

Liniowa korelacja wyników lekkiej płyty dynamicznej jako sposób na usprawnienie procesu budowlanego

Mgr inż. Michał Majcherek, Politechnika Poznańska,
inż. Jan Nowak, Zakład Drogowo-Budowlany NOJAN Jan Nowak

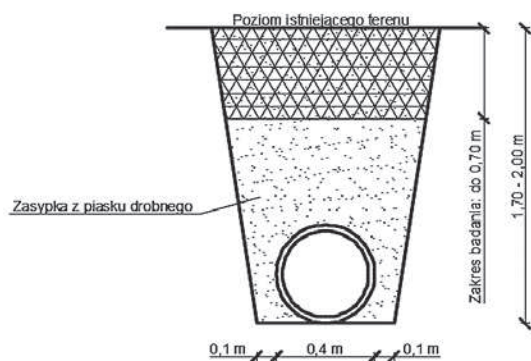
1. Wprowadzenie

Prowadzenie badań metodami *in situ* w pracach drogowych to niezwykle czasochłonne zajęcie, które niejednokrotnie wymaga zaangażowania dużych zasobów sprzętowych, ludzkich oraz czasowych. W dynamicznym procesie, jakim jest budowa, nie zawsze jest to możliwe do osiągnięcia, a tym samym badania, również badania zagęszczenia i nośności warstw konstrukcyjnych (konieczność ich przeprowadzania), mogą prowadzić do opóźnień w realizacji samych robót. Szczególnie widoczne jest to w budownictwie drogowym. W harmonogramie robót nie można też uwzględnić wszystkich wymaganych badań, zwłaszcza jeżeli prace są prowadzone jednocześnie na wielu odcinkach roboczych, ulokowanych w pewnym oddaleniu od siebie. Szczególnie istotnymi aspektami badań, jakie należy wykonać, są sprawdzenia nośności oraz zagęszczenia podłoża jak również warstw konstrukcyjnych podbudowy, od których właściwego wykonania zależy między innymi trwałość całej drogi [2]. Niestety

Tabela 1. Przybliżona czasochłonność wybranych metod badawczych

Rodzaj badania	Czas przygotowania	Czas badania	Liczba badań na godzinę
VSS*	30 min	25 min	1,2
SD-10	20 min	20 min	2,0
LPD	15 min	2 min	22,5

* potrzebna dodatkowo koparka kołowa lub samochód ciężarowy



Rys. 1. Przekrój poprzeczny wykopu pod kanalizację deszczową (źródło własne)

standardowe metody badań, wykorzystujące na przykład płytę VSS, wymagają zaangażowania nie tylko osoby do prowadzenia badań, ale również ciężkich pojazdów, które mogą pełnić funkcję obciążenia dla urządzenia. Również pobieranie próbek oraz badanie ich w warunkach laboratoryjnych jest nieefektywne, ponieważ zarówno ich transport, jak i sam proces oceny właściwości nie pozwala na natychmiastowe otrzymanie wyników. Czas samego badania, jak również moment uzyskania wyników, jest zatem elementem kluczowym (tabela 1).

2. Charakterystyka obiektu badawczego

Oprócz właściwego przygotowania oraz sprawdzenia sprzętu pomiarowego niezbędne jest szczegółowe zaprojektowanie pola badawczego. W tym celu została przeprowadzona analiza wymagań w odniesieniu do charakterystyki prowadzenia robót. Tym samym prace badawcze zostały przeprowadzone w obrębie dwóch realizacji:

- „Budowa odcinka drogi gminnej (działki nr 218/2, 219/4) na terenie Osiedla Wojska Polskiego w Grodzisku Wielkopolskim wraz z odwodnieniem”, realizowana dla gminy Grodzisk Wielkopolski.
- „Przebudowa drogi gminnej – ulica Długa w Granowie”, realizowana dla gminy Granowo.

Dobór obiektów budowlanych został zdeterminowany przede wszystkim podobnymi warunkami gruntowo-wodnymi, jak również zakresem robót obejmującym wykonanie odcinka kanalizacji deszczowej w pasie drogi. W ten sposób pola badawcze będą mogły zostać wyznaczone w obrębie wykopów wąsko-przestrzennych, których zagęszczenie jest niezwykle istotne ze względu na warstwy konstrukcyjne nawierzchni wykonywanych później w ciągu linii przekopów. Przykładowy schemat przekroju poprzecznego wykopu liniowego pod kanalizację deszczową pokazano na rysunku 1.

Poszczególne stanowiska badawcze zostały oznaczone symbolami: A, B, C, D i E, a każde z nich zostało przygotowane w dokładnie taki sam sposób, zarówno jeżeli chodzi o rodzaj materiału zasypowego, jak również jego dogęszczania. W ten sposób zostały ograniczone błędy wynikające z rodzaju zastosowanego kruszywa, jak również formy jego wbudowania – celem uzyskania możliwie największej zbieżności wyników. Z kolei krotność wykonania badań została oparta

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie liczby badań założonych do wykonania

Budowa	Liczba stanowisk	LPD	SD-10	VSS
[-]	[szt.]	[szt.]	[szt.]	[szt.]
Grodzisk Wielkopolski	2	10	2	2
Granowo	3	15	3	3
Suma Σ	5	25	5	5

przede wszystkim na pracochłonności ich wykonania na budowie (tabela 2).

Należy również zaznaczyć, że na tym etapie nie zostały narzucone niezbędne do określenia wartości parametrów zagęszczenia, czy nośności podłoża, a tym samym uzyskane wyniki będą odzwierciedlać stan faktyczny na budowie po wbudowaniu i wstępnym zagęszczeniu, bez analizy wyników względem poszczególnych projektów, czy szczegółowych specyfikacji technicznych. Oczywiście same wyniki mogą posłużyć określeniu jakości wykonanych prac, ale docelowo nie jest to przedmiotem niniejszej pracy.

3. Lekka płyta dynamiczna

Lekka płyta dynamiczna to urządzenie, które przez ostatnie dziesięć lat zyskało sobie wielkie uznanie w Polsce i które służy do szybkiego oraz wygodnego badania zagęszczenia oraz nośności kruszyw. Zgodnie z informacją przekazywaną przez producentów tego typu urządzeń płyta jest przeznaczona do warstw niezwiązanych podbudów oraz nasypów budowlanych. Wynikiem podstawowym przeprowadzonych pomiarów jest dynamiczny moduł odkształcenia podłoża (E_{vd}), który został szczegółowo opisany w instrukcji nr TP BF-StB cz. B8.3 (2003) [1], podobnie jak sama procedura przeprowadzenia badania. Budowa samego urządzenia umożliwia nie tylko sporą mobilność podczas prowadzenia badań terenowych, ale również nie wymaga angażowania dużych zasobów ludzkich i sprzętowych (rys. 2). Do profesjonalnej i sprawnej obsługi urządzenia wystarcza jedna osoba, a dzięki pamięci wewnętrznej oraz możliwości lokalizacji miejsca badania z wykorzystaniem GPS-u nie ma potrzeby dodatkowego notowania otrzymanych wyników, co znacząco zmniejsza czas wykonania badania (około 5 minut).



Rys. 2. Kompletne wyposażenie lekkiej płyty dynamicznej (źródło własne)

Tabela 3. Zbiorcze zestawienie wyników badań

Stanowisko badawcze	E_{vd}	E_1	E_2	I_s
[-]	[MN/mm ²]	[MPa]	[MPa]	[-]
A.	23,84	13,92	58,14	0,9586
B.	23,58	13,01	55,69	0,9771
C.	28,84	12,27	66,77	0,9786
D.	33,32	14,12	73,29	0,9871
E.	28,94	13,39	66,77	0,9800

Należy jednak zaznaczyć, że zasięg oddziaływania płyty określany jest (w zależności od producenta) jako przedział miarodajnej głębokości maksymalnej od 0,5 m do 0,7 m. Biorąc jednak pod uwagę zapisy, które można znaleźć przy obecnie wykonywanych projektach, można przyjąć, że szczegółowe specyfikacje techniczne lub wytyczne dla wykonawcy i tak wymagają wykonywania oraz dogęszczania gruntów nasypowych w warstwach o grubościach około 0,5 m. Tym samym nie powinno to stanowić poważnego problemu podczas właściwego kontrolowania wykonanych robót na budowie. Metodologia przeprowadzania przeliczeń nie jest skomplikowana, jednak stanowi pewnego rodzaju uproszczenie, ponieważ przyjmowany jest współczynnik Poissona $\nu=0,5$ oraz zakłada się, że rozkład naprężeń pod płytą obciążoną jest równomierny. Należy pamiętać, że kruszywo nie jest w tym wypadku tworem jednorodnym, a jego właściwości zależą w dużej mierze nie tylko od zagęszczenia, ale również od kształtu ziaren, wilgotności, czy stopnia różnoziarnistości U [3].

W toku zaplanowanych badań założone zostało wykorzystanie lekkiej płyty dynamicznej firmy Terratest 4000 USB, która została zakupiona przez Zakład Drogowo-Budowlany NOJAN Jan Nowak w 2014 roku i od tego czasu była użytkowana jako element badań kontrolnych na terenach robót drogowych, kubaturowych oraz instalacyjnych, realizowanych przez firmę. Płyta była w pełni sprawna, jednak przed przystąpieniem do realizacji, została dodatkowo sprawdzona i skalibrowana.

4. Zestawienie wyników badań

Dla przyjętej metody badawczej, jak również metod porównawczych, będących podstawą uzyskania zależności korelacyjnej, całość wyników została przedstawiona w formie zbiorczego zestawienia (tabela 3), gdzie pięciokrotność badania lekką płytą dynamiczną oraz uzyskanie wyniku średniego z tych pomiarów miało za zadanie zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia błędu w uzyskanym wyniku.

5. Zależność korelacyjna uzyskanych wyników

Istnieje wiele metod statystycznych przedstawienia zależności pomiędzy różnymi parametrami. Koniecznym było wybranie jednej z metod, która pozwoliłaby uzyskać możliwie wiarygodne wyniki, bez konieczności angażowania do przeliczeń złożonych programów obliczeniowych. Od początku

założeniem badań było uzyskanie wzorów, umożliwiających przeliczenie w sposób prosty modułu odkształcenia dynamicznego na parametry wiodące gruntu nasypowego. Kierownik budowy ma otrzymać informację natychmiast po badaniu, tak aby podjąć decyzję, czy kontynuować prace, czy też konieczne jest dalsze dogęszczenie podłoża.

Ostatecznie biorąc pod uwagę prostotę obliczeń, ustalono, że najefektywniejsze jest wykorzystanie regresji liniowej [4]. Metoda ta pozwala nie tylko uzyskać prosty wzór przeliczeniowy, ale umożliwia sprawdzenie stopnia korelacji pomiędzy poszczególnymi badanymi parametrami (wskaźnik korelacji Pearsona). Docelowo otrzymana prosta ma być tak dobrana, aby jak najlepiej opisywać zmianę wartości E_1 , E_2 oraz I_s względem E_{vd} , gdzie: E_1 to moduł odkształcenia pierwotnego, E_2 – moduł odkształcenia wtórnego, a I_s – wskaźnik zagęszczenia. Są to trzy parametry wiodące, których określenie wiąże się z największą pracochłonnością.

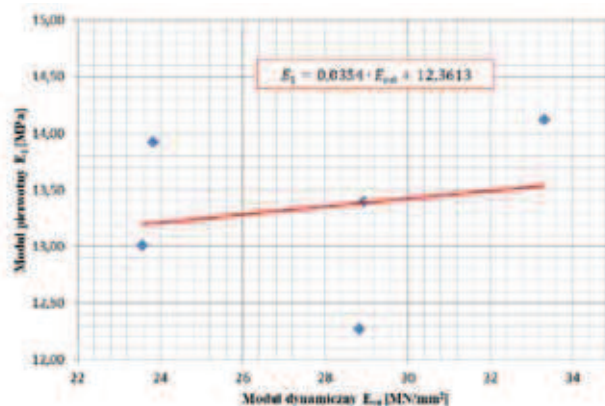
Implementując regresję liniową, otrzymujemy ostatecznie zestawy danych, odpowiednio dla zależności E_1 (E_{vd}), E_2 (E_{vd}) oraz I_s (E_{vd}) (tabela 3).

Dla wszystkich tych danych zostały określone funkcje liniowe oraz wskaźniki korelacji, których ostateczną formą są wykresy na rysunkach 3, 4 i 5.

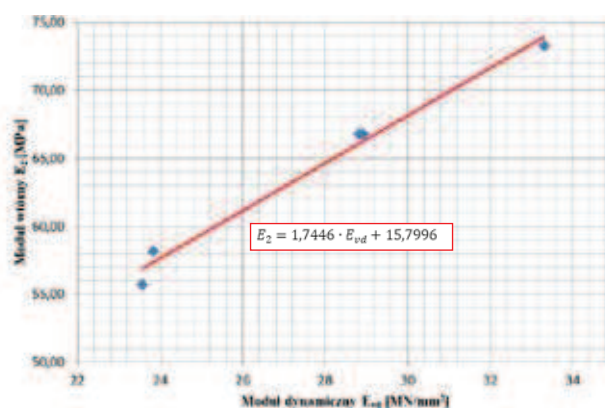
6. Analiza wyników

Analizując otrzymane wyniki, jak również ich graficzne przedstawienie w postaci wykresów, wyraźnie można zaobserwować zbieżność wyników w przypadku modułu odkształcenia wtórnego, jak również wskaźnika zagęszczenia. Tym samym te dwie zależności mogą być z powodzeniem stosowane podczas prac na budowie jako proste przeliczniki dla lekkiej płyty dynamicznej. Ponadto wysoki poziom korelacji w przypadku modułu odkształcenia wtórnego, równy 0,99 wyraźnie wskazuje, że uzyskany przelicznik jest niemal idealny względem wartości modułu wtórnego. Zatem jego poprawności nie powinno się kwestionować. Z kolei w kwestii wskaźnika zagęszczenia uzyskany wzór zawierający wskaźnik korelacji Pearsona równy 0,77 wyraźnie wskazuje na możliwość poprawy, jednak tylko nieznacznej. Biorąc pod uwagę liczbę danych przyjętych do przeliczeń, należałoby się zastanowić nad rozszerzeniem badań o kolejne stanowiska badawcze, celem uzyskania zwiększonej dokładności, najlepiej powyżej $r = 0,90$. Prawdopodobnie w przypadku 10 stanowisk taka dokładność przelicznika zostałaby uzyskana. Jest to również zakres badań, jaki warto rozważyć w przypadku kontynuowania prac badawczych nad zależnościami korelacyjnymi wskaźnika zagęszczenia i modułu odkształcenia dynamicznego.

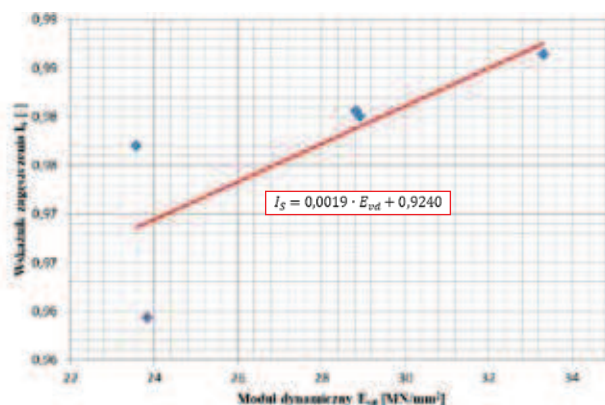
Niestety w przypadku ostatniego z parametrów wiodących, modułu odkształcenia pierwotnego, uzyskana zależność matematyczna jest nieakceptowalna i wyraźnie wskazuje na brak jednoznacznej korelacji przy poziomie korelacji liniowej równym 0,19. Poddaje to również pod wątpliwość celowość zaplanowania dalszych badań, mających na celu ustalenie dokładniejszej zależności liniowej między E_1 oraz E_{vd} . Przy opracowaniu planu prowadzenia poszczególnych badań zostały ograniczone błędy wynikające ze stosowania kruszywa



Rys. 3. Graficzne przedstawienie wyników korelacji liniowej E_1 - E_{vd}



Rys. 4. Graficzne przedstawienie wyników korelacji liniowej E_2 - E_{vd}



Rys. 5. Graficzne przedstawienie wyników korelacji liniowej I_s - E_{vd}

o różnych parametrach, jak również sposobu zagęszczania. Znormalizowanie niniejszych kwestii w obrębie wszystkich pięciu stanowisk badawczych zmusza do poszukiwania innych przyczyn. Najbardziej prawdopodobną jest sama forma przeprowadzenia badania lekką płytą dynamiczną, podczas którego trzy uderzenia pomiarowe są poprzedzane trzema uderzeniami kalibracyjnymi. Tym samym mają one wpływ również na losowy układ ziaren kruszywa i mogą uniemożliwiać ocenę modułu pierwotnego, który jest określany dla gruntu przed

powstaniem w nim znaczących przemieszczeń. Chociaż oba badania należą do grupy badań semi-nieniszczących to jednak właśnie w tej kwestii należy się dopatrywać przyczyny niepowodzenia w uzyskaniu zadowalających wyników obliczeń dla funkcji E_1 (E_{vd}). Wskaźnik korelacji 0,19 może poddawać również pod wątpliwość przeprowadzanie podobnych badań korelacyjnych dla modułu odkształcenia pierwotnego w przypadku poszerzenia liczby badań lub ich przeprowadzenia dla innych rodzajów kruszywa.

7. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę zarówno same wyniki, jak i ich późniejszą analizę, można przyjąć, że badania zachęcają do ich dalszego kontynuowania zarówno w szerszym zakresie stanowisk badawczych, jak również zaplanowania badań dla innych rodzajów kruszywa. Podobne analizy należy przeprowadzać osobno dla każdej warstwy konstrukcyjnej. Niemniej biorąc pod uwagę względnie niezmiennie parametry wbudowywanych kruszyw w obrębie poszczególnych realizacji, wynikających z wykorzystania tych samych materiałów (od tych samych dostawców), można przyjąć, że nawet początkowa pracochłonność jest niewielka w stosunku do dużej oszczędności czasu przy wszelkich dalszych powtórzeniach badań.

Warto również nadmienić, że w przypadku robót drogowych i kanalizacyjnych, prowadzonych w świetle projektowanych pasów drogowych, najrozsądniejsze wydawałoby się kontynuowanie badań, zwłaszcza w przypadku zastosowania innych rodzajów kruszywa zasypowego niż to przedstawiono w niniejszej pracy. Szczególnie obiecujące mogą okazać się wyniki oraz przeliczniki uzyskane dla kruszyw łamanych frakcji 0–31,5 mm oraz 0–63 mm, które to bardzo często są wykorzystywane jako materiał na podbudowy niezwiązane przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TP BF-StB cz. B8.3 (2003): Dynamic Plate-Load Testing with the Aid of the Light Drop-Weight Tester, Technical Test Code for Soil and Rock Mechanics in Road Construction, Road and Transport Research Association
- [2] Kraszewski C., Gajewska B., Metody ustalania nośności podłoża drogowego – wymagania i badania, IBDiM. 02.11.2016 r. (<http://www.kataloginzyniera.pl>)
- [3] Komor M. K., Kumor Ł. A., Farmas J., Badanie związków korelacyjnych parametrów zagęszczenia nasypu budowlanego w warunkach in situ, Budownictwo i Architektura 12, 3/2013, str. 97–104
- [4] Szpikowski M. z Zespołem, Badanie i ustalanie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną, IBDiM 2005

BIM

BIM DLA INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA

STUDIA PODYPLOMOWE



INSTYTUT TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH W INŻYNIERII LĄDOWEJ L-5
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Instytut Technologii Informatycznych w Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej zaprasza na dwusemestralne studia podyplomowe:

Koordynator BIM

– nowoczesne projektowanie i realizacja inwestycji

#BIMTeam

Program studiów obejmuje **168 godz. zajęć** i **11 bloków** tematycznych m.in.:

- „Koordynacja międzybranżowa i wykrywanie kolizji”
- „Platformy pracy zespołowej i koordynacji”
- „Zarządzanie danymi BIM i otwarte standardy”

Zajęcia w 1. semestrze będą się odbywały podczas 7 sobotnich zjazdów, co 2 tygodnie, od 6. października 2018 do 26. stycznia 2019,
Koszt jednego semestru studiów wynosi **2600 zł**

Dalsze informacje i formularz zgłoszeniowy pod adresem:

www.L5.pk.edu.pl