ŚRODOWISKO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-Ś/2011
ZESZYT 21
ROK 108
ISSUE 21
YEAR 108

JAN GASZYŃSKI*, ZBIGNIEW PABIAN**

BADANIA MODELOWE UDAROWEGO ZAGĘSZCZENIA GRUNTU SPOISTEGO

MODEL TESTS OF COMPACTION OF COHESIVE SOIL

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowych badań procesu zagęszczania gruntów spoistych metodą udarową. Po wcześniejszych eksperymentalnych badaniach laboratoryjnych obrazujących jednoosiowy stan odkształcenia przeprowadzono badania w skrzyni modelowej jako odzwierciedlenie płaskiego stanu odkształcenia i ocenę wpływu wielkości obciążenia udarowego, sposobu zadawania udarów oraz parametrów początkowych gruntu na efekty zagęszczenia.

Słowa kluczowe: zagęszczenie udarowe, grunt spoisty, obciążenie dynamiczne

Abstract

Results of compaction tests of cohesive soils, caused by an impact loading, are presented in the paper. After preliminary experimental oedometric tests in which the uniaxial strain condition was investigated, the new set of experiments under plane-strain condition was carried out in the testing chamber. The influence of the magnitude and frequency of applied impact loading, and initial state conditions as well, on soil densification, was studied.

Keywords: impact compaction, cohesive soils, dynamic loads

* Dr hab. Jan Gaszyński, prof. PK, dr inż. Zbigniew Pabian, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Oznaczenia

$E_{\text{jedn.}}$ – energia jednostkowa udaru, kNm/m^2
w_{opt} – wilgotność optymalna, %
w_p – granica plastyczności, %
w_L – granica płynności, %
$w_{\text{pocz.}}$ – wilgotność początkowa, %
ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, g/cm^3
ρ_{dp} – początkowa gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, g/cm^3
ρ_{dk} – końcowa gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, g/cm^3
$\Delta\rho$ – przyrost gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, g/cm^3
$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$ – względny przyrost gęstości objętościowej szkieletu gruntowego

1. Wstęp

W pracy [1] przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań doświadczalnych jednoosiowego stanu odkształceń prób gruntu spoistego pod obciążeniem udarowym. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki kontynuowanych badań nad procesem udarowego zagęszczania gruntów spoistych. Eksperyment rozszerzono o badania w skrzyni modelowej jako odzwierciedlenie płaskiego stanu odkształcenia i ocenę wpływu wielkości obciążenia udarowego, sposobu zadawania udarów oraz parametrów początkowych gruntu na zasięg i efekty końcowe zagęszczenia. Badania przeprowadzono na próbach gruntu o znacznie większych objętościach niż w eksperymentalnych badaniach laboratoryjnych. Pozwoliło to na ocenę wpływu miąższości zagęszczanej warstwy na końcowy efekt zagęszczenia oraz na ocenę zasięgu oddziaływania udarowej energii zagęszczania. Badania eksperymentalne i modelowe podjęto w celu poznania i oceny zachowania się gruntu pod obciążeniem udarowym, jak dzieje się to podczas stosowania tzw. metody konsolidacji dynamicznej w procesie wzmacniania podłoża gruntowego. Metoda dynamicznej konsolidacji gruntów polega na udarowym zagęszczeniu podłoża gruntowego ciężkimi ubijakami spadającymi swobodnie z pewnej wysokości. Istotą procesu wzmacniania podłoża tą metodą jest oddziaływanie fal podłużnych wywołanych energią udaru, które przenikają podłoże gruntowe na znaczną głębokość. Powodują one zagęszczanie, a następnie konsolidację gruntu w wyniku chwilowego silnego wzrostu naprężeń na szkielet gruntowy oraz wzrostu przepuszczalności (powstają w wyniku rozerwania szkieletu tzw. uprzywilejowane drogi odpływu), ułatwiając odpływ wody z porów gruntu oraz powodując zmniejszenie porowatości i wilgotności gruntu. W efekcie prowadzi to do wzrostu nośności podłoża. Proces udarowego zagęszczania obejmuje czyste zagęszczanie oraz w dalszym jego etapie (w zależności od warunków gruntowo-wodnych) konsolidację, przez co jest określeniem o szerszym znaczeniu niż konsolidacja dynamiczna, może dotyczyć wzmocnienia gruntów w każdej jego fazie nawilgocenia. Przy udarowym obciążeniu inaczej zachowują się utwory grubo okruchowe niespoiste, w których efekt zagęszczenia jest niemal natychmiastowy w wyniku ściśnięcia szkieletu gruntowego, a inaczej proces ten przebiega w gruntach spoistych, gdzie skutek udarów jest znacznie opóźniony i utrudniony, głównie przez opory w czasie odprowadzania wód porowych.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Proces wzmacniania tych gruntów metodą udarowego zagęszczania jest zatem bardziej skomplikowany, a uzyskanie pozytywnych efektów utrudnione. Te przesłanki zdecydowały o podjęciu badań przebiegu procesu zagęszczania gruntów tą metodą, właśnie dla gruntów spoistych [1]. W praktyce dobór energii zagęszczania i ocenę efektów dynamicznego zagęszczania prowadzi się na poletkach doświadczalnych, dochodząc do wartości optymalnych metodą prób [2, 3].

Badania przeprowadzone przez francuską firmę Menarda, w tzw. edometrze dynamicznym wyposażonym w czujniki pomiaru ciśnienia porowego, pozwalały ustalić przerwy czasowe miedzy udarami, natomiast grunty wykazujące wzrost zagęszczenia w badaniach laboratoryjnych o 4% nadają się do wzmocnienia tą metodą [4].

W artykule przedstawiono badania mające na celu ocenić wpływ wielkości obciążenia udarowego, sposobu zadawania udarów oraz parametrów początkowych gruntu na efekty zagęszczenia.

2. Materiał badawczy

Zarówno w pierwszym [1] etapie badań eksperymentalnych, jak i w badaniach modelowych materiałem badawczym był grunt drobnoziarnisty, średnio spoisty – glina pylasta lessopodobna, charakteryzująca się parametrami:

- gęstość właściwa $\rho_s = 2{,}671$ g/cm^2
- wilgotność optymalna $w_{opt} = 15{,}1\%$
- granice konsystencji $w_p = 18{,}6\%$, $w_L = 30{,}1\%$
- wskaźnik plastyczności $I_p = 11{,}5\%$

Założono, iż ocena i sprawdzanie efektów wzmacniania gruntów metodą udarową opierać się będzie na zmianach **gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i wilgotności.**

Badania modelowe procesu udarowego zagęszczania były przeprowadzone na próbach gruntu specjalnie przygotowanych i w takich ilościach, by parametry wyjściowe (początkowe) przyjętych prób gruntu do danego cyklu badań dały możliwość powtarzalności wyników. Grunt był przygotowany w dużych zamkniętych pojemnikach poprzez doprowadzenie go (dozowanie wody) do określonej i założonej wilgotności a następnie został zagęszczony i formowany bezpośrednio w skrzyni.

Grunt układano w 6 warstwach, zagęszczając każdą z nich 23 udarami znormalizowanego ubijaka według normalnej metody Proctora, czyli całą objętość próby energią równą ¼ energii (0,15 J/cm^3) zagęszczenia tą metodą. Przygotowanie próbek tą metodą miało na celu uzyskanie porównywalnych i jednakowych zagęszczeń dla określonych wilgotności gruntu przy badaniach doświadczalnych na wszystkich aparatach.

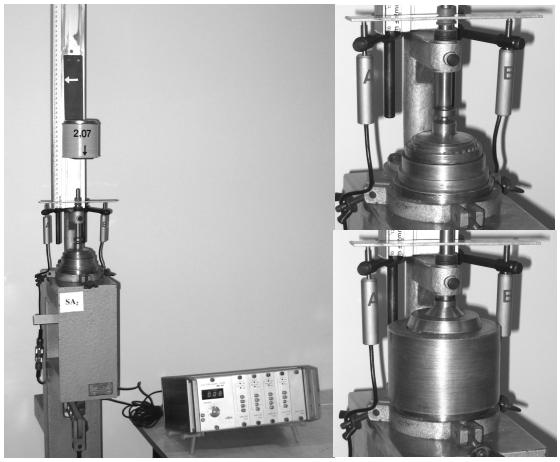
Grunt zabudowany w skrzyni modelowej zabezpieczono przed wysychaniem i przetrzymywano w aparacie przez 48 godzin do momentu rozpoczęcia badań w celu ustabilizowania się ciśnienia parowego i wilgotności. Z przygotowanego w ten sposób materiału gruntowego uzyskiwano próby gruntów pozwalające na powtarzanie badań na próbach o tych samych parametrach początkowych.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Aparatura badawcza

Stanowisko badawcze dla pierwszego etapu badań [1] składa się z edometru standardowego produkcji Zakładu Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Próba umieszczona jest w pierścieniu o wymiarach $\Phi = 64{,}95$ mm i wysokości $h = 20$ mm ($V = 66{,}23$ cm^3) i oparta na filtrze dolnym, pokryta pokrywą górną filtrowaną o $F = 33{,}16$ cm^2, poprzez którą zadawane jest obciążenie na próbkę gruntu.

Edometr został wyposażony w dodatkowe urządzenie, wykonane w Instytucie Geotechniki Politechniki Krakowskiej do zadawania obciążenia udarowego. Jest nim szyna jako pionowa prowadnica obciążnika (młota udarowego) oraz obciążnik o ciężarze $G = 20{,}7$ N, opadający po szynie na łożyskach kulkowych z wysokości $H = 0{,}2$, 0,4 i 0,8 m (fot. 1). Obciążnik uderza w trzpień przekazujący energię udaru na pokrywę górną edometru, a dalej na próbę gruntu. Dodatkowo badania prowadzono w edometrze zmodyfikowanym z pierścieniem o wysokości 6 cm pozwalającym na obciążanie próbek o zróżnicowanej miąższości $h_2 = 40$ mm oraz $h_3 = 60$ mm (fot. 1).



Fot. 1. Standardardowy i zmodyfikowany edometr do badań dynamicznych

Photo 1. Standard and modified oedometer designed for application of dynamic loading

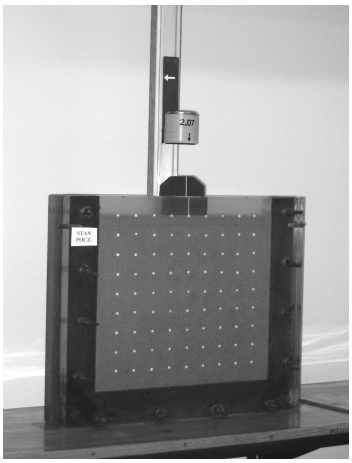
Stanowisko do **badań modelowych** składa się z płaskiej skrzyni modelowej, stempla, szyny jako pionowej prowadnicy ubijaka, którym zadawano udary. Dodatkowym wyposażeniem jest aparatura kontrolno-pomiarowa do oceny efektów badań. Zestaw do tych badań modelowych wykonano w laboratorium Instytutu Geotechniki PK.

– **skrzynia modelowa** (fot. 2) o wymiarach wewnętrznych $50 \times 50 \times 3{,}5$ cm, stanowi podstawowy element aparatury modelowej.

Zbudowana jest z grubych płyt (3,5 cm) przezroczystego pleksiglasu. Wewnętrzna część konstrukcyjna stanowiąca równocześnie ściany boczne i dno skrzyni wycięte w postaci „U" jest elementem, do którego mocowana jest na stałe ściana tylna oraz dostawiana i dokręcana ściana przednia. W części dennej zamontowane są zawory drenażowe. Grunt zabudowany jest w skrzyni do wysokości 45 cm, tj. 5 cm poniżej wysokości skrzyni.

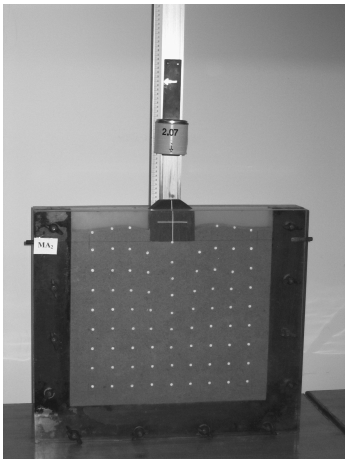
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– **stempel**, przez który zadawane jest obciążenie udarowe ma wymiary podstawy 3,50 × 9,47 i powierzchni identycznej jak powierzchnia pokrywy w edometrach, czyli $F = 33{,}16$ cm^2.
– **szyna** jako pionowa prowadnica obciążnika.



Fot. 2.A. Skrzynia badawcza – stan początkowy

Photo 2.A. Testing chamber – initial state



Fot. 2.B. Skrzynia badawcza – stan po obciążeniu

Photo 2.B. Testing chamber – state after application of loading

– **ubijak** do zadawania udarów dynamicznych o masie $G = 2{,}07$ kg opadający po szynie na łożyskach kulkowych z wysokości $H = 0{,}2$, 0,4, 0,8 m w zależności od zadawanej jednostkowej energii udaru.

3.1. Techniki pomiarowe

W skrzyni modelowej próba gruntu obciążona jest udarowo poprzez stempel spoczywający na powierzchni, a energia udaru przekazywana jest na pewien obszar wewnętrzny gruntu o wielkości i zasięgu zależnym od zadanej energii udaru. Strefa oddziaływania energii i ewentualnych efektów udarowego zagęszczenia jest ograniczona i nie obejmuje całej próby gruntu umieszczonej w skrzyni.

Tutaj nie można stosować takich technik pomiarowych, jak na stanowiskach badawczych z edometrami, gdzie oddziaływaniu energii udaru podlegała cała próba gruntu, co umożliwiało proste oznaczenie zmian objętości, wilgotności i zagęszczenia. Przezroczyste ściany skrzyni pozwalają natomiast na obserwację i rejestrację deformacji, czyli przemieszczeń pionowych i poziomych gruntu poddanego udarowemu zagęszczeniu. W tym celu po uformowaniu próby gruntu w skrzyni i zdjęciu ściany czołowej wciśnięto w grunt poziome repery w postaci szpilek stalowych. Rozmieszczono je w węzłach siatki 5 × 5 cm na całej powierzchni próby gruntu. Po zamknięciu ściany przedniej siatka reperów była widoczna i umożliwiła rejestrację ich przemieszczeń (rys. 2). Rejestrację deformacji całego układu gruntu z reperami wykonano za pomocą zdjęć fotograficznych na płycie szklanej aparatem wielkoobrazkowym „Globika” produkcji Carl Zeiss Jena Niemcy.

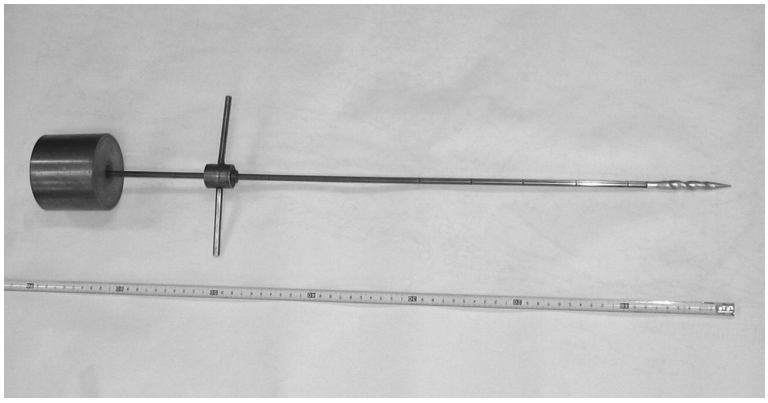
BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Zarejestrowane na fotograficznej płycie szklanej (20 × 15 cm) położenie reperów w stanie początkowym (rys. 2) i po każdym etapie badań pozwoliło na odczytanie ich współrzędnych na stereokomparatorze w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie. W dalszej kolejności ustalono wielkości i zasięg przemieszczeń poziomych, pionowych i całkowitych siatki reperów (rys. 3–5).

Próby oceny ilościowej efektów zagęszczania na podstawie przemieszczeń siatki reperów (np. zmiany powierzchni pól siatki) nie dały pozytywnego rezultatu. Wyniki pozwalają jedynie na rejestrację i wizualizację przemieszczeń. Nie uzyskano również informacji o zasięgu i wielkości zmian zagęszczenia na podstawie kilkunastu punktowych badań ścinarką obrotową i poboru lokalnych prób dla oceny gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. Skoro przyjęto, że głównym czynnikiem wynikowym będzie gęstość objętościowa szkieletu gruntowego jako ocena efektów udarowego zagęszczenia, zdecydowano wykorzystać takie techniki pomiarowe, które pozwolą bezpośrednio lub pośrednio na oznaczenie postępów badań na podstawie gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i do tego celu zastosowano mini sondę wkręcaną (fot. 3).

Do oceny i zasięgu postępów udarowego zagęszczenia w skrzyni modelowej skonstruowano mini sondę wkręcaną statyczną opartą na działaniu sondy statycznej wkręcanej typu Viktsond firmy „Borros". Sonda „Viktsond" posiada końcówkę spiralną, ślimakową i wkręcana jest w podłoże gruntowe przez żerdzie stalowe obciążone ciężarem do 100 kg. Służy do oceny stopnia plastyczności lub stopnia zagęszczenia gruntu.

Badanie wykonuje się poprzez zagłębienie sondy obciążonej ciężarem, wkręcając ją pokrętłem w podłoże i określając liczbę półobrotów sondy na 20 cm wpędu. Interpretacja wyników polega na ocenie stanu podłoża gruntowego w zależności od liczby półobrotów na 20 cm wpędu sondy, tzw. N_{20}. Mini sonda wkręcana (fot. 3) posiada końcówkę spiralną w skali 1:5, żerdzie w skali 1:5 oraz obciążenie w skali 1:50, czyli 2 kg. Ponieważ wcześniej przyjęto w skrzyni modelowej rozmieszczenie punktów pomiarowych w siatce 5 × 5 cm ustalono liczbę półobrotów sondy na 5 cm jej wpędu (N_5). Cechowanie sondy, czyli ustalenie zależności liczby półobrotów sondy (N_5) od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_d) przeprowadzono w laboratorium na tym samym materiale badawczym, czyli glinie pylastej.



Fot. 3. Mini sonda wkręcana statyczna – do oceny zagęszczenia w skrzyni badawczej

Photo 3. Static mini-probe for assessment of densification in the testing chamber

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Próby do badań przygotowano w gilzach stalowych o Φ = 8 cm i h = 40 cm. Grunt o wilgotności od 16,5–26% zagęszczono w gilzach w 6 warstwach energią 6 udarów znormalizowanego ubijaka metodą normalną Proctora (tzn. ok. 0,15 J/cm^3). Tak przygotowane próby gruntu po oznaczeniu wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego przesondowano w 3 punktach po 3 odczyty liczby półobrotów, zaczynając od głębokości 10 cm (9 wyników z jednej gilzy). Wartości te uśredniono i przypisano średnią do próby gruntu o danej wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (tabela na rys. 1). Zależność liczby półobrotów mini sondy (N_5) od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (ρ_d) dla badanego gruntu przedstawiono na wykresie (rys. 1). Mini sondę zastosowano do oceny efektów badań udarowego zagęszczenia gruntu w skrzyni modelowej, oznaczając sondowaniem stan początkowy (wyjściowy), a następnie wykonując pomiary po etapie udarowego zagęszczenia. Pomiary wykonywano po badaniu w osi centralnej udaru (w osi stempla nazwanej 25) oraz w osiach w odstępie co 5 cm (osie nazwano: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45). Odczyty półobrotów notowano na głębokościach co 5 cm (w 8 poziomach nazwanych: –5, –10, –15, –20, –25, –30, –35, –40). Duża selektywność sondy pozwoliła na uchwycenie nawet niedużych zmian gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

4. Plan i metodyka badań modelowych

W celu udokumentowania efektów procesu udarowego zagęszczenia podczas badań doświadczalnych przyjęto obserwację i pomiar wybranych parametrów, według których zdaniem autorów można przedstawić stan, tendencję i zakres zmian w badanym gruncie przed i po obciążeniu udarowym. Zdecydowano, że głównym czynnikiem wynikowym będzie zagęszczenie gruntu obrazowane gęstością objętościową szkieletu gruntowego, natomiast czynniki przyczynowe raz zmienne lub stałe mające wpływ na wynik końcowy to jednostkowa energia udaru, wilgotność początkowa oraz sposób zadawania obciążenia.

Badania eksperymentalne wykonane w skrzyni modelowej to odwzorowanie płaskiego stanu odkształcenia. Badanie przeprowadzono na tym samym gruncie co w edometrach, czyli glinie pylastej, a próby do badań odpowiednio przygotowane wypełniały cały obszar skrzyni modelowej tworząc model płaski, który obciążono udarowo poprzez stempel na górnej części powierzchni próbki gruntu. Próba gruntu (inaczej niż w edometrach) nie ma płaszczyzn ani warstw drenażowych, a przemieszczanie się wód porowych poza obszar obciążony odbywa się wyłącznie wewnątrz gruntu spoistego.

Przygotowane (wbudowane w skrzynię) próby gruntu o wilgotności:

$$w_1 = 19{,}5\%,\ w_2 = 21{,}0\%,\ w_3 = 23{,}0\%$$

obciążono udarowo energią jednostkową jednego udaru równą:

$$E_1 = 1{,}25\ \text{kNm/m}^2,\ E_2 = 2{,}5\ \text{kNm/m}^2,\ E_3 = 5{,}0\ \text{kNm/m}^2$$

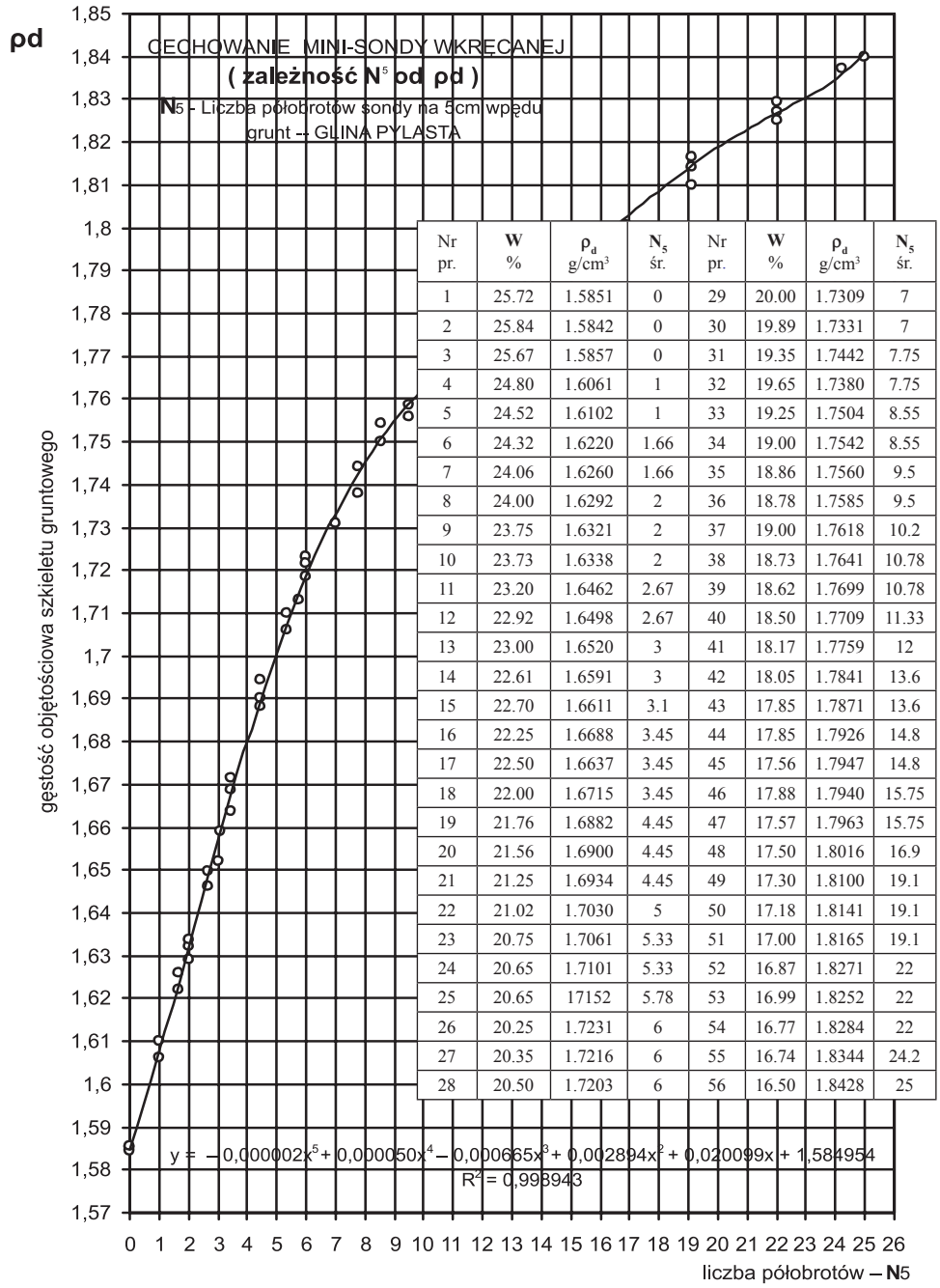
wg sposobu obciążenia:

A – 3 serie po 3 udary z odstępem czasowym 30 min. między seriami i 1 min pomiędzy pojedynczymi udarami w serii.

B – 9 udarów zadawanych w sposób ciągły z odstępem 1 min. pomiędzy udarami.

Badanie w skrzyni modelowej wykonano w trzech etapach – etap wstępny, zasadniczy i dodatkowy.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Nr pr.	W %	ρ_d g/cm^3	N_5 śr.	Nr pr.	W %	ρ_d g/cm^3	N_5 śr.
1	25.72	1.5851	0	29	20.00	1.7309	7
2	25.84	1.5842	0	30	19.89	1.7331	7
3	25.67	1.5857	0	31	19.35	1.7442	7.75
4	24.80	1.6061	1	32	19.65	1.7380	7.75
5	24.52	1.6102	1	33	19.25	1.7504	8.55
6	24.32	1.6220	1.66	34	19.00	1.7542	8.55
7	24.06	1.6260	1.66	35	18.86	1.7560	9.5
8	24.00	1.6292	2	36	18.78	1.7585	9.5
9	23.75	1.6321	2	37	19.00	1.7618	10.2
10	23.73	1.6338	2	38	18.73	1.7641	10.78
11	23.20	1.6462	2.67	39	18.62	1.7699	10.78
12	22.92	1.6498	2.67	40	18.50	1.7709	11.33
13	23.00	1.6520	3	41	18.17	1.7759	12
14	22.61	1.6591	3	42	18.05	1.7841	13.6
15	22.70	1.6611	3.1	43	17.85	1.7871	13.6
16	22.25	1.6688	3.45	44	17.85	1.7926	14.8
17	22.50	1.6637	3.45	45	17.56	1.7947	14.8
18	22.00	1.6715	3.45	46	17.88	1.7940	15.75
19	21.76	1.6882	4.45	47	17.57	1.7963	15.75
20	21.56	1.6900	4.45	48	17.50	1.8016	16.9
21	21.25	1.6934	4.45	49	17.30	1.8100	19.1
22	21.02	1.7030	5	50	17.18	1.8141	19.1
23	20.75	1.7061	5.33	51	17.00	1.8165	19.1
24	20.65	1.7101	5.33	52	16.87	1.8271	22
25	20.65	17152	5.78	53	16.99	1.8252	22
26	20.25	1.7231	6	54	16.77	1.8284	22
27	20.35	1.7216	6	55	16.74	1.8344	24.2
28	20.50	1.7203	6	56	16.50	1.8428	25

Rys. 1. Cechowanie mini sondy

Fig. 1. Calibrating of mini-probe

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Etap pierwszy wstępny to badania, po których zdecydowano, że do dalszych badań przyjęto próby gruntu o wilgotności 19,5, 21,0, 23,0%. Wykonano jedno doświadczenie wstępne dla prób o wilgotności początkowej 21% i jednostkowej energii udaru E_2 = kNm/m^2 w celu oceny sposobu pomiaru postępów udarowego obciążenia i przydatności zastosowanych technik pomiarowych. Przyjęty sposób pomiaru w tym etapie to obserwacja przemieszczeń pionowych i poziomych obszarów próby gruntu, na podstawie przemieszczeń siatki reperów (zamontowanych wewnątrz próby materiału badawczego) oraz ich pomiar i rejestracja według opisanych technik pomiarowych w pkt 3.

Etap drugi zasadniczy to przeprowadzenie eksperymentu w pełnym zakresie obciążeń (E_1 = 1,25 kNm/m^2, E_2 = 2,5 kNm/m^2, E_3 = 5,0 kNm/m^2) dla trzech parametrów początkowych (w_1 = 19%, w_2 = 22,5%, w_3 = 26,5%) wg sposobu obciążenia (A). Pomiar efektów udarowego zagęszczania wykonano inną techniką, tzn. mini sondą, pozwalającą na ocenę zmian gęstości objętościowej w oparciu o pomiar oporów sondowań.

Etap trzeci dodatkowy to doświadczenia na próbach o wilgotności w_1 i obciążanych udarowo wg sposobu obciążenia (B) oraz doświadczenia na próbach gruntu o wilgotności w_3 = 23% i energii jednostkowej udaru E_3 = 5,0 kNm/m^2 (sposób obciążeń A) z zastosowaniem w skrzyni modelowej 10 centymetrowych warstw filtracyjnych, oddzielnie w części dennej, części stropowej i dennej z boczną, a realizowany w celu oceny wpływu warstw filtracyjnych na postępy przy udarowym obciążeniu prób gruntu spoistego.

5. Wyniki i analiza badań

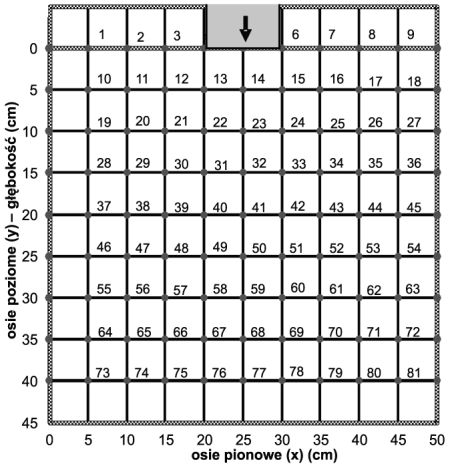
Po każdym etapie obciążenia wykonano pomiar zmian efektów zagęszczania jako zmian oporów sondowań (N_5), zmian gęstość objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d, przyrostów $\Delta\rho_d$ oraz względnych przyrostów $\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$ badanej próby gruntu, przedstawiając wyniki w postaci tabelarycznej.

Na wykresach przedstawiono zależność względnych przyrostów $\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$ od przyjętej energii udarów. Względny przyrost gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ($\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$) przyjęto jako główny parametr dający możliwość porównania oraz ustalenia zależności między wynikami z badań na próbach o różnych parametrach wyjściowych (ρ_{dp}).

5.1. Etap badań wstępnych

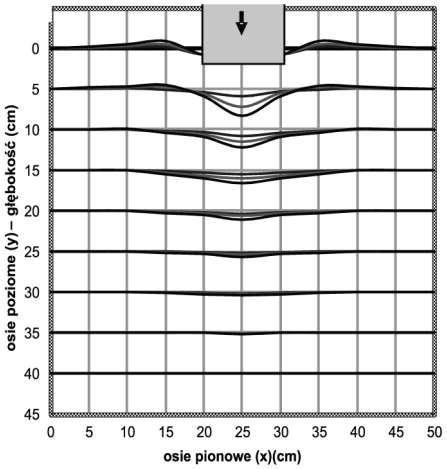
Doświadczenie wstępne wykonano na próbie materiału badawczego (*glina pylasta*) o wybranej średniej (jednej z trzech) wilgotności w_2 = 21% i obciążano ją udarowo 3 seriami udarów z przerwą pomiędzy seriami udarów (sposób A obciążenia) przy jednostkowej energii udaru E_2 = 2,5 kNm/m^2.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



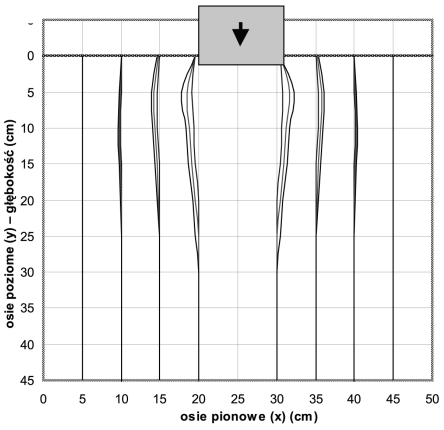
Rys. 2. Siatka reperów (stan początkowy)

Fig. 2. Net of benchmarks (initial state)



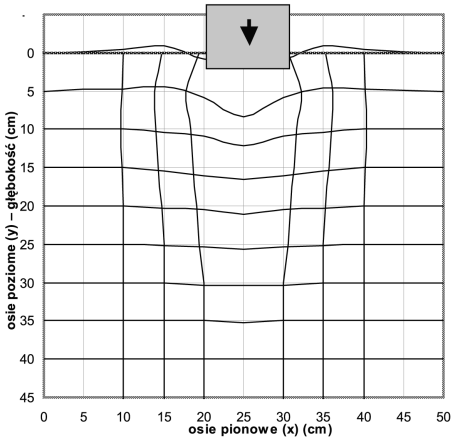
Rys. 3. Przemieszczenia pionowe

Fig. 3.Vertical displacements



Rys. 4. Przemieszczenie poziome

Fig. 4. Horizontal displacements



Rys. 5. Przemieszczenia całkowite

Fig. 5. Total deformation

Rejestrację wyników udarowego zagęszczania wykonano, opierając się na pomiarach przemieszczeń reperów zamontowanych w próbie gruntu i przedstawiono na rys. 2 jako układ siatki reperów w stanie początkowym (przed badaniem), na rys. 3 przemieszczenia pionowe reperów po każdej serii udarów, na rys. 4 przemieszczenia poziome reperów po każdej serii udarów i na rys. 5 przemieszczenia całkowite reperów i deformacje obszarów gruntu po 3 seriach udarów.

Wyniki badań z tego doświadczenia pozwalają na ocenę zasięgu i wizualizację przemieszczeń wewnątrz próby gruntu obciążanej udarowo w zależności od zadawanej energii udaru i tak:

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wraz ze wzrostem energii zagęszczenia wielkość przemieszczeń również wzrasta, natomiast przyrosty przemieszczeń nie są proporcjonalne do przyrostu energii i są coraz mniejsze mimo stałego przyrostu energii. Jest to wynikiem systematycznego wzmacniania gruntu i zwiększonych oporów wywołanych ściślejszym upakowaniem szkieletu gruntowego.
2. Największe przemieszczenia cząstek gruntu występują w strefie bezpośredniego oddziaływania obciążenia i maleją wraz ze wzrostem odległości od powierzchni obciążanej.

Próby ilościowej lub jakościowej oceny efektów udarowego zagęszczenia na podstawie punktowych badań wilgotności, gęstości objętościowej oraz zmian powierzchni pól siatki reperów nie pozwoliły na uzyskanie zadowalającej informacji o zasięgu i wielkości zmian zagęszczenia. Duża zmienność wartości parametrów w obszarze próby i niedokładność tych technik pomiarowych wymusiła zastosowanie innych metod oceny rezultatów badań. W następnych doświadczeniach zastosowano ocenę zagęszczenia metodą sondowania gruntu.

5.2. Etap badań zasadniczych (podstawowych)

Etap badań zasadniczych obejmował doświadczenie na próbach gruntu o trzech wilgotnościach początkowych tzn. $w_1 = 19{,}5\%$, $w_2 = 21{,}0\%$, $w_3 = 23{,}0\%$ i przy obciążeniu udarowym dla trzech energii jednostkowych udaru, tj. $E_1 = 1{,}25$ kNm/m^2, $E_2 = 2{,}5$ kNm/m^2 oraz $E_3 = 5{,}0$ kNm/m^2. Przyjęto w tym etapie dwa sposoby obciążenia : sposób A (3 serie × 3 udary) i sposób B (9 udarów ciągłych).

Po zabudowaniu jednorodnej próby gruntu o określonej wilgotności w skrzyni modelowej przeprowadzono sprawdzenie stanu początkowego zagęszczenia sondowaniem mini sondą, uzyskując wyjściową (początkową) wartość sondowań, tzw. Np oraz odpowiadającą jej wielkość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{dp} (wg rys. 1). Po przeprowadzeniu pełnego cyklu obciążenia udarowego sposobem A lub B wykonano pomiar zmian gęstości w próbie gruntu wywołanych tym obciążeniem. Pomiaru rezultatów udarowego zagęszczenia dokonano za pomocą sondowania mini sondą w całym obszarze próby, prowadząc sondowania z powierzchni gruntu w 8 osiach pionowych co 5 cm (z odstępem 5 cm między osiami), wykonując odczyty sondowań co 5 cm na całej głębokości. Tak też przedstawiono wyniki oporów sondowań w tabelach. Na rysunkach zobrazowano w postaci izolinii jednakowych oporów sondowań rozkład zmian, który powstał w całej próbie gruntu po cyklu udarowego obciążenia. Zmiany wartości oporów sondowań przeliczone na wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego umownie nazwano efektami zagęszczenia. Dodatkowo dla porównania wyników i ustalenia zależności między wynikami badań na próbach o różnych parametrach początkowych i obciążanych różnymi energiami przedstawiono w postaci tabelarycznej i graficznej wyniki uzyskane w osi centralnej badanych prób, czyli w osi zadawania udaru, gdzie zmiany efektów zagęszczania są największe (oś pionowa nazwana „25").

Dla zobrazowania procesu zagęszczania w skrzyni modelowej w artykule przedstawiono tylko wybrane, przykładowe wyniki badań przeprowadzone przy energii jednostkowej zagęszczania równej $E_3 = 5{,}0$ kNm/m^2 i trzech różnych wilgotnościach początkowych.

Wyniki badań w postaci oporów sondowań przedstawiono w tabelach 1–3.

Zasięg i wielkość obszarów wzmocnienia gruntu udarowym zagęszczeniem w zależności od przyjętych wilgotności początkowych prób gruntu przedstawiono na rys. 6–8 jako izolinie jednakowych oporów sondowań. Dodatkowo pokazano przestrzenny obraz zasięgu zmian po badaniu.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Analizując te wyniki, stwierdzić można, że:

- Na skutek zadawanego poprzez stempel udarowego obciążenia na część powierzchni próby gruntu powstaje w gruncie obszar odkształceń o zasięgu, kształcie i wielkości zależnym od wartości energii udaru.
- Przyrosty oporów sondowań (zagęszczenia) wzrastają podobnie w kierunku pionowym, czyli w głąb próby gruntu, jak i na szerokości próby.
- Bezpośrednio pod stemplem (punkt przyłożenia obciążenia) występuje strefa lokalnego rozluźnienia (uplastycznienia) gruntu, dopiero na większych głębokościach zaznacza się wzrost gęstości gruntu i jest maksymalny na głębokości około 2B (20 cm) od podstawy stempla.
- Rozluźnienie jest efektem gwałtownego rozrywającego grunt ciśnienia porowego wywołanego udarem. Fakt ten potęguje brak warstwy filtracyjnej pozwalającej na szybki odpływ wód porowych.
- Bez względu na parametry początkowe próby gruntu (wilgotność) obszar o zwiększonych oporach sondowań w stosunku do stanu wyjściowego jest największy oraz największe są przyrosty oporów sondowań po zastosowaniu największej energii udaru (E_3), czyli zagęszczenie wzrasta ze wzrostem zastosowanej do obciążenia energii, a maleją wraz ze wzrostem wilgotności początkowej badanej próby gruntu.
- Jeżeli przyjąć, że zmiany oporów sondowań (N_5) są odpowiednikiem zmian gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (korelacje wg rys. 1) nazwane umownie zmianami zagęszczenia, to obszar wzrostu oporów sondowań (ograniczony na rysunkach izoliniami) jest obszarem wzrostu zagęszczenia jako efektu udarowego obciążenia.

Tabela 1

Wyniki sondowań – badanie przy W_p = 19,5%

Parametry początkowe	E jedn. udaru	Głębokość poziom sondowania (co 5 cm)	Wyniki sondowań – liczba półobrotów N_5								
			osie pionowe sondowań (co 5 cm)								
			5	10	15	20	25	30	35	40	45
W_p = 19,5% N_p = 8 ρ_{dp} = 1,743 g/cm^3	5,0 kNm/m^2	–5	8	8	8	8	**9**	8	7	8	7
		–10	8	8	9	9	**10**	10	10	9	8
		–15	8	8	10	10	**15**	11	10	10	9
		–20	8	8	11	13	**16**	13	10	9	8
		–25	8,5	8	9	10	**14**	10	8	8	8
		–30	8	8	8	9	**11**	9	8	8	7
		–35	7,5	8	8	8	**10**	8	8	8	8,5
		–40	8	8	8,5	8	**9**	8	8	8,5	8

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 2

Wyniki sondowań – badanie przy W_p = 21,0%

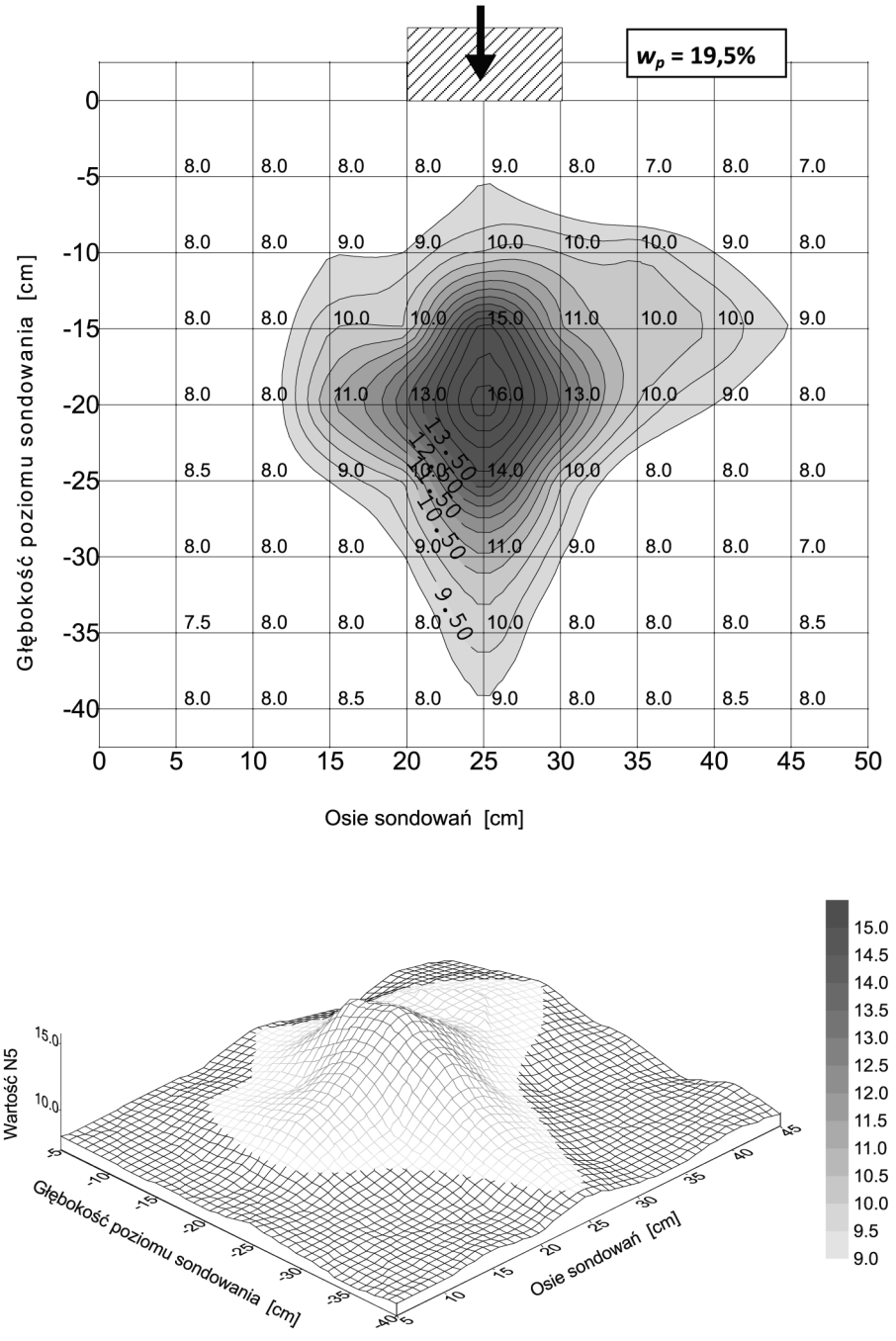
Parametry początkowe	E Jedn. udaru	Głębokość poziom sondowania (co 5 cm)	Wyniki sondowań – liczba półobrotów N_s								
			osie pionowe sondowań (co 5 cm)								
			5	10	15	20	25	30	35	40	45
W_p = 21% N_p = 5 ρ_{dp} =1,703 g/cm^3	5,0 kNm/m^2	–5	5	5	5	4	**5**	4,5	5	5	5,5
		–10	5	4,4	5	5	**6**	5	5	5	4,5
		–15	4,5	5	5	6	**9**	6	6	6	5
		–20	5	6	8	9	**10,5**	8,5	8,5	8	5
		–25	5,5	5	7	9	**10**	8	8	6	5
		–30	5	5	6	7	**7**	5,5	5,5	5	5
		–35	4,5	5,5	5	6	**5**	5	5	5	4,5
		–40	5	5	5	5	**5**	5	5	5	5

Tabela 3

Wyniki sondowań – badanie przy W_p = 23,0%

Parametry początkowe	E Jedn. udaru	Głębokość poziom sondowania (co 5 cm)	Wyniki sondowań — liczba półobrotów N								
			osie pionowe sondowań (co 5 cm)								
			5	10	15	20	25	30	35	40	45
W_p = 23% N_p = 3 ρ_{dp} = 1,656 g/cm^3	5,0 kNm/m^2	–5	3	2,5	3	2	2	1	2	3	3
		–10	3	3	3	3	3	3	3	3	2,5
		–15	2,5	3	3	4	6	4	3	3	3
		–20	3,5	3	4	5	6,5	5	4,5	3	3
		–25	3	3	3	4	5,5	4,5	3	3	3
		–30	3	2,5	3	3	4,5	4	3	3,5	2,5
		–35	3	3	3	3	3,5	3	3	3,5	3
		–40	3	3	3	3	3	3	3	3	3

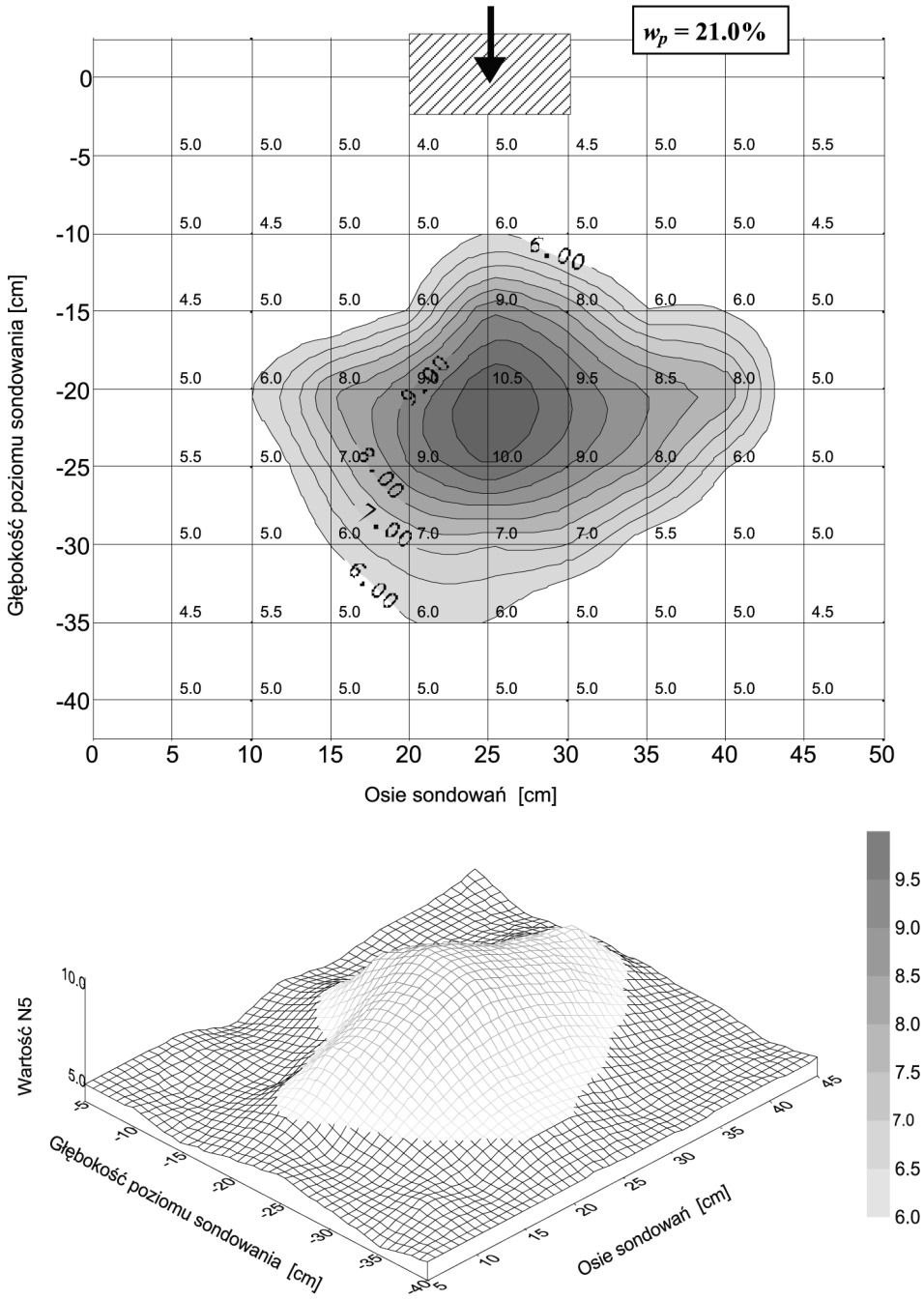
BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 6. Izolinie oporów sondowań N_5 $E_{jedn.}$ = 5,0 kN/m^2 – W_p = 19,5%

Fig. 6. Isolines of sounding resistance N_5 $E_{jedn.}$ = 5.0 kN/m^2 – W_p = 19,5%

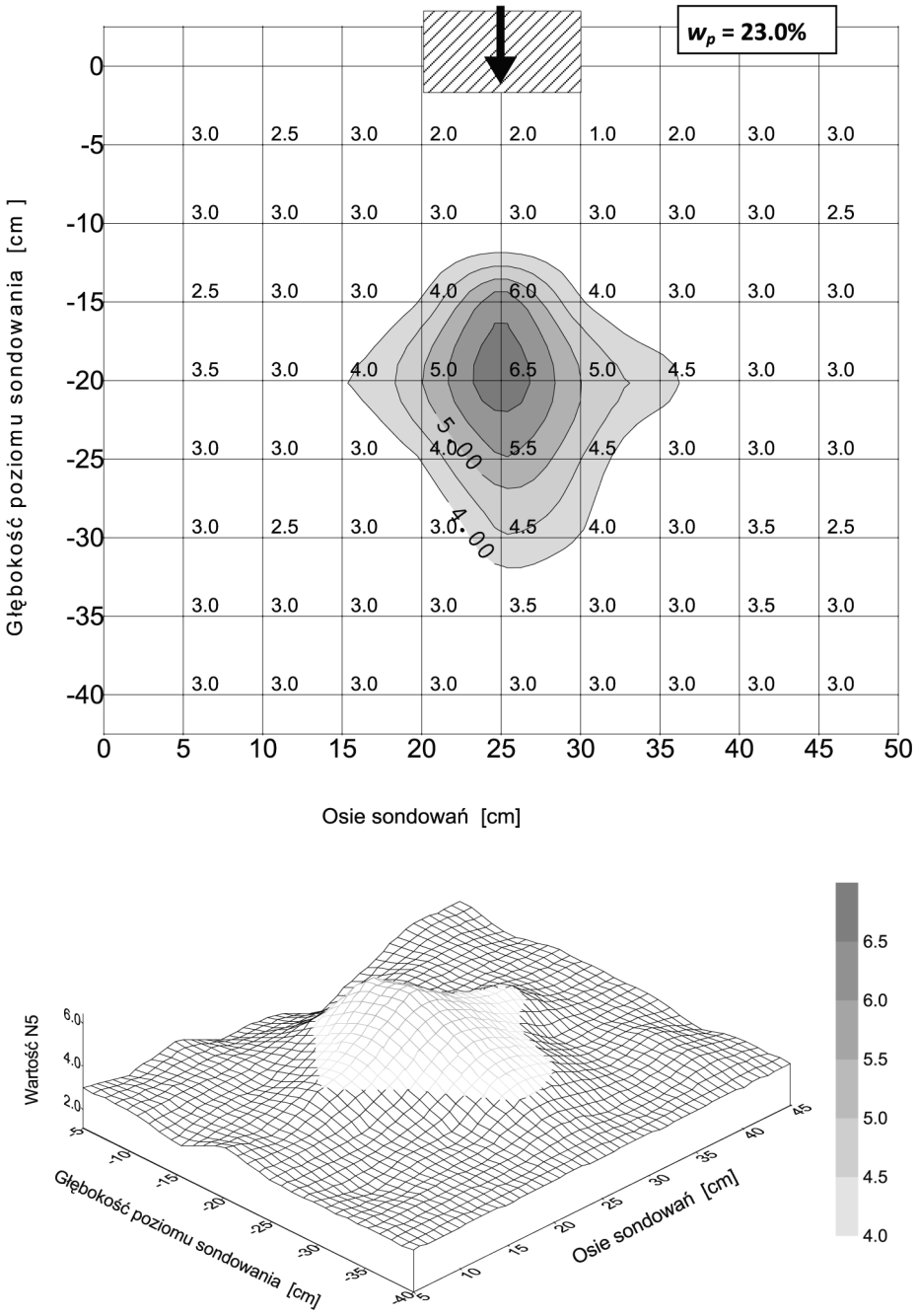
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 7. Izolinie oporów sondowań N_5 $E_{jedn.}$ = 5,0 kN/m² – W_p = 21,0%

Fig. 7. Isolines of sounding resistance N_5 $E_{jedn.}$ = 5,0 kN/m² – W_p = 21,0%

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 8. Izolinie oporów sondowań N_5 $E_{jedn.}$ = 5,0 kN/m² – W_p = 23,0%

Fig. 8. Isolines of sounding resistance N_5 $E_{jedn.}$ = 5,0 kN/m² – W_p = 23,0%

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Analizując przebieg, wielkość i zasięg zmian w gruncie wywołanych obciążeniem udarowym, stwierdzono, że dla każdej badanej próby największe i najbardziej reprezentatywne zmiany występują w osi obciążenia, czyli w osi pionowej pod stemplem (oś oznaczona „25"). Dlatego do dalszej analizy wyników, a głównie do próby oceny ilościowej efektów udarowego zagęszczenia z badań na modelu płaskim, przyjęto wyniki uzyskane z doświadczeń przedstawiające obraz zmian w próbie gruntu w jej przekroju centralnym, czyli w osi (stempla) działania obciążenia. Przyjęta do analizy ta część wyników pozwala na ich porównanie i ustalenie zależności między wynikami z badań na próbach o różnych parametrach początkowych i przy różnych zastosowanych energiach udarowego zagęszczania.

Wyselekcjonowane z ogólnych wyników badań wartości oporów sondowania w osi obciążenia („25") próbki przedstawiono w tabelach 4–6. W tabelach przedstawiono wyniki w postaci:

- oporów sondowań (N) na głębokościach co 5 cm,
- odpowiadające im gęstości objętościowe szkieletu gruntowego (ρ_{dk}),
- przyrosty gęstości $\Delta\rho_d$ (od wartości początkowej),
- względne przyrosty gęstości $\Delta\rho_d/\rho_{dp}$.

Wyniki z tabel przedstawiono również w postaci graficznej na rysunkach 9 i 10.

Uzyskane z badań w skrzyni modelowej wyniki obrazujące zmiany odkształcenia w przekroju centralnym, czyli w osi obciążenia, a przedstawione w tab. 4–6 oraz na rys. 9–10 wskazują na wpływ parametrów początkowych prób gruntu i wartości energii udarowej na końcowe efekty zagęszczenia.

- Wraz ze wzrostem wartości obciążenia udarowego, bez względu na parametry początkowe, zwiększa się obszar i wartość przyrostu zagęszczenia.
- Przy określonej udarowej energii zgęszczania całkowite maksymalne wartości oporów sondowań N i odpowiadające im ρ_d końcowe jest tym większe, im niższa była wartość wilgotności początkowej (większe ρ_{dp}), bardziej zbliżone do wielkości optymalnej (badań przy wilgotności optymalnej nie prowadzono, gdyż grunty spoiste o tej wilgotności nie wymagają wzmocnienia).
- Całkowite maksymalne przyrosty $\Delta\rho_d$, a przede wszystkim względne przyrosty $\Delta\rho_d/\rho_{dp}$ są tym większe, im wyższa była wartość wilgotności początkowej.
- Wprawdzie maksymalne wartości względnego przyrostu zgęszczenia są większe dla prób o większej wilgotności początkowej, to występują one lokalnie na małym obszarze próby, natomiast przy wilgotności niższej strefa przyrostu gęstości (zagęszczenia) jest znacznie większa zarówno na głębokości, jak i na szerokości próbki i bezwzględna wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (końcowa wartość zagęszczenia) jest większa.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 4

Wyniki sondowań w osi obciążenia przy Wp = 19,5%

Wp [%]	Param. pocz.	E_{jedn} udaru	Przyrost od wart. pocz.	Głębokość (poziom sondowania) co 5 cm							
				–5	–10	–15	–20	–25	–30	–35	–40
19,5	$N_p = 8\ \rho_{dp} = 1{,}743$ g/cm^3	1,25 kNm/m^2	N_5	7	9	12	13	11	9	8	8
			ρ_{dk}	1,732	1,753	1,775	1,781	1,769	1,753	1,743	1,743
			$\Delta\rho_d$	–0,011	0,010	0,032	0,038	0,026	0,010	0	0
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–63	57	184	218	149	57	0	0
		2,5 kNm/m^2	N_5	8	10	14	14	12	10	8	8
			ρ_{dk}	1,743	1,762	1,787	1,787	1,775	1,762	1,743	1,743
			$\Delta\rho_d$	0	0,019	0,044	0,044	0,032	0,019	0	0
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	0	109	253	253	184	109	0	0
		5,0 kNm/m^2	N_5	9	10	15	16	14	11	10	9
			ρ_{dk}	1,753	1,762	1,793	1,798	1,789	1,769	1,762	1,753
			$\Delta\rho_d$	0,010	0,019	0,050	0,055	0,044	0,026	0,019	0,010
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	57	109	287	316	253	149	109	57

Tabela 5

Wyniki sondowań w osi obciążenia przy Wp = 21,0%

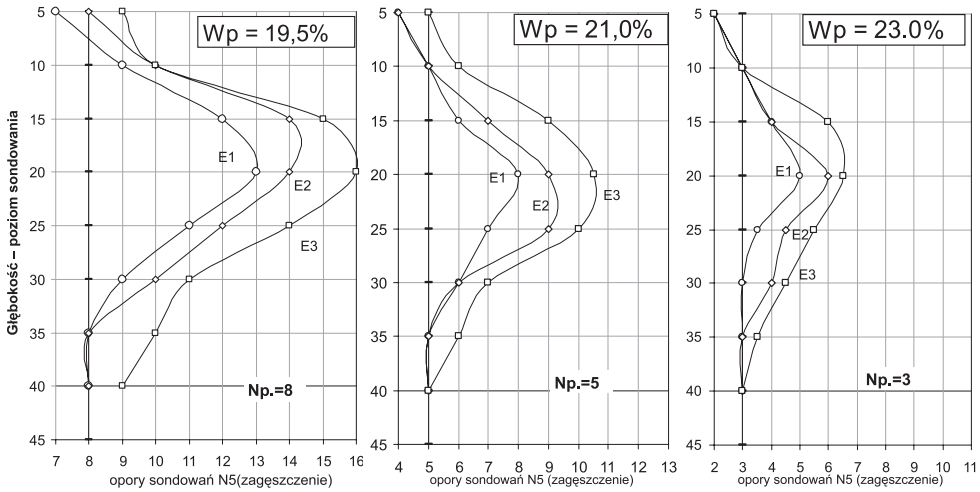
Wp [%]	Param. pocz.	$E_{jedn.}$ udaru	Przyrost od wart. pocz.	Głębokość (poziom sondowania) co 5 cm							
				–5	–10	–15	–20	–25	–30	–35	–40
21,0	$N_p = 5\ \rho_{dp} = 1{,}703$ g/cm^3	1,25 kNm/m^2	N_5	4	5	6	8	7	6	5	5
			ρ_{dk}	1,680	1,703	1,720	1,743	1,732	1,720	1,703	1,703
			$\Delta\rho_d$	–0,023	0	0,017	0,040	0,029	0,017	0	0
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–135	0	100	235	170	100	0	0
		2,5 kNm/m^2	N_5	4	5	7	9	9	6	5	5
			ρ_{dk}	–0,023	0	0,029	0,050	0,050	0,017	0	0
			$\Delta\rho_d$	1,680	1,703	1,732	1,753	1,753	1,720	1,703	1,703
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–135	0	170	294	294	100	0	0
		5,0 kNm/m^2	N_5	5	6	9	10,5	10	7	6	5
			ρ_{dk}	1,703	1,720	1,753	1,765	1,762	1,732	1,720	1,703
			$\Delta\rho_d$	0	0,017	0,050	0,062	0,062	0,029	0,017	0
			$\Delta\rho_d/\rho_{dp} \times 10^{-4}$	0	100	294	364	346	170	100	0

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 6

Wyniki sondowań w osi obciążenia przy Wp = 23,0%

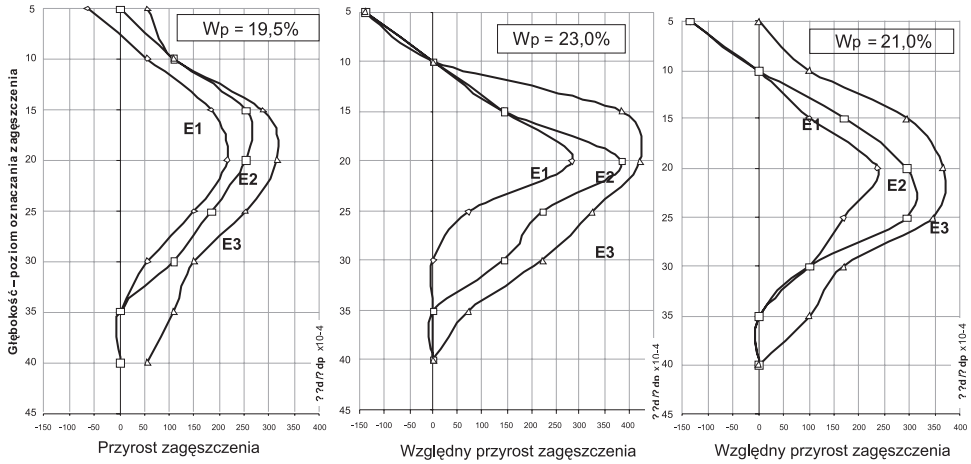
Wp [%]	Param. pocz.	E_{jedn} udaru	Przyrost od wart. pocz.	Głębokość (poziom sondowania) co 5 cm							
				–5	–10	–15	–20	–25	–30	–35	–40
23,0	$N_p = 3\ \rho_{dp} = 1{,}656$ g/cm^3	1,25 kNm/m^2	N_5	2	3	4	5	3,5	3	3	3
			ρ_{dk}	1,633	1,656	1,680	1,703	1,668	1,656	1,656	1,656
			$\Delta\rho_d$	–0,023	0	0,024	0,047	0,012	0	0	0
			$\Delta\rho_d\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–139	0	145	284	73	0	0	0
		2,5 kNm/m^2	N_5	2	3	4	6	4,5	4	3	3
			ρ_d	1,633	1,656	1,680	1,720	1,693	1,680	1,656	1,656
			$\Delta\rho_d$	–0,023	0	0,024	0,064	0,037	0,024	0	0
			$\Delta\rho_d\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–139	0	145	387	223	145	0	0
		5,0 kNm/m^2	N_5	2	3	6	6,5	5,5	4,5	3,5	3
			ρ_d	1,633	1,656	1,720	1,726	1,710	1,693	1,668	1,656
			$\Delta\rho_d$	–0,023	0	0,064	0,070	0,054	0,037	0,012	0
			$\Delta\rho_d\rho_{dp} \times 10^{-4}$	–139	0	387	423	326	223	73	0



Rys. 9. Rozkład oporów sondowań (w osi obciążenia „25")

Fig. 9. Distribution of sounding resistances (along the load "25" axis)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

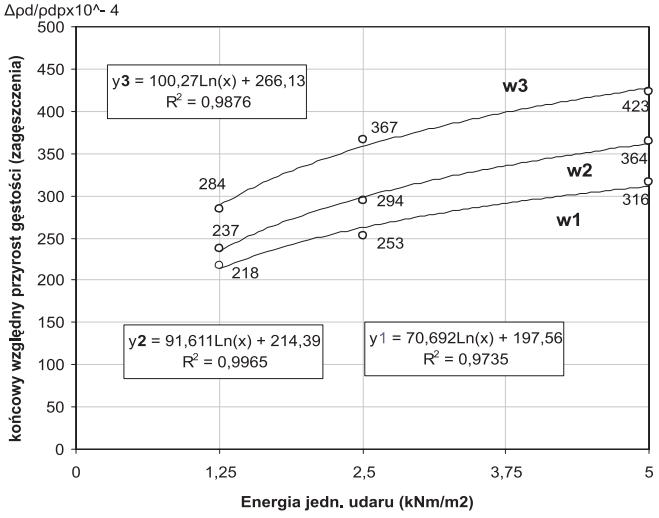


Rys. 10. Rozkład względnych przyrostów zagęszczenia $\Delta\rho_d/\rho_{dp}$ (w osi obciążenia „25”)

Fig. 10. Distribution of relative increments of densification $\Delta\rho_d/\rho_{dp}$ (along the loading “25” axis)

Maksymalne końcowe wartości względnego przyrostu gęstości (zagęszczenia) w osi obciążenia „25” zestawione w zależności ze stosowaną energią jednostkową udaru dla określonej wilgotności początkowej prób gruntu pozwalają ocenić wpływ tej energii i wilgotności na efekt końcowy zagęszczenia, według funkcji:

$$\rho_{dk} = f(E_{\text{jedn.}}, w_p) \tag{1}$$



Rys. 11. Wpływ energii jednostkowej udaru na końcowy efekt zagęszczenia

Fig. 11. Influence of unit impact energy on final effect of densification

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Linie wykresów maksymalnego końcowego przyrostu zagęszczenia ($\Delta\rho_d/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$) w zależności od stosowanej jednostkowej energii udaru ($E_{\text{jedn.}}$) w postaci krzywych regresji opisują funkcje logarytmiczne:

$$y = a \ln(x) + b \tag{2}$$

gdzie a i b to współczynniki liczbowe funkcji zależne od wilgotności początkowej i opisują je funkcje: a, $b = f(w_p)$, czyli :

$$a = 8{,}2281 w_p - 86{,}637$$

$$b = 19{,}931 w_p - 195{,}84$$

Zatem funkcję (4) $y = a \ln(x) + b$ można przedstawić:

$$\rho_{dk} = (8{,}2281 w_p - 86{,}637)\ln(E_{\text{jedn}}) + (19{,}931 w_p - 195{,}84) \tag{3}$$

Wyprowadzona zależność (3) jest ilościowym przedstawieniem wyników badań eksperymentalnych prowadzonych w **skrzyni** modelowej przy obciążeniu udarowym metodą **A** (3 serie × 3 udary z przerwą czasową między seriami).

Prawdziwość tego związku jest potwierdzona w zakresie wilgotności początkowych badanych prób gruntu (w = 19,5–23%) i dla stosowanych jednostkowych energii udaru ($E_{\text{jedn.}}$ = 1,25–5,0 kNm/m^2).

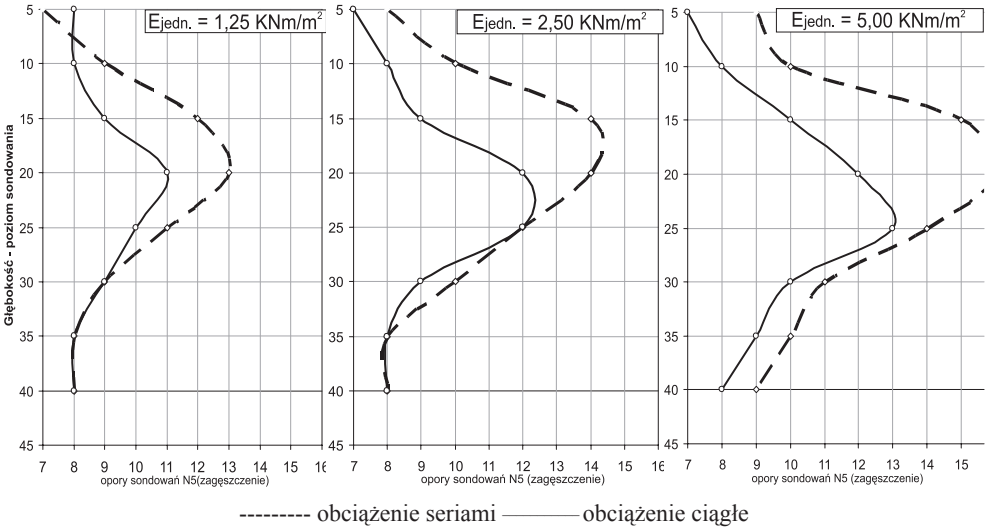
Etap badań dodatkowych

1. Badania przy obciążeniu udarowym próby gruntu 9-cioma udarami zdawanymi w sposób ciągły.
2. Badania na próbach gruntu spoistego z dodatkowymi warstwami drenażowymi na krawędziach tych prób.

Obciążenie udarowe próby w modelu płaskim 9-cioma udarami zdawanymi w sposób ciągły, występującymi po sobie tylko z przerwą 1 minuty między udarami, przeprowadzono w celu oceny różnic w postępach zagęszczania przy obciążeniu ciągłym, a obciążeniu zadawanym seriami udarów z odstępem czasowym. Badanie to potraktowano jako kontrolne, porównawcze i przeprowadzono eksperyment tylko dla jednej wilgotności początkowej prób gruntu w_1 = 19,5% i przy trzech energiach jednostkowych udaru $E_1 E_2 E_3$.

Wyniki przedstawiono na rys. 12 tylko w postaci wykresów zmian efektów zagęszczenia na głębokości, w osi obciążenia „25” przy obciążeniu seriami udarów w porównaniu z obciążeniem udarami w sposób ciągły.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 12. Rozkład oporów sondowań na głębokości

Fig. 12. Distribution of sounding resistances along the depth

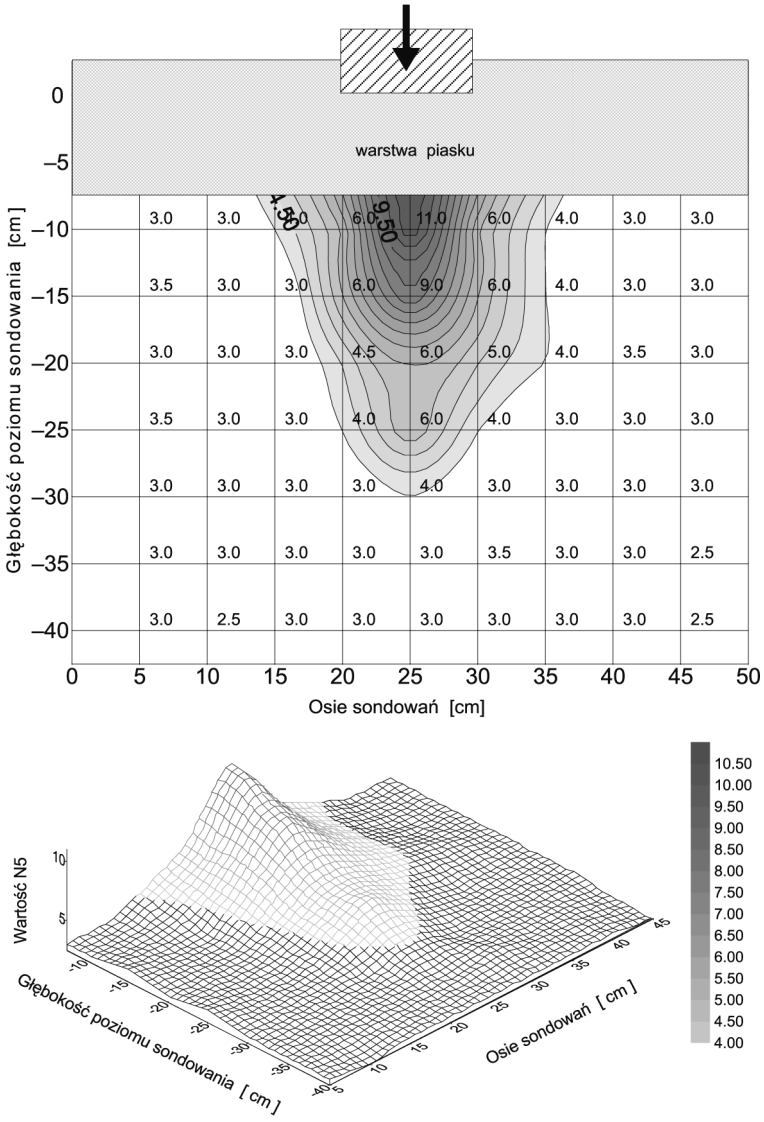
Porównując wyniki badań uzyskane przy obciążeniu próby gruntu metodą serii udarów oraz metodą udarów ciągłych, stwierdzić można, że:

1. Efektywność tego samego całkowitego obciążenia udarowego zadawanego udarami ciągłymi jest mniejsza o 30% niż zadawanego seriami udarów. Dotyczy to głównie uzyskanych maksymalnych wartości przyrostów względnych zagęszczenia w osi obciążenia, gdzie przedstawiono wykresy zależności przyrostu zagęszczenia przy różnych wartościach energii udarowej i różnych sposobach obciążenia. Różnice występują także w obszarze (w zasięgu) tych przyrostów, gdzie wielkości przyrostów zagęszczenia przy obciążeniu seriami z przerwą czasową są większe zarówno w głąb obciążanej próby, jak i na jej szerokości.
2. Różnice te wykazują znaczący wpływ przerw czasowych (pozwalających na rozproszenie ciśnienia porowego) w procesie udarowego zagęszczania, na wielkość przyrostów odkształcenia.

Jako uzupełniające przeprowadzono badanie z dodatkowymi warstwami drenażowymi na krawędziach prób z gruntu spoistego, którego celem była ocena wpływu tych warstw filtracyjnych na wartość i zasięg przyrostu zagęszczenia. Eksperyment z drenażem przeprowadzono na próbach gruntu o wilgotności początkowej w_p = 23% i obciążanych udarowo – 3 serie po 3 udary w serii z odstępem czasowym 30 minut pomiędzy seriami udarów z zastosowaniem $E_{\text{jedn.}}$ = 5,0 kNm/m^2. Drenaż brzegowy wykonano w postaci 10 cm warstwy piasku średniego.

Wyniki przedstawiono na rys. 13, 14 jako izolinie oporów sondowań, przedstawiając przestrzenny obraz zasięgu zmian po badaniu.

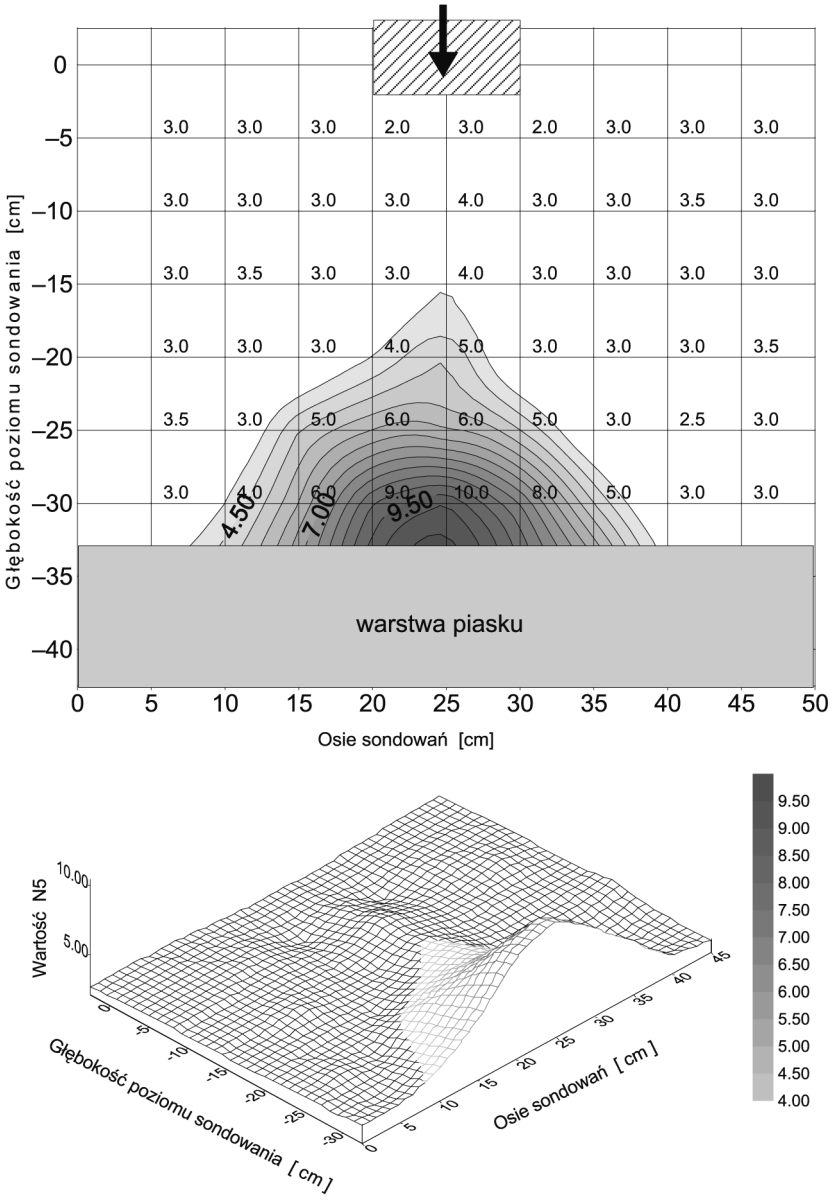
BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 13. Izolinie oporów sondowań N_5 (warstwa filtracyjna górą)

Fig. 13. Isolines of sounding resistances N_5 (draining layer on top)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 14. Izolinie oporów sondowań N_5 (warstwa filtracyjna dołem)

Fig. 14. Isolines of sounding resistances N_5 (draining layer on down)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6. Podsumowanie

Otrzymane z badań wyniki pozwalają stwierdzić, że:

1. Bez względu na warunki początkowe wraz ze wzrostem stosowanej energii udarowej zwiększa się wielkość przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (zagęszczenia) badanej próby gruntu.
2. Wzrost wilgotności początkowej gruntu spoistego znacznie opóźnia i utrudnia proces deformacji, co powoduje, że po obciążeniu udarowym końcowa wartość gęstości gruntu jest zawsze większa, dla niższych wilgotności początkowych gruntu, bardziej zbliżonych do wilgotności optymalnej. Jednak całkowity względny przyrost gęstości (zagęszczenia) jest tym większy, im wyższa jest wilgotność początkowa próby gruntu, co wskazuje, iż zmiany strukturalne w gruncie wywołane obciążeniem udarowym ułatwiają proces zagęszczania, a to pozwala w praktyce na wzmacnianie gruntów o wysokiej wilgotności.
3. Zdecydowanie najlepsze efekty udarowego zgęszczenia uzyskano z stosowaniem serii obciążenia udarowego z przerwami czasowymi pozwalającymi na rozproszenie się nadciśnienia porowego niż przy obciążeniu udarami ciągłymi. Na efekty deformacji gruntu spoistego przy udarowym obciążeniu większy wpływ ma wilgotność początkowa gruntu i przerwy między udarami niż wartość obciążenia udarowego, które można w praktyce zmniejszyć kosztem wydłużenia przerw.
4. W badanych próbach gruntu z warstwą filtracyjną strefy przyrostu gęstości są o większym zasięgu, a maksymalne wzrosty zagęszczenia są o ok. 60% wyższe niż w próbach bez tej warstwy, to znaczy, że warstwy filtracyjne wprowadzone w grunty spoiste obciążone udarowo zdecydowanie wspomagają i ułatwiają proces zagęszczania. W praktyce można wykorzystać ten efekt poprzez wykonanie drenażu pionowego w podłożu, znacznie poprawiając efekt dynamicznego zagęszczania uwarstwionych słabonośnych gruntów nawet do znacznych głębokości.

Literatura

[1] Gaszyński J., Pabian Z., *Udarowe zagęszczanie gruntu spoistego w eksperymentalnych badaniach laboratoryjnych*, Czasopismo Techniczne 4-Ś/2009, z. 14, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

[2] Kłos J., Tejchman A., *Zastosowanie dynamicznej konsolidacji w budownictwie*, Inż. i Budow., 7/1979.

[3] Ménard L., BroIse Y., *Teoretical and practical aspects of dynamic consolidation*, Géotechnique, 1975.

[4] Ménard Techniques Limited, *Oedometre Dynamic*, Paryż 1978.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ