:  $E_m = 3\text{GPa}$ ,  $\nu = 0,25$ ,  $b = 0,25\text{cm}$  (grubość ściany). Natomiast na parametry materiałowe obiektu „nowego” o konstrukcji płytowo-słupowej przyjęto:  $E_{pt} = E_{sl} = 30\text{GPa}$ ,  $\nu = 0,16$ . Dyskretyzację modelu wykonano wykorzystując elementy czterowzłowe (ośrodek gruntowy, budynek w sąsiedztwie) oraz belkowe (słupy, ściana szczelinowa). Pozostałe dane obliczeniowe (między innymi podstawowe wymiary) przedstawiono na rysunku 8.



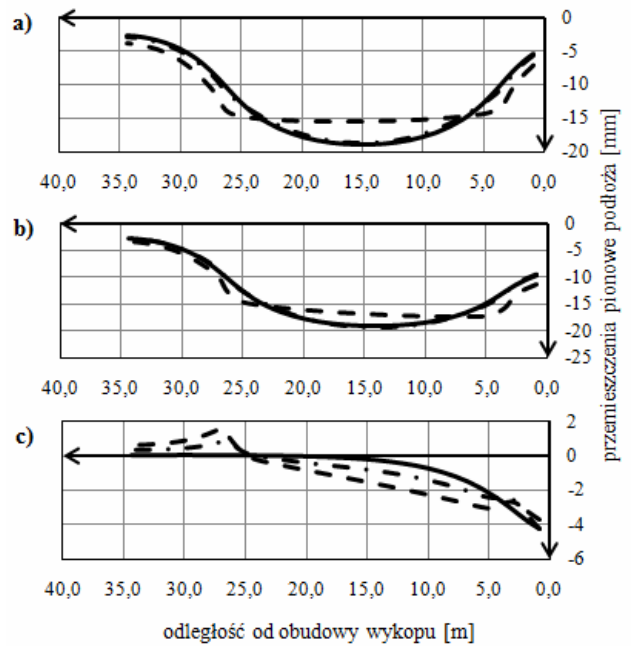
Rys. 8. Wariantowy model obliczeniowy MES do analizy głęboko posadowionego budynku wraz z sąsiednią zabudową

W analizie uwzględniono następujące fazy realizacji głębokiego posadowienia budynku: stan naprężeniowo-przemieszczeniowy układu wywołany pierwotnym posadowieniem budynku w sąsiedztwie, realizację pełną metodą stropową części podziemnej, a następnie części nadziemnej nowo wznoszonego obiektu, a także uwzględnienie w obliczeniach fazy użytkowania budynku.

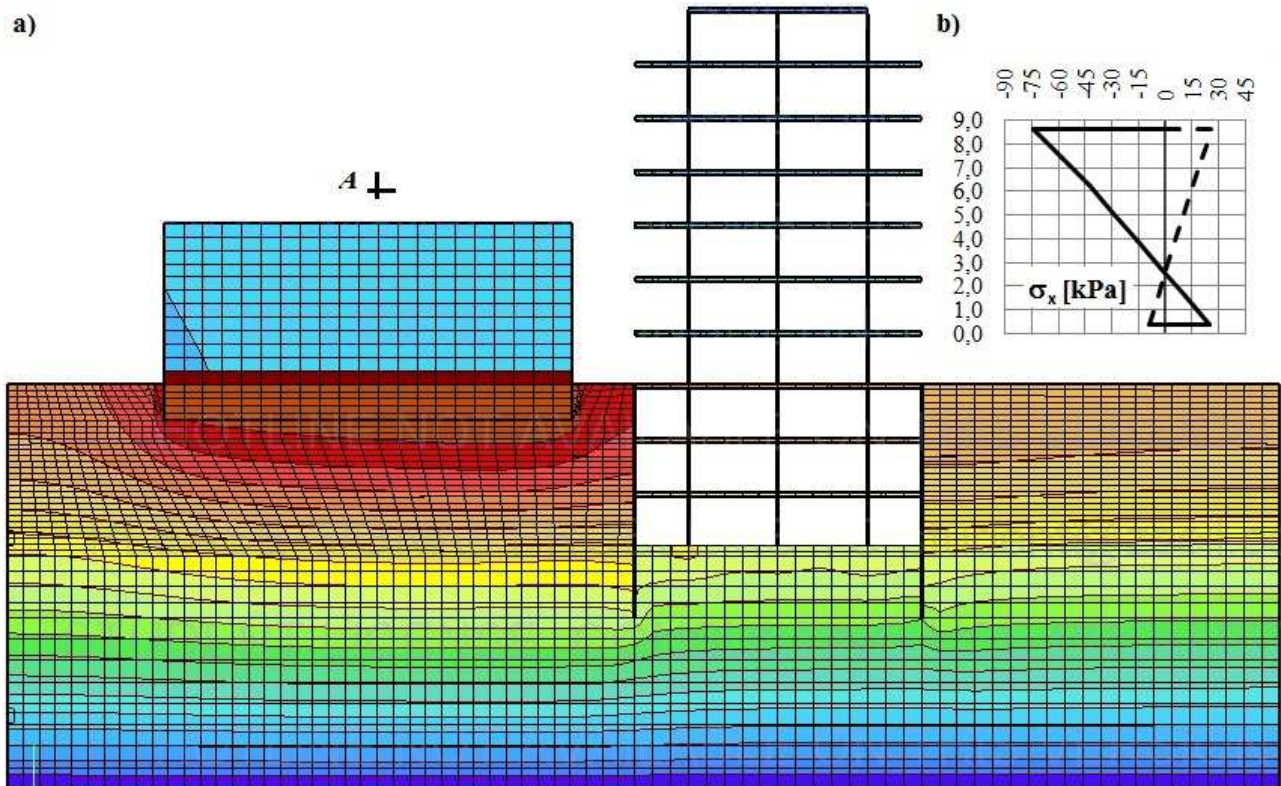
Przykładowe wyniki przemieszczeń podłoża pod fundamentem budynku w sąsiedztwie nowo wznoszonego obiektu przedstawiono na rysunku 9.

Trajektorie przemieszczeń w modelu w fazie końcowej (stan użytkowania obiektu) oraz wykres naprężeń normalnych w ścianie w przekroju A-A przedstawiono na rysunku 10. Rozkład naprężeń podano, dla następujących faz wznoszenia budynku głęboko posadowionego: stan pierwotny (stan przed budową „nowego” obiektu), faza końcowa (po wykonaniu części nadziemnej budynku głęboko posadowionego wraz z uwzględnieniem obciążenia użytkowego).

Wyniki analiz numerycznych wskazują, że uwzględnienie w obliczeniach geometrii i sztywności budynku zlokalizowanego w sąsiedztwie obiektu głęboko posadowionego daje bardziej realistyczny kształt krzywej deformacji terenu za obudową wykopu, niż w przypadku obciążenia zastępczego lub wariantu, tylko z częścią podziemną obiektu. Jednocześnie kształt krzywej opisującej deformację podłoża pod fundamentem ma istotny wpływ na rozkład naprężeń w ścianie budynku (rys. 9). Kształt krzywej osiadań terenu zależy



Rys. 9. Wykresy przemieszczeń pionowych podłoża na głębokości fundamentu modelowego budynku, istniejącego w sąsiedztwie nowo wznoszonego obiektu po uwzględnieniu: obciążenia zastępczego (linia ciągła), tylko części podziemnej obiektu (linia przerywana-kropkowana), geometrii i sztywności sąsiedniej zabudowy (linia przerywana) a) deformacja pierwotna, b) deformacja końcowa, c) deformacja wywołana wpływem wykopu i posadowienia nowo wznoszonego obiektu



Rys. 10. Model MES głębokiego posadowienia budynku wraz z sąsiednią zabudową: a) faza końcowa: trajektorie przemieszczeń w modelu, b) wykres naprężeń normalnych w przekroju A-A powstałych na skutek odkształcenia podłoża pod ścianą: w fazie pierwotnej (linia ciągła) oraz w fazie końcowej (linia przerywana)

## Literatura

od poszczególnych faz wznoszenia budynku głęboko posadowionego i jest różny na poszczególnych etapach budowy. Na rysunku 10b zaprezentowano rozkład naprężeń normalnych  $\sigma_x$  w przekroju pionowym ściany modelowego budynku w sąsiedztwie. Linia ciągła reprezentuje rozkład naprężeń w ścianie w fazie pierwotnej, natomiast linią przerywaną oznaczono rozkład naprężeń powstałych na skutek głębokiego posadowienia obiektu „nowego”. Jak można zauważyć na wykresie maksymalne naprężenia normalne  $\sigma_x$ , powstałe od posadowienia głębokiego obiektu mają przeciwny znak (naprężenia rozciągające) do tych ze stanu pierwotnego (naprężenia ściskające), co może mieć istotny wpływ na stan techniczny obiektu w sąsiedztwie.

Dodatkowo, kompleksowa analiza nowo wznoszonego obiektu z częścią podziemną i nadziemną wraz z sąsiednią zabudową pozwoliłaby uzyskać bardziej wszechstronne informacje na etapie projektowania inwestycji (to jest między innymi ocenę wpływu głębokiego posadowienia na sąsiednią zabudowę przy wykorzystaniu jednego, całościowego modelu numerycznego w poszczególnych fazach realizacji).

## 5. Podsumowanie

Jak wynika z wykonanych analiz głębokie posadowienie w sposób istotny wpływa na stan przemieszczeniowo-naprężeniowy gruntu i budynków w sąsiedztwie.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury widoczny jest trend analizy układów podłoża gruntowe – „nowy” budynek – zabudowa istniejąca, metodą elementów skończonych. Obliczenia MES sprowadzają się obecnie zazwyczaj do modelu 2D, w którym model budynku realizowanego ogranicza się do jego części podziemnej (fundament, stropy, ściany poprzeczne). Natomiast symulacja zabudowy w sąsiedztwie sprowadza się zazwyczaj do zastosowania obciążenia zastępczego (w niektórych przypadkach w modelu 2D uwzględniane są również fundamenty wraz z częścią podziemną obiektu). Jednocześnie ważna jest kalibracja parametrów modelu obliczeniowego w korelacji z rzeczywistym zachowaniem się realizowanego obiektu.

Wydajność sprzętu komputerowego oraz możliwości algorytmów numerycznych (algorytmy przetwarzania równoległego) pozwalają na rozwiązywanie coraz to większych zadań metodą elementów skończonych. Zatem wydaje się zasadne, aby zadania interakcji podłoża gruntowego i budowli w zakresie teoretycznym modelować z uwzględnieniem geometrii oraz sztywności budynków w sąsiedztwie i z wykorzystaniem technik 3D. Jednocześnie, aby realnie ocenić oddziaływanie budynku głęboko posadowionego na sąsiednią zabudowę (głównie na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji), wskazane jest opracowanie tak zwanych modeli śledzących, pozwalających na bardziej rzeczywiste odwzorowanie pracy konstrukcji w czasie jej wznoszenia i użytkowania, (Steckiewicz, 1979; Miedziałowski, 1994; Krętowska i Miedziałowski, 2001).

- Barański M., Popielski P., Szczepański T., Wrona M. (2007). Analiza możliwości weryfikacji modelu numerycznego na podstawie pomiarów i badań wykonanych w trakcie wykonywania obiektu. *Czasopismo Techniczne, Politechnika Krakowska*, z. 1-Ś/2007, 3-16.
- Bentler D. J. (1998). Finite element analysis of deep excavations. Rozprawa doktorska, *Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- Gaszyński J., Poślajko M. (2003). Analiza numeryczna zabezpieczenia wykopu przy budowie hotelu Sheraton w Krakowie., *XV Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”*, Korbielów 2003.
- Il'ichev V. A., Nikiforova N. S., Koreneva E. B. (2006). Method for calculating bed deformations of buildings near deep excavations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 43, No. 6, 189-196.
- Jen L. C. (1998). The design and performance of deep excavations in clay. Rozprawa doktorska, *Massachusetts Institute of Technology*.
- Kłosiński B. (2010). Głębokie wykopy i ich wpływ na otoczenie. *Seminarium „ściany szczelinowe”*, Warszawa.
- Krętowska J., Miedziałowski Cz. (2001). Modele interakcyjne i modele śledzące konstrukcji budynków. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo Z.21/2001*, 79-189.
- Michalak H. (2008). Budynki głęboko posadowione a przemieszczenia podłoża i zabudowy w sąsiedztwie, *Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, 04/2008, 66-76.
- Michalak H. (2009). Wybrane zagadnienia kształtowania konstrukcyjno-przestrzennego wielokondygnacyjnych garaży podziemnych w strefach śródmiejskich. *Górnictwo i Geoinżynieria, Zeszyt 3/1*, 257-266.
- Miedziałowski Cz. (1994). Dyskretny model złożonych konstrukcji ścianowych budynków uwzględniający współpracę podłoża gruntowego. *Rozprawy naukowe Politechniki Białostockiej*, Nr 24, Białystok.
- Nogueira C., Azevedo R., Zornberg J. (2009). Coupled Analyses of Excavations in Saturated Soil. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 9, No. 2, 73-81.
- Oka F., Higo Y., i inni (2008). Elasto-viscoplastic numerical analysis of a deep excavation in an Osaka soft clay deposit using the open-cut method. *The XXII International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Indie 2008.
- Qiong Z., Jiejiang Z., Jinming X. (2006). Analysis of foundation excavation based on ANSYS 8.0 software. *Industrial Construction*, 2006.
- Siemińska-Lewandowska A. (2001). Przemieszczenia kotwionych ścian szczelinowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, Zeszyt 139*, Warszawa.
- Siemińska-Lewandowska A. (2010). Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, Warszawa.
- Sorbjan P., Truty A., Urbański A., Wolski W. (2001). Analiza statyczno-wytrzymałościowa ściany szczelinowej podziemia rezydencji Hyatt przy ulicy Belwederskiej i Spacerowej w Warszawie. *XIII Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”*, Korbielów 2001.
- Steckiewicz R. (1979). Współpraca budowli z podłożem gruntowym w okresie jej wznoszenia i użytkowania. *Inżynieria i Budownictwo*, 12/1979.



- Szulborski K., Michalak A., Woźniak M. (2009). Zabezpieczenia i obserwacja obiektów w sąsiedztwie głębokich wykopów. *XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Wisła 2009.
- Świeca M. (2011). Zasady projektowania geotechnicznego w nawiązaniu do Eurokodu 7 z zastosowaniem programów numerycznych. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Terlikowski W., Dłużewski J. (2001). Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych posadowienia z użyciem ścian szczelinowych na przemieszczenia poziome i pionowe w ujęciu metody elementów skończonych. *XIII Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”*, Korbielów 2001.
- Truty A. (2009). Modelowanie komputerowe w zagadnieniach geotechniczno-budowlanych. *XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta*, Wisła 2009.
- Weimin Q., Liming L. (2011). Numerical simulation study on deformation of deep excavation based on ANSYS – taking deep excavation of Yichang City as background. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2011.
- Zaczek-Peplińska J., Popielski P. (2012). Utilisation of Geodetic Monitoring for Verification of the Numerical Model of Impact of a Building under Construction on Surrounding Structures. *FIG Working Week*, Rome 2012.

#### DEEP BUILDING FOUNDATIONS AND METHODS OF THEIR STATIC ANALYSIS METHODS

**Abstract:** The paper presents execution methods of deep excavation. Computational methods currently in use, indicating specified by the researchers difficulties and problems in numerical analysis are presented. Directions of further development of the topic of deep foundation static analysis using the finite element method are given. Discussed issues are illustrated by calculation example, in which the influence of the deep building foundation on the displacement-stress state of soil and buildings in direct neighborhood was examined in each stages of implementation.