
Adrianna Golowska*, Alicja Góralczyk*

INNOWACYJNY SYSTEM ŁĄCZENIA FUNDAMENTÓW BEZPOŚRĘDNIACH Z KONSTRUKCJAMI CEMENTOGRUNTOWYMI

Artykuł podejmuje temat łączenia fundamentów bezpośrednich obiektów inżynierskich, takich jak np. mosty czy wiadukty, z konstrukcjami cementogruntoowymi wykonanymi w technologii TRENCHMIX®. Ze względu na brak wyznaczonych parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a betonem przeprowadzono autorskie badanie wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania oraz wykonano badania wytrzymałościowe cementogruntu. Następnie wykonano modelowanie trzech kształtów o różnych wymiarach umiejscowionych w cementogrunie w programie FLAC3D. Na koniec wykonano symulacje testów wrywania oraz wybrano najlepszy kształt. Proces analizy numerycznej udało się zautomatyzować dzięki kodowi napisanemu w języku Python.

INNOVATIVE SYSTEM OF INTEGRATING DIRECT FOUNDATIONS WITH CEMENT-SOIL CONSTRUCTIONS

The presentation addresses the topic of integrating the foundations of direct engineering structures such as bridges or viaducts with cement-soil structures made using TRENCHMIX® technology. Due to the lack of designated contact parameters between cement-soil and concrete, an original shear strength study was conducted using a direct shear apparatus, along with strength tests on cement-soil. Subsequently, modeling of three shapes of various dimensions embedded in cement-soil was carried out using the FLAC3D program. Finally, simulations of pull-out tests were performed, and the best shape was selected. The process of numerical analysis was automated using code written in Python.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach coraz częściej stosuje się technologię TRENCHMIX® jako wzmocnienie gruntów słabonośnych. Projektanci obiektów inżynierskich oczekują, aby momenty zginające oraz siły wrywające były przenoszone na podłoże. Zwykle zapewnia się to dzięki

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Koło Naukowe Budownictwa i Geomechaniki.

powiązaniu zbrojenia posadowienia obiektu ze zbrojeniem wzmocnienia (np. zbrojeniem pala). Ze względu na fakt, że panele cementogruntowe nie są zbrojone, w przedmiotowym projekcie zaproponowano system łączenia fundamentów bezpośrednich obiektów inżynierskich, takich jak np. mosty czy wiadukty, z konstrukcjami cementogruntowymi wykonanymi w technologii TRENCHMIX®

2. MATERIAŁY I METODY

Opis materiałów i metod obejmuje dogłębną analizę warunków geologiczno-inżynierskich lokalizacji, z której pobrano próbki do przeprowadzenia badań laboratoryjnych. Zebrane dane umożliwiły identyfikację składników badanego cementogruntu. Ponadto przedstawiono szczegółowo metody przeprowadzonych badań.

2.1. MATERIAŁY

Próbki cementogruntu do realizacji badań laboratoryjnych zostały pobrane na ulicy Ostatni Etap, która znajduje się na terenie budowy drogi krajowej DK44, stanowiącej obwodnicę Oświęcimia. Do ich wykonania wykorzystano cement CEM II/B-V 32,5 R – HSR.

Analiza warunków geologiczno-inżynierskich na trasie drogi ekspresowej S1 – Mysłowice – Bielsko-Biała

W obrębie wiaduktu kolejowego występują grunty wykształcone w okresie czwartorzędu, a dokładnie w holocenie [1]. W dokumentacji [2] zawarto cztery przekroje poprzeczne, na których wyróżniono siedem warstw geotechnicznych oznaczonych cyframi rzymskimi. W tabeli 1 opisano te warstwy, które pojawiły się na dostępnych przekrojach.

Tabela 1. Zestawienie warstw geotechnicznych

Oznaczenie	Symbol gruntu*	Rodzaj gruntu	Stan gruntu	Wilgotność
IB	NN (Ż, Tł, Ps, Pd, PsH, Gπ)	żwir, tłuczeń, piasek średni, piasek drobny, piasek średni próchniczny, glina pylasta	–	mw, w
IIB	Gπ + cz. org	glina pylasta z domieszką części organicznych	tpl, tpl/pl	mw, mw/w
IIIB	Pg/Gp, Gπ, Pog, Pog/Gp	piasek gliniasty na pograniczu gliny piaszczystej, glina pylasta, pospółka gliniasta, pospółka gliniasta na pograniczu z gliną piaszczystą	tpl	mw
IIIC	Pog, Pog/Gp, Gπ, Gp + Ż	pospółka gliniasta, pospółka gliniasta na pograniczu z gliną piaszczystą, glina pylasta, glina piaszczysta z dodatkiem żwiru	pl, tpl/pl	mw, mw/w

Tabela 1. cd.

Oznaczenie	Symbol gruntu*	Rodzaj gruntu	Stan gruntu	Wilgotność
VD	Ps + Ż, Ps, Ps//Gπ, Ps + Ż//Gπ	piasek średni z domieszką żwiru, piasek średni, piasek średni z przewarstwieniem gliny pylastej, piasek średni z domieszką żwiru z przewarstwieniem gliny pylastej	–	nw
VIC	Po	pospółka	zg	nw
VID	Po, Ps + Ż, Po + G	pospółka, piasek średni z domieszką żwiru, pospółka z domieszką gliny	bzg	nw
VIID	Gπ, Gπ/I	gliny pylaste oraz gliny pylaste na pograniczu z iłami	tpl	mw

* PN-B-02480:1986

Minimalna głębokość stabilizacji zwierciadła wody gruntowej wynosi 3,5 m, a maksymalna 4,2 m. W jednym z przekrojów występuje sączenie na głębokości 1,4 m [2].

Klasyczny trencher miesza grunt na całej długości miecza urabiającego. Głębokość posadowienia paneli cementogruntowych wynosiła do około 18 m p.p.t.

2.2. METODY

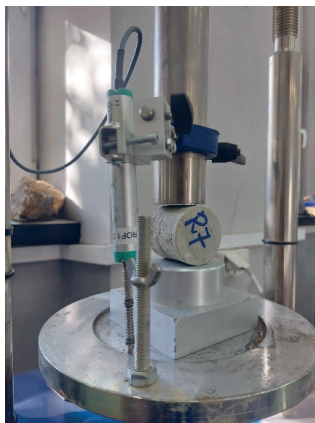
Badania laboratoryjne miały na celu wyznaczenie parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a prefabrykowanymi elementami betonowymi, tj. kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji, a także wytrzymałości cementogruntu na ściskanie i rozciąganie. Przebadano łącznie 202 próbki, których materiał do badań został pobrany *in situ*. Warto zaznaczyć, że tak pobrany materiał charakteryzuje się mniejszą jednorodnością mieszanki, a także dużą zmiennością parametrów wytrzymałościowych w stosunku do cementogruntu wymieszanego w laboratorium [3].

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Badanie wytrzymałości na rozciąganie wykonano metodą brazylijską (rys. 1), na podstawie normy [4], na siedmiu próbkach walcowych o stosunku długości do średnicy równym 1. Dopuszczono się pewnego odstępstwa, a mianowicie zastosowano wymiar równy 50 mm, którego to norma nie dopuszcza.

Próbki o kształcie walca o średnicy i długości równych 50 mm wycięto z większej płyty cementogruntu po czasie wiązania wynoszącym 28 dni. Przed wykonaniem badania próbki

zmierzono oraz zważono, a samo badanie wykonano w prasie wytrzymałościowej CBR, ze względu na odpowiednią rozdzielczość prasy. Prędkość badania wynosiła 0,090 mm/min, a obciążenie początkowe 0,001 kN.



Rys. 1. Przygotowana próbka do badania wytrzymałości na rozciąganie w prasie wytrzymałościowej CBR

Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykonano zgodnie z normą [5]. Próbki walcowe o średnicy równej 50 mm i wysokości 100 mm wycięto z większej płyty cemento-gruntu po czasie wiązania 28 dni. Przed wykonaniem badania próbki zmierzono oraz zważono. Tak przygotowane próbki umieszczano między płytami dociskowymi prasy wytrzymałościowej CBR (rys. 2) z automatyczną rejestracją siły i przemieszczeń. Próbki obciążano ze stałą prędkością równą 0,15 mm/min aż do zniszczenia. Założono obciążenie początkowe równe 0,001 kN.



Rys. 2. Przygotowana próbka do badania wytrzymałości na ściskanie w prasie wytrzymałościowej CBR

Badanie wytrzymałości na ścinanie

Brak norm i nieliczne badania dotyczące parametrów kontaktu pomiędzy cementogruntem a prefabrykowanymi elementami betonowymi sprawiają, że wykonane badanie wytrzymałości na ścinanie można uznać za autorskie, a jego przebieg nie jest unormowany. Badanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach, w przypadku których kontakt pomiędzy dwoma materiałami nie był naruszony. Dodatkowo próbki podzielono na takie, które łączyły się z cementogruntem powierzchnią chropowatą oraz płaską.

Badane próbki miały kształt prostopadłościanu o wymiarach 6,0 cm × 6,0 cm × ok. 2,0 cm. Składały się z betonu architektonicznego o grubości 1,0 cm oraz cementogruntu. Wysokość próbki była uzależniona od karetki, w której wykonywano badanie. Próbki wykonywano w styropianowych formach, w których umieszczano betonową płytkę (wyciętą z betonu architektonicznego), a następnie zalewano cementogruntem. Próbki wiązały przez 28 dni w laboratorium, a po tym czasie wykonywano badanie wytrzymałościowe w aparacie bezpośredniego ścinania.

Ze względu na brak dostępnych norm wykonano badanie próbne, które miało określić stałą prędkość przesuwania skrzynki. Czas wykonywanego badania ograniczono do 12 min, a prędkość ścinania przyjęto równą 0,5 mm/min. Warto zaznaczyć, że prędkość ta nie ma tak dużego znaczenia jak w przypadku gruntów, gdy jej wartość zależy od rodzaju gruntu oraz metody badań [6]. Ponadto przyjęto wartość graniczną przemieszczenia jako 6 mm, co stanowi 10% długości boku próbki. Badanie wykonano dla czterech różnych naprężeń pionowych, tj. 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa i 400 kPa. W badaniu kluczowe było ustawienie próbki, tak aby ścięcie zachodziło na kontakcie dwóch materiałów. Na rysunku 3 przedstawiono prawidłowe ustawienie próbki.



Rys. 3. Prawidłowe ustawienie próbki w aparacie bezpośredniego ścinania

3. WYNIKI

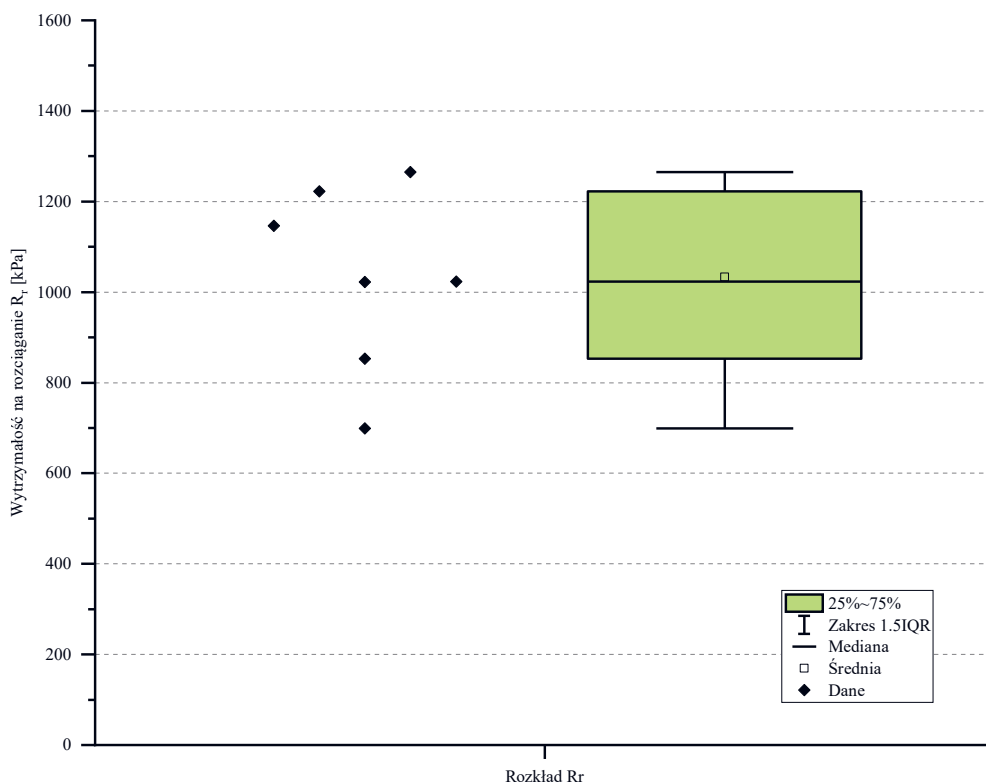
3.1. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE

W przypadku badanych próbek wyznaczono gęstość objętościową i ciężar objętościowy, a wyniki przedstawiono w tabeli 2. Wartości obliczonych gęstości wahają się w granicach od 1651,707 kg/m³ do 1767,521 kg/m³, a ich średnia wynosi 1710,059 kg/m³. Natomiast wartości obliczonego ciężaru objętościowego zawierają się w przedziale od 16,203 kN/m³

do $17,339 \text{ kN/m}^3$, a ich średnia jest równa $16,776 \text{ kN/m}^3$. Wartości wytrzymałości na rozciąganie mieszczą się w zakresie od $698,778 \text{ kPa}$ do $1265,359 \text{ kPa}$ (rys. 4). Średnia wartość wytrzymałości wynosi $1032,886 \text{ kPa}$, natomiast mediana – $1022,893 \text{ kPa}$.

Tabela 2. Zestawienie gęstości objętościowej i ciężaru objętościowego próbek

Próbki	Masa [kg]	Objętość [m ³]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]
P1	0,183	0,000110	1657,601	16,261
P2	0,197	0,000111	1767,313	17,337
P3	0,181	0,000109	1651,707	16,203
P4	0,195	0,000111	1758,264	17,249
P5	0,188	0,000111	1697,093	16,648
P6	0,184	0,000110	1670,912	16,392
P7	0,195	0,000110	1767,521	17,339
Średnia arytmetyczna			1710,059	16,776



Rys. 4. Wartości wytrzymałości na rozciąganie

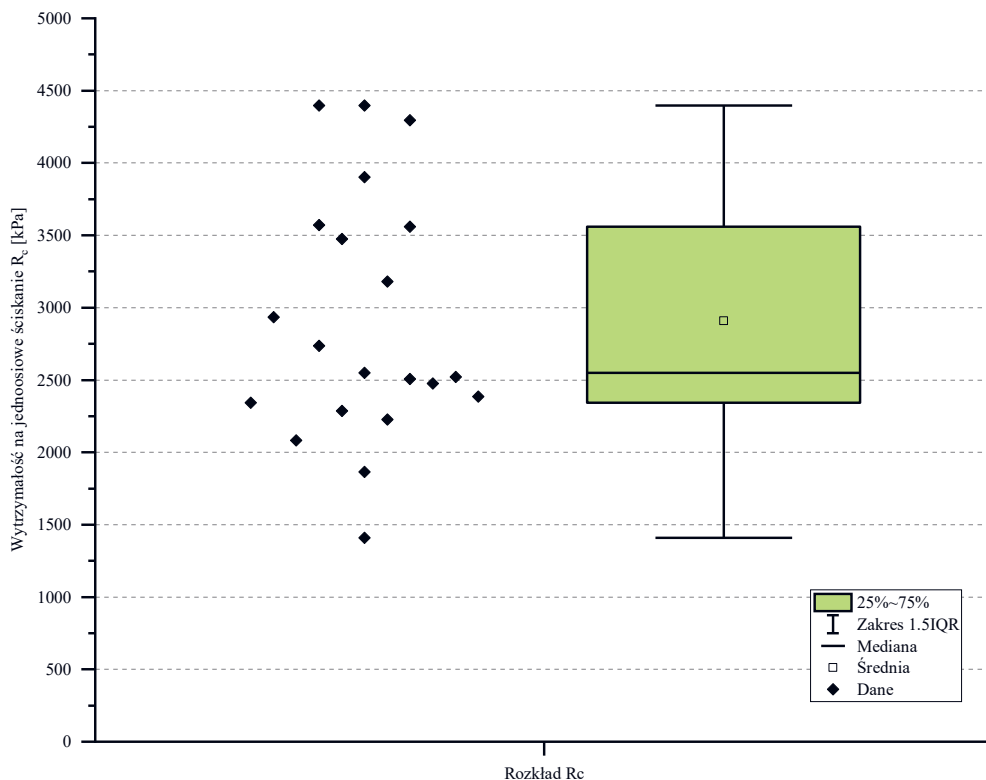
3.2. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

W przypadku badanych próbek wyznaczono gęstość objętościową i ciężar objętościowy, a wyniki przedstawiono w tabeli 3. Zakres gęstości objętościowej zawiera się w przedziale od 1695,386 kg/m³ do nawet 1926,615 kg/m³, natomiast zakres wartości ciężaru objętościowego waha się w granicach od 16,632 kN/m³ do 18,900 kN/m³.

Tabela 3. Zestawienie gęstości objętościowej i ciężaru objętościowego próbek

Próbki	Masa [kg]	Objętość [m ³]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]
W1	0,38298	0,000219	1747,600	17,144
W2	0,38458	0,000221	1740,548	17,075
W3	0,38674	0,000219	1762,643	17,292
W4	0,42251	0,000222	1901,814	18,657
W5	0,40229	0,000221	1822,218	17,876
W6	0,37649	0,000220	1708,600	16,761
W7	0,39762	0,000220	1809,707	17,753
W8	0,38456	0,000220	1745,472	17,123
W9	0,39535	0,000218	1811,276	17,769
W10	0,37883	0,000220	1721,614	16,889
W11	0,42600	0,000221	1926,615	18,900
W12	0,41155	0,000219	1877,239	18,416
W13	0,37636	0,000222	1698,827	16,666
W14	0,41425	0,000220	1879,663	18,440
W15	0,38351	0,000220	1743,813	17,107
W16	0,38696	0,000221	1754,267	17,209
W17	0,30713	0,000181	1701,313	16,690
W18	0,30884	0,000179	1721,725	16,890
W19	0,39915	0,000224	1782,411	17,485
W20	0,32261	0,000183	1758,349	17,249
W21	0,30892	0,000182	1695,386	16,632
Średnia arytmetyczna			1776,719	17,430

Rysunek 5 przedstawia rozkład wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Wartości te wahają się w granicach od 1791,7 kPa do nawet 4400,46 kPa. Różnica pomiędzy najniższą wartością a najwyższą wynosi 2608,76 kPa, co wskazuje na duży rozrzut wyników badań. Średnia wartość wynosi 2824,55 kPa, a mediana 2521,95 kPa.



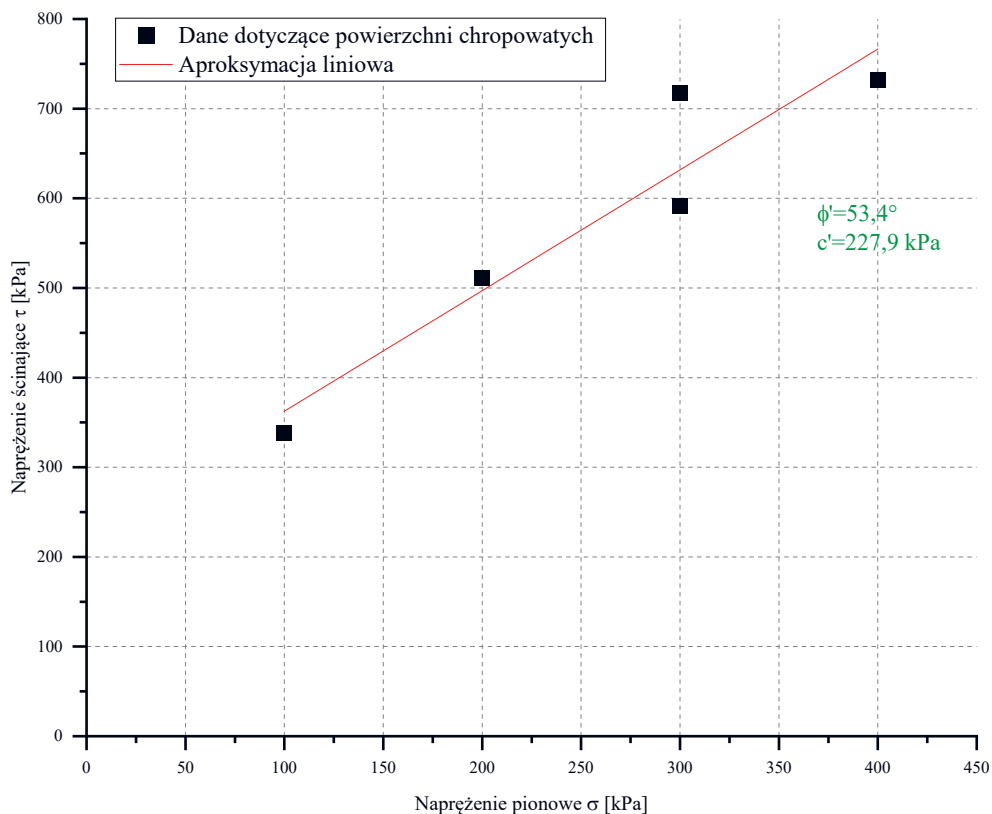
Rys. 5. Wartości wytrzymałości na ściskanie

3.3. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

W celu wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji zastosowano aproksymację liniową, dzięki której została wyznaczona prosta najlepiej przybliżająca punkty odpowiadające wynikom badań. Miejsce przecięcia się tej prostej z osią pionową wskazuje na wartość kohezji, natomiast nachylenie – kąt tarcia wewnętrznego.

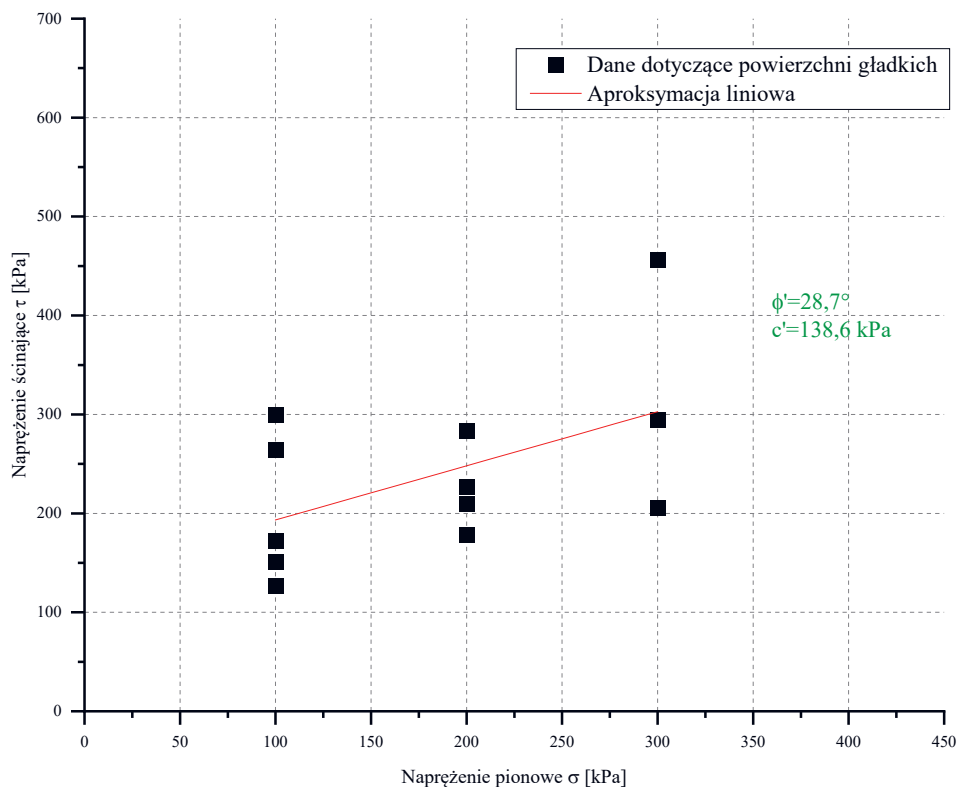
Wyniki przedstawiono na dwóch wykresach (rys. 6 i 7), wyróżniając w ten sposób wyniki dotyczące próbek o powierzchni chropowatej i gładkiej. Warto zauważyć, że parametry kontaktu próbek o powierzchni chropowatej są wyższe w porównaniu z próbkami o powierzchni gładkiej. Wartość różnicy kąta tarcia wewnętrznego między tymi dwoma rodzajami powierzchni wynosi $24,7^\circ$, a w przypadku kohezji 89,3 kPa. Po zakończeniu badania na

powierzchni kontaktu w przypadku próbek o powierzchni chropowatej, po stronie cemento-gruntu, obserwowano wyraźne bruzdy powstałe na skutek żłobienia, które świadczą o silnym kontakcie pomiędzy dwoma materiałami, czego nie zaobserwowano w przypadku próbek o powierzchni gładkiej. Należy jednak podkreślić, że w przypadku wariantu z chropowatą powierzchnią przebadano niewielką liczbę próbek, co może mieć wpływ na uzyskane wyniki (szczególnie w aspekcie bardzo wysokiego kąta tarcia).



Równanie	$y = a + bx$
Wyraz wolny	$227,882 \pm 74,10096$
Nachylenie	$1,34624 \pm 0,26532$
Resztowa suma kwadratów	10 981,90595
Współczynnik Pearsona r	0,94638
Współczynnik determinacji	0,89563
Skorygowany współczynnik determinacji	0,86085

Rys. 6. Wykres zależności naprężeń stycznych od naprężeń normalnych próbek o powierzchni chropowatej

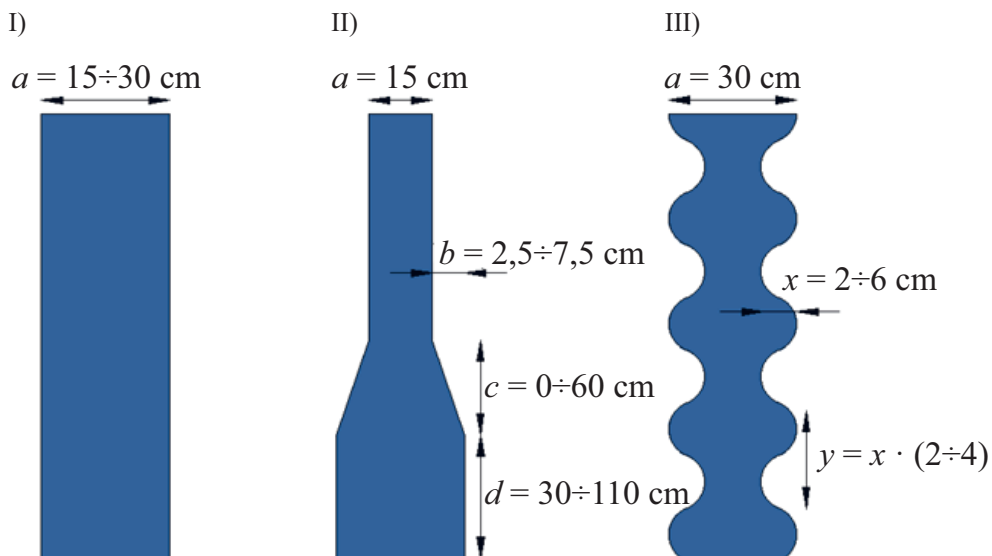


Równanie	$y = a + bx$
Wyraz wolny	$138,59824 \pm 57,89159$
Nachylenie	$0,54732 \pm 0,28946$
Resztowa suma kwadratów	64 235,86636
Współczynnik Pearsona r	0,5132
Współczynnik determinacji	0,26337
Skorygowany współczynnik determinacji	0,18971

Rys. 7. Wykres zależności naprężeń stycznych od naprężeń normalnych próbek o powierzchni gładkiej

4. ZAŁOŻENIA BADANIA NUMERYCZNEGO

W artykule poddano analizie trzy kształty łączników przedstawionych na rysunku 8, tj. kształt walca (I), walca o poszerzonej końcówce (II) i sinusoidalny (III). Następnie sparametryzowano ich wymiary. Po konsultacji z projektantem z firmy Soley przyjęto stałą wysokość 3 m oraz maksymalną szerokość całkowitą łącznika 30 cm. Na rysunku 8 przedstawiono kształty i wymiary łączników.



Rys. 8. Kształty i wymiary łączników:

I – kształt walca; II – kształt walca z poszerzoną końcówką; III – kształt sinusoidalny

W tabelach 4–6 przedstawiono wymiary analizowanych łączników oraz nadano im nazwę.

Tabela 4. Wymiary z łączników z grupy I

Grupa I			
Nazwa	Parametr a [m]	Nazwa	Parametr a [m]
I.0	0,15	I.8	0,23
I.1	0,16	I.9	0,24
I.2	0,17	I.10	0,25
I.3	0,18	I.11	0,26
I.4	0,19	I.12	0,27
I.5	0,20	I.13	0,28
I.6	0,21	I.14	0,29
I.7	0,22	I.15	0,30

Tabela 5 cd.
Tabela 5. Wymiary łączników z grupy II

Grupa II							
Nazwa	Parametr [m]			Nazwa	Parametr [m]		
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
II.0	0,025	0	0,3	II.18	0,050	0,40	0,7
II.1	0,025	0,2	0,3	II.19	0,050	0,60	0,7
II.2	0,025	0,4	0,3	II.20	0,050	0,0	1,1
II.3	0,025	0,6	0,3	II.21	0,050	0,2	1,1
II.4	0,025	0,0	0,7	II.22	0,050	0,4	1,1
II.5	0,025	0,2	0,7	II.23	0,050	0,6	1,1
II.6	0,025	0,4	0,7	II.24	0,075	0,0	0,3
II.7	0,025	0,6	0,7	II.25	0,075	0,2	0,3
II.8	0,025	0,0	1,1	II.26	0,075	0,4	0,3
II.9	0,025	0,2	1,1	II.27	0,075	0,6	0,3
II.10	0,025	0,4	1,1	II.28	0,075	0,0	0,7
II.11	0,025	0,6	1,1	II.29	0,075	0,2	0,7
II.12	0,05	0,0	0,3	II.30	0,075	0,4	0,7
II.13	0,05	0,2	0,3	II.31	0,075	0,6	0,7
II.14	0,05	0,4	0,3	II.32	0,075	0,0	1,1
II.15	0,05	0,6	0,3	II.33	0,075	0,2	1,1
II.16	0,05	0,0	0,7	II.34	0,075	0,4	1,1
II.17	0,05	0,2	0,7	II.35	0,075	0,6	1,1

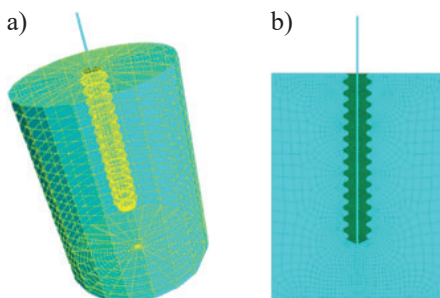
Tabela 6. Wymiary z łączników z grupy III

Grupa III		
Nazwa	Parametr <i>x</i> [m]	Parametr <i>y</i> [m]
III.0	0,02	0,04
III.1	0,02	0,06
III.2	0,02	0,08
III.3	0,03	0,06
III.4	0,03	0,09
III.5	0,03	0,12
III.6	0,04	0,08

Tabela 6 cd.

III.7	0,04	0,12
III.8	0,04	0,16
III.9	0,05	0,10
III.10	0,05	0,15
III.11	0,05	0,20
III.12	0,06	0,12
III.13	0,06	0,18
III.14	0,06	0,24

Wokół łączników zamodelowano cementogrunt o wysokości 4 m oraz średnicy 3 m. Na rysunku 9a pokazano model w 3D, a na rysunku 9b jego przekrój. W łączniku zamodelowano pręt o długości 2,7 m, w którym monitorowano wartość siły wrywającej. Symulacje ustawiono na 150 000 cykli, przy założeniu, że w każdym cyklu pręt przemieszcza się o 0,001 mm, czyli ostateczne przemieszczenie wynosi 15 cm (5% długości łącznika).



Rys. 9. Model 3D (a) i przekrój modelu (b)

Kolejnym etapem był wybór modelu konstytutywnego do opisania poszczególnych materiałów. W przypadku cementogruntu zdecydowano się na model Coulomba–Mohra, a w przypadku łącznika na model sprężysty. Podobne podejście przyjęto w innych źródłach [7, 8], ze względu na to, że bada się wpływ kształtu łącznika na zniszczenia i naprężenia w cementogrunie, a nie zniszczenia samego łącznika. Dodatkowo zamodelowano interfejs na połączeniu dwóch materiałów, a parametry do jego poprawnego opisania przyjęto z autorskich badań laboratoryjnych na wytrzymałość na ścinanie.

Przyjęto następujące parametry w przypadku modelowanych elementów:

- interfejs pomiędzy łącznikiem a cementogruntem:
 - kąt tarcia wewnętrzny – 31° ,
 - kohezja – 127 kPa,
 - sztywność normalna – 900 MPa,
 - sztywność styczna – 900 MPa;

- pręt:
 - gęstość 7850 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – 210 GPa ,
 - pole przekroju – $7,06858 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$,
 - moment bezwładności względem osi x oraz y – $3,976 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$,
 - stała skręcania – $7,952 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$;
- łącznik:
 - gęstość – 240 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – $31,4 \text{ GPa}$,
 - współczynnik Poissona – $0,18$;
- cementogrunt:
 - gęstość – 1780 kg/m^3 ,
 - moduł Younga – 90 GPa ,
 - współczynnik Poissona – $0,22$,
 - kąt tarcia wewnętrznego – 0° ,
 - kohezja – 450 kPa ,
 - wytrzymałość na rozciąganie – 90 kPa .

Symulacje wykonano w programie FLAC3D 9.0.0, który umożliwia programowanie w języku Python. Pozwoliło to na automatyczne wygenerowanie bazy danych wymiarów kształtów łączników, a następnie stworzenie modelu 3D. Kolejnym krokiem było wykonanie obliczeń oraz eksport najistotniejszych wyników do pliku Excel, co na dalszym etapie ułatwiło analizę wyników. Dzięki napisanemu kodowi udało się zautomatyzować proces i przeprowadzić łącznie 83 symulacje.

Obliczenia w przypadku kształtu walcowego przeprowadzono w trybie dużych oraz małych odkształceń. W programie FLAC3D tryb dużych odkształceń odnosi się do trybu obliczeń, w którym uwzględniane są zmiany geometrii siatki. Gdy wyłączymy ten tryb, pozycje węzłów pozostają niezmiennione, a obliczenia naprężeń i odkształceń są wykonywane przy użyciu pierwotnej siatki modelu. W tym trybie dokonywane są również dodatkowe obliczenia, takie jak korekta rotacji w przyrostach naprężeń w siatce.

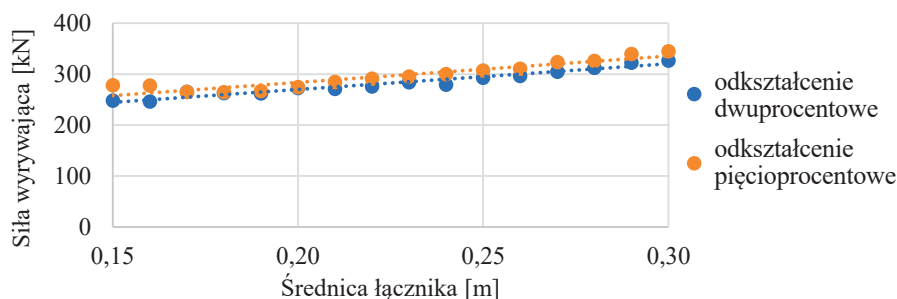
W modelach, w których dochodzi do dużych odkształceń, strefy mogą ulec skrajnym odkształceniom, co prowadzi do powstania geometrycznie niedopuszczalnych warunków, takich jak zerowa objętość elementu. W takiej sytuacji obliczenia programu zostają zatrzymane i stało się tak w przypadku kształtu II oraz III.

5. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Sumarycznie udało się przeprowadzić 83 symulacje dotyczące trzech kształtów łączników zamodelowanych w modelu sprężystym.

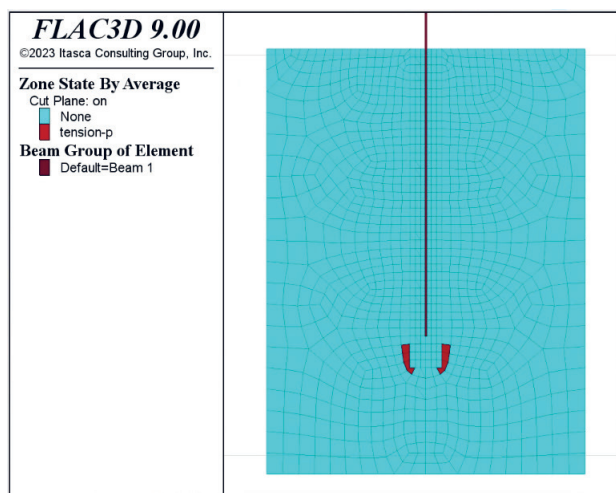
5.1. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW WALCOWYCH

Na rysunku 10 przedstawiono maksymalne siły wrywające kształtów walcowych przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5%, w trybie małych odkształceń. Analizując wykres, można zauważyć liniowy przyrost wartości maksymalnej siły wrywającej. Maksymalne siły uzyskano w przypadku łączników o największej średnicy – wynika to z rosnącej wraz ze średnicą powierzchni kontaktu.



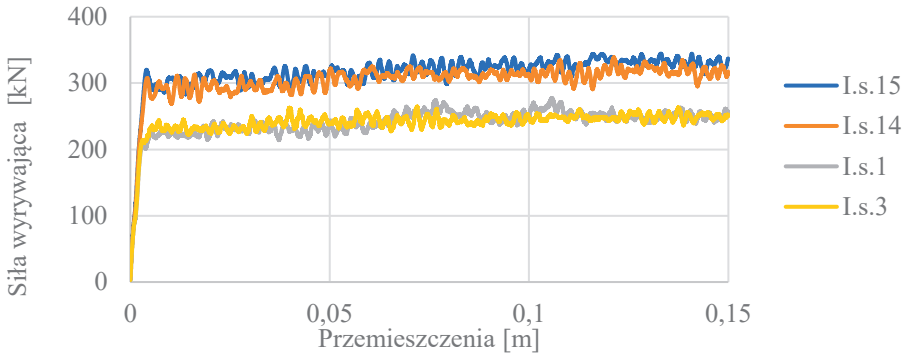
Rys. 10. Zależność maksymalnej siły wrywającej od średnicy łącznika o kształcie walca przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5% (tryb małych odkształceń)

Strefy uplastycznienia z wyłączeniem elementów kontaktowych przedstawiono na rysunku 11. Należy zauważyć, że do uplastycznienia dochodzi jedynie w kilku strefach cementogruntu oznaczonych kolorem czerwonym (zniszczenie na skutek rozciągania). Przy założeniu sprężystego zachowania się materiału łącznika zniszczenie zachodzi jedynie na kontakcie pomiędzy powierzchnią łącznika i cementogruntem.



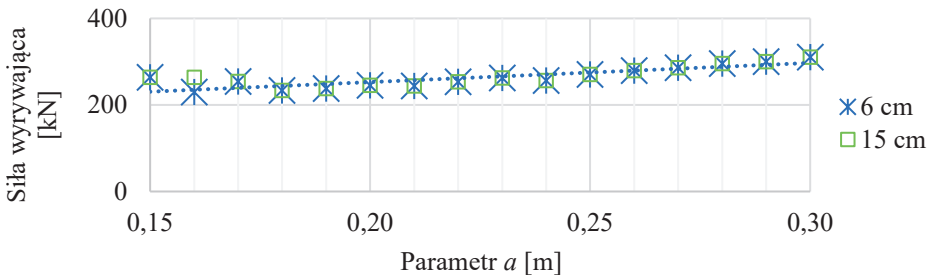
Rys. 11. Strefa uplastycznień walca o średnicy 30 cm (tryb małych odkształceń)

Na rysunku 12 zaprezentowano zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku czterech łączników. Wybrano po dwa łączniki o najwyższej i najniższej sile wrywającej przy odkształceniu wynoszącym 5%. Moment całkowitego uplastycznienia kontaktu jest dobrze widoczny w miejscu rozpoczęcia oscylacji siły wrywającej.



Rys. 12. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb małych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

Drugim wariantem wykonanych obliczeń dotyczących kształtu walca był tryb dużych odkształceń. Wyniki dotyczące wszystkich analizowanych średnic przedstawiono na rysunku 13.

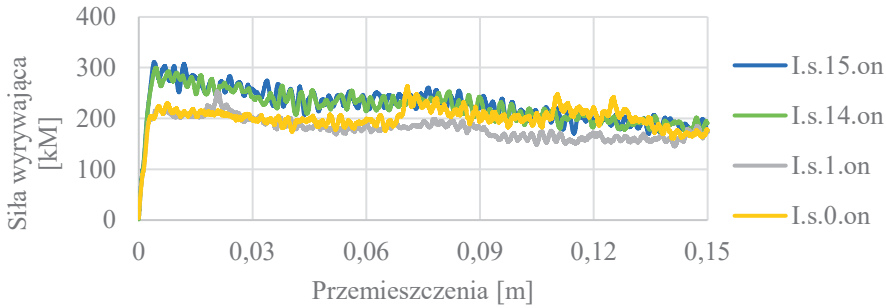


Rys. 13. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb małych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

Analizując rysunek 13, należy zauważyć, że wartości sił maksymalnych nieznacznie spadły w porównaniu z obliczeniami z wyłączonym trybem dużych odkształceń. Ponadto w większości przypadków siły wrywające dla odkształceń wynoszących 2% i 5% pokrywają się. Wyjątkiem jest walec o średnicy 16 cm.

Porównując wyniki otrzymane w efekcie zastosowania trybu dużych i małych odkształceń, można dojść do wniosku, że w trybie małych odkształceń dochodzi do nieuzasadnionego przyrostu siły wrywającej wraz z postępującym przemieszczeniem łącznika (nieuzasadnione umocnienie materiału).

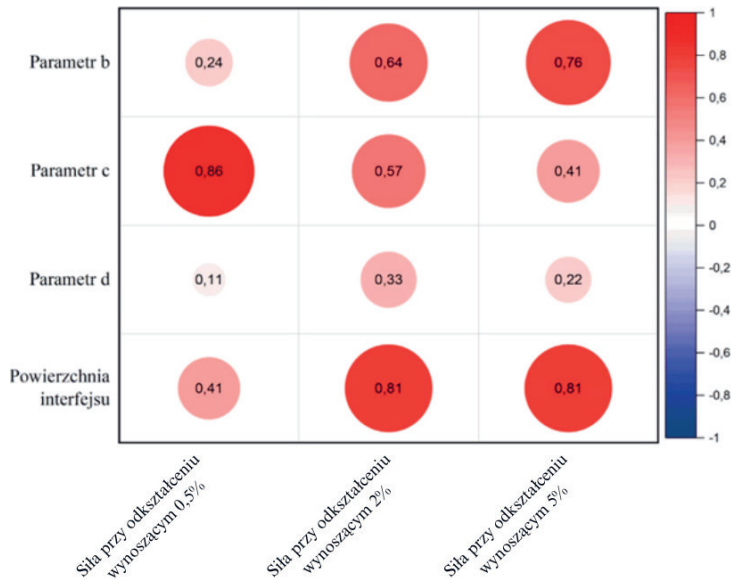
Największą różnicę pomiędzy obliczeniami w trybie małych i dużych odkształceń można zaobserwować na wykresie przedstawiającym zależność sił wrywających od przemieszczeń (rys. 14). Włączenie trybu dużych odkształceń spowodowało, że pomimo oscylacji wartość sił wrywających lekko spada wraz z przemieszczeniem.



Rys. 14. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców (tryb dużych odkształceń) – zakres do 5% odkształcenia

5.2. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW WALCA Z POSZERZONĄ KOŃCÓWKĄ

Kształt walca z poszerzoną końcówką powoduje zmianę w sposobie pracy łącznika. W celu dokładnego prześledzenia pracy łącznika wygenerowano macierz korelacji pomiędzy parametrami definiującymi geometrię łącznika i siłą wrywającą w różnych fazach odkształcenia (rys. 15).

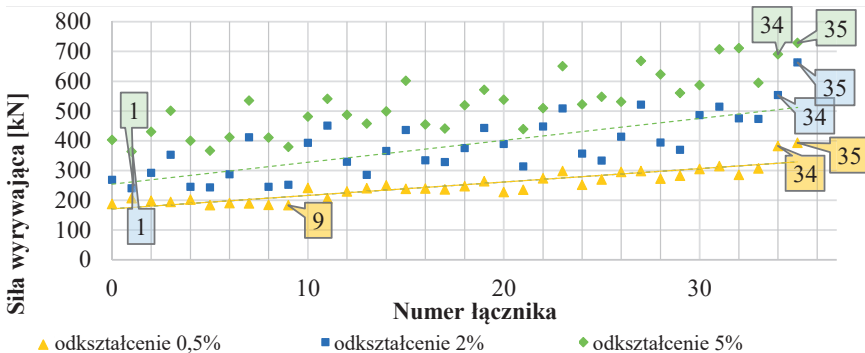


Rys. 15. Macierz korelacji pomiędzy parametrami opisującymi kształt walca o poszerzonej końcówce a maksymalną siłą wrywającą przy odkształceniach wynoszących 0,5%, 2% i 5%

Macierz korelacji ukazuje wpływ danego parametru na inny. Współczynnik korelacji równy -1 oznacza idealną odwrotną proporcjonalność między dwiema seriami danych, natomiast współczynnik korelacji równy 1 wskazuje na bezpośrednią proporcjonalność między dwiema seriami danych.

Analizując rysunek 15, należy zauważyć, że w początkowej fazie wrywania (odkształcenie wynoszące maksymalnie $0,5\%$) największym współczynnikiem korelacji do siły wrywania charakteryzuje się parametr c . Oznacza to, że w początkowej fazie siła mobilizuje się na pochylonej części klina łącznika. Występuje tam największy docisk, więc mamy do czynienia z najlepiej oddziałującym interfejsem. Następnie wraz ze wzrostem odkształcenia spada znaczenie parametru c , a wzrasta parametru b , który decyduje o wielkości poszerzenia końcówki. Wynika to z tego, że w drugiej fazie zniszczenie zachodzi już w cementogruncie, dlatego im większa wartość parametru b , tym większy tworzy się klin zniszczenia w cementogruncie i tym większą mobilizuje się siłę.

Na rysunku 16 przedstawiono maksymalne siły wrywające w przypadku poszczególnych numerów łączników przy odkształceniach wynoszących $0,5\%$, 2% oraz 5% . Do dalszej analizy wybrano po dwa kształty, które przeniosły największe obciążenia ($0,5\%$, 2% oraz 5% odkształceń) oraz po jednym, który przenosił najmniejsze obciążenia ($0,5\%$, 2% oraz 5% odkształceń).

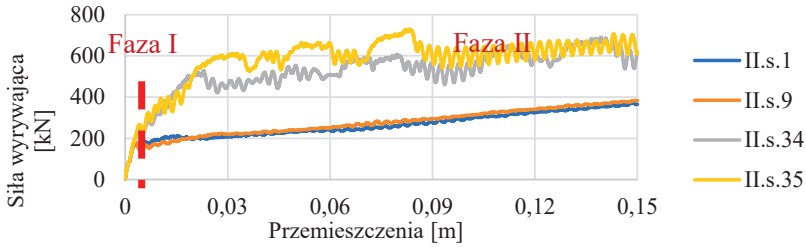


Rys. 16. Zależność maksymalnej siły wrywającej w przypadku poszczególnych numerów łączników o kształcie walca z poszerzoną końcówką przy odkształceniach wynoszących $0,5\%$, 2% oraz 5%

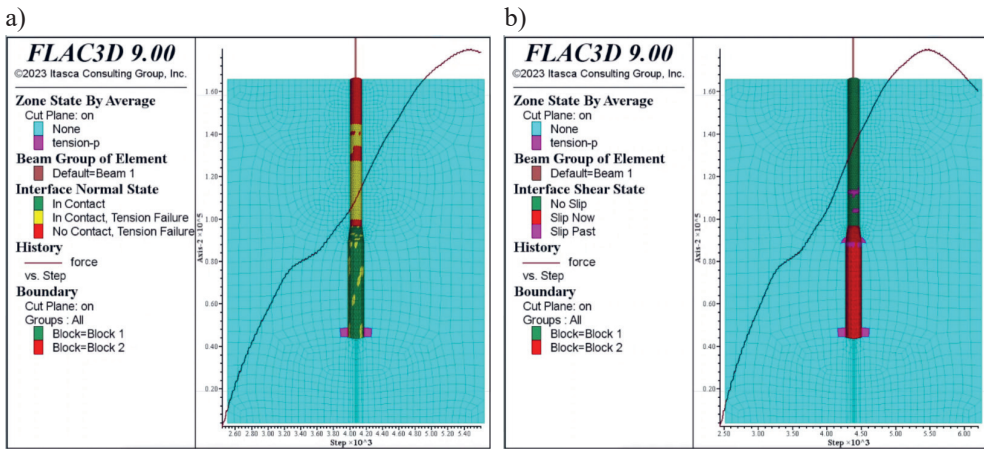
Na rysunku 17 przedstawiono, jak w przypadku wybranych łączników siła wrywająca zmienia się w zależności od przemieszczeń. W początkowej fazie I obserwuje się gwałtowny przyrost siły, który w momencie przejścia do fazy II pracy łącznika łagodnieje.

Schemat zniszczeń wygląda podobnie w przypadku wszystkich łączników i przedstawiono go na przykładzie łącznika II.9. W momencie przejścia z fazy I do fazy II pracy łącznika (zaznaczone na rysunku czerwoną przerywaną linią) pojawia się uplastycznienie elementów kontaktu spowodowane naprężeniami stycznymi w górnej części łącznika oraz występuje całkowite uplastycznienie elementów kontaktu spowodowane naprężeniami stycznymi na poszerzonej końcówce (rys. 18b).

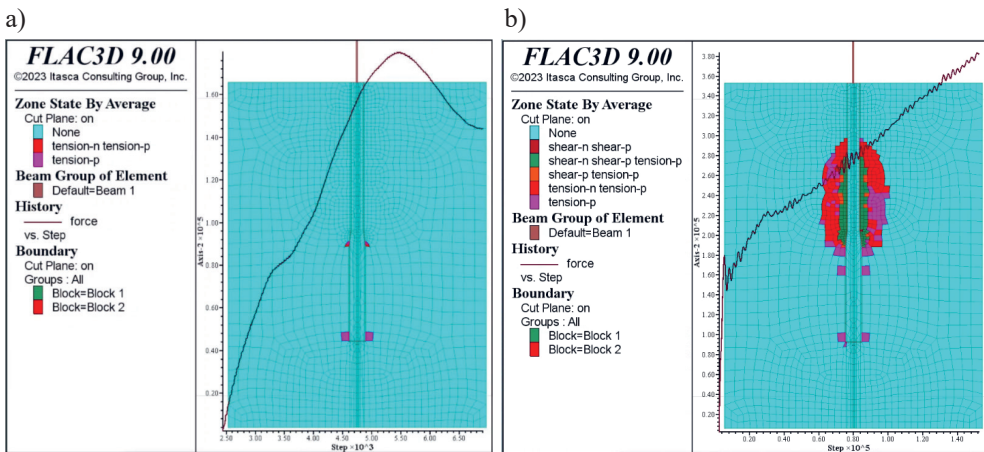
W fazie II pojawiają się pierwsze zniszczenia w cementogruncie, które wraz z kolejnymi cyklami obliczeniowymi postępują wzdłuż górnej części łącznika (rys. 19).



Rys. 17. Zależność siły wyrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych walców o poszerzonej końcówce – zakres do 5% odkształcenia



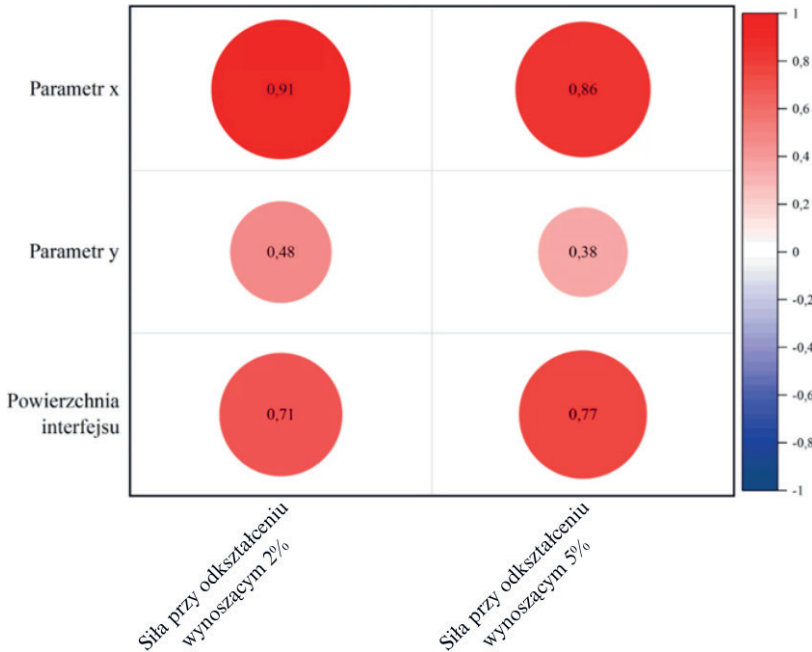
Rys. 18. Uplastycznienia elementów kontaktu na początku fazy II (łącznik II.9): a) spowodowane naprężeniami normalnymi; b) spowodowane naprężeniami stycznymi



Rys. 19. Strefa uplastycznień (łącznik II.9) w: a) pierwszej fazie symulacji; b) drugiej fazie symulacji

5.3. WYNIKI ANALIZY KSZTAŁTÓW SINUSOIDALNYCH

Na rysunku 20 przedstawiono macierz korelacji dla parametrów geometrycznych oraz siły wrywania przy różnych odkształceniach. Analizując rysunek 20, należy stwierdzić, że największe znaczenie dla wartości siły wrywającej ma parametr x , a więc amplituda sinusoidy. Parametr y (okres sinusoidy) ma mniejsze znaczenie zarówno w przypadku odkształcenia wynoszącego 2%, jak i 5%.



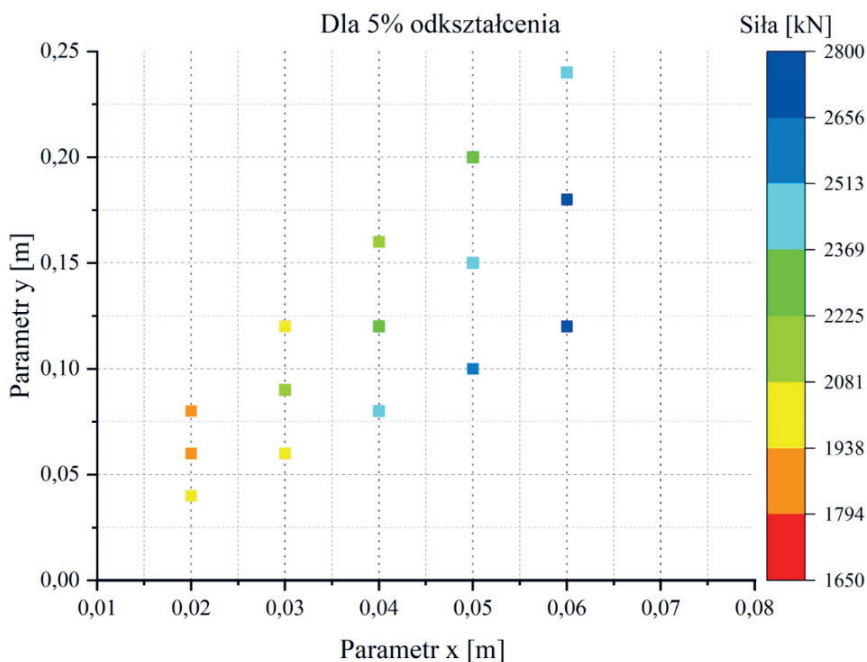
Rys. 20. Macierz korelacji pomiędzy parametrami opisującymi kształt sinusoidalny a maksymalną siłą wrywającą przy odkształceniach wynoszących 2% i 5%

Na rysunku 21 przedstawiono zależności pomiędzy parametrami x i y w kontekście maksymalnej siły wrywającej przy odkształceniu wynoszącym 5%. Obserwuje się, że wraz ze zwiększeniem wartości parametru x (amplituda) maksymalna siła wrywająca wzrasta. Jednocześnie w miarę wzrostu parametru y (okres), dla ustalonej wartości x , maksymalna siła wrywająca spada.

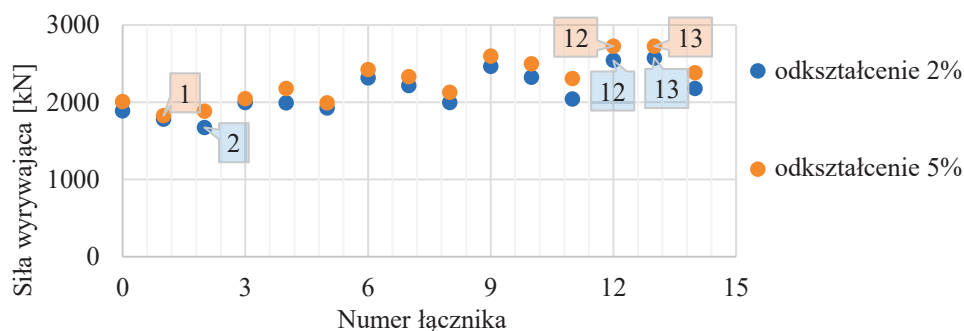
Maksymalne siły wrywające w przypadku poszczególnych numerów łączników przy odkształceniach wynoszących 2% i 5% przedstawiono na rysunku 22. Do dalszej analizy wybrano po dwa kształty, które przeniosły największe obciążenia (w przypadku odkształceń wynoszących 0,5%, 2% oraz 5%) oraz po jednym, który przenosił najmniejsze odciążenia (w przypadku odkształceń wynoszących 0,5%, 2% oraz 5%).

Rysunek 23 przedstawia zależność pomiędzy siłą wrywającą i przemieszczeniami łącznika. Na wykresie można zaobserwować duży wzrost siły wrywającej (faza I), po czym (w wyniku

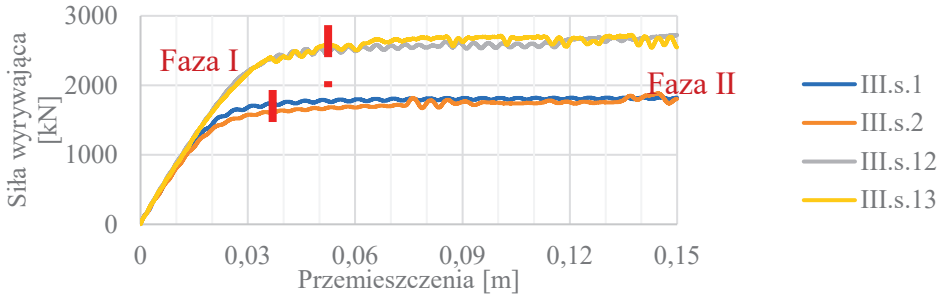
przekroczenia pewnej wartości siły wrywającej) następuje stabilizacja (faza II). W fazie II cementogrunt znajdujący się pomiędzy „ząbkami” łącznika uległ już zniszczeniu, dlatego nie obserwuje się przyrostu siły. W przypadku łącznika numer 13 można zaobserwować, że po przekroczeniu granicy około 4 cm dochodzi do całkowitego zniszczenia cementogruntu i pomimo dalszego wzrostu przemieszczeń siła wrywająca prawie się nie zmienia. Można więc przyjąć, że łącznik pracuje tylko gdy przemieszczenia nie przekroczą około 4 cm.



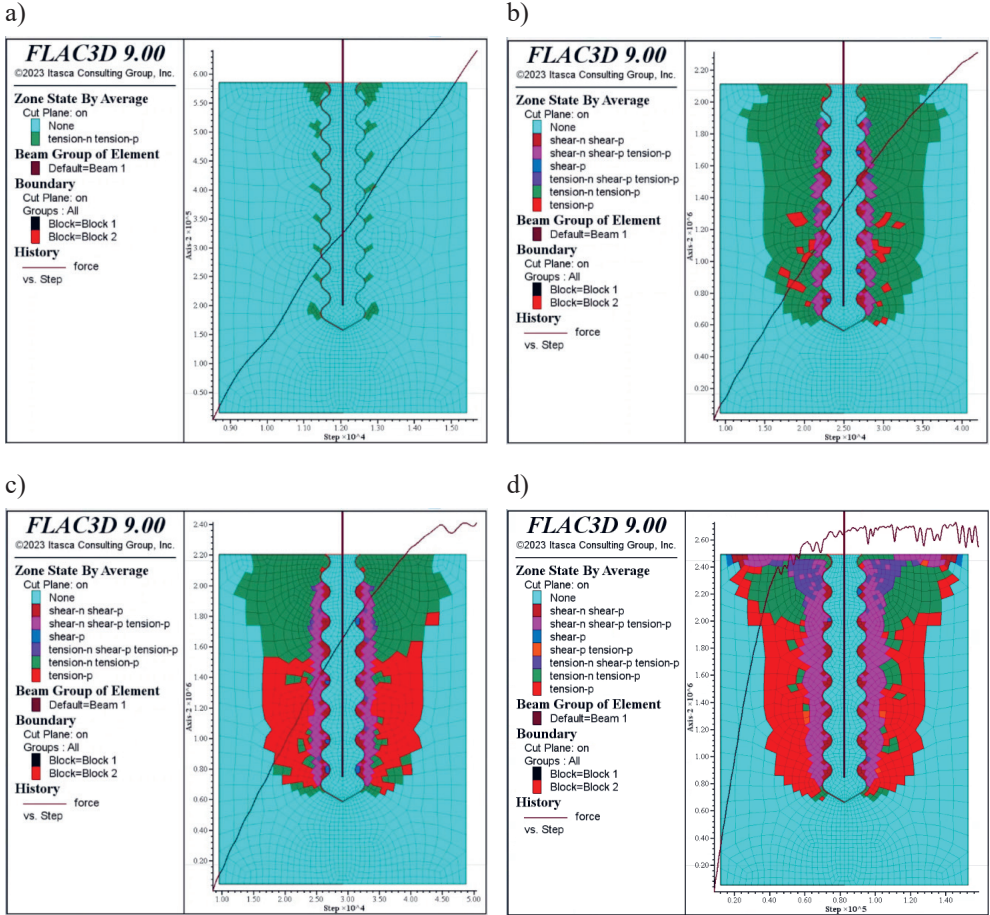
Rys. 21. Zależność siły wrywającej od parametrów x oraz y w przypadku łącznika o kształcie sinusoidalnym przy odkształceniu wynoszącym 5%



Rys. 22. Zależność maksymalnej siły wrywającej w przypadku łącznika o kształcie sinusoidalnym przy odkształceniach wynoszących 2% oraz 5%



Rys. 23. Zależność siły wrywającej od przemieszczeń w przypadku wybranych kształtów sinusoidalnych – zakres do 5% odkształcenia



Rys. 24. Strefy uplastycznień (łącznik numer III.0):
 a) na początku symulacji; b) w fazie I; c) w fazie II; d) po zakończeniu symulacji

Na rysunku 24 przedstawiono schemat przebiegu zniszczenia w otoczeniu łącznika na przykładzie łącznika numer III.13. Od samego początku łącznik pracuje na całej długości, zaś uplastycznienia pojawiają się na końcówkach „ząbków” (rys. 24a), a następnie postępują wzdłuż „ząbków” (rys. 24b). Warto zauważyć nagromadzenie uplastycznionych stref w górnej części łącznika. Moment przejścia z fazy I do fazy II następuje, gdy strefa cementogruntu w najbliższym sąsiedztwie łącznika przestaje stawiać opór i zostaje całkowicie zniszczona (rys. 24c). Na kolejnym etapie strefa zniszczenia cementogruntu postępuje i nieco się poszerza (rys. 24d).

LITERATURA

- [1] *Szczegółowa mapa geologiczna Polski*, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0970.jpg [dostęp: 2.01.2024].
- [2] Rohde M. i in., *Projekt budowlany: Budowy drogi ekspresowej S1 od węzła „Kosztowy II” w Mysłowicach do węzła „Suchy Potok” w Bielsku – Białej” wg wariantu E*, 2022.
- [3] Stefaniuk D., Menard P.M., Rybak J., *Praktyczne aspekty badania i projektowania kolumn DSM w gruntach organicznych*, [w:] *Duże mosty wieloprzęsłowe: projektowanie, technologie budowy, monitoring: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław, 29–30 listopada 2016*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2016, s. 193–202, <https://www.researchgate.net/publication/329973035> [dostęp: 2.01.2024].
- [4] PN-EN 12390-6:2011, *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.
- [5] PN-EN 12390-3:2019-07, *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.
- [6] Pisarczyk S., *Gruntoznawstwo inżynierskie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] Qian Y., Sun L., Ai L., Zhou Y., Li M.: *Theoretical analysis of the influence of bearing plate position on the bearing performance of soil around the CEP antipull force double pile*, *Buildings*, vol. 13(10), 2023, 2613, <https://doi.org/10.3390/buildings13102613>.
- [8] FLAC3D 9.0 Itasca Software Guide User Manual, <https://docs.itascacg.com/itasca900/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html?node1978> [dostęp: 9.05.2024].