

Wzmocniony gruntobeton

Przedmiotem wynalazku jest gruntobeton, modyfikujący właściwości gruntu i znajdujący zastosowanie w realizacji ścian dla szczelnych obudów wykopów, przegród przeciwfiltracyjnych oraz palisad i kolumn wykonywanych metodą wgłębnej stabilizacji polegającej na wgłębny mieszaniu gruntu (DSM - deep soil mixing) z zaczynem cementowym na mokro.

Gruntobetonowanie jest znanym i powszechnie stosowanym sposobem modyfikacji właściwości gruntów, szczególnie dla wzmocnienia gruntu rodzimego niespoistego, reprezentowanego głównie przez piaski gruboziarniste (Pr), średnioziarniste (Ps) i drobnoziarniste (Pd).

Niedogodnością znanych gruntobetonów są ograniczone odkształcenia plastyczne, wzmocnionego zaczynem gruntu, podczas obciążania i utrata nośności po zarysowaniu oraz niskie właściwości mechaniczne, zwłaszcza przy rozciąganiu.

Gruntobeton, w większym stopniu niż beton zwykły, jest mało odporny na rozciąganie przy zginaniu oraz na ściskanie, a także charakteryzuje się niską odpornością zmęczeniową i niską udarnością.

Dla poprawy parametrów gruntobetonu podobnie jak dla poprawy parametrów betonu stosuje się różne rodzaje zbrojeń od konstrukcyjnych i montażowych stalowych (skupionych) po strukturalne (rozproszone) różnych rodzajów.

Z praktyki przemysłowej znane jest wzmocnianie betonu zbrojeniem rozproszonym z użyciem włókien stalowych, szklanych lub polimerowych. Kompozyt taki nazywa się fibrobetonem. Cechuje go wyższa odporność na zarysowania zwiększona udarność i pseudoplastyczny charakter zniszczenia. Najczęściej stosowane do wzmocniania kompozytów mineralnych są włókna stalowe. Kształty, wymiary (długość 15-60 mm) i parametry włókien metalowych określa norma PN-EN 14889-1. Włókna stalowe nie znajdują zastosowania w gruntobetonach z uwagi na możliwą filtrację wód środowiskowych i związaną z tym korozję a tym samym spodziewaną niewielką ich trwałość. Ponadto właściwości mechaniczne włókien stalowych znacząco przekraczają zapotrzebowanie wynikające ze stosunkowo słabej matrycy gruntobetonowej.

Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie włókien polimerowych odpornych na oddziaływanie wody środowiskowej i nieulegających korozji w jej obecności. Włókna polimerowe są drugą pod względem ważności grupą włókien, stosowanych w zbrojeniach rozproszonych. Według normy PN EN 14889 - 2, włókna polimerowe definiuje

się, jako proste lub odkształcone fragmenty wytłaczanego, zorientowanego i ciętego materiału polimerowego, przydatne do jednorodnego wymieszania z betonem lub zaprawą. Jako zbrojenia konstrukcyjne wpływające na nośność elementu betonowego stosowane są włókna polipropylenowe klasy II o średnicy $> 0,30$ mm.

Włókna polimerowe stosowane są, jako dodatek do betonu w ilościach $0,9 \text{ kg/m}^3$ do 3 kg/m^3 pozwalają na np. ograniczenie skurczu lub eksplozyjnego złuszczenia się w warunkach działania ognia.

Ze stanu techniki znane są rozwiązania, wykorzystujące włókna polimerowe stosowane do wzmocnienie gruntu, polegające na ręcznym lub maszynowym rozsypywaniu krótkich włókien polipropylenowych o długości 12-19 mm i cementu na gruncie rodzimym. Cement wiążąc się z wodą zawartą w gruncie pozwala na uzyskanie wzmocnienia gruntu. Niedogodnością tego rozwiązania jest uzyskanie wzmocnienia jedynie dla przypowierzchniowej warstwy gruntu oraz stosunkowo niewielkie wykorzystanie zbrojenia rozproszonego (włókien polipropylenowych) ze względu na niewielką współpracę włókien ze słabą matrycą.

Badania gruntobetonu wzmocnionego krótkimi włóknami polipropylenowymi wykazało, że ten rodzaj zbrojenia nie zapewnia zadowalającego wzmocnienia gruntobetonu, w przypadku gruntów spoistych i niespoistych.

Znany jest z japońskiego zgłoszenia patentowego o nr JP 2007270488 gruntobeton wzmocniony włóknami polipropylenowymi. Włókna polipropylenowe mieszane są w ilości 0,4-2% w stosunku do objętości gruntobetonu wzmocnionego. Wytrzymałość na pękanie zastosowanych włókien wynosi 200-1200 MPa, natomiast stosunek długości włókna do jego grubości, w zastosowanych włóknach, jest większy niż 1000. W wyniku mieszania i ugniatania gruntobetonu włókna stanowiące zbrojenie rozproszone mogą być ze sobą połączone i powiązane.

Z chińskiego opisu patentowego nr CN 104099921 znany jest gruntobeton wzmocniony poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien o kształcie fali, przy czym wysokość fali mieści się w przedziale 0,1 mm – 0,5 mm, długość fali w przedziale 1mm – 5mm a średnica włókna w przedziale 0,1 mm do 1mm. Zbrojenie rozproszone dodawane jest w ilości 0,1% - 5% suchej masy gruntobetonu a długość włókien wynosi od 5 mm do 50mm. Japoński zgłoszenie patentowe nr JP 2012057334 rozwiązuje problem zwiększenia odporności nieprzepuszczalnej ścianki gruntobetonowej w sytuacji działania na nią obciążenia rozciągającego i zginającego poprzez zastosowanie włókna polipropylenowego równomiernie wymieszanego w matrycy gruntobetonu.

Z opisu zgłoszenia o numerze WO9919268 znane są włókna polipropylenowe przeznaczone do wzmocniania produktów z cementu, które zawierają na powierzchni warstwę polimeru zawierającą monomery olefinowe, otrzymywany poprzez obróbkę powierzchni za pomocą wodnej dyspersji tych polimerów a wyroby wzmocnione tego typu włóknami wykazują większą wytrzymałość na rozerwanie i na pękanie.

Wynalazek ujawniony w opisie patentowym EP2230350 dotyczy nowego włókna polimerowego przeznaczonego na zbrojenie rozproszone polimerowe otrzymywanego metodą przedzenia ze stopu polimeru. W opisie ujawniony jest sposób zastosowania włókna oraz sposobu jego wytwarzania.

Nadal jednak problemem jest opracowanie taniego i łatwego w stosowaniu, rodzaju zbrojenia rozproszonego wykonanego z polipropylenu, które umożliwi uzyskanie znacząco wyższych parametrów wytrzymałościowych fibrogruntobetonu przeznaczonego do wzmocnienia gruntu niespoistego, bez konieczności nadmiernego komplikowania technologii wykonywania i receptury wzmocnionego gruntobetonu.

Istotą wzmocnionego gruntobetonu według wynalazku jest zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci polipropylenowej taśmy fibrylizowanej, w odcinkach o długości 60 - 100 mm, jako pojedynczych odcinków taśm lub odcinków wiązek skręconych taśm zawierających od 2 do 8 taśm we wiązce. Wzmocniony gruntobeton, według wynalazku charakteryzuje się tym, że uzyskany jest poprzez równomierne rozprowadzenie w gruncie zbrojenia rozproszonego w postaci wspomnianych odcinków taśm lub odcinków skręconych taśm fibrylizowanych, w ilości 6 - 10 kg/m³ gruntobetonu, poprzez jego wymieszanie z zaczynem cementowym, w ilości 350-450 dm³/m³ gruntobetonu oraz macierzystym gruntem niespoistym, zwłaszcza takim jak piaski grubo-, średnio- i drobnoziarniste. Zaczyn cementowy wymieszany z gruntem macierzystym i zbrojeniem rozproszonym charakteryzuje się wskaźnikiem wodno - spoiwowym w zakresie 0,6-1,8 i wykonany jest z cementu portlandzkiego, CEM I lub CEM II, o klasie nie większej niż 42,5, przy tym podany zakres wartości wskaźnika wodno - spoiwowego uwzględnia wilgotność gruntu rodzimego.

Zastosowanie fibrylizowanej taśmy do wzmocnienia gruntobetonu, znacząco zwiększających wartości przenoszonych przez kompozyt maksymalnych naprężeń i powoduje, iż zniszczenie podczas zginania ma charakter pseudo-plastyczny. Zastosowane taśmy PP pozwalają na dalszą pracę elementu z gruntobetonu w stanie pokrytycznym umożliwiając uzyskanie wartości naprężeń pokrytycznych, przy zarysowaniu 10 mm, nie mniejszych niż 4,0 MPa. Przyczyną tego nieoczekiwanego efektu jest to, że w trakcie mieszania wiązki taśm ulegają rozkręceniu, a pojedyncze taśmy rozciągnięciu w kierunku prostopadłym do wzdłużnych osi odcinków a fibrylizowane taśmy uzyskują strukturę siatkową, przez co zwiększa się zakotwienie zbrojenia rozproszonego, według wynalazku, w matrycy gruntobetonu.

W rozwiązaniu według wynalazku, ilość taśm polipropylenowych i ich geometria oraz ilość zaczynu cementowego umożliwi uzyskanie żądanych właściwości reologicznych w stanie nieutwardzonym oraz równomierne rozprowadzenie włókien w matrycy gruntobetonowej.

Przedmiot wynalazku jest bliżej objaśniony w przykładach wykonania i zilustrowany na rysunku, na którym Fig.1 przedstawia zdjęcie zbrojenia rozproszonego - polipropylenowa taśma fibrylizowana(mikroskop optyczny, powiększenie 10x), Fig.2 przedstawia zdjęcie zbrojenia rozproszonego - rozciągnięta poprzecznie, w wyniku mieszania składników gruntobetonu, taśma fibrylizowana i jej siatkowa struktura (mikroskop optyczny, powiększenie 10x), Fig.3 przedstawia zdjęcie zbrojenia rozproszonego gruntobetonu w postaci skręconej wiązki polipropylenowych taśm fibrylizowanych (mikroskop optyczny, powiększenie 10x), Fig.4 przedstawia wykres zależności naprężenie – rozwarcie rysy CMOD gruntobetonów o składach omówionych w przykładzie 1 wykonania wynalazku zaś Fig.5 przedstawia wykres zależności naprężenie – rozwarcie rysy CMOD gruntobetonów o składach omówionych w przykładzie 2 wykonania wynalazku.

Przykład I.

Wzmocniony gruntobeton według wynalazku wykonany dla niespoistego gruntu rodzimego, w który jako zbrojenie rozproszone zastosowana została fibrylizowana taśma polipropylenowa.

Gruntobeton wzmocniony fibrylizowanymi taśmami polipropylenowymi wykonano na gruncie niespoistym, piasku Ps, o właściwościach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1.

Gęstość objęt. ρ [g/cm ³]	1,60
Gęstość objęt. szkieł. grunt. ρ_d [g/cm ³]	1,56
Wilgotność optymal. w_{opt} [%]	8,50
Wilgotność naturalna $w_{n.śr}$ [%]	4,00

Zaczyn cementowy wykonano z cementu CEM II/B-S 32,5R o właściwościach podanych w tabeli 2, spełniającego wymagania PN EN 197-1:2012, oraz wody zarobowej wodociągowej, tym samym spełniającej wymagania sprecyzowane w PN EN 1008:2004.

Tabela 2.

Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	18,0
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	49,0
Początek czasu wiązania [min]	190
Woda do konsystencji normowej [%]	28
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	3570

Jako zbrojenie rozproszone kompozytu zastosowano fibrylizowane taśmy PP o gęstości 0,91 g/cm³, w ilości 10 kg/m³ gruntobetonu. Użyte fibrylizowane taśmy polipropylenowe miały wymiary przekroju poprzecznego; grubości 0,16 mm i szerokości 4,35 mm. W przykładowym wykonaniu wykorzystano taśmy o długościach; dla pierwszego wykonania 60 mm (skład 3) i dla drugiego wykonania 100 mm (skład 4). Na zdjęciu prezentowanym, jako Fig. 1 przedstawiono wygląd fibrylizowanej taśmy polipropylenowej zaś jako Fig.2 i rozciągniętej poprzecznie taśmy, w celu pokazania jej siatkowej struktury podczas pracy w gruntobetonie.

Proporcje masowe składników kompozytów wykonanych w przykładzie I przedstawiono w tabeli 3, która zawiera charakterystykę składu gruntobetonów bez zbrojenia rozproszonego (skład 1); wzmacnianych standardowym zbrojeniem PP (skład 2) i fibrylizowanymi taśmami PP (składy 3-4). Podane wartości wskaźnika wodno-cementowego, masy gruntu i wody uwzględniają wilgotność naturalną gruntu (patrz tabl. 1). Dla celów porównawczych oraz dla udokumentowania efektywności zastosowanego zbrojenia rozproszonego według wynalazku, w postaci fibrylizowane taśmy polipropylenowej o dwóch wymiarach wykonano badania właściwości kompozytów gruntobetonowych według wynalazku i porównano z właściwościami kompozytów wykonanych z materiału o takim samym składzie, lecz pozbawionego zbrojenia rozproszonego (skład 1) oraz zbrojonego standardowym włóknem PP wykorzystywanym w technologii betonu zwykłego o długości 19 mm w ilości charakterystycznej dla fibrobetonu 1kg/m³ (skład 2).

Tabela 3.

Material / parametr	Skład 1	Skład 2	Skład 3	Skład 4
Grunt sypki [kg/m ³]	1516	1514	1500	
Cement [kg/m ³]	401	400	397	
Woda [kg/m ³]	262	262	260	
W/C [-]	0,8	0,8	0,8	
Zaczyn V_{zacz} [dm ³ /m ³]	450	450	445	
Standardowe włókna PP 19 mm [kg/m ³]	0	1	0	0
Taśma fibrylizowana PP 60 mm [kg/m ³]	0	0	10	0
Taśma fibrylizowana PP 100 mm [kg/m ³]	0	0	0	10

Skład gruntobetonu zapewnia uzyskanie możliwie największej wytrzymałość przy jednocześnie odpowiedniej konsystencji (rozplływ na stoliku rozplwowym do zapraw mierzony wg PN-EN 1015-3:2000 wyniósł około 200 mm), pozwalającej na swobodne, grawitacyjne ułożenie, zagęszczenie i tym samym znaczne odpowietrzenie mieszanki. Wprowadzenie taśm i jednorodne ich wymieszanie z matrycą powoduje nieznaczne obniżenie ciekłości mieszanki, redukując rozplływ do 180 mm. Uzyskana konsystencja pozwala na wbudowywanie kompozytu w konstrukcję metodami stosowanymi na skalę techniczną.

Badania cech mechanicznych gruntobetonów wzmocnianych taśmami PP wykonano po 28 dniach dojrzewania w warunkach uniemożliwiających wymianę masy pomiędzy próbką a otoczeniem. Wytrzymałość na ściskanie została określona na kostkach sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm, zgodnie z normą PN-EN 12390-4:2001.

Dla wykazania poprawy parametrów wzmocnionego fibrylizowanymi taśmami PP, jako zbrojeniem rozproszonym, gruntobetonu według wynalazku, w stosunku do rozwiązań standardowych wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie przy 3-punktowym zginaniu zgodnie z PN EN 14651:2007 wraz z określeniem wartości naprężeń pokrywicznych σ_{CMOD} . Ponadto oznaczono granicę proporcjonalności LOP (*limit of proportionality*) oraz MOR (*modulus of rupture*), a także całkowitą energią zniszczenia materiału G_{tot} . Badania te przeprowadzono na ciałach próbnych o wymiarach 150x150x600mm z karbem wykonanym na środku belki o głębokości 25 mm i szerokości 1 mm. Podczas stałego przyrostu ugięcia belki w czasie badania rejestrowano jednocześnie wartość działającej siły P, rozwarcie rysy zainicjowanej karbem CMOD (*crack mouth opening displacement*) oraz ugięcie belki d. Norma PN-EN 14651:2007 sugeruje zakończenie pomiarów przy rozwarciu rysy CMOD = 4 mm, jednak ze względu na rosnące naprężenia pokrywiczne, badanie kontynuowano do CMOD = 10 mm, dlatego wyznaczenie wartości naprężeń pokrywicznych dokonano przy CMOD = 0,5; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 mm. Wartość σ_{LOP} wyznaczono jako maksymalne naprężenie, przy którym nie obserwuje się już liniowej zależności pomiędzy naprężeniem i rozwarcie rysy. Współczynnik σ_{MOR} określa maksymalną wartość naprężeń przenoszonych przez włókna po zarysowaniu matrycy tj. po punkcie LOP. Całkowita energia zniszczenia G_{tot} wyznaczona jest jako pole powierzchni pod krzywą siła – ugięcie do ugięcia 10 mm i odniesiona do powierzchni przekroju próbki. Na rysunku (Fig.4) przedstawiono wykres uśrednionego przebiegu zależności naprężenie – CMOD dla czterech kompozytów o składzie ujętym w tabeli 3.

Tabela 4 natomiast zawiera zestawienie wszystkich analizowanych właściwości mechanicznych gruntobetonów o składach podanych w tabeli 3 a mianowicie; bez zbrojenia rozproszonego (skład 1); wzmacnianych standardowym zbrojeniem PP (skład2) i fibrylizowanymi taśmami PP (składy 3-4).

Tabela 4.

Parametr/materiał	Skład 1	Skład 2	Skład 3	Skład 4
Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ [MPa]	21,4	19,2	17,3	15,7
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{fm,28}$ [MPa]	2,4	2,0	5,7	4,8
σ_{LOP} [MPa]	-	2,0	2,8	2,1
σ_{MOR} [MPa]	-	0,5	5,7	4,8
$\sigma_{CMOD 0,5}$ [MPa]	-	0,4	3,6	1,9
$\sigma_{CMOD 2,5}$ [MPa]	-	0,5	5,2	3,2
$\sigma_{CMOD 5,0}$ [MPa]	-	0,4	5,4	4,1
$\sigma_{CMOD 7,5}$ [MPa]	-	0,2	5,7	4,6
$\sigma_{CMOD 10,0}$ [MPa]	-	0,1	5,5	4,7
G_{tot} [J/m ²]	77	620	9691	7448

Przykład II

Wzmocniony grutobeton według wynalazku wykonany dla niespoistego gruntu rodzimego, w który jako zbrojenie rozproszone zastosowana została skręcona wiązka fibrylizowanych taśm polipropylenowych.

W przykładzie II zastosowano te same składniki pod względem jakościowym jak i ilościowym jak w przykładzie I, z tą różnicą, że zastosowane zbrojenie rozproszone wykonano ze skręconej wiązki taśm fibrylizowanych w ilości 5 szt./wiązka. Ten rodzaj włókien cechuje silnie rozwinięta powierzchnia i tym samym dobra przyczepność do stosunkowo słabej matrycy grutobetonowej Fig.4. Średnica powstałych wiązek taśm wynosi około 2 mm. W przykładowym wykonaniu wykorzystano wiązki taśmy o długościach; dla pierwszego wykonania 60 mm (skład 3) i dla drugiego wykonania 100 mm (skład 4).

Skład kompozytów przedstawiono w tabeli 5, która zawiera charakterystykę składu grutobetonów bez zbrojenia rozproszonego (skład 1); wzmacnianych standardowym zbrojeniem PP (skład 2) i wzmocnionych skręconą wiązką polipropylenowych taśm fibrylizowanych (składy 3 - 4). Podane wartości wskaźnika wodno-cementowego, masy gruntu i wody uwzględniają wilgotność naturalną gruntu (tabl. 1). Metodę badań przyjęto identyczną jak w poprzednim przykładzie. Zastosowanie wiązki taśm fibrylizowanych spowodowało nieznaczne obniżenie ciekłości mieszanki (średnica rozplywu z 200 mm do 180 mm). Uzyskana konsystencja umożliwia wbudowanie materiału w konstrukcję metodami stosowanymi na skalę techniczną.

Tabela 5.

Parametr/materiał	Skład 1	Skład 2	Skład 3	Skład 4
Grunt sypki [kg/m ³]	1516	1514	1500	
Cement [kg/m ³]	401	400	397	
Woda [kg/m ³]	262	262	260	
W/C [-]	0,8	0,8	0,8	
Zaczyn V_{zacz} [dm ³ /m ³]	450	450	445	
Standardowe włókna PP 19mm [kg/m ³]	0	1	0	0
Wiązka taśm fibrylizowanych PP 60 mm [kg/m ³]	0	0	10	0
Wiązka taśm fibrylizowanych PP 100 mm [kg/m ³]	0	0	0	10

Na rysunku Fig.5 przedstawiono przebieg zależności naprężenie – CMOD, a wyznaczone właściwości mechaniczne gruntobetonów o składach 1 – 4 zebrano w tabeli 5.

Właściwości mechaniczne gruntobetonów bez zbrojenia rozproszonego (skład 1); wzmacnianych standardowym zbrojeniem PP (skład 2) i skręconą wiązką polipropylenowej taśmy fibrylizowanej (składy 3-4) zawiera tabela 6.

Tabela 6.

Parametr/ materiał	Skład 1	Skład 2	Skład 3	Skład 4
Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ [MPa]	21,4	19,2	18,4	18,8
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{tm,28}$ [MPa]	2,4	2,0	6,0	5,2
σ_{LOP} [MPa]	-	2,0	2,5	2,6
σ_{MOR} [MPa]	-	0,5	6,0	5,2
$\sigma_{CMOD 0,5}$ [MPa]	-	0,4	3,3	2,3
$\sigma_{CMOD 2,5}$ [MPa]	-	0,5	5,8	4,4
$\sigma_{CMOD 5,0}$ [MPa]	-	0,4	5,6	5,2
$\sigma_{CMOD 7,5}$ [MPa]	-	0,2	4,7	4,8
$\sigma_{CMOD 10,0}$ [MPa]	-	0,1	4,2	4,0
G_{tot} [J/m ²]	77	620	8792	7630

Wzmocnienie gruntu według wynalazku może znaleźć zastosowanie przy wykonywaniu szczelnych obudów wykopów, mieszając składniki na placu budowy np. metodą wgłębnego mieszania gruntu z zaczynem cementowym.

Rzecznik Patentowy

(2334)

mgr inż. Andrzej Rogowski