

Marek Cała, Jerzy Flisiak**

ANALIZA STATECZNOŚCI ŚCIANKI SZCZELNEJ Z ZASTOSOWANIEM METODY RÓŻNIC SKOŃCZONYCH

1. Wprowadzenie

Ścianki szczelne stanowią konstrukcje wykonane z podłużnych elementów stalowych, żelbetowych, drewnianych lub z tworzyw sztucznych, nazywanych brusami lub grodzicami [10].

Zadaniem ścianek szczelnych jest:

- uniemożliwienie lub utrudnienie przemieszczenia się znajdującego się za ścianką gruntu w kierunku poziomym, a więc zabezpieczenie stateczności pionowej lub nachylonej skarpy;
- uniemożliwienie lub utrudnienie przepływu wód gruntowych lub powierzchniowych znajdujących się za ścianką;
- zapewnienie przejścia spodziewanego parcia gruntu i wody oraz oddziaływań pionowych.

Ściany szczelne stosowane są powszechnie w różnych dziedzinach budownictwa specjalnego. Stanowią obudowę tymczasową wykopów budowli komunikacyjnych, komór startowych wykonywanych przy budowie mikrotuneli itp. W warunkach tych ścianki szczelne poddane są złożonym i zmiennym w czasie obciążeniom pochodzącym od zlokalizowanych w pobliżu budynków oraz linii komunikacyjnych, a dla zapewnienia ich stateczności stosowane jest kotwienie lub różne konstrukcje rozporowe.

Do projektowania ścianek szczelnych wykorzystywane są najczęściej metody stanów granicznych polegające na [11]:

- wyznaczeniu metodą Coulomba sił parcia czynnego na część ścianki powyżej dna wykopu i sił parcia biernego na część ścianki poniżej dna wykopu oraz parcia wody,
- wyznaczeniu głębokości wbicia ścianki dla przyjętego sposobu jej umocowania w gruncie (podparcie przegubowe lub utwierdzenie),

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

- obliczeniu momentów zginających i sił w elementach stabilizujących metodami graficznymi lub analitycznymi (np. Bluma),
- zwymiarowaniu elementów ścianki oraz elementów stabilizujących.

Zastosowanie klasycznej metodyki projektowania ścianek szczelnych daje dobre rezultaty w przypadku prostych konstrukcji, pracujących w stanie zbliżonym do granicznego.

Powszechnie sądzi się, że zastosowanie metod klasycznych prowadzi do zawyżenia wartości sił przekrojowych, przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa zaprojektowanej konstrukcji. Stosowanie uproszczonych schematów może jednak prowadzić do wyciągania błędnych wniosków. Jak wykazano w pracach [6, 7], w stanach odbiegających od granicznych uzyskuje się zawyżone, w stosunku do rzeczywistych wartości sił odporu, prowadzące do zaniżenia wartości momentów zginających i niewłaściwego zaprojektowania konstrukcji. Dla ograniczenia tego niebezpieczeństwa w praktyce projektowania ścianek szczelnych stosuje się arbitralne dwukrotne (PN-83/B-03010) lub nawet czterokrotne zmniejszenie spójności gruntu przy obliczaniu odporu.

W klasycznych metodach projektowania ścianek szczelnych obliczenia prowadzone są w płaskim stanie odkształcenia. Założenie to powoduje, że wiarygodne wyniki uzyskuje się jedynie dla wykopów o znacznej szerokości i długości w porównaniu z wysokością. W obliczeniach obudowy wykopów o niewielkich wymiarach w przekroju poziomym (np. komór startowych przy budowie mikrotuneli) prowadzić to może do popełniania znacznych błędów wynikających z nieuwzględniania koncentracji naprężeń w otoczeniu krawędzi. Odrębnym zagadnieniem jest wiarygodność określania deformacji ścianki (nieuwzględnianie sztywności ścianki) oraz naziomu, co jest szczególnie istotne przy ocenie oddziaływania wykopów na zlokalizowane w małej odległości trasy komunikacyjne i budowle [8].

Znaczne zwiększenie dokładności obliczeń oraz rezygnację z wielu założeń upraszczających uzyskać można, stosując do projektowania konstrukcji oporowych numeryczne metody rozwiązywania zadań teorii sprężystości i plastyczności. Stosowanie metod numerycznych do projektowania jest zgodne z Eurokodem 7-1, gdzie zaliczane są one do jednej z czterech podstawowych metod projektowania. Zwolennikami takiego podejścia są między innymi autorzy prac [6, 12, 13], którzy do analizy stateczności proponują zastosowanie metody elementów skończonych. W pracach tych podają oni warunki, jakie powinny spełniać programy obliczeniowe przydatne przy analizie stateczności ścianek szczelnych.

Są one następujące:

- możliwość analizy płaskiego stanu odkształcenia (2D) lub pełnej analizy trójwymiarowej;
- generacja stanu naprężeń początkowych występujących w podłożu przed rozpoczęciem zdarzeń będących przedmiotem analizy;
- uwzględnienie modeli konstytutywnych właściwych dla analizy ośrodka gruntowego, łatwych do identyfikowania na podstawie standardowych badań;
- uwzględnienie wpływu obecności wody gruntowej i możliwość symulacji zmian stosunków wodnych (odwodnienia, stany awaryjne);
- generowanie nieproporcjonalnych procesów obciążenia i odciążenia;

- zastosowanie właściwych technik aproksymacji skończonej elementowej, wolnych od blokady deformacji objętościowej pojawiających się w zagadnieniach z nieściśliwym płynięciem plastycznym lub w modelach z dylatacją;
- modelowanie nieciągłości deformacji na stykach konstrukcji i gruntu przy użyciu elementów kontaktowych;
- opis elementów strukturalnych: powierzchniowych, belek, prętów, membran;
- wprowadzanie elementów kotwiących w dowolnym, niekoniecznie węzłowym, punkcie modelu i symulacji ich sprężania;
- możliwość czasowego włączania i wyłączania elementów, warunków brzegowych i innych składników modelu (z techniką częściowego odprężania) przy symulacji procesu wykonywania wykopu lub wyrobiska oraz wbudowywania konstrukcji współdziałającej z ośrodkiem gruntowym lub skalnym;
- uruchamianie algorytmu oceny współczynnika bezpieczeństwa budowli w każdym etapie analizy (metodą redukcji parametrów wytrzymałościowych ośrodka) i powrotu do przebiegu podstawowego;
- łatwy i przyjazny dla użytkownika, zorientowany na specyfikę zadań geotechniki pre- i post-processing, pozwalający na szybkie, wielokrotne i wariantowe przeprowadzanie analiz.

Warunki te spełnia między innymi program FLAC, bazujący na metodzie różnic skończonych. W pracy przedstawiono porównanie wyników obliczeń ścianki szczelnej z wynikami obliczeń numerycznych programem FLAC. Wskazuje ono, że w świetle obliczeń numerycznych ścianka obliczona metodami klasycznymi nie spełnia kryteriów stateczności i wytrzymałości.

2. Modelowanie numeryczne stateczności kotwionej ścianki szczelnej

W poniższym rozdziale pokazano możliwości zastosowania metod numerycznych dla określania stateczności kotwionych ścianek szczelnych oraz analizy ich współpracy z gruntem. W porównaniu z klasycznymi metodami obliczeniowymi metody numeryczne posiadają jedno, bardzo istotne ograniczenie. Mogą one bowiem służyć tylko do analizy stateczności konstrukcji o z góry określonych parametrach. Stosowanie ich jako jedyne narzędzia projektowego może nastęrczać istotne trudności. Nadają się one jednak świetnie do weryfikacji i korekty wyników uzyskanych z klasycznych metod projektowych.

Dla przykładu rozpatrzono stateczność ścianki szczelnej zaprojektowanej według metod klasycznych w pracy [11]. Jej autorzy projektują obudowę wykopu o głębokości 9,5 m za pomocą kotwionej ścianki szczelnej. Charakterystyczne wartości parametrów warstw gruntów w przyjętym profilu przedstawiono w tabeli 1. Przyjęto obciążenie naziomu równe 19,62 kPa.

Do obliczeń numerycznych wykorzystano program FLAC [14, 15, 16], który posiada elementy strukturalne umożliwiające modelowanie stalowych ścianek szczelnych (elementy typu beam) oraz kotwi (elementy typu cable lub rockbolt).

TABELA 1

Parametry warstw gruntu przyjęte do obliczeń

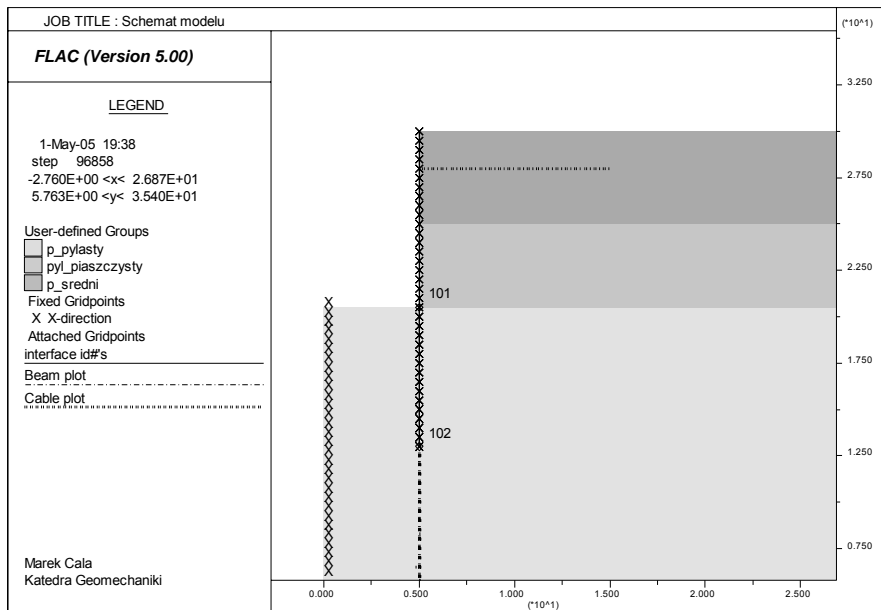
Nazwa	Mięższość, m	Ciężar obj., kN/m ³	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewn., deg	Moduł Younga, MPa	Liczba Poissona
Piasek średni	5,0	18,50	0	30	70	0,25
Pył piaszczysty	4,5	19,62	23,54	24	43	0,25
Piasek pylasty	7,5	17,17	0	30	35	0,30

Obliczenia przeprowadzono, zakładając ośrodek sprężysto-plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba – Mohra i niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia (kąty dylatacji $\psi = 0$). Obliczenia numeryczne przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia. Na obu bocznych krawędziach tarczy założono zerowe przemieszczenia poziome, zaś na dolnej zerowe przemieszczenia pionowe i poziome. Obciążenie tarczy stanowił ciężar wynikający z grawitacji. Przyjęto, że na styku ścianki z gruntem występuje kontakt charakteryzujący się określonymi wartościami kohezji, kąta tarcia wewnętrznego, wytrzymałości na rozciąganie oraz jednostkowej sztywności normalnej (k_n) i jednostkowej sztywności stycznej (k_s). Na kontakcie założono zerową kohezję, kąt tarcia równy 17 stopni oraz $k_s = k_n = 100$ MPa/m.

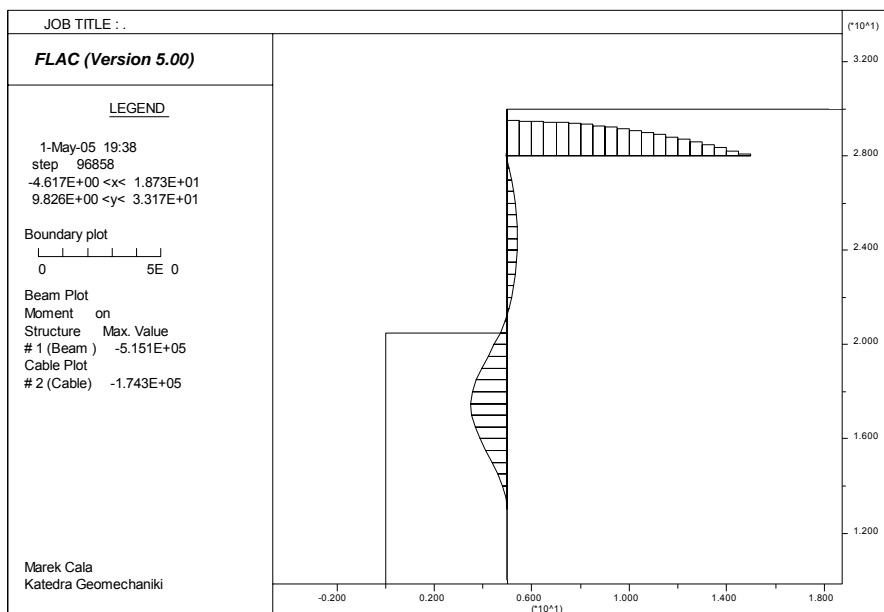
Na podstawie obliczeń z zastosowaniem metod klasycznych, w pracy [11] stwierdza się, że dla zachowania stateczności wykopu należy zastosować profile Larssena o wskaźniku wytrzymałości na zginanie W_x równym 2200 cm³ o długości całkowitej równej 16,9 m (dla celów obliczeń numerycznych przyjęto długość 17 m). Założono także, że ścianka musi być jednokrotnie kotwiona za pomocą poziomych kotwi o nośności 183 kN, długości 10 m, budowanych z krokiem 1,6 m w odległości 2,0 m od naziomu. Schematycznie wykop oraz ściankę pokazano na rysunku 1.

Pierwszym problemem, na jaki natrafiono budując model numeryczny, była szerokość wykopu. Model budowano, przyjmując symetrię zagadnienia, stąd też konieczne było założenie pewnej szerokości wykopu. Ma ona istotny wpływ na stateczność konstrukcji, a nie jest w żaden sposób uwzględniana w obliczeniach przeprowadzanych metodami klasycznymi. W pracy, dla potrzeb obliczeń numerycznych, zdecydowano się przyjąć, że wykop będzie miał szerokość zbliżoną do głębokości, i założono jego szerokość równą 10 m. Zagadnienie wpływu szerokości wykopu na stateczność ścianek szczelnych będzie przedmiotem dalszych prac autorów tego artykułu.

Dla w miarę wiernego procesu wykonywania wykopu, obliczenia numeryczne wykonywano w kolejnych etapach. W etapie pierwszym założono wbicie w grunt ścianki szczelnej o długości 17 m. Następnie symulowano wybieranie kolejnych warstw gruntu o miąższości 1 m lub 0,5 m, zakładając instalacją poziomej kotwi po wykonaniu wykopu o głębokości 2,5 m. Na rysunku 2 pokazano rozkład momentów gnących w elementach stalowych ścianki oraz rozkład sił osiowych w kotwi po osiągnięciu docelowej głębokości wykopu.

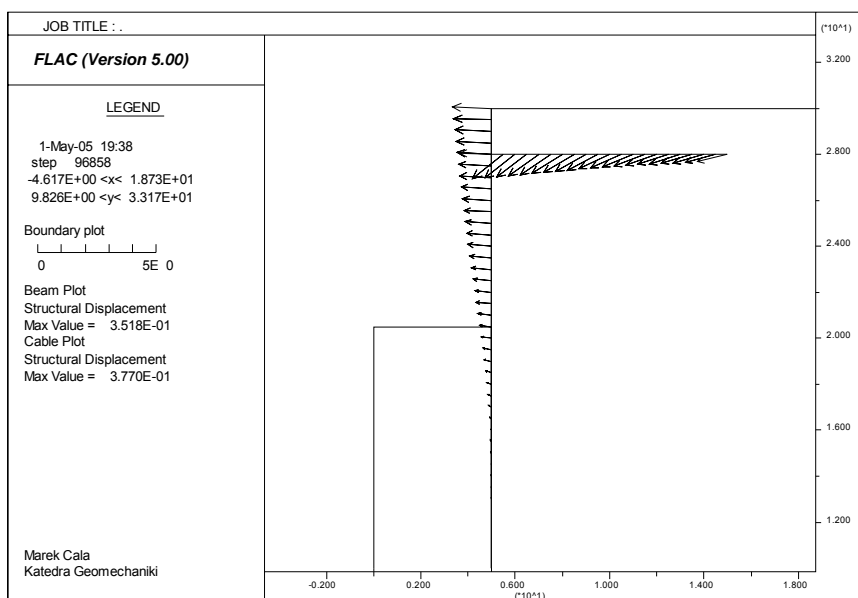


Rys. 1. Schemat modelu obliczeniowego



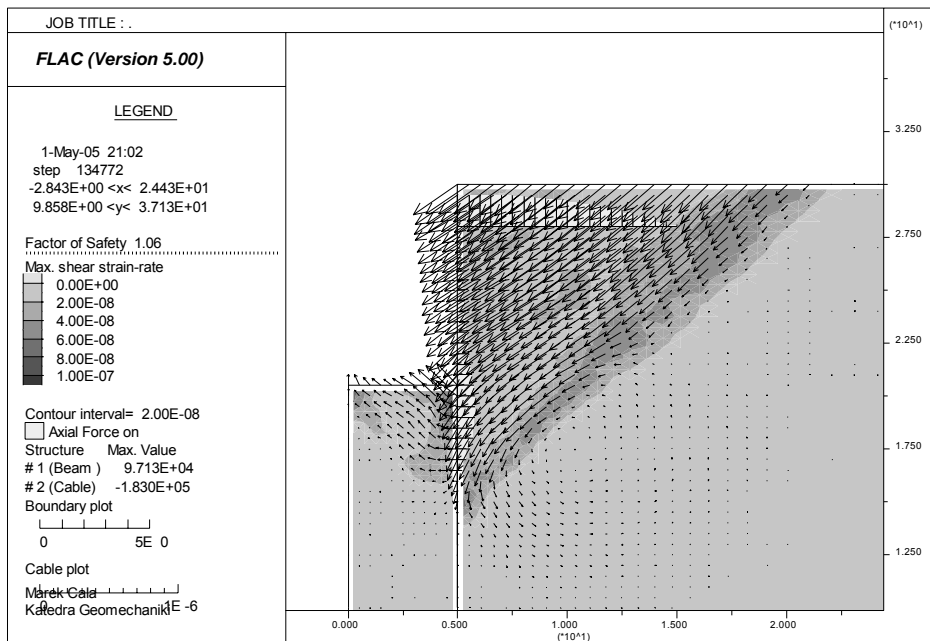
Rys. 2. Rozkład momentów gięcych w ścianie oraz sił osiowych w kotwi

Wartości maksymalnych momentów gnących są równe $-515,1$ kNm, co wywołuje w elementach belkowych naprężenia zginające równe 234 MPa. Są to wartości znacznie większe niż przyjęte za dopuszczalne $k_d = 150$ MPa i mogą one spowodować uplastycznienie elementów ścianki. Wartości maksymalnych sił osiowych w kotwi są równe $174,3$ kN i stanowią ponad 95% nośności kotwi, co także może świadczyć o możliwości zniszczenia kotwi na skutek wyrwania. Wnioski te potwierdza rysunek 3, na którym przedstawiono wektory przemieszczeń w elementach ścianki oraz kotwi. Maksymalne przemieszczenia ścianki przyjmują wartości $37,7$ cm, zaś kotwi $35,2$ cm i są to wartości mogące sugerować stan bliski utraty stateczności.



Rys. 3. Wektory przemieszczeń w elementach ścianki oraz kotwi

Zarówno wartości momentów gnących występujących w elementach belkowych, sił osiowych występujących w kotwiach, jak i wartości przemieszczeń gruntu skłaniają do stwierdzenia, że układ ścianka – grunt jest bliski utraty stateczności. Aby określić wartość globalnego wskaźnika stateczności układu ścianka – grunt, zastosowano procedurę redukcji wytrzymałości na ścinanie [1, 2, 3, 4, 5, 9]. W metodzie tej grunt traktuje się jako ośrodek sprężysto-plastyczny ze stowarzyszonym lub niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia. Po zastosowaniu tej procedury okazało się, że wartość wskaźnika stateczności układu jest równa $1,06$ (rys. 4). Zdecydowanie nie jest to wartość FS, która może być uznana za bezpieczną.



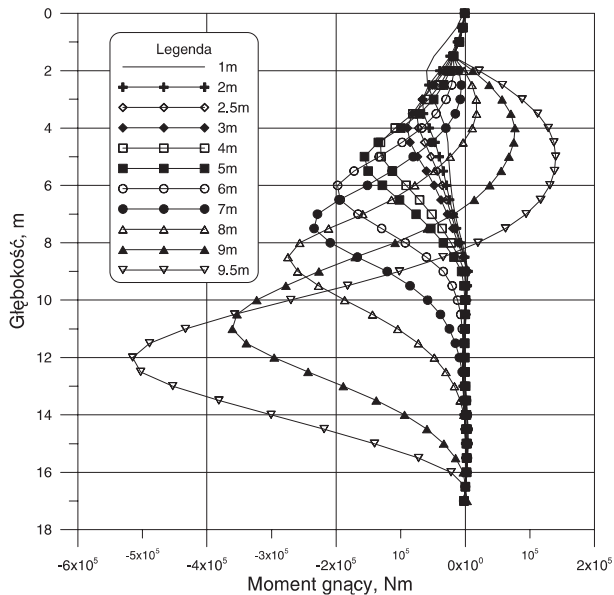
Rys. 4. Mapa odkształceń postaciowych oraz wektorów prędkości dla FS = 1,06

Na rysunku 5 pokazano zmienność momentów gnących w elementach ścianki szczelnej w miarę wzrostu głębokości wykopu. Widać wyraźnie narastanie maksymalnych momentów zginających w miarę wzrostu głębokości wykopu. Szczególnie istotny wzrost wartości momentów gnących występuje przy zwiększeniu głębokości wykopu od 8,0 m do 9,5 m.

Wobec powyższego zdecydowano się rozpatrzyć inne warianty wzmocnienia ścianki za pomocą kotwi.

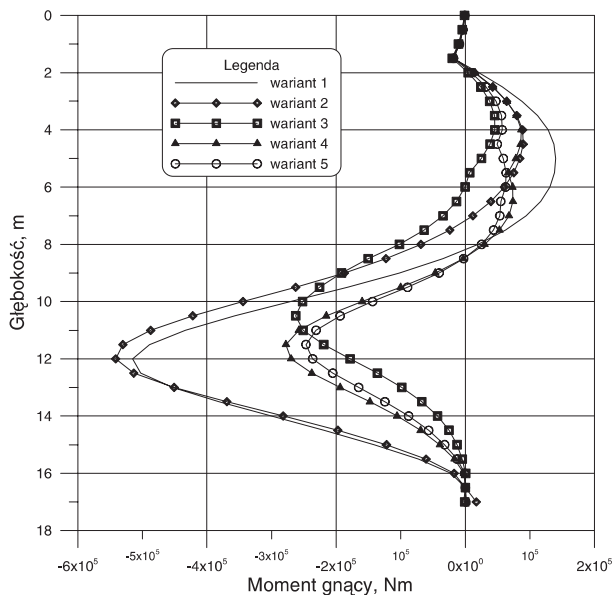
W kolejnych wariantach rozpatrzono następujące sytuacje:

- wariant 1 — sytuacja odpowiadająca rozwiązaniu utrzymanemu z analiz za pomocą metod klasycznych;
- wariant 2 — nachylenia kotwi umiejscowionej na głębokości 2 m pod kątem 30° do poziomu;
- wariant 3 — tak jak wariant 2 z dodatkową kotwią o długości 8 m nachyloną pod kątem 30° do poziomu umiejscowionej na głębokości 6 m od naziomu;
- wariant 4 — tak jak wariant 3 przy założeniu zwiększenia nośności obu kotwi do 250 kN;
- wariant 5 — tak jak wariant 2 z dodatkowymi kotwiami o długości 8 m nachylonymi pod kątem 30° do poziomu umiejscowionymi odpowiednio na głębokości 5 m i 7 m od naziomu; przyjęto nośność kotwi równą 250 kN.



Rys. 5. Moment gnący w elementach ścianki szczelnej w miarę wzrostu głębokości wykopu

Na rysunku 6 pokazano rozkłady momentów gnących w elementach ścianki szczelnej dla poszczególnych wariantów po osiągnięciu docelowej głębokości wykopu.



Rys. 6. Momenty gnące dla kolejnych rozpatrywanych wariantów

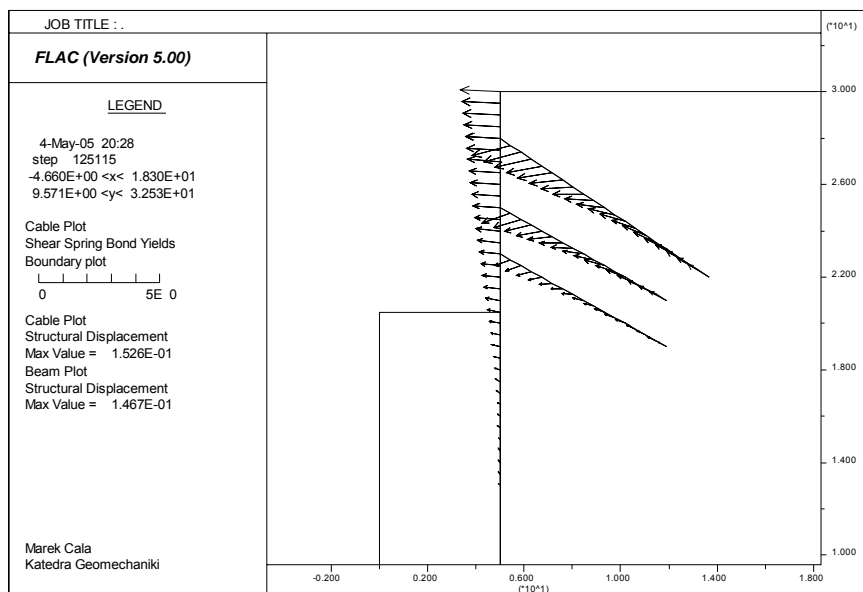
Widać wyraźnie, że zastosowanie pochylenia kotwi w wariantcie 2 powoduje niewielki wzrost maksymalnych wartości momentów zginających, zaś zastosowanie dodatkowej kotwi (wariant 3 i wariant 4) powoduje istotny spadek wartości maksymalnych momentów gnących. Zabudowa trzeciej kotwi (wariant 5) powoduje stosunkowo niewielki spadek wartości maksymalnych momentów gnących w porównaniu z wariantem 3 i 4. Wartości maksymalne momentów gnących dla wszystkich wariantów zebrano w tabeli 2. Pokazano w niej także wartości maksymalne naprężeń normalnych wynikających ze zginania. Widać wyraźnie, że dla wariantów 3, 4 i 5 osiągają one wartości mniejsze od przyjętych za dopuszczalne ($k_d = 150$ MPa). Potwierdzają to wartości przemieszczeń ścianki oraz kotwi.

TABELA 2

Maksymalne wartości momentów gnących dla rozpatrywanych wariantów

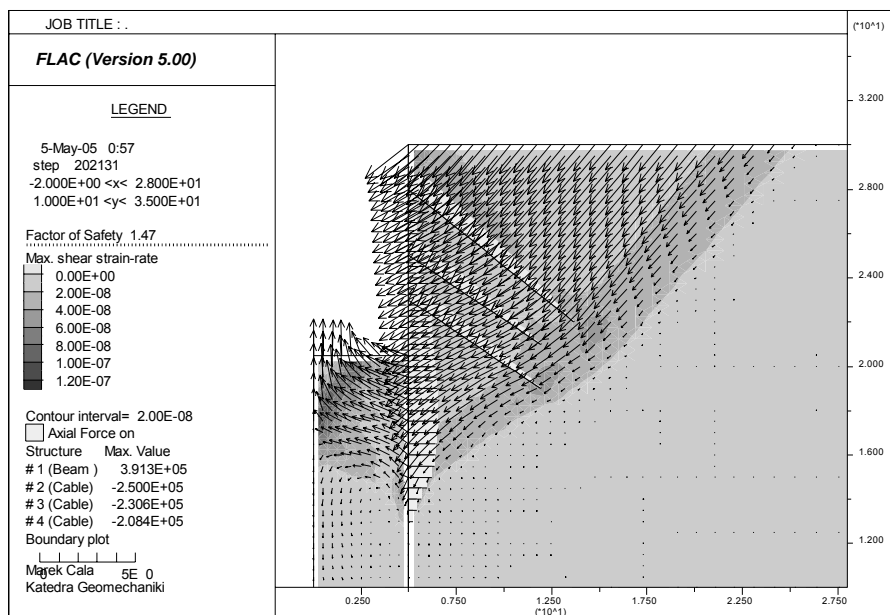
Wariant	Maksymalny moment gnący, kNm	Naprężenie zginające, MPa
1	515,1	234,1
2	541,4	246,1
3	262,6	119,4
4	277,7	126,2
5	246,8	112,2

Na rysunku 7 pokazano wektory przemieszczeń w elementach ścianki oraz kotwi.



Rys. 7. Wektory przemieszczeń w elementach ścianki oraz kotwi dla wariantu 5

Maksymalne przemieszczenia ścianki przyjmują wartości 15,3 cm, zaś kotwi 14,7 cm i są to wartości, które można uznać za bezpieczne. Na rysunku 8 pokazano powierzchnię poślizgu dla docelowej głębokości wykopu w wariancie 5 — widać wyraźnie, że ma ona inną postać niż dla wariantu 1 (rys. 5).



Rys. 8. Mapa odkształceń postaciowych oraz wektorów prędkości dla wariantu 5 — FS = 1,47

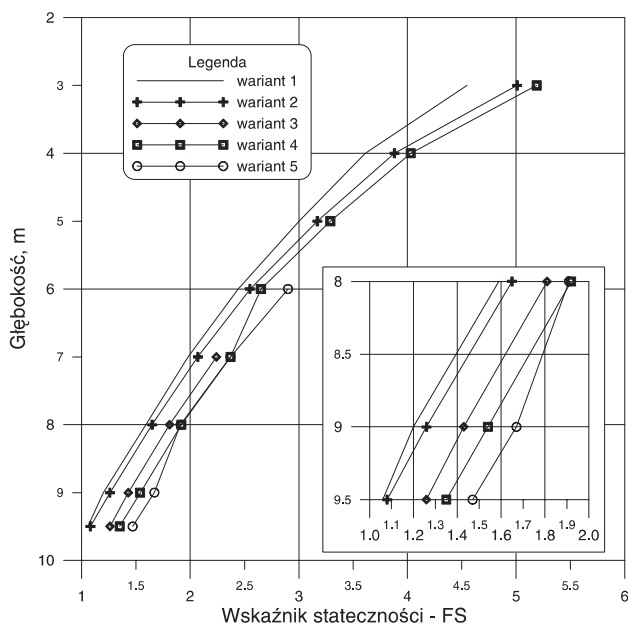
Podobnie jak dla wariantu 1, dla poszczególnych wariantów i wybranych głębokości wykopu określono wartości wskaźnika stateczności (FS) z zastosowaniem procedury redukcji wytrzymałości na ścinanie. Uzyskane wyniki zebrano w tabeli 3 oraz przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 9.

Widać wyraźnie, że dla wszystkich rozpatrywanych wariantów wartości FS spadają wraz ze wzrostem głębokości wykopu. Już samo nachylenie kotwi o kąt 30° do poziomu (wariant 2) początkowo powoduje znaczący wzrost wartości FS (o 0,46). W miarę zwiększania głębokości wykopu różnice pomiędzy FS dla wariantów 1 i 2 sukcesywnie się zmniejszają, aż do osiągnięcia porównywalnych wartości (1,06 i 1,08) dla maksymalnej głębokości wykopu. Zastosowanie drugiego rzędu kotwi nachylonych (wariant 3) powoduje wzrost wartości FS o około 0,2. Po osiągnięciu głębokości wykopu równej 9,5 m wskaźnik FS dla wariantu 3 osiąga wartość 1,26. Zwiększenie nośności kotwi zaproponowane w wariancie 4 przyniosło wzrost wartości FS o około 0,1. Dla docelowej głębokości wykopu uzyskano FS = 1,35. Zabudowa trzeciego rzędu kotwi (wariant 5) wywołuje dalszy wzrost wartości FS, który dla wykopu o głębokości 9,5 jest równy 1,47.

TABELA 3

Wartości FS dla kolejnych rozpatrywanych wariantów

Głębokość wykopu, m	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4	Wariant 5
3	4,55	5,01	–	5,19	–
4	3,61	3,88	–	4,03	–
5	3,00	3,17	–	3,29	–
6	2,44	2,55	–	2,65	2,90
7	1,98	2,07	2,24	2,37	2,37
8	1,59	1,65	1,81	1,92	1,91
9	1,20	1,26	1,43	1,54	1,67
9,5	1,06	1,08	1,26	1,35	1,47

**Rys. 9.** Wartości FS dla kolejnych rozpatrywanych wariantów**3. Podsumowanie**

Klasyczne metody obliczeniowe mogą prowadzić do popełnienia znaczących błędów przy projektowaniu kotwionych ścianek szczelnych. Nadają się one jednak świetnie do ustalania wstępnych parametrów konstrukcji kotwionej ścianki szczelnej (głębokość zabcia,

profil grodzicy, wymagana nośność kotwi). Parametry te mogą następnie być dokładnie zweryfikowane i ewentualnie skorygowane poprzez zastosowanie metod numerycznych. Pozwalają one na uniknięcie wielu uproszczeń, co w efekcie powoduje, że analiza współpracy konstrukcji oporowej z gruntem jest bardziej wiarygodna. Powinny być one stosowane na znacznie szerszą skalę jako narzędzie wspomagające projektowanie konstrukcji kotwionych ścianek szczelnych.

LITERATURA

- [1] *Cala M., Flisiak J.*: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII ZSMG. Kraków, Wydawnictwo KGBiG 2000, 27–37
- [2] *Cala M., Flisiak J.*: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers 2001, 111–114
- [3] *Cala M., Flisiak J.*: Analiza wpływu słabej warstwy na stateczność skarp. XXV ZSMG. Kraków, Wydawnictwo KGBiG 2002, 83–92
- [4] *Cala M., Flisiak J.*: Complex geology slope stability analysis by shear strength reduction. In Brummer, Andrieux, Detournay & Hart (eds.) *FLAC and Numerical Modelling in Geomechanics*. A.A. Balkema Publishers 2003, 99–102
- [5] *Dawson E.M., Roth W.H.*: Slope stability analysis with FLAC. *FLAC and numerical modelling in geomechanics* (Detournay & Hart). Rotterdam, A.A. Balkema 1999, 3–9
- [6] *Grodecki M., Truty A., Urbański A.*: Modelowanie numeryczne ścianek szczelnych. *Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 27, z. 3–4, 2003, 297–303
- [7] *Grodecki M.*: Modelowanie numeryczne ścianki szczelnej nieskotwionej. XV Konferencja naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, 2003, 67–76
- [8] *Janusz J.*: Analiza ugięć i zmian nachylenia ścian szczelinowych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 6, 2002, 329–331
- [9] *Lane P.A., Griffiths D.V.*: Finite element slope stability analysis. Why are engineers still drawing circles. *Numerical Models in Geomechanics* (Pietruszczak & Pande). Rotterdam, A.A. Balkema 1997, 589–593
- [10] *Mazurkiewicz B.*: Projektowanie ścianek szczelnych. XX Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji. *Wisła – Ustroń – Kraków*, 2005, 75–92
- [11] *Pula O., Rybak Cz., Sarniak W.*: Projektowanie posadowień. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 1999
- [12] *Ryż K., Urbański A.*: Analiza statyczna konstrukcji ścianowej z grodzic ze ściągami współpracującej z nasypem kolejowym z wykorzystaniem modelowania MES. *Kwartalnik AGH Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 27, z. 3–4, 2003, 533–541
- [13] *Urbański A., Truty A.*: Współczesne możliwości modelowania komputerowego w zagadnieniach geotechniczno-budowlanych. XX Ogólnopolska konferencja warsztat pracy projektanta konstrukcji. *Wisła – Ustroń – Kraków*, 2005, 209–234
- [14] *FLAC v. 4.0a*. 2002: Users manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis
- [15] *FLAC v. 4.0b*. 2002: Theory and background. Itasca Consulting Group. Minneapolis
- [16] *FLAC v. 5.0*. 2005: Users manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis