

JAN GASZYŃSKI, ZBIGNIEW PABIAN*

UDAROWE ZAGĘSZCZANIE GRUNTU SPOISTEGO W EKSPERYMENTALNYCH BADANIACH LABORATORYJNYCH

EXPERIMENTAL LABORATORY TESTING OF IMPACT COMPACTION OF COHESIVE SOILS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań laboratoryjnych procesu zagęszczenia gruntów spoistych metodą udarową. Przeanalizowano wpływ wielkości obciążenia udarowego, sposobu zadawania udarów oraz parametrów początkowych gruntu na efekty zagęszczenia.

Słowa kluczowe: zagęszczenie udarowe, grunt spoisty, obciążenie dynamiczne

Abstract

Presentation of results of laboratory experiments concerning impact compaction of cohesive soils is the aim of the paper. The amplitude and frequency of the impact loading as well as initial state conditions of tested soils were analyzed.

Keywords: impact compaction, cohesive soils, dynamic loads

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

Oznaczenia

E_{jedn}	– energia jednostkowa udaru [kNm/m ²]
w_{opt}	– wilgotność optymalna [%]
w_p	– granica plastyczności [%]
w_L	– granica płynności [%]
w_{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 [g/cm ³]

1. Wstęp

Jedną z bardziej efektywnych metod przygotowania słabego podłoża gruntowego do posadowienia budowli jest metoda dynamicznej konsolidacji gruntów, zwana dalej jako udarowe zagęszczanie.

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 wywołane energią udaru, które przenikają podłoże gruntowe na znaczną głębokość. Powodują one zagęszczanie i konsolidację gruntu w wyniku chwilowego silnego wzrostu naprężeń w szkielecie gruntowym oraz wzrostu przepuszczalności (powstają w wyniku rozerwania szkieletu, tzw. uprzywilejowane drogi odpływu), ułatwiając odpływ wody z porów gruntu i 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, gdyż może dotyczyć wzmocnienia gruntów w każdej jego fazie nawilgocenia. Metoda udarowego zagęszczania gruntów, jako jedna z metod wzmacniania gruntów słabonośnych, jest stosowana z dużym powodzeniem przy zagęszczaniu gruntów gruboziarnistych lub grubookruchowych nasypów. W gruntach drobnoziarnistych spoistych, a szczególnie mocno nawilgoconych, stosowanie tej metody napotyka na pewne trudności i ograniczenia.

Przy udarowym obciążeniu inaczej zachowują się utwory grubookruchowe 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 związane z przepływem wód porowych. Proces wzmacniania tych gruntów metodą udarowego zagęszczania jest zatem bardziej skomplikowany, a uzyskanie pozytywnych efektów utrudnione.

Sam mechanizm działania jest opisany modelami konsolidacji ośrodka gruntowego wg Terzagiego, Biota i innych. Jednak o ile w przypadku teorii Terzagiego, opartej na prostych założeniach, zachowanie się gruntów podczas konsolidacji statycznej jest dokładnie przewidywalne i oczywiste, o tyle w przypadku nagłych, silnych uderzeń ubijaka w pod-

łże gruntowe, pod wpływem których pojawiają się znaczne osiadania, trudno jest wyjaśnić w sposób jednoznaczny zjawiska zachodzące w gruncie.

W związku z tym zdecydowano o podjęciu badań przebiegu procesu zagęszczania gruntów tą metodą, właśnie dla gruntów spoistych. Badania przeprowadzono na gruncie średniospoistym w postaci gliny pylastej.

2. Materiał badawczy

Dla zobrazowania, oceny i sprawdzenia efektów procesu odkształcenia gruntów będącego wynikiem udarowego obciążenia, w badaniach eksperymentalnych użyto jako materiału badawczego gruntu drobnoziarnistego, średniospoistego – **gliny pylastej** lessopodobnej o parametrach:

- gęstość właściwa $\rho_s = 2,671 \text{ g/cm}^3$
- wilgotność optymalna $w_{\text{opt}} = 15,1\%$
- granice konsystencji $w_p = 18,6\%$ $w_L = 30,1\%$
- wskaźnik plastyczności $I_p = 11,5\%$

Pozostałych właściwości fizycznych i mechanicznych przyjętego do badań eksperymentalnych gruntu nie oznaczano ze względu na początkowe założenia, że ocenę i sprawdzanie efektów wzmacniania gruntów metodą udarowego zagęszczania opierać się będzie głównie na zmianach **gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i wilgotności**.

Badania eksperymentalne procesu udarowego zagęszczania przeprowadzono na próbach gruntu specjalnie przygotowanych i w takich ilościach, by parametry wyjściowe (początkowe) przyjętych prób gruntu do danego cyklu badań dały możliwość powtarzalności wyników.

Jak już zaznaczono, za parametry wyjściowe badanych prób gruntu przyjęto zagęszczenia początkowe charakteryzowane gęstością objętościową szkieletu gruntowego przy określonej wilgotności.

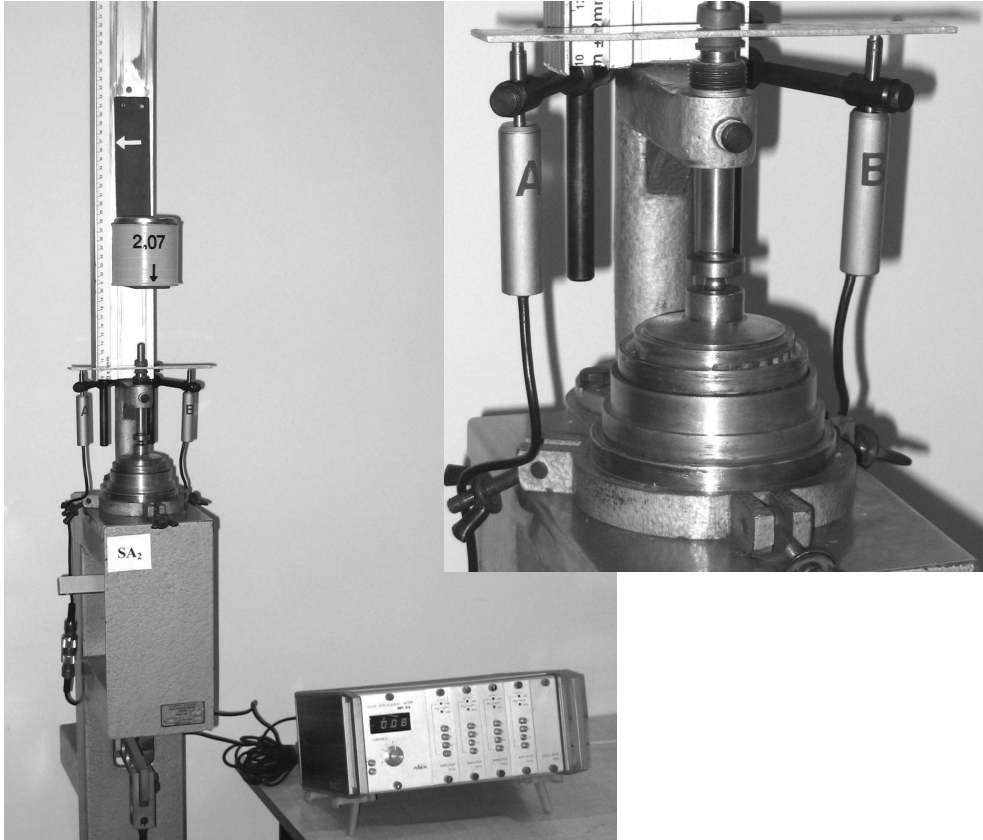
Grunt przygotowywano w dużych zamkniętych pojemnikach, doprowadzając go poprzez mieszanie i dozowanie wody do określonej i założonej wilgotności, a następnie zagęszczono w cylindrach stalowych (gilzach) $\Phi = 8 \text{ cm}$, $h = 40 \text{ cm}$, $V = 2000 \text{ cm}^3$, energią zagęszczenia równą 1/4 energii przy zagęszczeniu prób gruntu metodą normalną Proctora, tzn. ok. $0,15 \text{ J/cm}^3$. Całość próby, czyli 6 warstw, zagęszczano sześcioma udarami każda.

Z przygotowanego w ten sposób materiału gruntowego uzyskiwano próby gruntów pozwalające na powtarzanie badań na próbach o tych samych parametrach początkowych.

3. Aparatura badawcza

Stanowisko badawcze składa się z edometru standardowego produkcji Zakładu Aparatury Naukowej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Próba umieszczona jest w pierścieniu o wymiarach $\Phi = 64,95 \text{ mm}$ i wysokości $h = 20 \text{ mm}$ ($V = 66,23 \text{ cm}^3$), oparta na filtrze dolnym, pokryta pokrywą górną filtrowaną o $F = 33,16 \text{ cm}^2$, przez którą zadawane jest obciążenie na próbkę gruntu. Dodatkowym wyposażeniem, wykonanym w Instytucie Geotechniki PK do zadawania obciążenia udarowego, jest szyna jako pionowa

przewadnica obciążnika (młota uderowego) 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).



Fot. 1. Zmodyfikowany edometr do badań dynamicznych

Photo 1. Modified oedometer designed for application of dynamic loading

Obciążnik uderza w trzpień przenoszący energię uderu na pokrywę górną edometru, a dalej na próbkę gruntu.

Przyjęte po wstępnych próbach obciążenie uderowe gruntu to trzy jednostkowe energie uderu

$$E_{\text{jedn}} = G \cdot H_i / F$$

- 1) $E_{\text{jedn}} = 1,25 \text{ KNm/m}^2$ dla $H_1 = 0,2$ m
- 2) $E_{\text{jedn}} = 2,50 \text{ KNm/m}^2$ dla $H_2 = 0,4$ m
- 3) $E_{\text{jedn}} = 5,00 \text{ KNm/m}^2$ dla $H_3 = 0,8$ m

Przed, w trakcie i po przeprowadzonych wg programu badaniach, wykonano pomiary:

a) zmiany wysokości próbki gruntu mierzono, stosując do pomiarów elektroniczne czujniki elektrooporowe przemieszczeń liniowych typu PX-20 połączone z rejestratorem przemieszczeń MPL-4 firmy „Peltron” Warszawa (fot. 1).

Pomiar był dokonywany w osi próbki poprzez trzpień przenoszący obciążenia na pokrywę edometru, do którego przymocowano trwale dwa ramiona będące podporą końcówek czujników. Taki układ umożliwił wygodne podnoszenie trzpienia i końcówek czujników w trakcie wyjmowania pierścienia z próbą gruntu i z pokrywami dolną i górną, bez odpinania i przesuwania zamontowanych na sztywno czujników. Pozwalało to na ciągłą rejestrację zmian wysokości próbki w stosunku do stanu początkowego.

b) zmiany masy próbki gruntu przed i po cyklu obciążania mierzono, ważąc próbę gruntu razem z pierścieniem i z pokrywami dolną i górną. Masę oznaczono na wadze elektronicznej typu WTP-5 firmy RAD-WAG o dokładności pomiaru 0,01 g. Pomiar masy pomiędzy cyklami obciążania przeprowadzono po wysunięciu z edometru równocześnie pełnego zestawu składającego się z próby z pierścieniem i pokrywami będącymi zarazem filtrami zewnętrznymi. Nie naruszając tego zestawu, usuwano wodę z filtrów dmuchawą powietrzną, ważono zestaw na wadze i całość montowano ponownie w edometrze w celu przeprowadzenia dalszego cyklu obciążania.

Z uzyskanych wyników pomiarów obliczono zmiany objętości, masy i wilgotności badanej próby gruntu, a następnie gęstość objętościową szkieletu gruntowego po każdym cyklu lub etapie badania.

4. Plan i metodyka badań

Badanie efektów udarowego zagęszczania gruntu przeprowadzono metodą fenomenologiczną, która polega na ocenie skutków określonych przyczyn bez analizy procesów wewnętrznych, które do tych skutków doprowadziły.

Proces zagęszczania gruntów, a w szczególności udarowe zagęszczanie gruntu powoduje zmiany wielu parametrów geotechnicznych i zależy od wielu czynników początkowych. Wpływ na przebieg procesu zagęszczania, poza parametrami fizycznymi (gęstość objętościowa, wilgotność, współczynnik filtracji, porowatość, stopień wilgotności), ma również, a może przede wszystkim, rodzaj gruntu, jego skład granulometryczny, kształt ziaren i ich ułożenie, a nawet rodzaj i lepkość cieczy wypełniającej pory gruntu. Wielkość tych parametrów w trakcie udarowego zagęszczenia ulega zmianie w zależności od zastosowanej energii zagęszczenia.

W celu udokumentowania efektów procesu udarowego zagęszczenia podczas badań doświadczalnych przyjęto obserwację i pomiar wybranych parametrów, według których zdaniem autorów można przedstawić tendencję i zakres zmian w badanym gruncie w trakcie i po obciążeniu udarowym.

Zdecydowano, że głównym czynnikiem wynikowym będzie zagęszczenie gruntu obrazowane gęstością objętościową szkieletu gruntowego. Czynniki przyczynowe zmienne lub stałe to jednostkowa energia udaru, wilgotność początkowa i sposób zadawania obciążenia mające wpływ na wynik końcowy.

Przyjęte energie jednostkowe udarów

$$E1_{jedn} = 1,25 \text{ KNm/m}^2 \quad E2_{jedn} = 2,50 \text{ KNm/m}^2 \quad E3_{jedn} = 5,00 \text{ KNm/m}^2$$

Przyjęte wilgotności początkowe i odpowiadające im $\rho_{d \text{ pocz}}$ (wartości uśrednione) to:

$$w1_{\text{pocz}} = 19\% \quad - \quad \rho_{d1p} = 1,7530 \text{ g/cm}^3$$

$$w2_{\text{pocz}} = 22,5\% \quad - \quad \rho_{d2p} = 1,6549 \text{ g/cm}^3$$

$$w3_{\text{pocz}} = 26,5\% \quad - \quad \rho_{d3p} = 1,5643 \text{ g/cm}^3$$

Przyjęty sposób zadawania obciążenia udarowego:

Sposób (A) – udarowe zagęszczenie seriami udarów pojedynczych, czyli 3 serie udarów po 3 udary w każdej serii (razem 9 udarów).

Udary w serii wykonywano w odstępach jednocinutowych natomiast przerwy czasowe pomiędzy sesjami udarów wynosiły 30 min.

Sposób (B) – udarowe zagęszczenie w sposób ciągły, czyli 9 pojedynczych udarów postępujących po sobie w odstępach jednocinutowych.

Przeprowadzono zatem badania na próbach gruntu dla każdej wilgotności początkowej przy każdej energii jednostkowej udaru oraz według obu sposobów zagęszczania.

5. Wyniki i analiza badań

Po każdym etapie obciążenia, czyli po jednej serii udarów oraz po przerwie między seriami (sposób A) i po każdym udarze (sposób B), wykonano pomiar zmian objętości oraz oznaczono wilgotność i gęstość objętościową badanej próby gruntu.

Wyniki przedstawiono w postaci tabelarycznej (tabele 1–6) jako zmiany gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d , przyrostów $\Delta\rho_d$ oraz względnych przyrostów $\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$.

Na wykresach (rys. 1–6) przedstawiono zależność względnych przyrostów $\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$ od serii udarów. Względny przyrost gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ($\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp}$) przyjęto jako główny parametr wynikowy z doświadczeń, ze względu na możliwość porównania wyników i ustalenia zależności między wynikami z badań na próbach o różnych parametrach wyjściowych ($\rho_{d \text{ pocz}}$).

Mimo starannego przygotowania prób gruntu do badania wg założonego planu, bardzo trudne jest uzyskanie idealnie takich samych parametrów początkowych do badań przy kilku powtórzeniach. Dlatego też uśrednienie wyników z badań powtarzanych i przedstawienie wyników końcowych jako wartości względnej do wartości parametru początkowego w każdym badaniu pozwala na porównanie wartości wyników i ustalenie zależności między różnymi próbami i doświadczeniami.

5.1. Eksperyment wg Sposobu (A) – 3 serie po 3 udary

Pierwszy cykl eksperymentów to badania przy seryjnym zadawaniu udarów (A) przy wszystkich założonych wilgotnościach początkowych i dla 3 różnych energii jednostkowych udaru (tabele 1–3, rys. 1–6).

Tabela 1

Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 19,0\%$

Wp1 [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Nr serii uderów					
				1	odstęp czasowy	2	odstęp czasowy	3	odstęp czasowy
19,0	1,25	1,7540	ρ_{dk} g/cm ³	1,7680	1,7708	1,7743	1,7761	1,7784	1,7793
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	140	168	203	221	244	253
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	80	96	116	126	140	144
			przyr. [%]	56	11	14	7	9	3
	2,5	1,7520	ρ_{dk} g/cm ³	1,7695	1,7728	1,7765	1,7790	1,7809	1,7825
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	175	208	245	270	289	305
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	100	119	140	154	165	174
			przyr. [%]	57	11	13	7	6	5
	5,0	1,7525	ρ_{dk} g/cm ³	1,7727	1,7756	1,7802	1,7828	1,7849	1,7870
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	202	231	277	303	324	345
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	115	132	158	173	185	197
			przyr. [%]	58	11	13	8	6	6

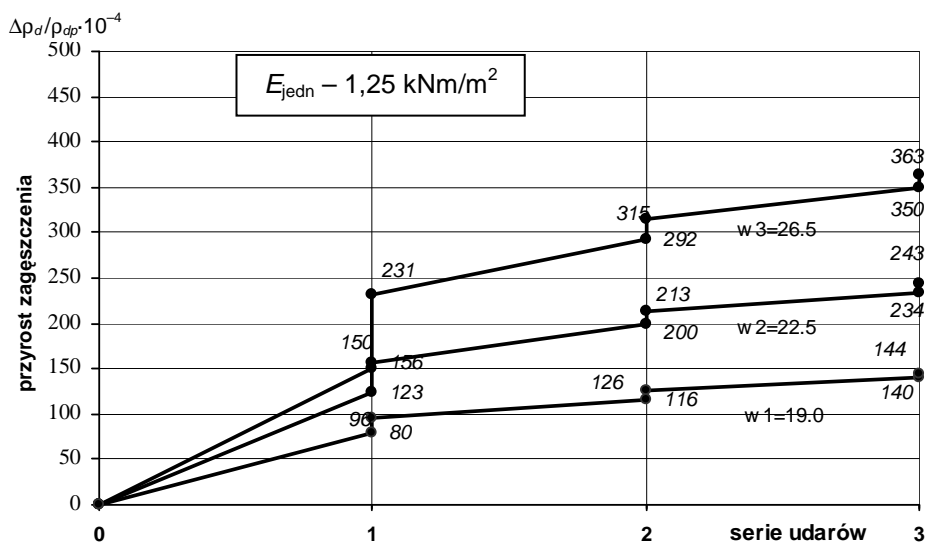
Tabela 2

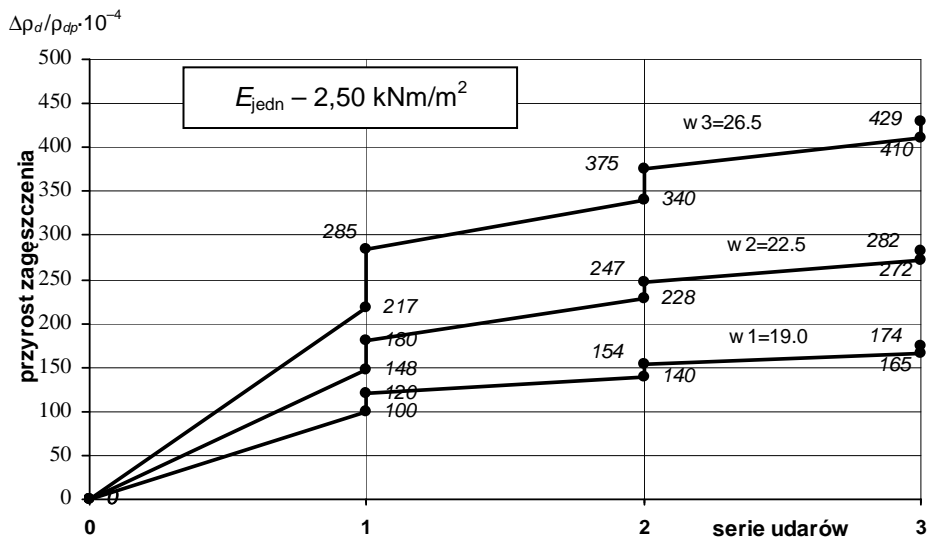
Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 22,5\%$

Wp2 [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Nr serii uderów					
				1	odstęp czasowy	2	odstęp czasowy	3	odstęp czasowy
22,5	1,25	1,6550	ρ_{dk} g/cm ³	1,6754	1,6808	1,6881	1,6902	1,6937	1,6952
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	204	258	331	352	387	402
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	123	156	200	213	234	243
			przyr. [%]	51	13	18	6	8	4
	2,5	1,6540	ρ_{dk} g/cm ³	1,6785	1,6838	1,6917	1,6949	1,6990	1,7015
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	245	298	377	409	450	475
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	148	180	228	247	272	282
			przyr. [%]	53	11	17	7	8	4
	5,0	1,6553	ρ_{dk} g/cm ³	1,6831	1,6901	1,6980	1,7030	1,7073	1,7099
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	278	357	427	477	520	546
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	168	216	258	288	314	330
			przyr. [%]	51	15	12	9	8	5

Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 26,5\%$

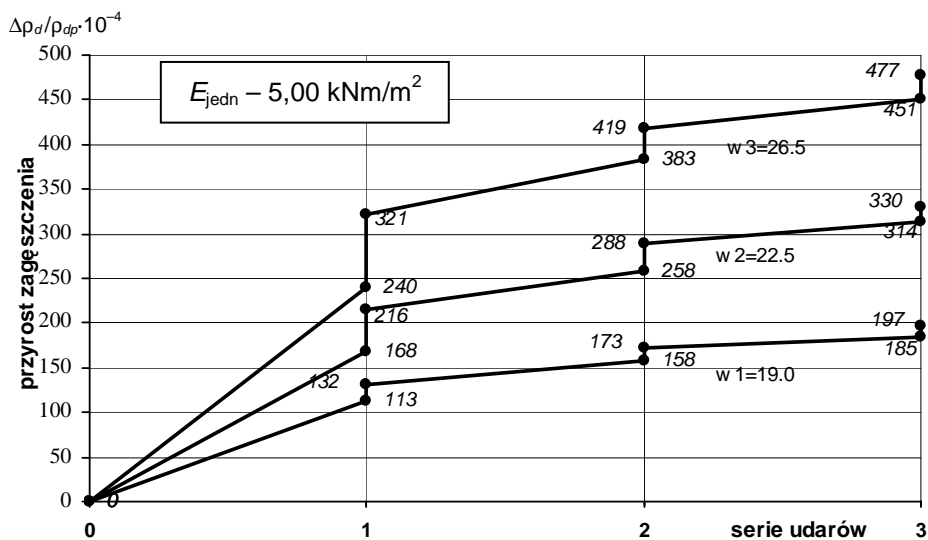
Wp3 [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Nr serii ударów					
				1	odstęp czasowy	2	odstęp czasowy	3	odstęp czasowy
26,5	1.25	1,5650	ρ_{dk} g/cm ³	1,5885	1,6012	1,6107	1,6143	1,6198	1,6218
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	235	362	457	493	548	568
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	150	231	292	315	350	363
			przyr. [%]	41	23	16	7	9	4
	2.5	1,5658	ρ_{dk} g/cm ³	1,5998	1,6104	1,6190	1,6245	1,6300	1,6330
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	340	446	532	587	642	672
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	217	285	340	375	410	429
			przyr. [%]	51	15	13	8	9	4
	5.0	1,5625	ρ_{dk} g/cm ³	1,6000	1,6127	1,6223	1,6280	1,6330	1,6370
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	375	502	598	655	705	745
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	240	321	383	419	451	477
			przyr. [%]	50	17	13	8	7	5

Rys. 1. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii ударów (z odstępem czasowym) dla $E_{jedn} = 1,25$ kNm/m²Fig. 1. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (with time interval) for $E = 1,25$ kNm/m²



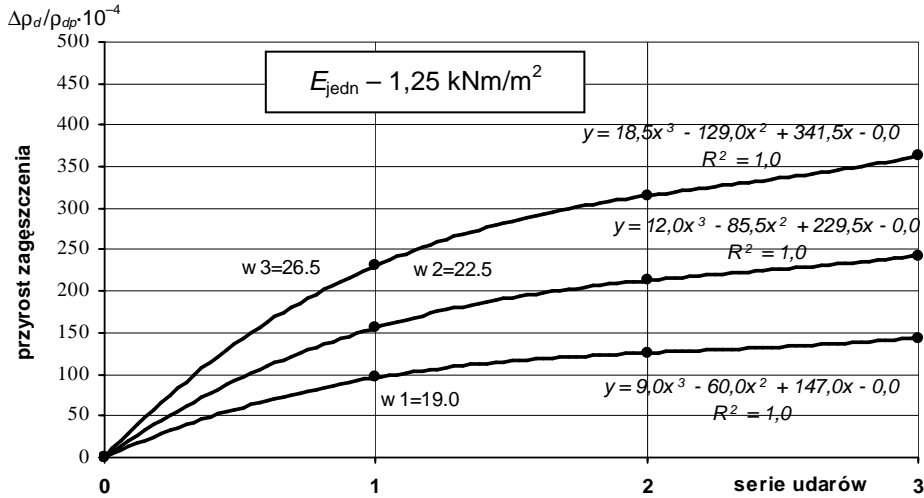
Rys. 2. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii udarów (z odstępem czasowym) dla $E_{jedn} = 2,50 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 2. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (with time interval) for $E = 2,50 \text{ kNm/m}^2$



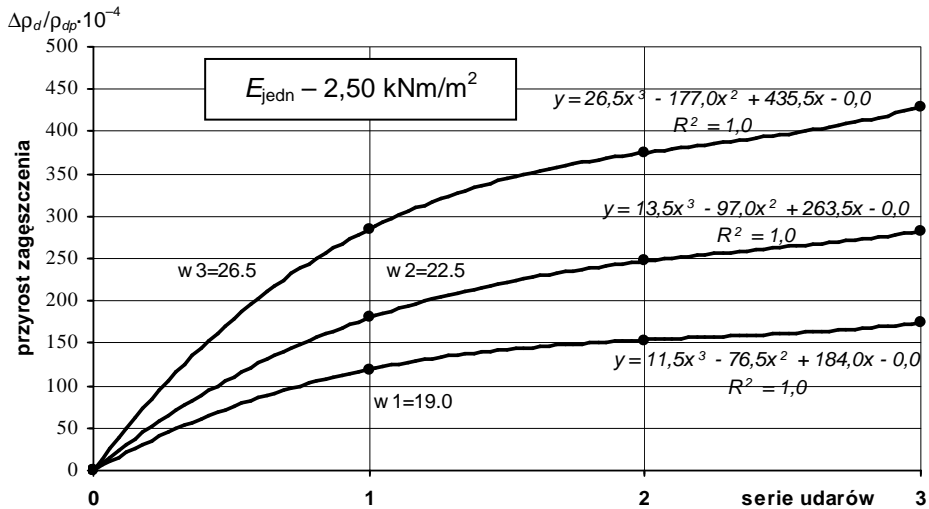
Rys. 3. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii udarów (z odstępem czasowym) dla $E_{jedn} = 5,0 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 3. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (with time interval) for $E = 5,0 \text{ kNm/m}^2$



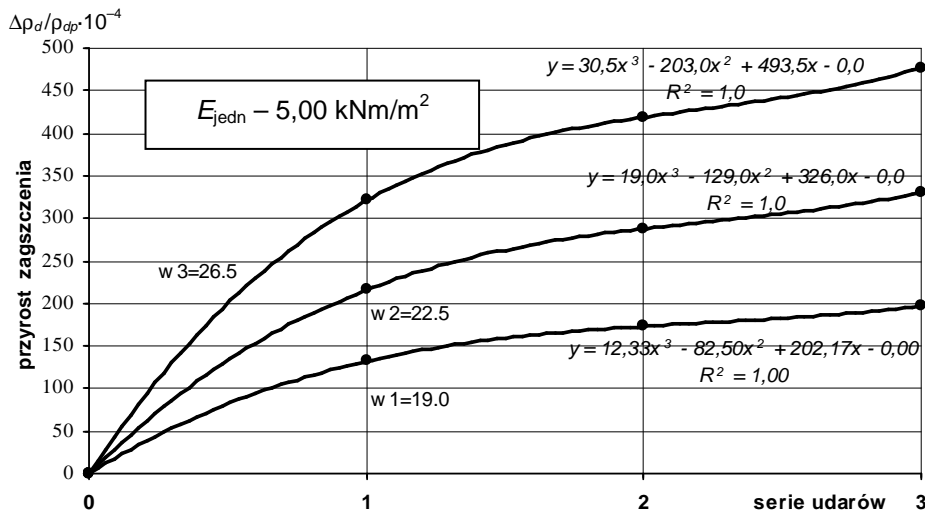
Rys. 4. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii udarów (wartości sumaryczne) dla $E_{jedn} = 1,25 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 4. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (total values) for $E = 1,25 \text{ kNm/m}^2$



Rys. 5. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii udarów (wartości sumaryczne) dla $E_{jedn} = 2,50 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 5. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (total values) for $E = 2,50 \text{ kNm/m}^2$



Rys. 6. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od serii udarów (wartości sumaryczne) dla $E_{jedn} = 5,00 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 6. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of impacts (total values) for $E = 5,00 \text{ kNm/m}^2$

Wartości uzyskanych w badaniach parametrów i kształt linii wykresów przyrostu zagęszczenia w zależności od zastosowanej energii jednostkowej udaru wskazują, że:

- z każdym etapem zadawanie energii udaru zagęszczenia wzrasta, jednak zmiany zagęszczenia są największe po pierwszej serii udarów, gdzie przyrost stanowi od 50–58% całego wzmocnienia, natomiast następne serie udarów dają 12–18%, seria druga i seria trzecia – 6–9% $\Delta\rho_{d \text{ całk.}}$. Tak więc przyrosty $\Delta\rho_d$ maleją wraz ze wzrostem początkowego ρ_d (potwierdza to prawo z krzywej ściśliwości przy obciążeniu statycznym);
- znaczące przyrosty wzmocnienia występują w trakcie 30-minutowych przerw czasowych między seriami udarów i stanowią od 11–17% całego wzmocnienia po pierwszej serii udarów, 6–9% po drugiej serii i 3–6% po serii trzeciej;
- wzmocnienie gruntu w czasie przerw między obciążeniami jest skutkiem rozproszenia się nadciśnienia parowego wywołującego wypływ wody z próby gruntu, a ułatwiony przez zwiększoną przepuszczalność spowodowaną rozerwaniem struktury gruntu udarem (tzw. uprzywilejowane drogi odpływu);
- wzrost energii jednostkowej udarów z wartości $E_1 = 1,25 \text{ kNm/m}^2$ (poziom odniesienia) na $E_2 = 2,5 \text{ kNm/m}^2$ w tym przypadku dwukrotny i czterokrotny na $E_3 = 5,0 \text{ kNm/m}^2$, skutkuje całkowitymi przyrostami efektów zagęszczenia dla prób o wilgotności:

$w_1 = 19\%$	ok. 20%	i	37%
$w_2 = 22,5\%$	ok. 16%	i	36%
$w_3 = 26,5\%$	ok. 18%	i	31%
	śr. (18%)	i	(35%)

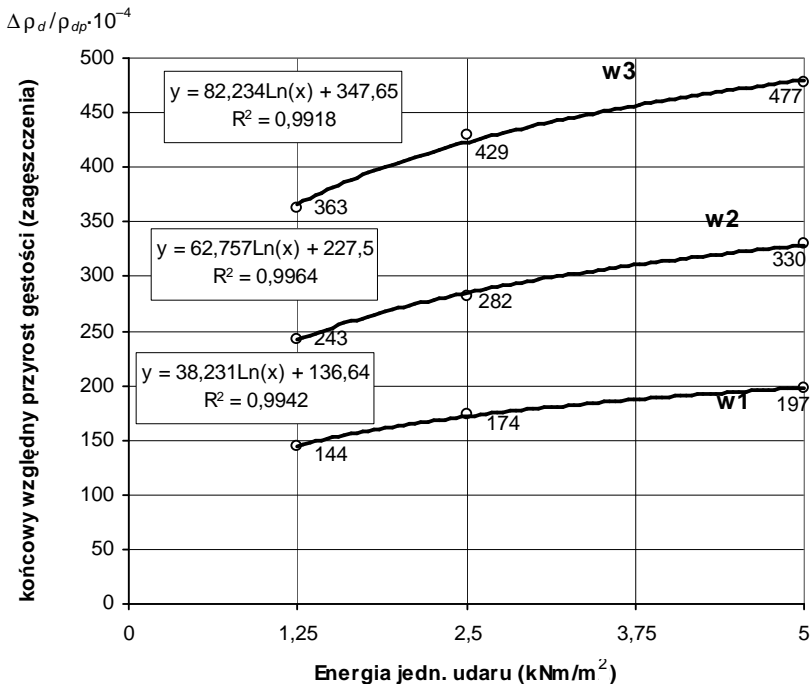
czyli progresja przyrostów zagęszczenia dla różnych wilgotności przy takich samych wzrostach energii zagęszczenia jest bardzo zbliżona;

- ze wzrostem jednostkowej energii udaru wzrasta zagęszczenie na każdym etapie obciążenia bez względu na parametry początkowe próby gruntu;
- przy określonej energii udarowego zagęszczenia całkowity przyrost $\Delta\rho_d$ jest tym większy, im większa jest wilgotność początkowa, tj. im mniejsza była wartość $\rho_{d\text{pocz.}}$. Jednak końcowa wartość ρ_{dk} jest tym większa, im większa była wartość $\rho_{d\text{pocz.}}$, a wilgotność bliższa wilgotności optymalnej $w_{\text{opt}} = 15,1\%$ (potwierdza zasadę w_{opt});
- mimo wyższych wilgotności początkowych prób gruntu przyrosty względne zagęszczenia wzrastają, co wskazuje na to, że zmiany struktury prowadzące do zwiększenia przepuszczalności gruntu dają silniejszy efekt i rekompensują opory wewnętrzne związane ze zwiększoną ilością wyciskanej wody porowej.

Zestawiając końcowe wartości względnego przyrostu gęstości (zagęszczenia) ze stosowaną energią jednostkową udaru (cały cykl 3×3) dla określonej wilgotności początkowej prób gruntu, można ocenić wpływ tej energii i wilgotności na efekt końcowy zagęszczenia wg funkcji

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

Wykresy tej zależności przedstawiono na rys. 8.



Rys. 7. Wpływ stosowanych energii jedn. udaru na końcowy efekt zagęszczenia (całkowity względny przyrost gęstości objętościowej szkieletu gruntowego)

Fig. 7. Of applied impact energies on final compaction (total relative increment of bulk density of soil skeleton)

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

$$y = a \ln(x) + b \quad (2)$$

gdzie a i b to współczynniki liczbowe funkcji zależne od wilgotności początkowej, które po obliczeniach pozwalają przedstawić tę funkcję jako

$$\rho_{dk} = (5,8434w_p - 71,378)\ln(E_{jedn}) + (28,18w_p - 401,48) \quad (3)$$

Wprowadzona zależność jest ilościowym przedstawieniem wyników badań eksperymentalnych prowadzonych w edometrze zmodyfikowanym przy obciążeniu udarowym metodą A (3 serie \times 3 udary z przerwą czasową między seriami).

Prawdziwość tego związku jest potwierdzona w zakresie wilgotności początkowych badanych prób gruntu ($w = 19,0 - 26,5\%$) i dla stosowanych jednostkowych energii udaru ($E_{jedn} = 1,25 - 5,0 \text{ kNm/m}^2$).

5.2. Eksperyment wg Sposobu (B) – udary ciągłe 9×1

Obciążenie udarowe prób gruntu wg sposobu B, czyli 9 udarów zadawanych w sposób ciągły, występujących po sobie tylko z przerwą 1 minuty między udarami, wykonano w celu sprawdzenia i ewentualnego oszacowania różnic w efektach wzmocnienia gruntu przy obciążeniu udarowym zadawanym w sposób ciągły, a obciążaniu seriami udarów z odstępem czasowym pomiędzy seriami.

Drugi cykl eksperymentów to badania przy ciągłym zadawaniu udarów (B), przy wszystkich założonych wilgotnościach początkowych i dla 3 różnych energii jednostkowych udaru (tabele 4–6, rys. 8–10).

Tabela 4

Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 19,0\%$

w_{1p} [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Udary								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
19,0	1,25	1,7542	$\rho_{dk} \text{ g/cm}^3$	1,761	1,765	1,768	1,769	1,770	1,771	1,771	1,771	1,772
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	77	116	140	151	161	168	174	177	181
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	44	66	80	86	92	96	99	101	103
			przycz. [%]	43	21	14	5	6	4	3	2	2
	2,5	1,7523	$\rho_{dk} \text{ g/cm}^3$	1,762	1,766	1,769	1,771	1,773	1,774	1,775	1,776	1,776
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	98	145	175	196	210	221	231	238	242
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	56	83	100	112	120	126	132	136	138
			przycz. [%]	41	19	13	8	6	4	5	2	2
	5,0	1,7530	$\rho_{dk} \text{ g/cm}^3$	1,764	1,769	1,773	1,774	1,776	1,777	1,778	1,778	1,779
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	110	167	202	224	238	247	252	259	263
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	63	95	115	128	136	141	144	148	150
			przycz. [%]	42	21	14	8	6	3	2	2	2

Tabela 5

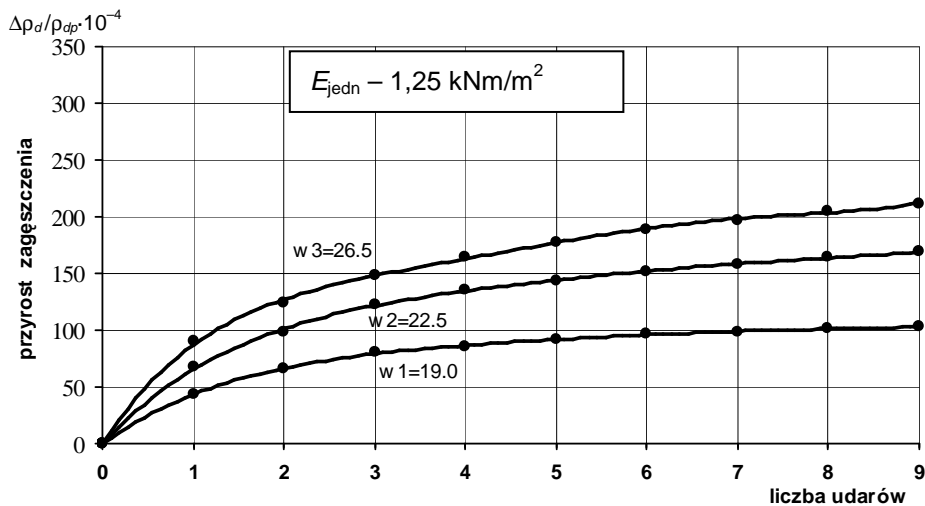
Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 22,5\%$

$w2p$ [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Udary								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
22,5	1,25	1,6554	ρ_{dk} g/cm ³	1,666	1,671	1,675	1,677	1,679	1,680	1,681	1,682	1,683
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	111	164	204	223	238	252	262	272	280
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	67	99	123	135	144	152	158	164	169
			przyr. [%]	40	19	14	7	5	5	4	3	3
	2,5	1,6550	ρ_{dk} g/cm ³	1,667	1,674	1,679	1,681	1,683	1,684	1,685	1,686	1,687
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	127	199	245	266	285	298	308	316	323
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	77	120	148	161	172	180	186	191	195
			przyr. [%]	40	22	15	6	5	4	3	3	2
	5,0	1,6554	ρ_{dk} g/cm ³	1,670	1,678	1,683	1,686	1,688	1,690	1,691	1,692	1,693
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	152	228	278	306	328	348	363	374	384
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	92	138	168	185	198	210	219	226	232
			przyr. [%]	40	20	12	8	5	6	3	3	3

Tabela 6

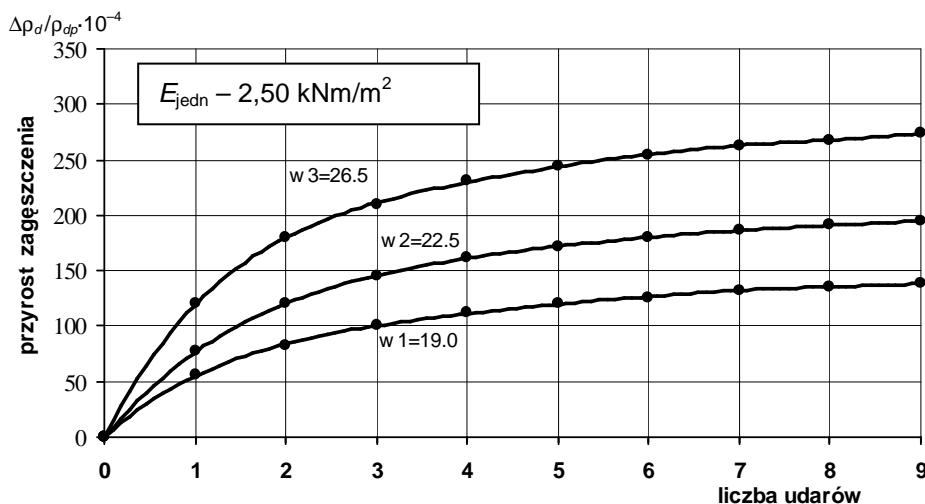
Przyrosty gęstości (zagęszczenia) – badanie przy $W_{pocz} = 26,5\%$

$w3p$ [%]	E_{jedn} [kNm/m ²]	ρ_{dp} [g/cm ³]	Przyrost od wartości początkowej	Udary								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
26,5	1,25	1,5646	ρ_{dk} g/cm ³	1,578	1,584	1,587	1,590	1,592	1,594	1,595	1,596	1,597
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	141	194	232	258	277	296	308	321	332
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	90	124	148	165	177	189	197	205	212
			przyr. [%]	43	16	11	8	6	5	4	4	3
	2,5	1,5652	ρ_{dk} g/cm ³	1,584	1,593	1,598	1,601	1,603	1,605	1,606	1,607	1,608
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	188	282	329	362	382	398	412	420	429
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	120	180	210	231	244	254	263	268	274
			przyr. [%]	44	22	11	7	5	4	3	2	2
	5,0	1,5626	ρ_{dk} g/cm ³	1,583	1,593	1,599	1,603	1,606	1,608	1,610	1,611	1,613
			$\Delta\rho_{dk} \cdot 10^{-4}$	206	306	369	409	436	458	477	491	505
			$\Delta\rho_{dk}/\rho_{dp} \cdot 10^{-4}$	132	196	236	262	279	293	305	314	323
			przyr. [%]	41	20	12	8	5	5	3	3	3



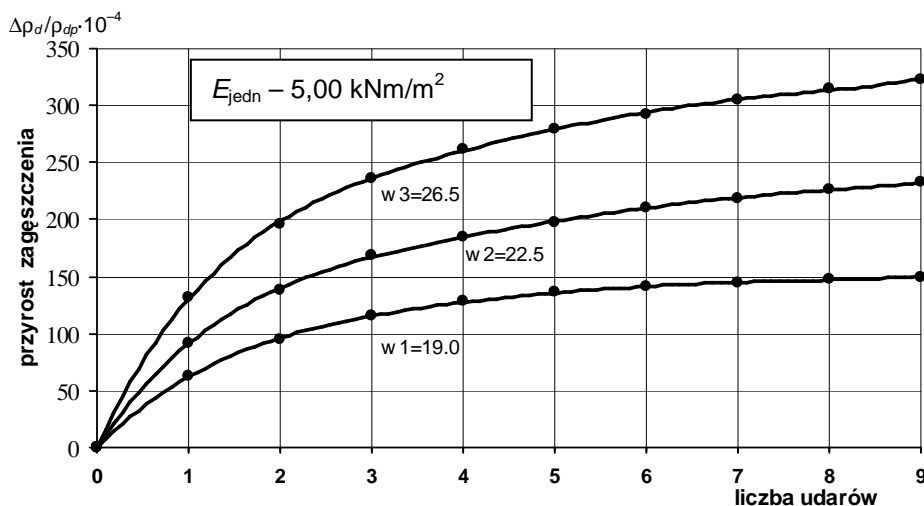
Rys. 8. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od liczby pojedynczych uderzeń dla $E_{jedn} = 1,25 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 8. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of single impacts for $E = 1,25 \text{ kNm/m}^2$



Rys. 9. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od liczby pojedynczych uderzeń dla $E_{jedn} = 2,50 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 9. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of single impacts for $E = 2,50 \text{ kNm/m}^2$



Rys. 10. Zależność względnego przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od liczby pojedynczych uderzeń dla $E_{jedn} = 5,0 \text{ kNm/m}^2$

Fig. 10. Relation between relative increment of bulk density of soil skeleton vs number of single impacts for $E = 5,0 \text{ kNm/m}^2$

- Po każdym uderzeniu zagęszczenie wzrasta, a jego przyrosty są największe w początkowej fazie zagęszczania, gdzie po 3 lub 4 uderzeniach przyrost zagęszczenia stanowi około 80% całkowitego przyrostu. Następne uderzenia dają małe kilkuprocentowe przyrosty, co jest wynikiem wzrostu ciśnienia porowego w próbce gruntu i braku odpowiedniego czasu na rozproszenie tego ciśnienia, przez co większość zadawanej energii nie jest przekazywana na szkielet gruntowy.
- Wszystkie jakościowe zmiany efektów uderzeniowego zagęszczenia przy obciążeniu uderzeniami ciągłymi i uderzeniami w seriach z odstępem czasowym są podobne (rys. 5–7 i 9–11), **ale ich wartości są inne.**

Porównując wyniki badań uzyskane z doświadczeń przy obciążeniu uderzeniowym sposobem A (3 serie \times 3 uderzenia z przerwą czasową między seriami), a obciążeniem sposobem B (9 uderzeń zadawanych w sposób ciągły), stwierdzono że:

- Efektywność takiej samej sumarycznej energii obciążenia uderzeniowego zadawanego uderzeniami ciągłymi (sposób B) jest znacznie niższa niż zadawanego seriami uderzeń z przerwą czasową (sposób A) i wynosi w porównaniu procentowym przyrostów całkowitych $\Delta\rho_{d \text{ całk}}$ dla prób o wilgotności początkowej:

$w_1 = 19\%$ $\Delta\rho_{d \text{ całk (B)}}$ jest mniejszy od $\Delta\rho_{d \text{ całk (A)}}$ – o około 25%

$w_2 = 22,5\%$ $\Delta\rho_{d \text{ całk (B)}}$ jest mniejszy od $\Delta\rho_{d \text{ całk (A)}}$ – o około 30%

$w_3 = 26,5\%$ $\Delta\rho_{d \text{ całk (B)}}$ jest mniejszy od $\Delta\rho_{d \text{ całk (A)}}$ – o około 36%

- Przy wyższej wilgotności próbki gruntu zaznacza się większy wpływ przerw czasowych na uzyskane efekty wzrostu gęstości.

6. Podsumowanie

Bez względu na warunki początkowe, wraz ze wzrostem stosowanej energii udarowej zwiększa się wielkość przyrostu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (zagęszczenia) badanej próby gruntu.

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, że zmiany strukturalne w gruncie wywołane obciążeniem udarowym ułatwiają proces zagęszczania.

Zdecydowanie lepsze efekty udarowego zwięszczenia 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 zmniejszyć kosztem wydłużenia przerw.

Literatura

- [1] Andrsasson B., Hansbo S., *Compaction control by dynamic method*, Väg-och vattenbyggaren, nr 8–9, 1977.
- [2] Gunaratne M., Ranganath M., Thilakasiri S., Mullins G., Stinnette P., Kuo C., *Study of pore pressures induced in laboratory Dynamic Consolidation*, Computers and Geotechnics, nr 2/1996, Great Britain.
- [3] Gryczmański M., *Dynamiczne metody wzmacniania podłoża gruntowego*, XVI Ogólnopolska Konferencja – Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Ustroń 2001.
- [4] Gaszyński J., Pabian Z., *Udarowe zagęszczanie gruntów w świetle badań modelowych*, Geotechnika i Budownictwo Specjalne, ZSMGiG XXIX, 2006.
- [5] Kłos J., Tejchman A., *Zastosowanie dynamicznej konsolidacji w budownictwie*, Inżynieria i Budownictwo, 7/1979, Warszawa.
- [6] Ménard L., Broise Y., *Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation*, Géotechnique, 1975.
- [7] Ménard Techniques Limited, *Oedometre Dynamic*, Paryż 1978.
- [8] Nowak B., *Konsolidacja dynamiczna gruntów*, Inżynieria i Budownictwo, 2/1989, Warszawa.
- [9] Tejchman A., *Dynamiczna konsolidacja podłoża*, Technika i Gospodarka Morska, nr 7/1975, Warszawa.