

# Monitoring działania wzmocnienia gruntu pod nasypem drogowym za pomocą sztywnych kolumn

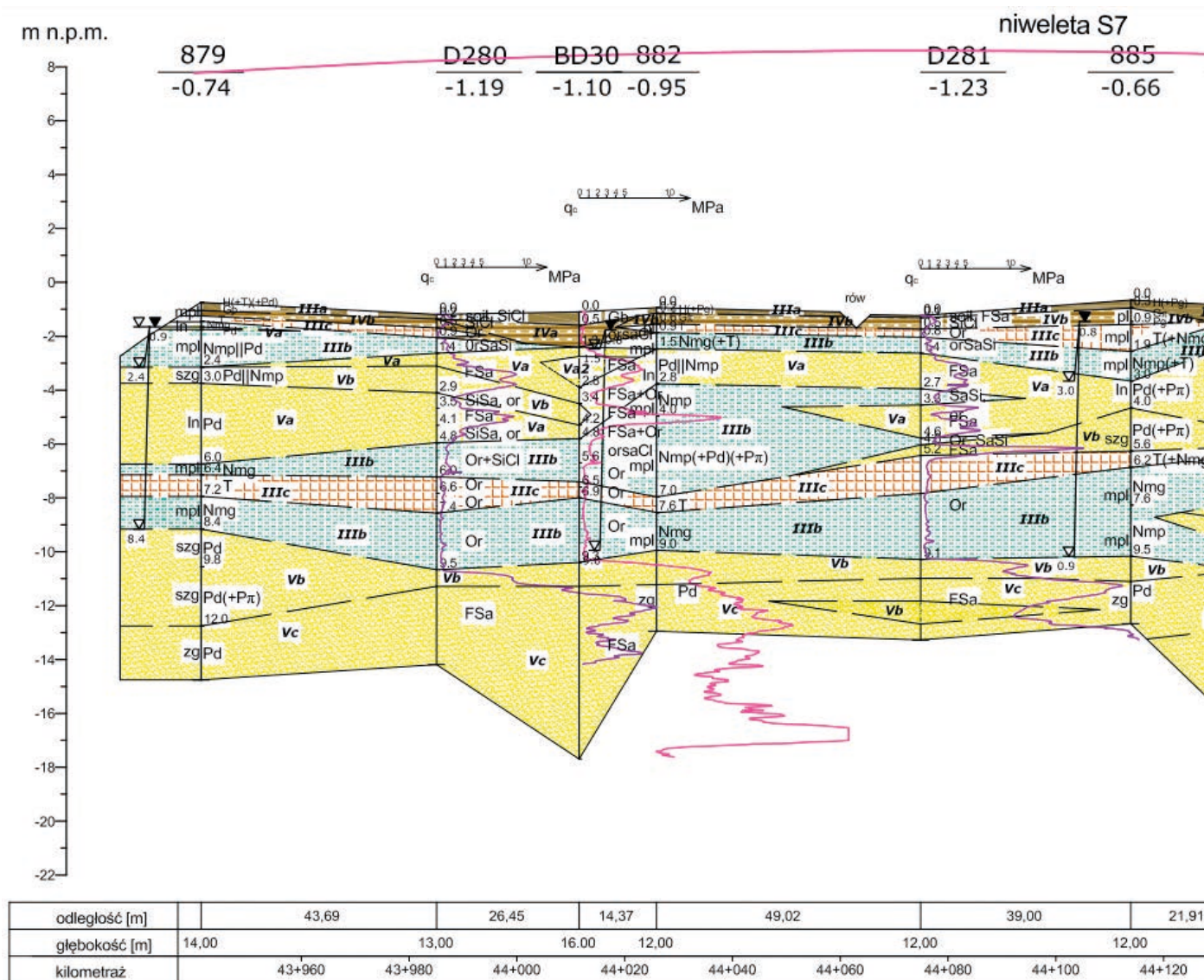
Mgr inż. Adam Jabłonowski, dr inż. Piotr Kanty – Menard Sp. z o.o.

Dr hab. inż. Adam Krasieński, prof. PG – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

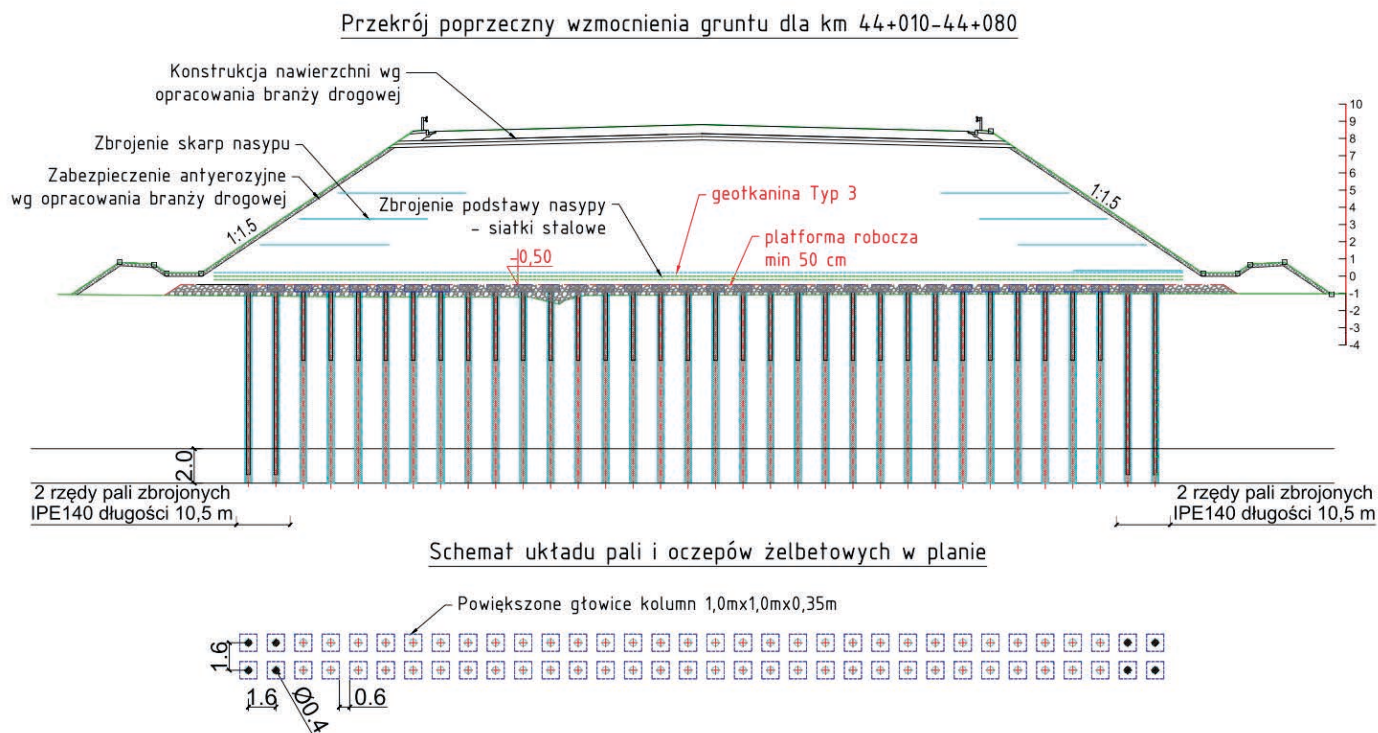
Popularną metodą wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypami, drogowymi czy kolejowymi, są kolumny betonowe wykonywane w technologii przemieszczeniowej. Narzędziem roboczym formującym kolumnę w gruncie jest specjalny świder o charakterystycznym, pogrubionym w swojej środkowej części, kształcie. W metodzie tej wyróżniamy dwie fazy: drażnienie otworu w gruncie oraz betonowanie kolumny. Etap drażnienia kończy się po osiągnięciu oczekiwanego zagłębienia kolumny w gruntach nośnych, a następnie wraz z podnoszeniem świda ku górze rozpoczyna się kolejna faza betonowania trzonu kolumny. Zdecydowaną zaletą tej metody jest nie wynoszenie urobku na zewnątrz, gdyż materiał gruntowy przemieszczany jest na boki, powodując jednocześnie zagęszczenie gruntu rodzimego. W celu efektywnego wzmocnienia gruntu rodzimego

pod projektowaną konstrukcją, sztywne inkluzje betonowe wykonuje się w regularnych rozstawach, najczęściej kwadratowych. Zazwyczaj, elementem towarzyszącym tej technologii jest warstwa transmisyjna w postaci materaca kruszywowego zbrojonego geosyntetykami, siatkami stalowymi bądź siatkami z prętów kompozytowych (na przykład z włókna szklanego). Czasami stosuje się żelbetowe, powiększone głowice kolumn w celu zwiększenia efektywności działania kolumn lub zwiększenia ich rozstawów. Podstawowymi parametrami podlegającymi projektowaniu są: średnica, rozstaw i długości oraz materiał kolumn.

Na przestrzeni lat, od kiedy zaczęto wykorzystywać technologię kolumn przemieszczeniowych w budownictwie, powstało wiele publikacji naukowych na jej temat, natomiast wciąż sto-



Rys. 1. Typowy przekrój geotechniczny Żuław Wiślanych (obszar pierwszego poletka próbnego)



Rys. 2. Konstrukcja zaprojektowanego wzmocnienia pod nasypem drogowym

sunkowo niewiele wiemy na temat tego, co się dzieje z wzmocnieniem i z nasypem w dłuższym czasie, w okresie wieloletniej eksploatacji konstrukcji.

Niniejszy artykuł przedstawia jedną z zaproponowanych metod badawczych, która umożliwi monitorowanie zjawisk zachodzących w kolumnach w czasie rzeczywistym pod wykonanym i użytkowanym nasypem drogowym. Zaproponowany system pomiarowy zainstalowano w ośmiu kolumnach na czterech poletkach próbnych podczas budowy drogi ekspresowej S7 relacji Nowy Dwór Gdański – Kazimierzowo, w latach 2016-2017. Artykuł jest pierwszą publikacją na temat wspomnianego przedsięwzięcia badawczo-pomiarowego. Opisano w nim ideę i charakterystykę zastosowanego systemu pomiarowego oraz przedstawiono wybrane, wstępne wyniki pomiarów. Szczegółowe wyniki monitoringu wraz z ich analizą będą przedmiotem późniejszych publikacji.

Z zagadnieniami rozpatrywanego monitoringu związana jest tematyka pracy doktorskiej głównego autora (A. Jabłonowski) realizowanej na Politechnice Gdańskiej pod kierunkiem A. Krasńskiego, w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”.

### WARUNKI GRUNTOWO-WODNE WYSTĘPUJĄCE NA POLETKU PRÓBNYM

Cały odcinek drogi S7 pomiędzy Gdańskiem a Elblągiem przebiega przez Żuławy Wiślane, charakteryzujące się nie tylko niskim, czasami depresyjnym, poziomem terenu w odniesieniu do poziomu morza, ale również niekorzystnymi warunkami geotechnicznymi. Występują tam duże miąższości słabonośnych gruntów organicznych w postaci torfów, namulów i gytii, często z przewarstwieniami gruntów mineralnych, najczęściej w postaci piasków (rys. 1). Taka budowa geotechniczna (warstwowa)

oraz wysoki poziom wód gruntowych czynią z tego obszaru teren trudny do posadzenia wszelkich obiektów budowlanych i infrastrukturalnych.

### CEL PROWADZENIA MONITORINGÓW

Celem prowadzonych monitoringów jest dokładniejsze zrozumienie zagadnienia wzmacniania gruntu metodą sztywnych kolumn przemieszczeniowych oraz podjęcie próby opisu współpracy systemu nasyp - warstwa transmisyjna - kolumna betonowa – podłoże gruntowe (rys. 2), z uwzględnieniem zjawisk i zmian zachodzących w czasie wieloletniej eksploatacji.

### OPIS ZASTOSOWANEGO OPOMIAROWANIA KOLUMN

W omawianym przedsięwzięciu badawczym zdecydowano się na opomiarowanie jedynie kolumn. Zrezygnowano z opomiarowania warstwy transmisyjnej, jej zbrojenia i nasypu. Cały system opracowano w projekcie technologicznym [10]. W systemie zastosowano strunową technikę pomiarową firmy Gekon, opisywaną w licznych publikacjach, między innymi w [1, 3, 4, 5].

Zastosowany system pomiarowy składa się z szeregu czujników zainstalowanych wzdłuż całej długości badanych kolumn, jednak najwięcej mierników znajduje się w górnych częściach kolumn (pierwsze 2 m długości). W danej kolumnie zainstalowano czujnik siły w specjalnie poszerzonej i nadbudowanej głowicy kolumny, następnie czujnik naprężenia oraz czujnik odkształceń. Kolejne czujniki służą do mierzenia odkształceń i są zainstalowane wzdłuż długości kolumny w określonych odstępach w przedziale od 1,7 ÷ 2,5 m (rys. 3).



Na rys. 3 pokazano, że w dwóch lokalizacjach nastąpiło rozbitcie systemu czujników na dwie kolumny. Wynika to z problemów technologicznych przy pograżaniu systemu pomiarowego w świeżo zabetonowaną kolumnę. Łącznie w 8 kolumnach zainstalowano 64 czujniki odkształceń, 6 czujników naprężenia oraz 7 siłomierzy. Całość systemu wraz z okablowaniem doprowadzona jest do 4 szaf sterowniczych, w których odbywa się ciągłe zbieranie i rejestracja danych pomiarowych.

Dodatkowo, każdy czujnik wyposażony jest w termistor do mierzenia temperatury.

Przewidziano dwa warianty instalowania czujników wzdłuż długości kolumn.

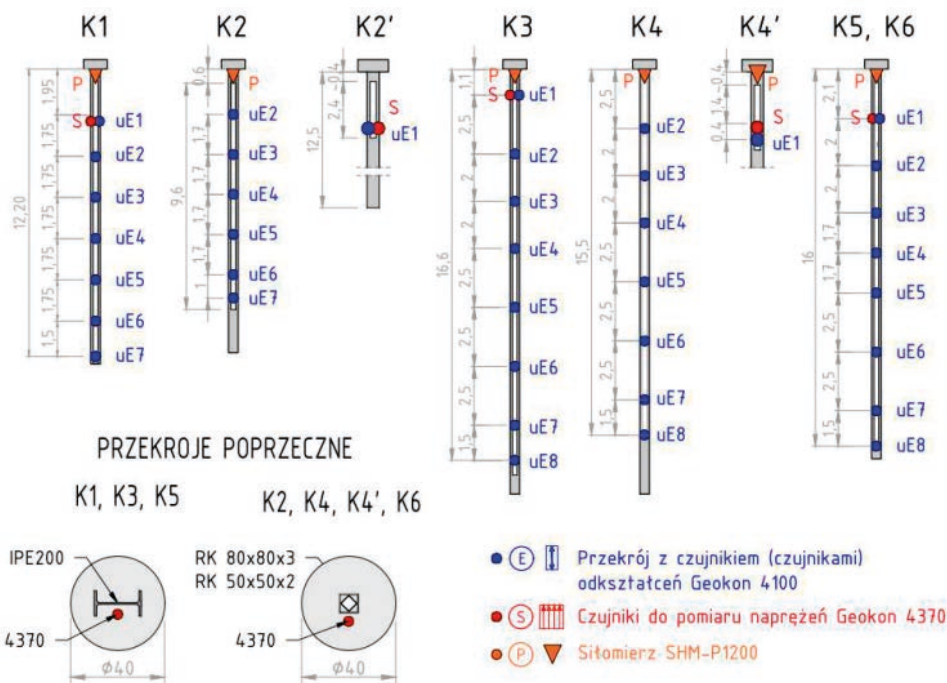
Pierwszy z wariantów polegał na instalowaniu czujników do zbrojenia kolumny wykonanego z kształtownika IPE200

(rys. 4). Zastosowano go w kolumnach o numeracji nieparzystej K1, K3 i K5. Omawiane kolumny wykonano z betonu C30/37.

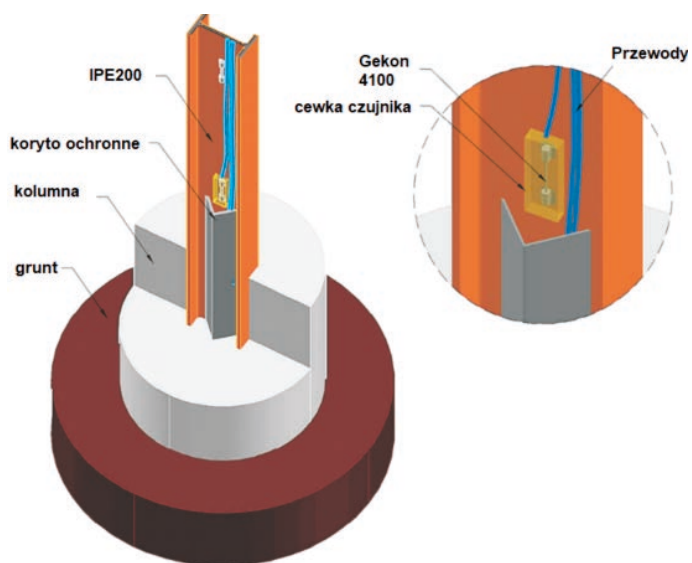
Drugi wariant polegał na instalacji czujników w układzie rur kwadratowych RK80 × 80 × 3 i RK50 × 50 × 2 (rys. 5). Zastosowano go w kolumnach o numeracji parzystej K2, K2', K4, K4' i K6. W tych kolumnach zastosowano beton C16/20.

### Lokalizacja kolumn pomiarowych

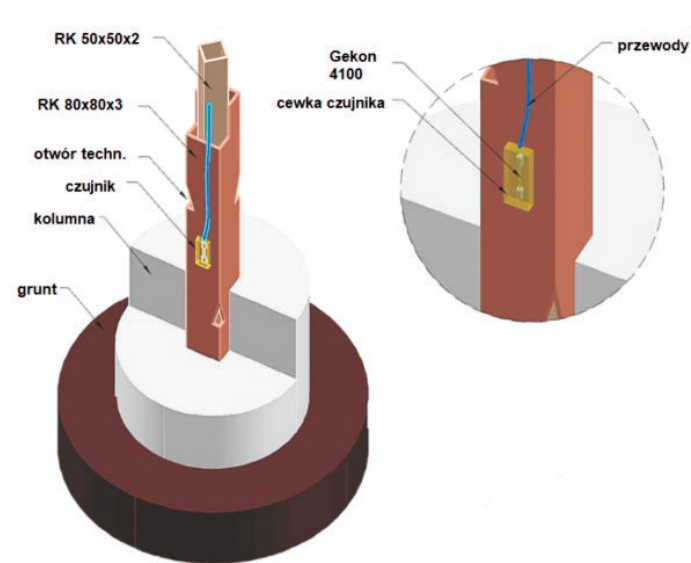
Na czterech poletkach badawczych wykonano w sumie 8 opomiarowanych (oprzyrządowanych) kolumn przemieszczeniowych wykonanych pod korpusem nasypu drogowego w następujących lokalizacjach (projektowych kilometrażach drogi):



Rys. 3. Szczegółowa lokalizacja czujników w danych kolumnach, według [10]



Rys. 4. Szczegół montażu czujników odkształceń w kolumnach zbrojonych kształtownikiem [10]

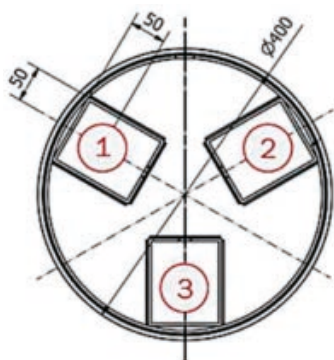


Rys. 5. Szczegół montażu czujników odkształceń w kolumnach niezbrojonych [10]

- przekrój km 44+050 – kolumna K1 (daty instalacji: 15.06.2016/24.07.2016),
- przekrój km 45+575 – kolumna K2 i K2' (daty instalacji: 7-11.10.2016/9-15.12.2016),
- przekrój km 48+150 – kolumny K3, K4 i K4' (daty instalacji: 26.08.2016/16.11.-15.12.2016),
- przekrój km 48+250 – kolumny K5 i K6 (daty instalacji: 12.10.2016/6-15.12.2016).

## OPIS ZASTOSOWANYCH CZUJNIKÓW

1. Siłomierz do pomiaru siły przekazywanej na kolumnę przez oczep. Zastosowano siłomierz SHM-P-1200, którego konstrukcja składa się z trzech trzpieni (nr 1, 2, 3 na rys. 6) o średnicy zewnętrznej równej 50 mm, wykonanych ze stali konstrukcyjnej S355, do których przygrzano punktowo strunowe czujniki odkształceń Geokon 4100,

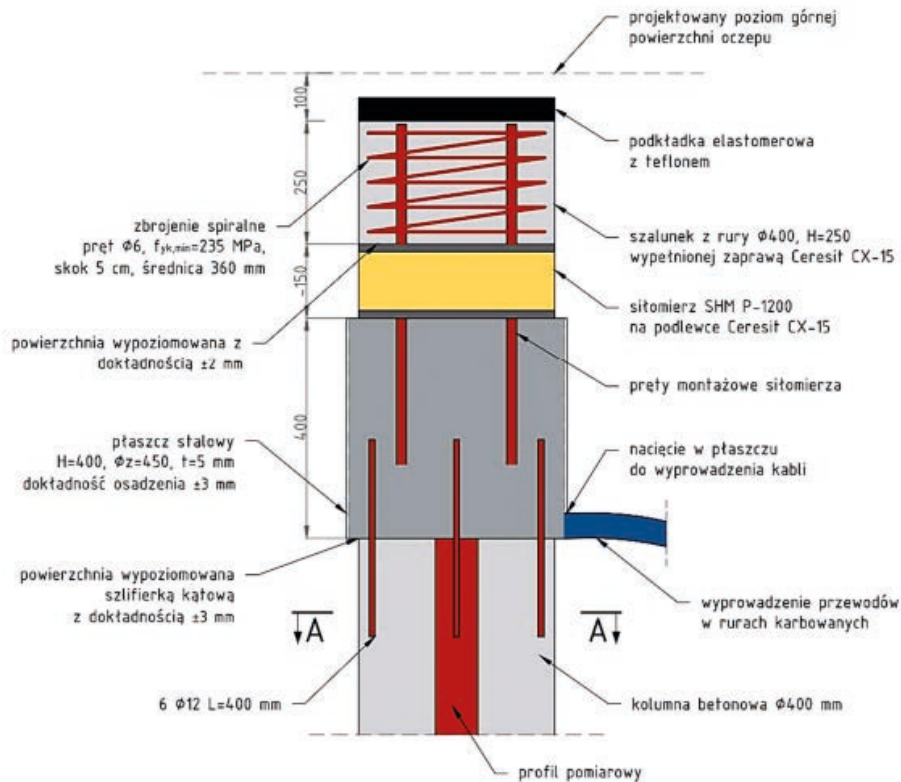


$$F = E \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \cdot A_i$$

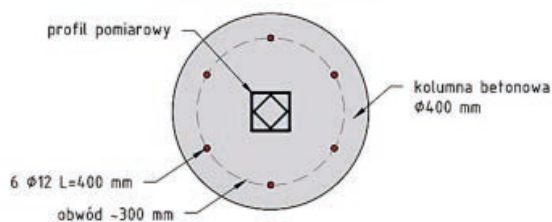
$F$  – siła przekazywana na kolumnę [kN]  
 $\varepsilon_i$  – odkształcenie zmierzone przez czujniki [ $10^{-6}$ ]  
 $A_i$  – pole przekroju trzpienia [ $\text{mm}^2$ ]  
 $E$  – moduł sprężystości stali konstrukcyjnej [GPa]

SIŁOMIERZ SHM-P1200	
Rodzaj przetwornika	strunowy
Zakres pomiarowy	1200 kN
Dokładność	$\pm 0,5\%$ zakresu
Przeciążenie	1,5
Zakres temperatur	- 20 do + 80 °C
Wysokość x średnica korpusu	125 x 400 mm

Rys. 6. Specyfikacja siłomierza SHM-P-1200, [10]



### PRZEKRÓJ A-A



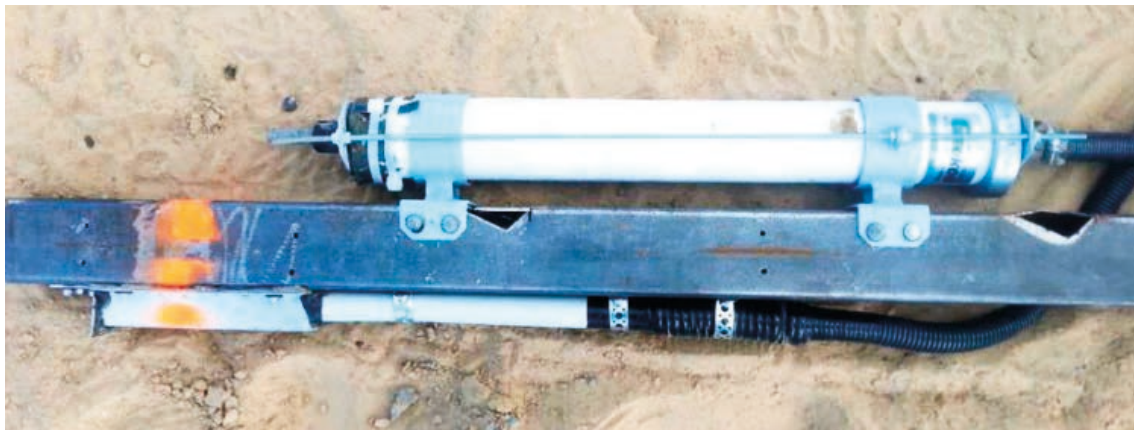
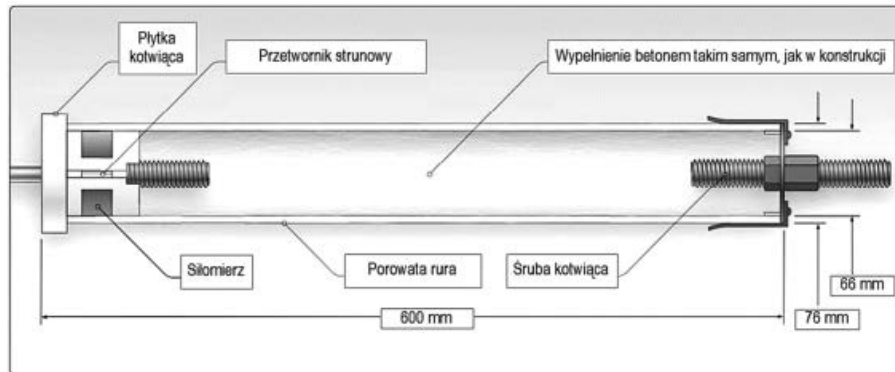
Rys. 7. Szczegół montażu siłomierza na głowicy kolumny [10]

[13]. Siłomierz instaluje się na specjalnie przygotowanej, poszerzonej głowicy kolumny, zgodnie z rys. 7.

2. Czujnik naprężenia, model Geokon 4370. Składa się on ze stunowego przetwornika siły połączonego z betonowym walcem umieszczonym w rzeczywistej konstrukcji. Urządzenie rejestruje osiową siłę działającą na wewnętrzny, betonowy walec, wywołaną naprężeniem

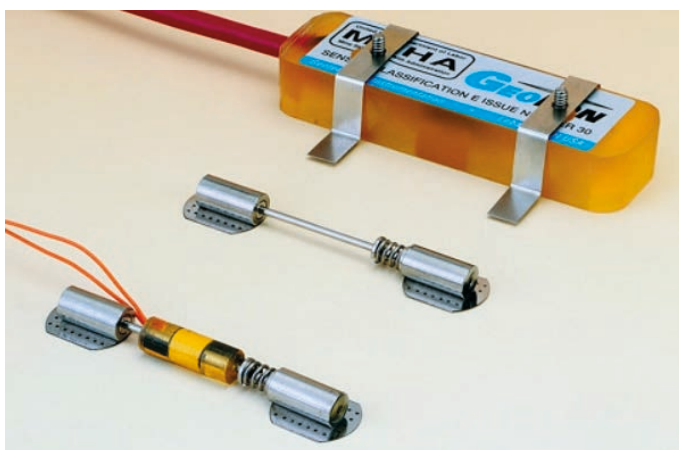
w otaczającym betonie. Do wypełnienia rury stosowany jest ten sam beton, z którego wykonana jest dana konstrukcja (kolumna). Zastosowanie tego modelu czujnika eliminuje potrzebę znajomości modułu sprężystości betonu w celu określenia wartości naprężenia.

3. Czujnik odkształceń do pomiaru odkształceń pionowych wzdłuż długości kolumny.



<b>Rodzaj czujnika</b>	Strunowy
<b>Zakres pomiarowy</b>	od -25 do +3 MPa
<b>Rozdzielczość</b>	10 kPa
<b>Dokładność</b>	± 0,25% zakresu
<b>Zakres temperatur</b>	- 20 do + 80 °C
<b>Długość x średnica</b>	600 x 76 mm

Rys. 8. Specyfikacja czujnika Geokon 4370 [10, 14]



<b>Rodzaj czujnika</b>	Strunowy
<b>Zakres pomiarowy</b>	3 000 $\mu\epsilon$
<b>Rozdzielczość</b>	0,4 $\mu\epsilon$
<b>Dokładność</b>	± 0,1% zakresu
<b>Liniowość</b>	< 0,5% zakresu
<b>Zakres temperatur</b>	- 20 do + 80 °C
<b>Aktywna długość czujnika</b>	51 mm

Rys. 9. Specyfikacja czujnika Geokon 4100 [10, 13]



Zastosowano tu strunowe czujniki Geokon model 4100 (rys. 9).

Każdy system pomiarowy został odpowiednio skalibrowany i zainstalowany w kolumnach przez dostawcę i serwisanta systemu, firmę SHM Monitor. Skalibrowane wartości i parametry zamieszczono w dzienniku [12]. Instalacja siłomierzy z przyczyn technicznych odbyła się dopiero po wykonaniu próbnego obciążenia kolumny, po okresie uzyskania pełnej dojrzałości przez beton.

Rejestracja pomiarów dla danej kolumny rozpoczęła się od razu po podłączeniu mierników, czyli najczęściej tego samego dnia co instalacja oprzyrządowania w kolumnach, i trwa nieprzerwanie do dnia dzisiejszego. Najwcześniejsze czujniki zainstalowano w dniu 15.06.2016 r., a więc ponad 6 lat temu. Tak długie pomiary prowadzone przez wszystkie etapy budowy drogi, to znaczy wykonywanie kolumn, badania kolumn, wzniesienie nasypu, budowa oraz eksploatacja drogi są zjawiskiem bezprecedensowym w skali nie tylko krajowej, ale i światowej. Uzyskane wyniki pomiarów będą źródłem wielu cennych informacji.

### PRZYKŁADOWE, WSTĘPNE WYNIKI POMIARÓW

Poniżej przedstawiono kilka wykresów z próbnymi obciążeniami kolumny K1 oraz pierwsze interpretacje pomiarów i zaobserwowanych zjawisk.

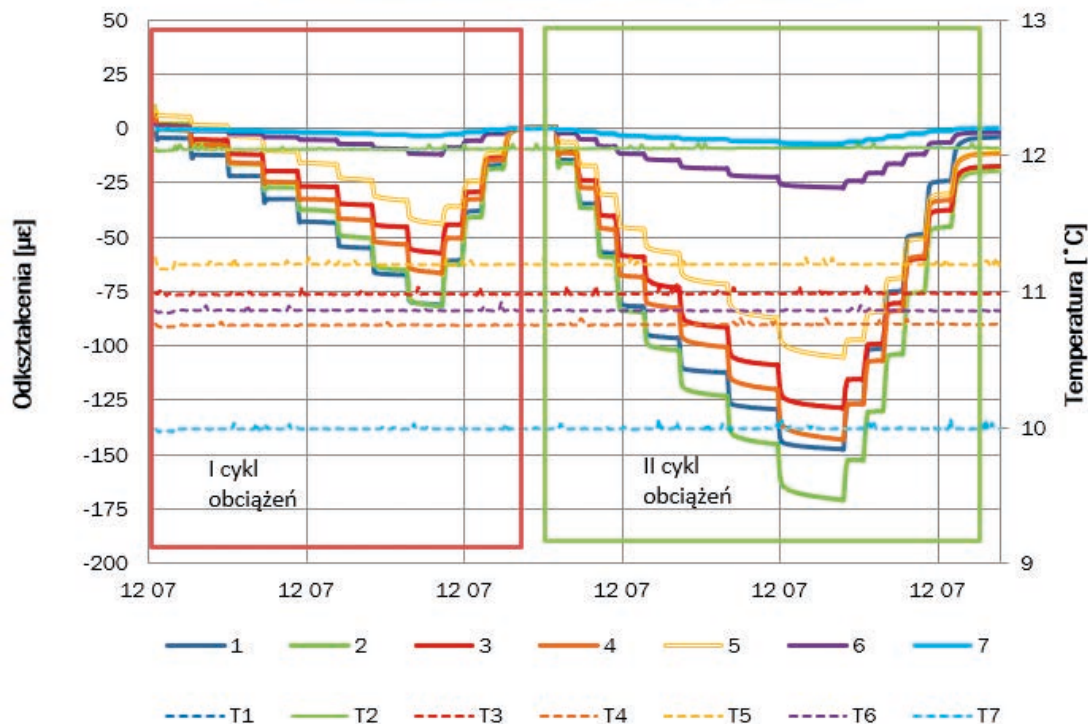
W tabl. 1 zamieszczono dane dotyczące przebiegu próbnego obciążenia kolumny K1.

Na rys. 10 przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń trzonu kolumny K1 zarejestrowanych podczas próbnego obciążenia

Tabl. 1. Parametry próbnego obciążenia kolumny K1

Nośność obliczeniowa 800 kN					
Cykl I			Cykl II		
Wartość procentowa obciążenia	Wartość obciążenia	Stabilizacja	Wartość procentowa obciążenia	Wartość obciążenia	Stabilizacja
12,5%	100	Tak	25,0%	200	Nie
25,0%	200	Tak	50,0%	400	Nie
37,5%	300	Tak	75,0%	600	Nie
50,0%	400	Tak	100,0%	800	Nie
62,5%	500	Tak	112,5%	900	Tak
75,0%	600	Tak	125,0%	1000	Tak
87,5%	700	Tak	137,5%	1100	Tak
100,0%	800	Tak	150,0%	1200	Tak
75,0%	600	Nie	75,0%	600	Nie
50,0%	400	Nie	50,0%	400	Nie
25,0%	200	Nie	25,0%	200	Nie
0,0%	0	Tak	0,0%	0	Tak

Odkształcenia powodujące naprężenia - kolumna K1



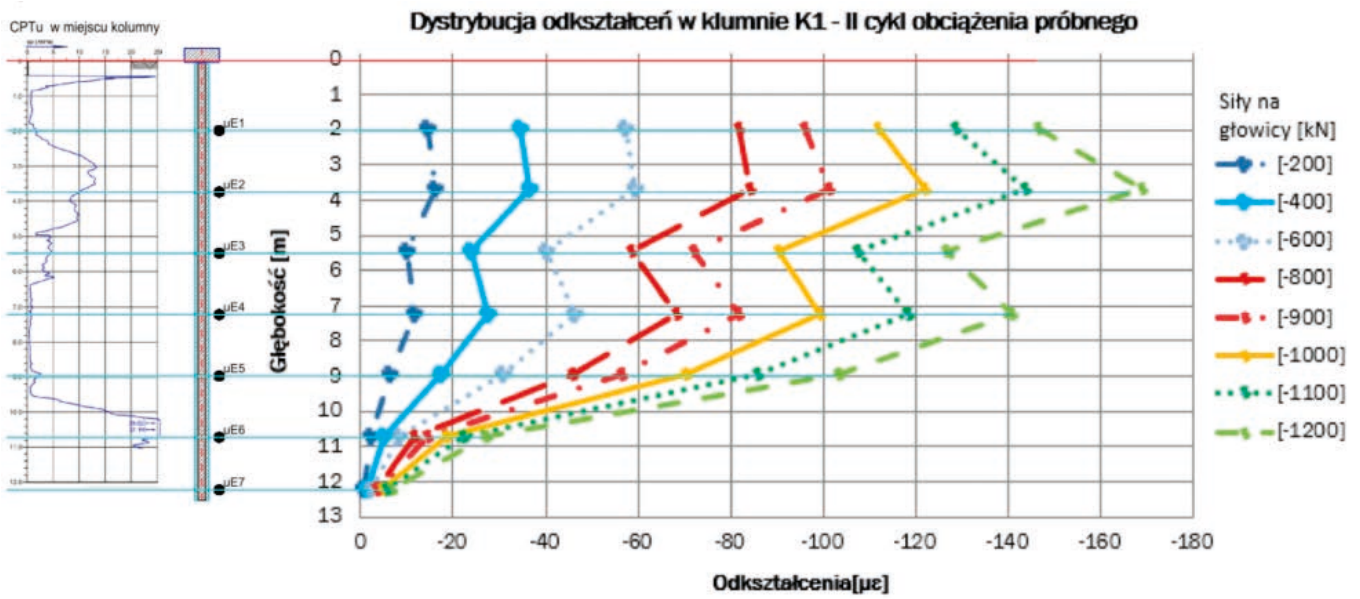
Rys. 10. Wyniki pomiarów odkształceń w trzonie kolumny K1 podczas próbnego obciążenia

żenia przez czujniki Geokon 4100. Można zauważyć wysoką czułość i dokładność pomiarów. Zauważalne są istotne zmiany odkształceń czujników w kolejnych dwóch cyklach próbnego obciążenia i odciążenia kolumny.

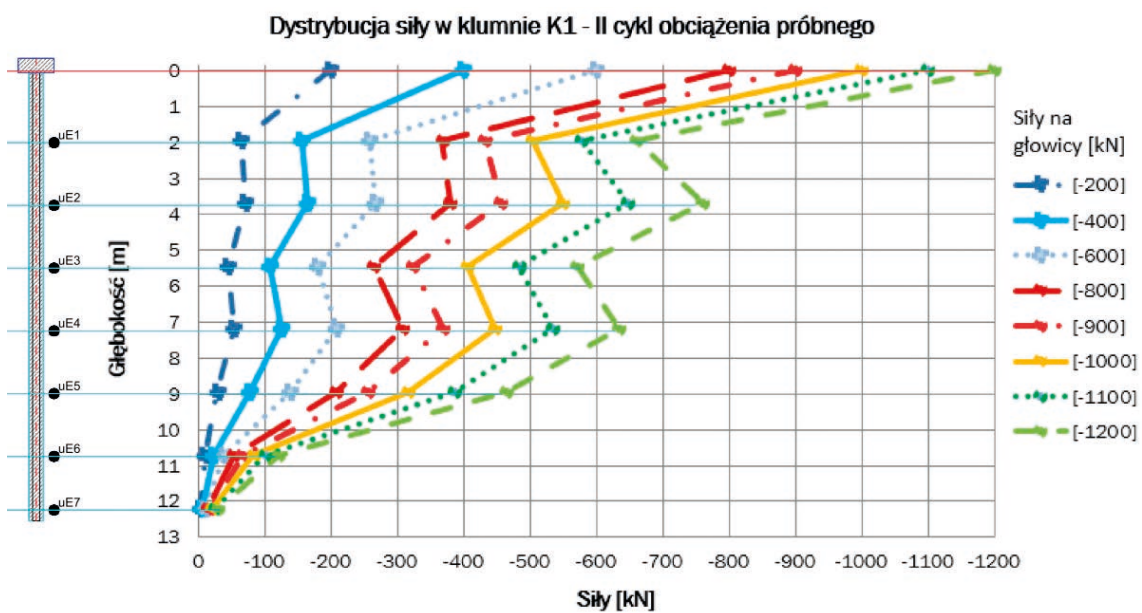
Na rys. 11 przedstawiono wykresy zmian odkształceń trzonu wzdłuż głębokości kolumny, a na rys. 12 wykresy zmieniającej się siły w trzonie kolumny dla poszczególnych stopni obciążenia zadawanego na głowicy kolumny. Są to wykresy odzwierciedlające tak zwane „surowe” wyniki z pomiarów czujników, przeliczane jedynie na wartości fizyczne przez współczynniki kalibrujące oraz przez nominalny przekrój trzonu i nominalny (katalogowy) moduł  $E_c$  betonu kolumny.

Na rys. 11 i 12 można zaobserwować anomalie pomiarowe. Występują one głównie na głębokościach 1,95 m i 5,5 m.

Dodatkowo, wartości siły na głębokościach 10,7 m i 12,2 m (rejon podstawy kolumny) wydają się być wyraźnie zaniżone. Przyczyną anomalii mogą być odchyłki od nominalnej średnicy trzonu kolumny oraz od nominalnej wartości modułu betonu. Na wymienionych głębokościach doszło najprawdopodobniej do powiększenia (w różnym stopniu) lub zmniejszenia średnicy kolumny, co w przypadku kolumn przemieszczeniowych wkręcanych formowanych w gruncie jest zjawiskiem powszechnym i typowym. Również niejednorodność betonu, a tym samym jego modułu sprężystości  $E_c$  wzdłuż długości pali i kolumn formowanych w gruncie jest zjawiskiem obserwowanym i sygnalizowanym w publikacjach (na przykład [2, 5, 6, 7, 9, 11]). Dodatkowym zjawiskiem zaburzającym pomiary jest występowanie tak zwanej siły rezydualnej w trzonie pala, opisywane między innymi w pracach [2, 6, 8]. W niniejszych rozważaniach



Rys. 11. Dystrybucja odkształceń w trzonie kolumny K1 podczas II cyklu próbnego obciążenia



Rys. 12. Wstępna dystrybucja siły osiowej w trzonie kolumny K1 podczas II cyklu próbnego obciążenia

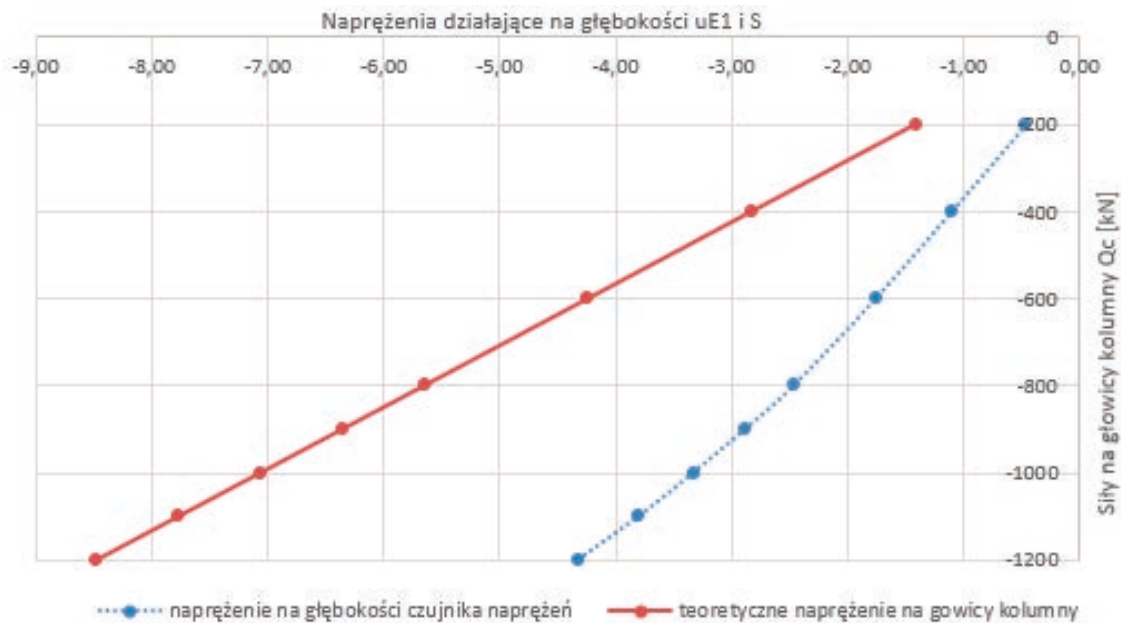
zjawisko to zostanie jednak pominięte. Przedstawione na rys. 12 wykresy wymagają niezbędnej korekty.

Między innymi w celu możliwości przeprowadzenia korekty i jednoczesnej poprawy dokładności interpretacji pomiarów w badanych kolumnach zastosowano oprócz czujników odkształceń również czujniki naprężenia. Wykonano to na głębokości 1,95 m p.p.t., na której umieszczono obok siebie czujnik odkształcenia Geokon 4100 oraz czujnik naprężenia Geokon 4370. Zaletą tego drugiego czujnika jest pomiar wartości naprężenia bez potrzeby znajomości przekroju kolumny  $A$  i modułu betonu  $E_c$ .

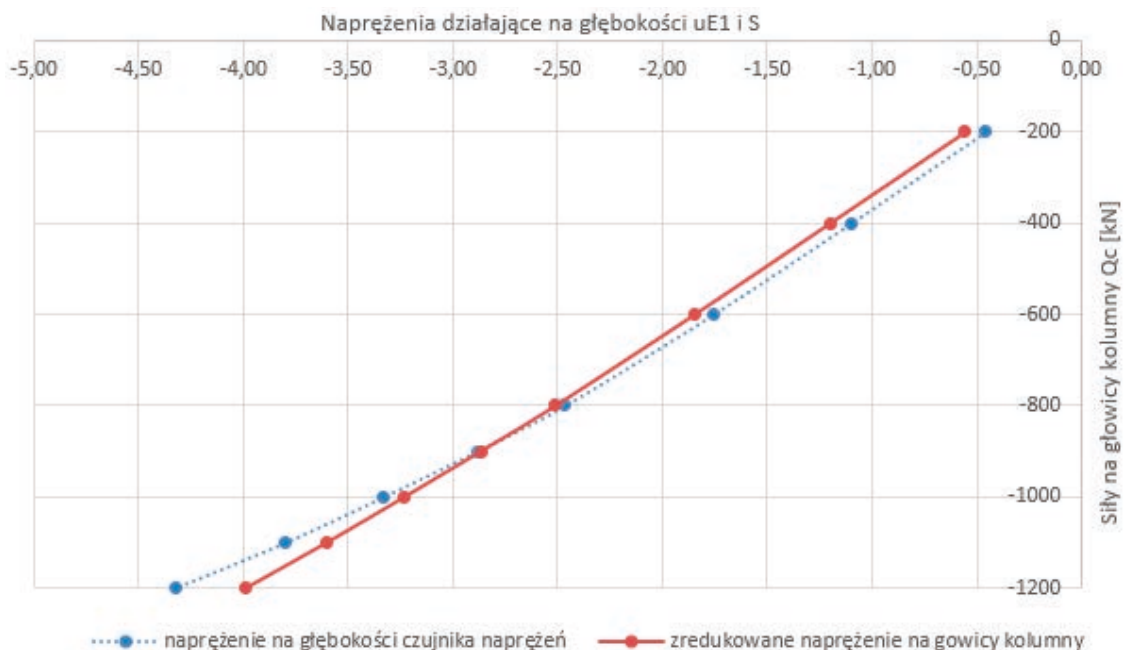
Na rys. 13 zestawiono dwa wykresy przedstawiające naprężenia. Jeden wykres dotyczy naprężenia otrzymanego z pomiaru czujnikiem naprężenia Geokon 4370, a drugi – naprężenia obliczonego przez podzielenie siły  $Q_c$  zadawanej na głowicę kolumny przez przekrój nominalny  $A_n$  trzonu kolumny.

Widoczna jest duża rozbieżność obu wykresów naprężenia. Czujnik naprężenia wskazuje na znaczącą redukcję naprężenia w trzonie kolumny na głębokości 1,95 m w stosunku do naprężenia pod głowicą kolumny. Głównymi powodami tej redukcji są:

1. Brak odkopania górnego odcinka kolumny (do czujnika  $uE_1$ ), a tym samym niewyeliminowanie oporów tarcia

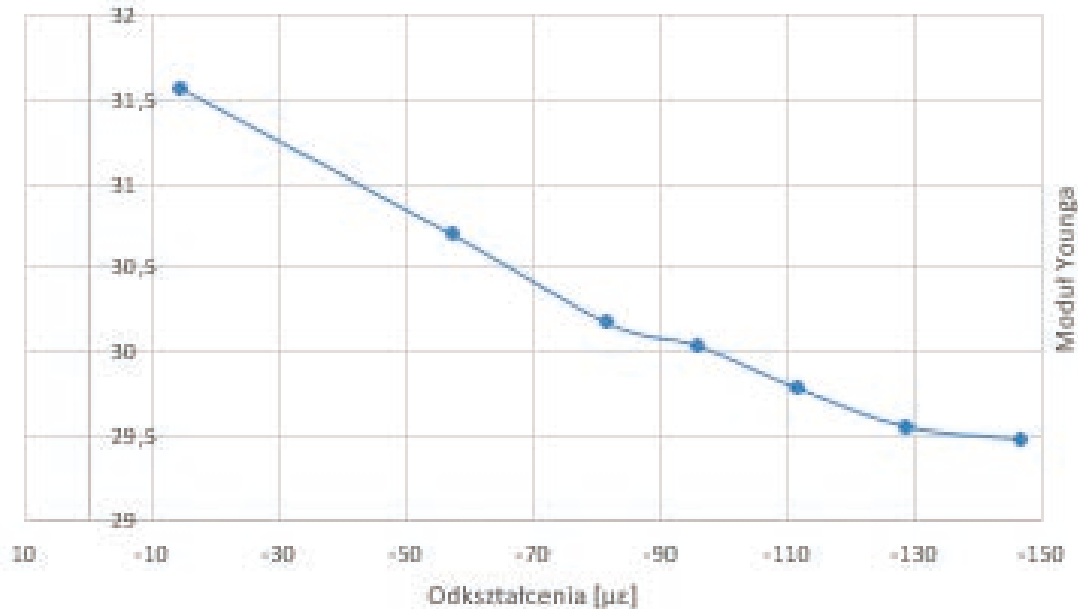


Rys. 13. Zestawienie porównawcze wykresów naprężenia w trzonie kolumny K1 na głębokości 1,95 m p.p.t.



Rys. 14. Zestawienie wykresów naprężenia w trzonie kolumny K1 na głębokości 1,95 m p.p.t. po korekcie





Rys. 15. Wykres modułu betonu w funkcji odkształceń wyznaczony z pomiarów na głębokości 1,95 m

gruntu na jego długości (siła tarcia  $\Delta Q_1$  wzdłuż pobocznic kolumny na długości 1,95 m spowodowała redukcję siły  $Q_c$ ).

- Średnica kolumny  $D_1$  na głębokości 1,95 m jest większa od średnicy nominalnej  $D_{nom} = 0,42$  m.

Pożądanym rozwiązaniem byłoby odkopanie trzonu kolumny na górnym odcinku (najlepiej do głębokości pierwszych czujników), a następnie bezpośrednie pomierzenie średnicy kolumny  $D_1$ . Jednocześnie nastąpiłaby znaczna eliminacja siły  $\Delta Q_1$ .

Mając jednak czujniki naprężenia i odkształceń na tym samym poziomie (1,95 m), można przeprowadzić przybliżoną kalibrację prowadzącą do określenia wartości średnicy kolumny  $D_1$  oraz wartości siły  $\Delta Q_1$ . Na początku założono, że wartość naprężenia  $\sigma_c$  pomierzona przez czujnik Geokon 4370 jest wartością miarodajną (prawdziwą). Następnie uznano, że redukcja naprężenia na głębokości 1,95 m jest wynikiem spadku siły  $Q$  o wartość  $\Delta Q_1$  oraz wzrostu powierzchni przekroju kolumny do wartości  $A_1$ . Założono, że oba wymienione wpływy rozkładają się po połowie, a więc:

$$Q_{1,i} = (1 - X) \cdot Q_{c,i} \quad \text{oraz} \quad A_1 = (1 + X) \cdot A_{nom} \quad (1)$$

gdzie  $A_{nom}$  jest przekrojem zastępczym (zespólnym) o średnicy nominalnej  $D_{nom} = 0,42$  m, uwzględniającym profil stalowy IPE200.

Następnie utworzono wzór na obliczenie naprężenia na poziomie 1,95 m:

$$\sigma_{1,i} = \frac{Q_{1,i}}{A_1} = \frac{(1 - X) \cdot Q_{c,i}}{(1 + X) \cdot A_{nom}} \quad (2)$$

Wartość  $X$  wyznaczono metodą prób tak, aby uzyskać dobrą zgodność wartości naprężenia obliczonego według wzoru (1) z wartością otrzymaną z pomiaru czujnikiem naprężenia (czyli uzyskania zgodności wykresów na rys. 13). W efekcie otrzymano  $X = 0,42$  oraz  $A_1 = 1,42 \cdot A_{nom}$ .

Wykresy naprężenia po przeprowadzonej korekcie zestawiono na rys. 14.

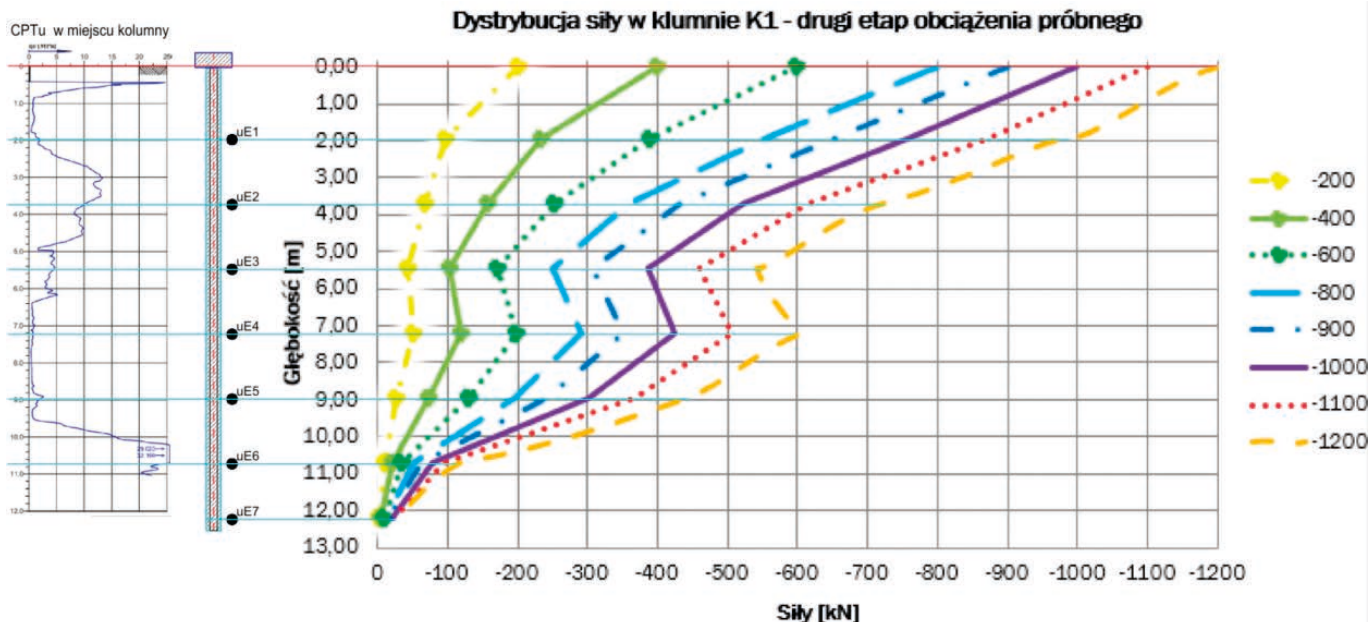
Kolejnym elementem korekty jest wyznaczenie rzeczywistej wartości modułu sztywności betonu kolumny na głębokości 1,95 m. Znając wartości naprężenia  $\sigma_{1,i}$  w stopniu obciążenia „I” z pomiaru czujnikiem Gekon 4370 i odkształcenia  $\epsilon_{1,i}$  z pomiaru czujnikiem Gokon 4100, wartość modułu  $E_{c,i}$  można wyznaczyć z wzoru:

$$E_{c,i} = \frac{\sigma_{1,i}}{\epsilon_{1,i}} \quad (3)$$

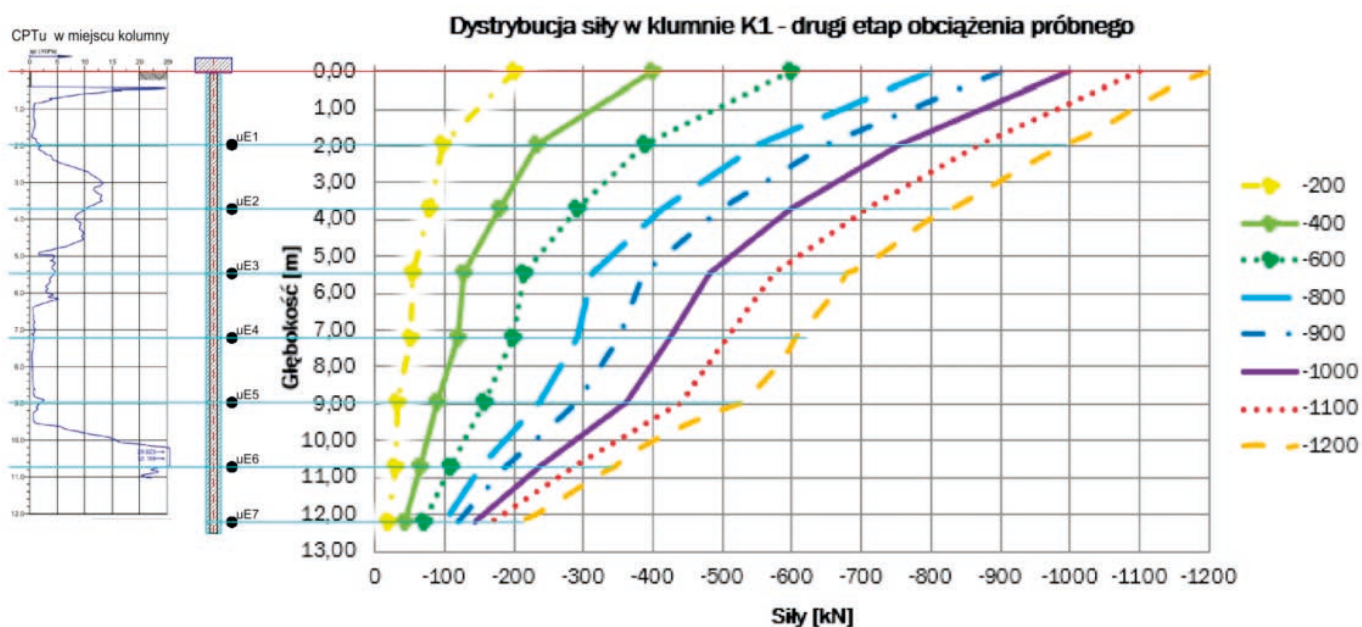
Otrzymane w ten sposób wartości  $E_{c,i}$  przedstawiono w postaci wykresu na rys. 15. Widać na nim, że wartość modułu nieznacznie maleje ze wzrostem odkształceń (również obciążenia) trzonu kolumny. Ze względu na małe znaczenie zaobserwowanej zmienności modułu pominięto ją i wyznaczono uśrednioną wartość modułu równą  $E_{c1} = 30,2$  MPa.

Po wyznaczeniu wartości przekroju  $A_1$ , występującej na głębokości 1,95 m, oraz przyjęciu na całej długości kolumny modułu  $E_c = E_{c1}$  można było ponownie przeliczyć rozkład sił w kolumnie. Rezultat w postaci wykresów przedstawiono na rys. 16.

Analizując powyższy wykres widać, że pewne anomalie występują jeszcze na głębokościach czujników  $uE_3$  i  $uE_4$  oraz czujników  $uE_6$  i  $uE_7$ . Wartości sił na tych głębokościach są zaburzone we wzajemnej relacji ze sobą. Podobnie jak wyżej, może to mieć związek ze zmianami średnicy kolumny w tych miejscach, przy czym na poziomach czujników  $uE_3$ ,  $uE_6$  i  $uE_7$  średnica ta jest zwiększona w stosunku do nominalnej, a w poziomie czujnika  $uE_4$  może być nominalna lub nieznacznie zmniejszona. Na obszarze wykonywanej kolumny występują przewarstwienia gruntów organicznych, które na skutek technologii przemieszczeniowej w fazie wiercenia i następnie w fazie betonowania pod ciśnieniem mają skłonność do dużych odkształceń i wpływania na zmiany średnicy  $D$  kolumny. Wartości przekroju  $A$  na wymienionych poziomach poddano dalszym korektom, pozostawiając natomiast stałą wartość modułu betonu  $E_c = E_{c1}$ . Po uwzględnieniu tych korekt kształt wykresów dystrybucji sił w trzonie kolumny przedstawia się jak na rys. 17.



Rys. 16. Dystrybucja siły osiowej w trzonie kolumny K1 podczas II cyklu próbnego obciążenia po korekcie na poziomie czujnika  $u_{E1}$



Rys. 17. Dystrybucja siły osiowej w trzonie kolumny K1 podczas II cyklu próbnego obciążenia po ostatecznej korekcie na poziomie czujnika  $u_{E1}$

## PODSUMOWANIE

Opisany w artykule monitoring jest szeroko zakrojonym przedsięwzięciem pomiarowym, które z pewnością dostarczy wielu cennych informacji i danych na temat rzeczywistego funkcjonowania wzmocnienia słabego podłoża gruntowego pod nasypem drogowym za pomocą kolumn betonowych. Informacje te będą dotyczyły głównie wartości obciążeń przenoszonych przez kolumny oraz zmian, jakim będą one podlegały w czasie wieloletniej eksploatacji drogi. Niemniej, na tej podstawie możliwe będzie również określenie mechanizmu i parametrów funkcjonowania całego systemu wzmocnienia (warstwy trans-

misyjnej, zbrojenia, gruntu między kolumnami). W dalszej perspektywie może to przyczynić się do modyfikacji oraz urealnienia metod obliczania i projektowania tego rodzaju wzmocnień podłoża gruntowego.

Materiał przedstawiony w artykule uwidocznił jednocześnie problem występowania szeregu czynników zaburzających wyniki pomiarów i utrudniających ich interpretację. Czynniki te związane są między innymi z niejednorodnością geometrii (średnicy) trzonów kolumn przemieszczeniowych oraz z niejednorodnością parametrów betonu (moduł  $E_c$ ) na długości kolumn. Dobrym rozwiązaniem i pomocnym w częściowym rozwiązaniu opisanych problemów było równoległe zastosowanie czujni-

ków do pomiaru naprężenia i odkształceń w betonie kolumn. Przy planowaniu lub projektowaniu w przyszłości podobnego systemu monitoringu wskazane byłoby zainstalowanie takiego zdublowanego układu czujników, nie tylko w jednym poziomie, tuż pod głowicą kolumny, ale również na 2 ÷ 3 głębszych poziomach na długości kolumny. Z powodu braku wystarczających danych, rozwiązanie niektórych problemów możliwe jest jedynie metodą przyjmowania arbitralnych założeń, które nadal pozwolą na wykonanie analizy wyników pomiarów, ale o charakterze jakościowym.

W najbliższym czasie planowane jest przygotowanie kolejnej publikacji, w której przedstawione będą wyniki bardziej kompleksowych i szczegółowych analiz rezultatów monitoringu.

## LITERATURA

1. Bednarski Ł., Sieńko R.: Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11/2013.
2. Fellenius B. H.: From strain measurements to load in an instrumented pile. *Geotechnical New Magazine*, 96, 2001, 1629-1653.
3. Krasiński A., Sieńko R.: Pomiar pionowego rozkładu siły w palu podczas testów statycznych. *Mat. 56 Konferencji Naukowej KILiW PAN oraz KN PZITB, Kielce-Krynica 19-24 września 2010*, 161-168.
4. Krasiński A., Sieńko R.: Wykorzystanie pomiaru pionowego rozkładu siły w palu w interpretacji testów statycznych. *Magazyn Autostrady*, 11/2010, 24-28.
5. Krasiński, A.: Wyniki badań terenowych pali i kolumn wkręcanych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2011, 516-529.
6. Krasiński A.: Problematyka interpretacji pomiarów rozkładu siły osiowej w trzonie pala podczas próbnych obciążeń statycznych, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/2012, 118-124.
7. Krasiński A., Wiszniewski M.: Static load test on concrete pile – instrumentation and results interpretation. *Int. Conf. on Advancement of Pile Technology and Pile Case Histories (PILE 2017)*, Bali, Indonesia.
8. Krasiński A., Wiszniewski M.: Identification of residual force in static load tests on instrumented screw displacement piles. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 43(4), 2021, 438-451.
9. Maertens J., Huybrechts N.: Belgian screw pile technology. Design and recent developments. Swets & Zeitlinger, 2003.
10. Sieńko R.: Projekt Technologiczny – System monitorowania odkształceń, naprężeń oraz sił w betonowych kolumnach fundamentowych w ramach budowy drogi ekspresowej S7 na odcinku Nowy Dwór Gdański – Kazimierzowo. SHM System, Kraków, 2016.
11. Wiszniewski M., Krasiński A., Linowiecki J.: Zmienność modułu sprężystości betonu w trzonie pala w świetle badań laboratoryjnych. *Acta Sci. Pol. Architectura* 17 (3), 2018, 57-65.
12. Dziennik montażu czujników i ich kalibracji w kolumnach badawczych. Opracowanie SHM System, 2016.
13. Model 4100/4150 Series Vibrating Wire Strain Gauges. Instruction Manual. Geokon, 2021, (<http://www.geokon.com>).
14. Model 4370 Concrete Stressmeter. Instruction Manual. Geokon, 2003-2019, (<http://www.geokon.com>).