Aparatura badawcza w nowoczesnym laboratorium geotechnicznym

Mgr inż. Marcin Bujko, dr inż. Ireneusz Dyka, dr hab. inż. Piotr Srokosz, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

1. Wprowadzenie

Powszechnie stosowane w Polsce metody badawcze zawarte w polskiej normie pomijają wiele czynników charakteryzujących złożoną naturę gruntu, co pozwala relatywnie prostymi procedurami laboratoryjno-terenowymi otrzymywać pożądane dane materiałowe charakteryzujące podłoże gruntowe. Efektem procesu projektowania są nieskomplikowane, lecz jednocześnie nieekonomiczne rozwiązania. W praktyce projektowania geotechnicznego można jednak zauważyć trend ku jak najdokładniejszej ocenie współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym, wykorzystując nowoczesne metody pomiarowe. Podejście to uzasadnione jest nie tylko aspektem ekonomicznym budowy, ale też niezawodnością samej konstrukcji.

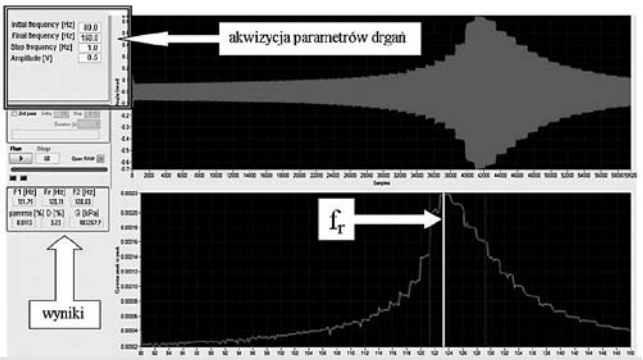
Modelowanie zachowania konstrukcji w poszczególnych etapach obciążenia wymaga znajomości cech podłoża, w szczególności tych, które opisują jego właściwości mechaniczne. Dzięki nowoczesnej aparaturze pomiarowej możliwe staje się wierniejsze odtworzenie w modelach teoretycznych zjawisk zachodzących w obciążonym ośrodku gruntowym, a dzięki temu opracowanie dokładniejszych procedur projektowych. Potencjalnie, stanowi to źródło doskonalenia metod projektowania zawartych w dotychczas obowiązujących normach oraz efektywniejszych i ekonomiczniejszych rozwiązań projektowych.

Instytut Budownictwa Wydziału Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie jest dziś jednym z najnowocześniejszych ośrodków badawczych w Polsce. Dzięki projektom RPO i RPW finansowanym ze środków Unii Europejskiej (2007–2013) wzbogacił swoją bazę laboratoryjną, stając się niekwestionowanym liderem w regionie pod względem innowacyjności badań. Zakład Geotechniki i Budownictwa Drogowego od lat współpracuje z wieloma lokalnymi ośrodkami badawczymi. Od niedawna wykorzystuje w swoich badaniach nowoczesny sprzęt laboratoryjny, co pozwoliło na nawiązanie współpracy z największymi partnerami regionu oraz na realnie efektywne wsparcie lokalnego środowiska eksperckiego.

2. Nowoczesny sprzęt laboratoryjny stosowany do badań geotechnicznych

Jedną z głównych osi rozwoju olsztyńskiego ośrodka badawczego jest rozwój badań gruntu w zakresie małych odkształceń postaciowych. Jest to zagadnienie, które początkowo kojarzono jedynie z warunkami obciążeń sejsmicznych i parasejsmicznych, lecz obecnie jego wagę dostrzegają również praktycy inżynierii lądowej zajmujący się tradycyjnymi rozwiązaniami projektowymi posadowień obiektów budowlanych. Coraz częściej uwzględnia się je, projektując posadowienia obiektów wysokich, wysokościowych, zabytkowych i innych obiektów w warunkach należących do trzeciej kategorii geotechnicznej. Stąd też olsztyński ośrodek traktuje inwestycje w nowoczesną aparaturę badawczą za cel strategiczny.

Rys. 1. *Widok komory aparatu RC/TS WF8500*



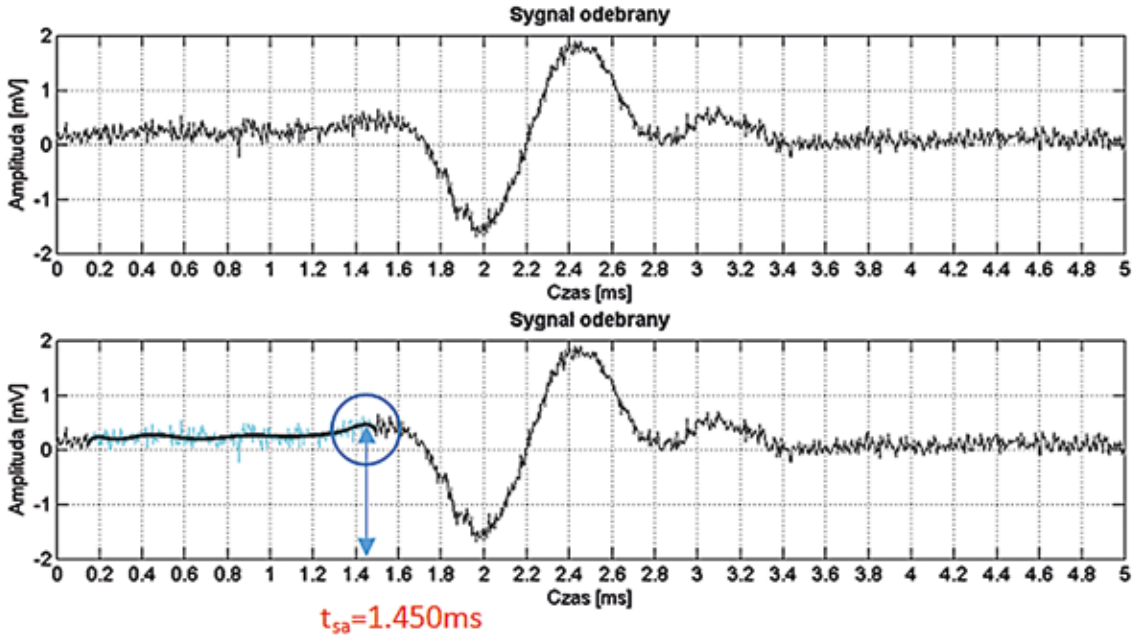
Rys. 2. *Widok okna programu obsługującego aparat RC z wynikami badania próbki gruntu spoistego*

Rys. 3. *Widok elementu bender zainstalowanego w cokole komory aparatu trójosiowego ściskania*

Aparat RC/TS jest precyzyjnym urządzeniem pomiarowym, który od lat 60. ub. wieku jest stosowany w inżynierii geotechnicznej na całym świecie. Konstrukcja urządzenia jest nieustannie modernizowana w celu poszerzania spektrum zastosowań. Model WF8500 brytyjskiej firmy Wykeham Farrance jest urządzeniem należącym do Zakładu Geotechniki i Budownictwa Drogowego UWM w Olsztynie (rys. 1). WF8500 jest aparatem typu RC – kolumna rezonansowa – z możliwością działania w trybie skrętnego ścinania TS. Aparat służy do wyznaczania cech mechanicznych gruntu związanych z jego sztywnością, w tym wartości modułu odkształcenia G (rys. 2). Szczegółowy opis przeprowadzania badań i interpretacji wyników zawarto m.in. w [1, 2]. W zastosowanej technice pomiarowej wykorzystuje się zjawisko rezonansu drgań w materiale gruntowym badanej próbki, wywoływane cyklicznym jej skręcaniem. Na podstawie wyznaczonej częstotliwości rezonansowej drgań skrętnych próbki można wyznaczyć początkową wartość modułu odkształcenia G_0.

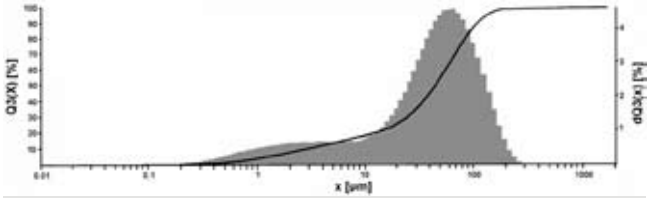
Urządzenie to działa w zakresie częstotliwości 10–300 Hz, co pozwala generować drgania skrętne odpowiadające zakresowi małych i bardzo małych odkształceń postaciowych. Aparat umożliwia badanie pełnej, walcowej próbki o średnicy 50 mm lub 70 mm. Badanie w kolumnie rezonansowej uznawane jest obecnie za wysoce miarodajne, praktyczne i stosunkowo wygodne zarówno pod względem interpretacji pomiaru, jak i technicznej obsługi aparatu (zob. [3, 4]).

Kolejnym innowacyjnym urządzeniem pomiarowym znajdującym się w Laboratorium Geotechnicznym w Olsztynie jest zestaw piezoelektrycznych **elementów *bender***, zespolonych z aparatem trójosiowego ściskania. Elementy *bender* są niewielkimi płytkami o identycznej budowie, które umieszczane są w przeciwległych końcach walcowej próbki gruntu. Na skutek przyłożenia zmiennego napięcia jedna z płytek wygina się, generując poprzeczne i podłużne fale mechaniczne. Druga



Rys. 4. *Przykład wyników badania próbki gruntu spoistego elementami bender*

Rys. 5. *Widok aparatu Analysette 22 NanoTec*



Rys. 6. *Przykład wyniku badania próbki gruntu spoistego w aparacie Analysette 22 NanoTec*

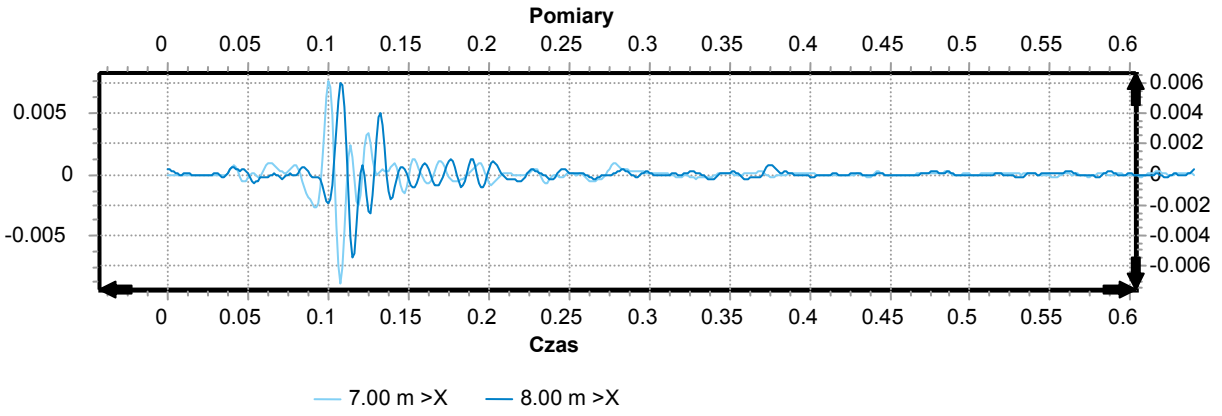
płytka rejestruje drgania i w reakcji wygina się cyklicznie, co generuje napięcie elektryczne rejestrowane przez elektroniczny oscyloskop. Pomierzony czas propagacji fali poprzecznej pozwala na wyznaczenie wartości modułu odkształcenia *G*. Urządzenie pracuje w zakresie bardzo małych odkształceń postaciowych (0,001%), co pozwala na określenie wartości początkowego modułu ścinania gruntu G_0. Elementy *bender* będące na wyposażeniu olsztyńskiego laboratorium zamocowane są w cokołach aparatu TRIAX firmy Wykeham Farrance i mają powierzchnię 14,3×10,2 mm. Są wykonane z rdzenia piezoceramicznego w epoksydowej osnowie (rys. 3). Przykładowe wyniki badań próbki gruntu spoistego przedstawiono na rysunku 4. Szczegółowy opis prowadzenia pomiarów oraz metod interpretacji ich wyników zawarto w [5].

Rutynowym badaniem laboratoryjnym, poprzedzającym wszystkie oznaczenia cech mechanicznych jest analiza granulometryczna gruntu. Tradycyjne podejście polega na wykonaniu analizy sitowej lub areometrycznej stosownie przygotowanych próbek gruntu. Metody te są obarczone wieloma niedogodnościami, z których największą jest długi czas badania i stosunkowo niewielka dokładność (zależna np. od stanu sit o najmniejszych oczkach, czy jakości przygotowanej zawiesiny gruntowej). Jednym z obecnie najnowocześniejszych urządzeń służących do wyznaczania charakterystyk uziarnienia materiałów gruntowych jest automatyczny, laserowy analizator granulometryczny **Analysette 22 NanoTec** stanowiący podstawowe wyposażenie olsztyńskiego laboratorium. Analizator ten generuje wiązkę światła laserowego, która jest rejestrowana przez światłoczuły ekran po przejściu przez celę pomiarową. W celi pomiarowej znajduje się zawiesina próbki badanego gruntu w wodzie. Możliwy jest również pomiar „na sucho" polegający na prześwietlaniu światłem laserowym próbki gruntu rozproszonej w sprężonym powietrzu. Idea pomiaru polega na wykorzystaniu zjawiska dyspersji i interferencji strumienia światła przez cząstki badanego materiału. Urządzenie pozwala na pomiar cząstek w zakresie średnic od 1 nanometra do 1 milimetra, łącząc tym samym zakresy analizy sitowej i areometrycznej. Przy wykorzystaniu niewielkiej ilości gruntu cały proces badania przebiega całkowicie automatycznie, zajmując kilka minut czasu. Przy cząstkach drobniejszych od 0.01 mm należy dodatkowo w dedykowanym formularzu oprogramowania uwzględnić skład chemiczny minerałów, z których składają się cząstki badanej zawiesiny. Na rysunku 5 przedstawiono widok urządzenia, a na rysunku 6 przykładowy wynik pomiaru.

3. Nowoczesny sprzęt terenowy stosowany do badań geotechnicznych

Niezwykle istotnym z punktu widzenia jakości uzyskiwanych parametrów materiałów gruntowych jest przeprowadzanie pomiarów *in situ*. Laboratorium Geotechniczne w Olsztynie posiada nowoczesną aparaturę do badań polowych. Najczęściej wykorzystywanym w praktyce geotechnicznej urządzeniem jest sejsmiczny **piezostożek SCPTU** firmy GEOTECH, który jest uzupełnieniem zestawu do sondowań statycznych CPTU. Wyposażenie standardowego stożka CPT w geofony lub akcelerometry umożliwia oznaczanie dynamicznych cech mechanicznych podłoża w oparciu o pomiar prędkości propagacji fali parasejsmicznej generowanej w badanym podłożu gruntowym. Wyniki przeprowadzonego badania SCPTU pozwalają ocenić *in situ* stan i rodzaj gruntu, stopień plastyczności i zagęszczenia, kąt tarcia wewnętrznego, spójność, moduły odkształcenia i współczynnik filtracji. Pełne badanie SCPTU polega na wciskaniu piezostożka pomiarowego w grunt ze stałą,

Rys. 7. *Widok sondy SCPT*



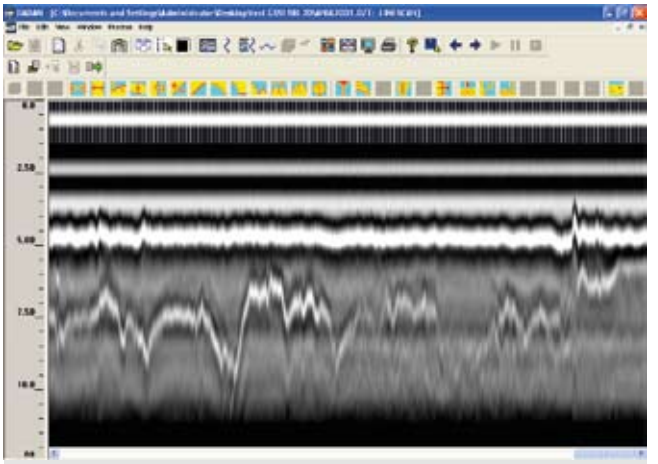
Rys. 8. *Przykład wyników sejsmicznych badań terenowych sondą SCPT – wykres echa fali sejsmicznej zarejestrowany na dwóch głębokościach*

znormalizowaną prędkością, równą 2 cm na sekundę. Podczas zagłębiania się w grunt stożek rejestruje opór penetracji pod jego podstawą q_c, opór na pobocznicy (tarcie) f_s, ciśnienie wody w porach gruntu u_2 oraz prędkość fali poprzecznej V_s. Na rysunku 7 przedstawiono widok sondy SCPTU.

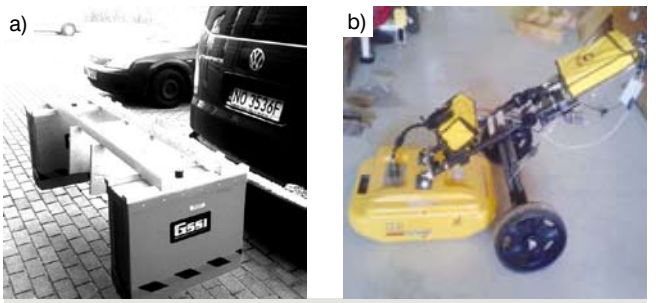
Pomiary sejsmiczne SCPTU wykonuje się w stropie i spągu badanej warstwy, zatrzymując proces penetracji i wyzwalając powierzchniową falę sejsmiczną uderzeniem młota w specjalne kowadło umocowane na powierzchni terenu. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru sejsmicznego na dwóch głębokościach, które umożliwiają wyznaczenie prędkości propagacji fali poprzecznej V_s, a przez to określenie początkowego modułu odkształcenia postaciowego G_0.

W celu przeprowadzenia badań nieniszczących podłoża gruntowego stosuje się georadary. To urządzenia, które tworzą mapy zmienności struktury badanych materiałów na podstawie analizy propagacji fal elektromagnetycznych. Typowe urządzenie zaopatrzone jest w antenę nadawczo-odbiorczą, która wysyła fale elektromagnetyczne o określonej częstotliwości w kierunku prostopadłym do badanej powierzchni. Fale penetrując podłoże, przenikają i odbijają się z różną prędkością zależną od stałej dielektrycznej materiałów badanej struktury. Do anteny jest podłączona elektroniczna jednostka sterująca, która rejestruje odbite sygnały docierające z różnymi opóźnieniami do urządzenia. Urządzenie przesuwając się wzdłuż określonego odcinka badanej powierzchni, zapisuje wyniki pomiaru tworząc dwuwymiarowy podłużny profil podłoża – rysunek 9.

Zakład Geotechniki i Budownictwa Drogowego ściśle współpracuje z lokalnym oddziałem Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w zakresie opracowania wspólnej metodyki badań z wykorzystaniem technik GPR. Oba te ośrodki są w posiadaniu georadaru – modelu SIR-20 firmy GSSI (rys. 10a). Urządzenie składa się z dwóch anten podczepianych poprzez specjalny stelaż do samochodu oraz elektronicznej jednostki



Rys. 9. *Przykład wyników badania podłoża georadarem*



Rys. 10. *Georadary stanowiące wyposażenie Laboratorium geotechnicznego w Olsztynie: a) SIR-20, b) DetectorDuo*

SIR-20 zespolonej z komputerem typu toughbook. Anteny pracują w zakresach częstotliwości 1 GHz oraz 2 GHz, co pozwala na dużą (jak na GPR) dokładność pomiaru w płytkim zakresie głębokości (praktycznie do 1,5 m), a co determinuje zastosowanie tego urządzenia głównie do diagnostyki stanu istniejących dróg oraz do oceny stanu płytkiego podłoża gruntowego.

Ponadto olsztyńskie laboratorium posiada georadar DetectorDuo (rys. 10b) holenderskiej firmy IDS. Jest on zaopatrzony w jedną, dwuzakresową antenę o częstotliwościach

250 i 700 MHz, co pozwala na głębszą niż SIR-20 penetrację fali do 7 m miąższości podłoża. Urządzenie jest kompaktowym aparatem i dzięki temu możliwe jest badanie powierzchni również wewnątrz budynków. Urządzenie wykorzystywane jest do lokalizacji istniejących instalacji budowlanych, zbrojenia konstrukcji żelbetowych oraz do analizy grubości i ciągłości warstw gruntu.
Oba georadary pozwalają uzyskiwać wyniki o nieocenionej wartości poznawczej, jeśli są korelowane z wynikami konwencjonalnych badań polowych, jak np. z punktowych odwiertów penetracyjnych oraz sondowań.

4. Podsumowanie

Prawidłowe rozpoznanie geotechniczne podłoża gruntowego jest pierwszym z aspektów możliwości powstania na danym obszarze inwestycji budowlanej. Właściwości geologiczno-inżynierskie zalegającego gruntu mają istotny wpływ na projektowaną konstrukcję pod względem bezpieczeństwa i optymalizacji kosztów posadowienia konstrukcji. Na etapie projektowania niezbędne są szczegółowe informacje geotechniczne uzyskane za pomocą badań *in situ* oraz laboratoryjnymi. W europejskiej normie projektowania geotechnicznego (Eurokod 7) stwierdza się, że „prawidłowo opracowane parametry geotechniczne i kontrola jakości wykonania robót na budowie mają większe znaczenie dla spełnienia podstawowych wymagań projektu niż dokładność modeli obliczeniowych i wartości współczynników częściowych". Podkreślono w ten sposób znaczenie badań geotechnicznych i doboru odpowiednich parametrów do obliczeń.

W niniejszym artykule przedstawiono tylko część wyposażenia Laboratorium Geotechnicznego w Olsztynie, skupiając uwagę na aparaturze wykorzystywanej zarówno w codziennej praktyce badawczej, jak i stosowanej w zagadnieniach o wąskiej specyfice zdefiniowanej wyjątkowością warunków prowadzenia rozpoznania *in situ* czy niestandardowymi wymogami dotyczącymi zestawów parametrów materiałowych. Niewątpliwie, zaplecze aparaturowe dzisiejszych laboratoriów budownictwa odgrywa decydującą rolę w zapewnieniu odpowiednio wysokiej jakości wyników. Nie wolno jednak zapominać o tym, że nowoczesna aparatura badawcza nigdy nie zastąpi doświadczenia inżynierskiego, które jest jednym z podstawowych warunków, aby wysokiej jakości sprzęt badawczy miał szansę stać się efektywnym narzędziem w rozwiązywaniu trudnych zagadnień z zakresu inżynierii budowlanej.

BIBLIOGRAFIA

[1] Dyka I., Srokosz P., Badania gruntu w aparacie skrętnego ścinania RC/TS. Część 1. Inżynieria Morska i Geotechnika, Nr 6/2012
[2] Dyka I., Srokosz P., Badania gruntu w aparacie skrętnego ścinania RC/TS. Część 2. Inżynieria Morska i Geotechnika, Nr 2/2014
[3] Massarsch, K. R., Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture of International Conference on Site Characterization, ISC'2, 19–22 Wrzesień 2004, Porto
[4] Mayne P. W., Coop M. R., Springman S. M., Huang A., Zornber J. G., Geomaterial behaviour and testing. Proc. of the 17-th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egipt, 2009
[5] Srokosz P.E., Interpretacja wyników badań elementami bender. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2012

ZAMÓWIENIE PRENUMERATY Przeglądu Budowlanego na rok 2016

Wybieram: (proszę zakreślić)	ZWYKŁA	ULGOWA lub STUDENCKA (dla indywidualnych członków PZITB i PIIB)
ROCZNA	☐ 252,00 zł*	☐ 126,00 zł*
ELEKTRONICZNA	☐ 75,00 zł *	

Zamówienia można składać **osobiście** lub **pocztą** – ul. Świętokrzyska 14 A, 00-050 Warszawa, **telefonicznie** 22 826-67-00 lub **e-mailem** reklama@przegladbudowlany.pl
* Ceny brutto (zawierają 5% VAT)

1. Imię i nazwisko/nazwa firmy

2. Nr telefonu kontaktowego 3. NIP (firmy)

4. Adres wysyłkowy

5. Okres prenumeraty

6. Opłata w kwocie (zł) została przekazana w dniu

Prenumeratorzy otrzymają zamówione egzemplarze po dokonaniu wpłaty na konto:

**PZITB ZARZĄD GŁÓWNY WYDAWNICTWO „PRZEGLĄD BUDOWLANY"
ul. Świętokrzyska 14 A, 00-050 Warszawa
Bank Millennium SA
90 1160 2202 0000 0000 5515 6488**

Upoważniamy Państwa do wystawienia faktury VAT bez podpisu odbiorcy.

Podpis