

ZBICIAK Artur¹
 MICHALCZYK Rafał²

Analiza numeryczna wpływu obciążeń komunikacyjnych na infrastrukturę kanalizacyjną

*Dynamika konstrukcji,
 infrastruktura kanalizacyjna,
 obciążenia komunikacyjne, MES*

Streszczenie

Na terenach miejskich, bliskie sąsiedztwo środków transportu w stosunku do budynków oraz infrastruktury podziemnej powoduje dodatkowe obciążenia dynamiczne jakie przekazywane są zarówno na konstrukcje obiektów jak i ewentualnie na ludzi w nich przebywających. Przy ocenie wpływów dynamicznych na wymienione obiekty, wykorzystuje się metody eksperymentalne, rozwiązania analityczne oraz obliczenia komputerowe metodą elementów skończonych (MES). W ostatnich latach daje się zauważyć znaczny wzrost znaczenia metod numerycznych przy szacowaniu tego typu efektów.

Głównym celem pracy jest prezentacja przykładowej analizy dynamicznej zachowania się betonowej konstrukcji kanału ściekowego zlokalizowanego w pobliżu linii metra. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych. Dodatkowo zwrócono uwagę na przydatność wybranych algorytmów całkowania równań ruchu dostępnych w komercyjnych programach MES.

NUMERICAL ANALYSIS OF URBAN TRANSPORT EFFECT ON SEWAGE INFRASTRUCTURE

Abstract

In congested urban areas, the close vicinity of the means of transport to buildings and underground infrastructure and thus to people, often leads to conflict in respect of the vibrations' transmission. In order to evaluate the influence of the urban transport on civil structures, the methods based on measurements, analytical approaches and finite element (FE) calculations can be suited. Especially the numerical methods have seen a strong growth in recent years and nowadays form an important part of a modern design of mitigation measures.

The main goal of this work is the presentation of a new concrete sewage pipe dynamic analysis located in the vicinity of an underground line. The calculations were carried out using FEM. Some additional problems related to the methods of numerical integration of equations of motion were also discussed in the paper. The results produced would contribute to a better understanding of the problem.

1. WSTĘP

Ze względu na ciągły wzrost obciążeń komunikacyjnych, na konstrukcje budowlane oraz na obiekty infrastruktury podziemnej [14, 18] przekazywane są, poprzez podłoże gruntowe, coraz większe obciążenia dynamiczne [16, 17]. Zjawisko to ma szczególnie niekorzystny wpływ na obiekty zlokalizowane na terenach miejskich, wzdłuż ciągów komunikacyjnych, gdzie często nakładają się obciążenia pochodzące od ruchu samochodów osobowych oraz ruchu ciężkiego, w tym autobusów, tramwajów i metra. W literaturze poświęcono wiele prac zagadnieniom teoretycznym związanym z rozchodzeniem się fal w podłożach gruntowych i z przekazywaniem ich na konstrukcje budowlane [9-12]. Do chwili obecnej analizy dynamiczne budowli poddanych obciążeniom komunikacyjnym przeprowadzane są, w większości przypadków, na uproszczonych modelach [1, 2, 6, 19]. Powodem takiego podejścia do rozwiązania zagadnienia jest niejednokrotnie duża i złożona konstrukcja analizowanych obiektów budowlanych i inżynierskich oraz moc obliczeniowa komputerów. Obecnie przy wykorzystaniu wysokiej klasy komputerów i programów metody elementów skończonych (MES) [15] możliwa jest dokładniejsza analiza dynamiczna złożonych obiektów, choć wciąż zasadne wydają się pewne uproszczenia polegające m.in. na przyjmowaniu, zamiast modeli trójwymiarowych, układów płaskich.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie przykładowej analizy dynamicznej nowoprojektowanego obiektu infrastruktury kanalizacyjnej zlokalizowanego w pobliżu linii metra. Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych. Jako wymuszenie przyjęto przykładowe sygnały przyspieszeń pochodzące od pociągów metra, przekazywane przez grunt na projektowany kanał ściekowy. Dodatkowo w pracy zwrócono uwagę na przydatność wybranych algorytmów całkowania równań ruchu dostępnych w komercyjnych programach MES.

¹ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, POLAND; Warsaw 00-637; Al. Armii Ludowej 16. Phone: + 48 22 234-63-49, Fax: + 48 22 825-89-46, E-mail: a.zbiciak@il.pw.edu.pl

² Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, POLAND; Warsaw 00-637; Al. Armii Ludowej 16. Phone: + 48 22 825-35-72, 234-65-43, Fax: + 48 22 825-89-46, E-mail: r.michalczyk@il.pw.edu.pl

2. OPIS ZADANIA I ZAŁOŻENIA MATERIAŁOWE

W opracowaniu założono, że nowobudowany kanał ściekowy, w obszarze istniejącej stacji metra, zlokalizowany jest głównie w warstwach gruntów spoistych. Obsypka wstępna kanału zostanie wykonana z drobnego żwiru lub piasku i zagęszczona do wartości wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$ (pod drogami $I_s = 1,00$). Zasyпка właściwa wykopu będzie wykonana z gruntu budowlanego z wykopu o granulacji poniżej 100 mm. Zagęszczenie tej warstwy powinno wynieść $I_s = 0,95$ (pod drogami $I_s = 1,00$).

Parametry wytrzymałościowe gruntów nasypowych założono na podstawie stopni zagęszczenia I_D (grunty niespoiste) przyjmując następującą zależność empiryczną wg [8]

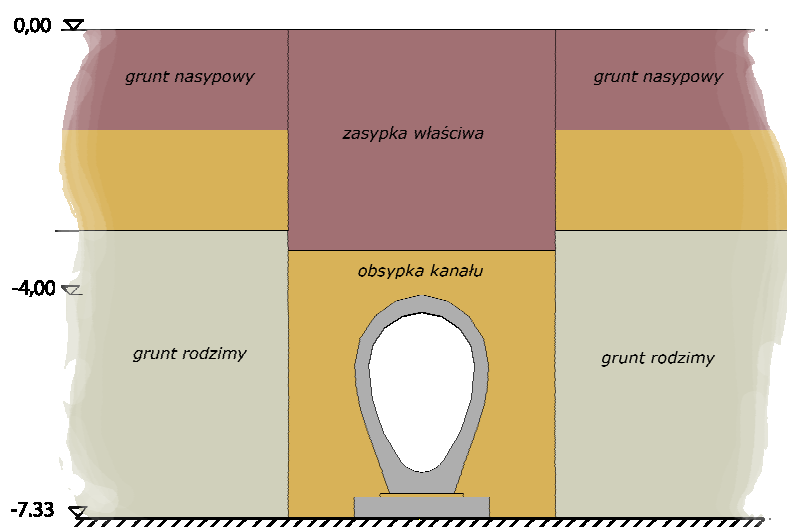
$$I_D = 6,061 (I_s - 0,855). \quad (1)$$

Przyjęte wartości parametrów materiałowych warstw gruntowych zestawiono w Tab. 1. Oprócz charakterystyk zagęszczenia podano tam również wartości ciężaru objętościowego poszczególnych warstw γ , pierwotne charakterystyki odkształcenia E_o i ν_o oraz wartości kątów tarcia wewnętrznego ϕ i kohezji c [3-5, 7, 13]. Układ warstw gruntu w analizowanym modelu MES przedstawiono na rys. 1.

Tab. 1. Stałe materiałowe warstw gruntu

| Warstwa | I_L | I_D | γ [kN/m ³] | ν_o [1] | E_o [MPa] | ϕ [°] | c [kPa] |
|------------------|-------|-------|-------------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| Grunt rodzimy | 0,20 | - | 20 | 0,37 | 13,7 | 10 | 5 |
| Grunt nasypowy | - | 0,88 | 17 | 0,25 | 65,0 | 30 | 0,00 |
| Obsypka kanału | - | 0,88 | 18 | 0,25 | 145,0 | 35 | 0,00 |
| Zasyпка właściwa | - | 0,88 | 18 | 0,25 | 145,0 | 35 | 0,00 |

Stałe materiałowe elementów betonowych (obudowy i podkładu kanału) założono, przyjmując wartości modułu sztywności $E = 30$ GPa oraz współczynnika Poissona $\nu = 0,3$.



Rys.1. Przekrój kanału ściekowego wraz z zaznaczonymi warunkami gruntowymi

W niniejszej pracy modelowane jest zagadnienie wpływu drgań na konstrukcję kanału ściekowego. Rozpatruje się zagadnienie początkowo-brzegowe wielowarstwowej niejednorodnej tarczy w płaskim stanie odkształcenia. Wymuszenie, w postaci sygnałów przyspieszeń generowanych przez przejeżdżające pociągi metra, przykładane jest w odpowiednich węzłach układu.

Zadanie, jako zagadnienie dynamiczne, rozwiązano stosując niejawny algorytm całkowania równań ruchu przy zastosowaniu pakietu metody elementów skończonych ABAQUS/Standard.

3. METODYKA MODELOWANIA MES

Każde modelowanie i analiza konstrukcji jest jedynie próbą odzwierciedlenia rzeczywistych warunków i zjawisk fizycznych panujących w obiekcie. Budowa modelu jest poszukiwaniem kompromisu pomiędzy jego dokładnością (odzwierciedlenie stanu faktycznego), a możliwością znalezienia rozwiązania. Tworzenie modelu wymaga więc zastosowania uproszczeń w odniesieniu do faktycznego stanu analizowanego obiektu budowlanego, a stosowane uproszczenia powinny prowadzić do wzrostu efektywności obliczeń przy zachowaniu oczekiwanej dokładności rozwiązania.

Rozpatrywane zadanie polega na wyznaczeniu stanów naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia w konstrukcji kanału ściekowego oraz otaczających go warstwach gruntu pod obciążeniem dynamicznym. Jest to układ o nieskończonej liczbie stopni swobody, którego zachowanie pod wpływem działających sił opisane jest równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Rozwiązanie tych równań nie może być niestety podane w sposób ścisły. Z tego też powodu zdecydowano się na poszukiwanie rozwiązania przybliżonego wykorzystując metodę elementów skończonych, która pozwala na analizę układów o dowolnie skomplikowanej geometrii i warunkach brzegowych oraz o własnościach materiałowych opisanych różnymi relacjami konstytutywnymi. Algorytm zamiany układów ciągłych na dyskretne, a tym samym sprowadzenie zadania do układu równań zwyczajnych o skończonej liczbie niewiadomych zostało dokładnie opisane w literaturze [15].

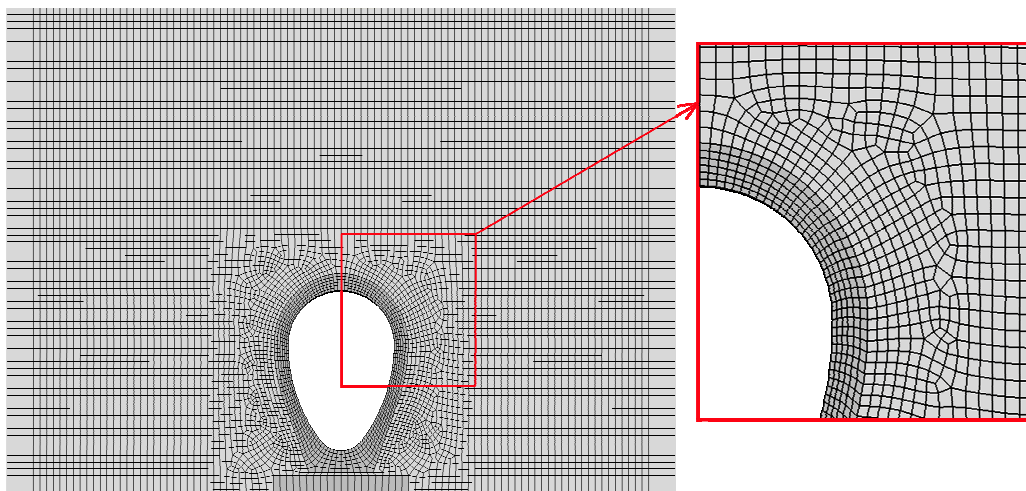
Geometria modelu powinna odpowiadać układowi elementów konstrukcyjnych obiektu, które współpracują w przenoszeniu obciążeń, oraz otoczenia gruntowego. Jednak przeprowadzenie obliczeń dla tak dużego trójwymiarowego obszaru jest na tyle skomplikowane, że zasadnym wydaje się poszukiwanie znacznych uproszczeń geometrii. Alternatywą dla modeli przestrzennych jest model tarczowy. Powinien on reprezentować wybrany przekrój modelu przestrzennego.

Gdy jeden z wymiarów konstrukcji jest bardzo duży w porównaniu do dwóch pozostałych, jak ma to miejsce w tym przypadku i konstrukcja jest jednakowo podparta i obciążona wzdłuż dominującego wymiaru to określa się ją jako konstrukcję w płaskim stanie odkształcenia (PSO). W stanie PSO zakładamy, że wyróżniony wymiar jest nieskończony i przemieszczenie konstrukcji w tym kierunku jest zerowe. W takiej sytuacji wystarczy rozpatrzyć wycinek konstrukcji o jednakowej grubości w płaszczyźnie prostopadłej do wyróżnionego wymiaru. Wynika z tego, że możemy przyjąć schemat statyczny zadania w postaci płaskiej tarczy. Opierając się na powyższej obserwacji kanał wraz z otaczającym gruntem zamodelowano, jako ciało dwuwymiarowe.

Kolejnym ograniczeniem jakie narzuca analiza numeryczna MES jest konieczność przyjęcia obszaru o skończonych wymiarach. Jego wielkość należy dobrać w taki sposób, aby zminimalizować wpływ warunków brzegowych na wyniki. W pracy przyjęto tarczę prostokątną, której górna i dolna krawędź odpowiadają odpowiednio powierzchni gruntu oraz stropowi tunelu metra. Szerokość tarczy dobrano tak, aby była o połowę większa od jej wysokości. Dodatkowo na bocznych krawędziach zastosowano bezobciążone warunki brzegowe, tzn. przemieszczająca się w czasie fala wywołana drganiami z chwilą dojścia do granic modelu zanika. W zaproponowanym modelu możemy więc wyróżnić trzy zasadnicze podobszary:

- konstrukcja kanału wraz z fundamentem
- warstwy gruntu rodzimego, nasypowego i wzmocnionego
- obszary pół-nieskończone modelujące grunt położony dalej.

Założono, że kolektor wraz z warstwami gruntu oparty jest w całości sztywno na stropie tunelu metra. Nie uwzględniano sił tarcia, tzn. brak możliwości poślizgu pomiędzy konstrukcją kanału a gruntem.



Rys.2. Siatka podziału modelu na elementy skończone

Na tak przygotowaną geometrię modelu kanału odwadniającego wraz z otaczającymi go warstwami gruntów rodzimych i nasypowych nałożono siatkę podziału na elementy skończone. Na podstawie wstępnych analiz numerycznych zdecydowano się wybrać do dalszych obliczeń elementy skończone wykorzystujące w sformułowaniu

funkcje aproksymujące w postaci wielomianów kwadratowych oraz całkowanie zredukowane. Ośmiowęzłowe, prostokątne elementy tego typu w dokumentacji programu ABAQUS oznaczono symbolem CPE8R. Na podobszarach półnieskończonych występujących na prawej i lewej krawędzi modelu zastosowano elementy nieskończone typu CINPE5R. Za najbardziej właściwą i ekonomiczną uznano siatkę nierównomierną. W obszarze kolektora zastosowano najbardziej zagęszczoną siatkę podziału na elementy o wymiarach 4,5x4,5 cm, natomiast w położonych dalej obszarach zwiększono rozmiary elementu do 10x10 cm. Zbudowany w ten sposób model składa się z około ośmiu tysięcy elementów połączonych w dwudziestu czterech tysiącach węzłów. Siatkę MES pokazano na rys. 2.

Wyniki obliczeń numerycznych zawartych w pracy, każdorazowo uwzględniają dwa etapy obciążania modelu konstrukcji:

- obciążenie ciężarem własnym gruntu i obudowy kanału,
- obciążenie dynamiczne spowodowane przejazdem wagonów metra.

Obciążenia statyczne wyznaczono na podstawie wartości parametrów mechanicznych gruntów i materiału obudowy kolektora ściekowego podanych w rozdz. 2.

Typowym i znanym z literatury podejściem do modelowania wpływu wstrząsów na konstrukcje jest wykorzystywanie zapisów z akcelerometrów. Obciążenia dynamiczne od pociągów metra przyjęto wg prognozy oddziaływań generowanych przez pociągi metra. Dysponujemy w ten sposób danymi o zmienności składowych wektora przyspieszenia w czasie.

Sygnał został wprowadzony poprzez wymuszenie kinematyczne przykładane w kierunku poziomym i pionowym do dolnej krawędzi modelu. Węzły na tej krawędzi, która odpowiada stropowi tunelu metra, połączono wcześniej w taki sposób, aby stanowiły ciało sztywne. Dzięki temu wartości przyspieszeń na całej długości krawędzi dolnej są takie same.

Analiza numeryczna modelu prezentowanego w niniejszej pracy uwzględnia zmienne sygnały wymuszeń kinematycznych. Z tego powodu przyjęto przybliżony sposób rozwiązania równań ruchu oparty o niejawną (implicit) metodzie całkowania równań, przeprowadzonej w dyskretnych chwilach czasowych. Metoda sprowadza się do rozwiązania nieliniowego układu równań w każdym kroku czasowym, co prowadzi do wydłużenia czasu obliczeń. Zaletą metody jest stabilność algorytmu wyznaczania stanu równowagi niezależna od przyjętego przyrostu czasu. Obliczenia odzwierciedlały zmiany stanu odkształcenia i naprężenia wywołane sygnałem sejsmicznym trwającym 10s.

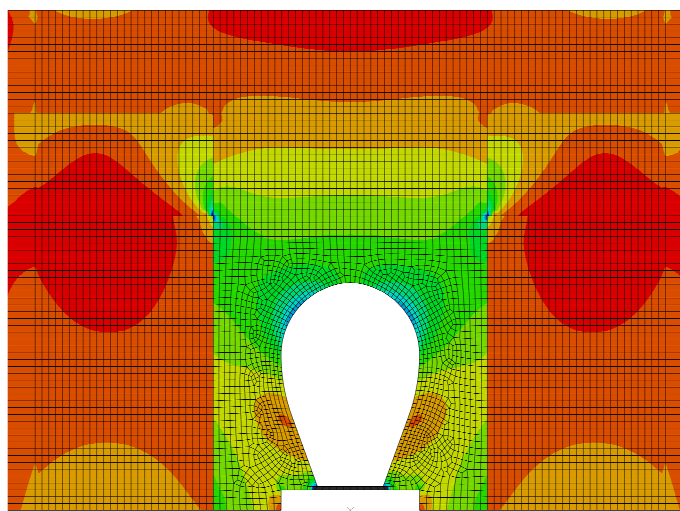
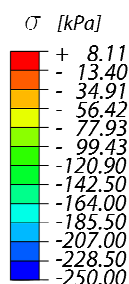
4. WYBRANE WYNIKI OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH

Przeprowadzone testy numeryczne, stanowią podstawę do oceny, jaki wpływ obciążenie komunikacyjne na wyteżenie konstrukcji kanału odwadniającego.

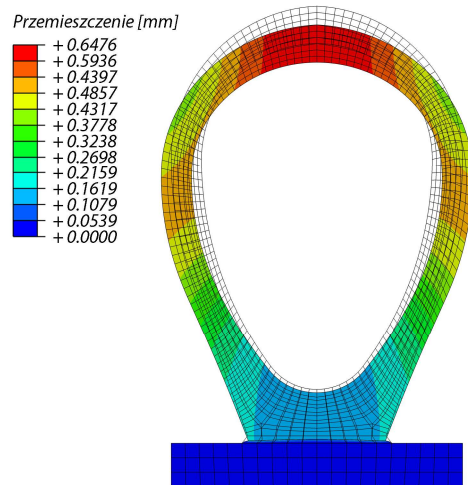
Kolejne rysunki przedstawiają warstwicę naprężeń w gruncie i w obudowie kanału. Na rysunku 3 pokazano mapę warstwicową najmniejszych naprężeń głównych. Najmniejsze wartości tych naprężeń wynoszą -250 kPa.

Kolejne mapy warstwicowe przedstawiają rozkłady naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w obudowie i podkładzie kanału. Deformację obudowy kanału, spowodowaną działaniem obciążeń masowych, pokazano na rys. 4. Widoczne tam przemieszczenia są powiększone 200 razy. Na kolejnych rys. 5a i 5b zestawiono odpowiednio warstwicę największych i najmniejszych naprężeń głównych. Wartości ekstremalnych naprężeń głównych są istotne w przypadku konstrukcji betonowych i żelbetowych, gdyż uwidaczniają wrażliwość danych części konstrukcji na zarysowanie. Największe naprężenia główne są zlokalizowane w górnej części obudowy tunelu i wynoszą ok. 3,25 MPa.

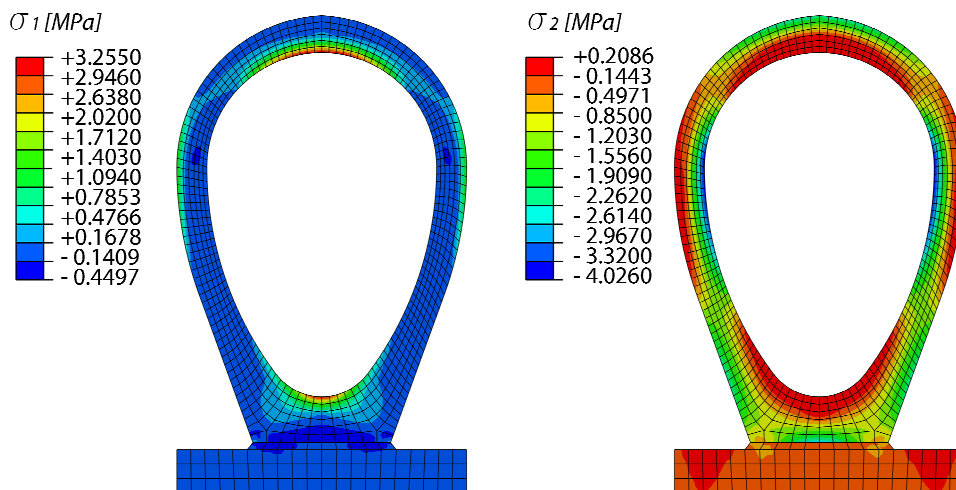
Na kolejnym rys. 6 podano przebieg czasowy naprężeń w najbardziej wyteżonym punkcie górnej części kanału. Należy zauważyć, że przyrosty naprężeń spowodowane dodatkowym obciążeniem dynamicznym są niewielkie w stosunku do naprężeń statycznych, wywołanych ciężarem własnym gruntu, kanału. W przypadku kanału niewypełnionego wodą, naprężenia od ciężaru własnego wynoszą ok. 3,255 MPa. Uwzględniając dodatkowo oddziaływania dynamiczne wartość to wzrasta do ok. 3,265 MPa. Niewielkie przyrosty naprężeń od oddziaływań dynamicznych przekładają się na bardzo małe zmiany odkształceń. Jeśli chodzi o uzyskane przyspieszenia w najbardziej wyteżonej części kanału, to wyniosły one ok. 7cm/s².



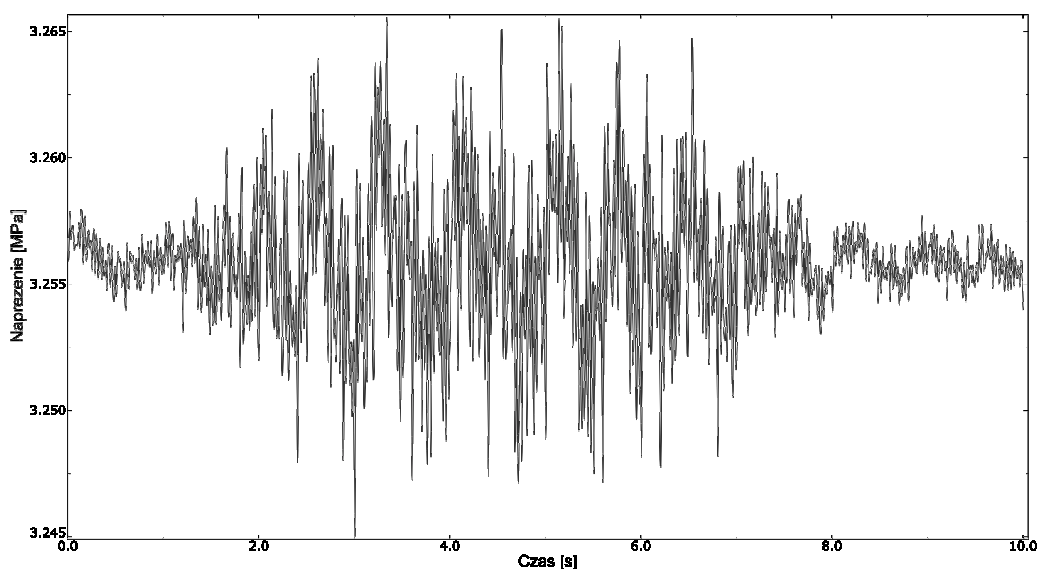
Rys.3. Mapa warstwicowa przedstawiająca najmniejsze naprężenia główne [kPa] w podłożu gruntowym wywołane obciążeniem statycznym



Rys.4. Mapa warstwiczna wypadkowych przemieszczeń kanału [mm]. W tle zaznaczono kształt przed obciążeniem. Przemieszczenia na rysunku powiększono 200 razy.



Rys.5. Mapa warstwiczna największego (po lewej) oraz najmniejszego (po prawej) naprężenia głównego [MPa] w obudowie kanału



Rys.6. Wykres przedstawiający zmiany wartości naprężeń (w najbardziej wyężonym punkcie górnej części kanału) wywołane drganiami

5. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza dynamiczna zachowania się nowoprojektowanego kanału ściekowego wykazała, że proponowane rozwiązanie konstrukcyjne jest poprawne i zapewnia nieprzekroczenie dopuszczalnych stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w przekroju kanału, wywołanych ruchem pociągów metra.

Wyznaczone wielkości przemieszczeń, naprężeń i odkształceń konstrukcji prefabrykowanego, żelbetowego kanału, wywołane przejazdem pociągu, są stosunkowo małe. Niemniej jednak nisko i wysoko częstotliwościowe małe drgania, wywołane ruchem pociągów, mogą powodować stopniowe zagęszczanie gruntu w otoczeniu kanału. Przeprowadzenie tak zaawansowanej analizy uwzględniającej zjawiska zmęczeniowe jest bardzo skomplikowane nawet przy aktualnym stanie wiedzy naukowo-inżynierskiej. Dlatego też, bez względu na otrzymane wartości naprężeń, należałoby zwrócić szczególną uwagę na właściwe wykonanie zagęszczenia obsypki wstępnej kanału i zasypki właściwej wykopu.

W opracowaniu zaprezentowano metodykę obliczeń komputerowych z wykorzystaniem MES. Otrzymane rezultaty wskazują na przydatność stosowania takiego podejścia przy szacowaniu wpływu obciążeń komunikacyjnych na infrastrukturę kanalizacyjną.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciesielski R., Maciąg E.: *Drgania drogowe i ich wpływ na budynki*. WKŁ, Warszawa 1990.
- [2] Ciesielski R., Stypuła K.: *Odpowiedź dynamiczna budynków leżących w pobliżu linii metra warszawskiego* (badania in situ). Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika z. 52, Problemy Dynamiki Konstrukcji, Rzeszów 1999.
- [3] Das B. M.: *Advanced Soil Mechanics*. 3rd Edition. Taylor&Francis, New York 2008.
- [4] Davis R.O., Selvadurai A.P.S.: *Plasticity and Geomechanics*. Cambridge Univ. Press, 2002.
- [5] Derski W., Izbicki R., Kisiel I., Mróz Z.: *Mechanika skał i gruntów*. PWN, Warszawa 1988.
- [6] Maciąg E.: *Interakcja układu budynek-podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym* (praca przeglądowa). Mechanika Teoretyczna i Stosowana 17, z. 4, 1979 str. 497-536.
- [7] Pietruszczak S.: *Fundamentals of Plasticity in Geomechanics*. CRC, 2010.
- [8] Pisarczyk S.: *Mechanika gruntów*. OWPW, Warszawa 1992.
- [9] Selvadurai A. P. S.: *Elastic analysis of soil-foundation interaction. Developments in geotechnical engineering*. Vol. 17, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1979.
- [10] Wolf J. P.: *Dynamic soil-structure-interaction*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1985.
- [11] Wolf J. P.: *Soil-structure-interaction analysis in time domain*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1989.
- [12] Wolf J. P.: *Foundation vibration analysis using simple physical models*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1991.
- [13] Wiłun Z.: *Zarys Geotechniki*, Wyd. III WKŁ, Warszawa 1987.
- [14] Wysokiński A., Howis J.: *Przepusty w infrastrukturze komunikacyjnej*. Cz. I-IX. Nowoczesne Budownictwo
- [15] Zienkiewicz O.C.: *The finite element method*. Vol. I-III. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [16] PN-B-02171:1988 *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.
- [17] PN-B-02170:1985 *Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki*.
- [18] PN-EN-752-5:2001 *Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Modernizacja*.
- [19] Sympozja I+X „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowlę.” Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska, Kraków 1978÷2003.