

Aspekty zmęczenia w badaniu konstrukcji gruntowo-powłokowych o przekroju otwartym

Dr hab. inż. Adam Wysokowski, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

Przepusty budowane w technologii tradycyjnej, a coraz częściej nowoczesnej stanowią istotny element infrastruktury komunikacyjnej zarówno w ciągu dróg kołowych, jak i linii kolejowych. Stosowane są do przeprowadzenia cieków wodnych jako przejścia dla pieszych i rowerzystów, przejścia gospodarcze, przepusty techniczne, a ostatnio coraz częściej jako przejścia dla zwierząt. Bardzo ważnym aspektem jest ich trwałość szczególnie w przypadku stale rosnących potrzeb komunikacyjnych. W związku z tym ich stan techniczny i sposób utrzymania są niezwykle ważne.

W przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych w ostatnich latach zanotowano, co cieszy bardzo, duży postęp techniczny dotyczący zarówno sposobu ich wznoszenia, zastosowanych materiałów, jak i rozpiętości i gabarytów [2, 3]. W przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych z blach falistych Polska jest w czołówce światowej w tym zakresie. Odnosi się to również w dużej mierze do budowanych w Polsce mostów ekologicznych.

Jednak wspomniany postęp techniczny, dotyczący omawianych konstrukcji wynika ze szczegółowych analiz stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, tak w aspekcie materiałowo-konstrukcyjnym, jak również trwałościowym. Należy tu zauważyć istotę zagadnień utrzymaniowych i trwałościowych w wieloletniej późniejszej eksploatacji tych obiektów. Jednym z tych ważnych zagadnień jest zjawisko zmęczenia.

2. Zjawisko zmęczenia w obiektach inżynierskich

Ogólnie wiadomo, że ze względu na charakter obciążeń komunikacyjnych obiektów inżynierskich, w tym mostów, są one również narażone na zjawisko zmęczenia. Zjawisko zmęczenia jest ściśle związane z takimi ważnymi zagadnieniami jak bezpieczeństwo i trwałość.

Podczas eksploatacji konstrukcji stalowych pojawiają się często charakterystyczne pęknięcia elementów konstrukcyjnych podlegających działaniu wielokrotnych okresowo zmiennych obciążeń, wywołujących naprężenia nawet znacznie mniejsze od doraźnej wytrzymałości materiału. Zjawisko to nazywamy zmęczeniem materiału, a końcowy efekt tego zjawiska – zniszczeniem zmęczeniowym.

Zmęczenie materiału odbija się niekorzystnie na pracy konstrukcji, gdyż ogranicza w mniejszym lub większym stopniu jej trwałość, a w wielu przypadkach prowadzi do niebezpiecznych awarii. Znane są liczne przykłady katastrof spowodowanych

pęknięciami zmęczeniowymi, które pociągnęły za sobą poważne straty ekonomiczne.

W tym kontekście, a dodatkowo ze względu na wiek dużej liczby eksploatowanych konstrukcji mostowych przedmiotowe zjawisko nabiera szczególnego znaczenia.

W krytycznym momencie, jak wspomniano, objawia się ono charakterystycznymi pęknięciami zmęczeniowymi, co jak ogólnie wiadomo związane jest nie tylko z wielkością zmiennych obciążeń, ale również wpływem działania karbu w materiale rodzimym, połączeniach i korbach od ewentualnych wżerów korozyjnych.

Trzeba jednak sobie zdawać sprawę, że obciążenia mostów mają charakter losowy, ponadto występuje ogólna tendencja zwiększania się obciążeń eksploatacyjnych, tak dla mostów kolejowych, jak i drogowych, a pojazdy kołowe są często przeładowywane. Po obiektach mostowych porusza się też duża liczba pojazdów ponadnormatywnych o konfiguracjach obciążeniowych nieuwzględnianych przy ich projektowaniu [4]. Od dłuższego czasu prowadzone są prace badawcze mające na celu wykrycie przyczyn zjawiska zmęczenia i opracowanie ilościowych kryteriów jego oceny tak, aby można było ograniczyć do minimum prawdopodobieństwo pojawienia się pęknięć zmęczeniowych elementów w okresie użytkowania konstrukcji mostowych.

Na bazie wielu wyników zaczęto uwzględniać zmęczenie w normach projektowych mostów kolejowych, a następnie drogowych. Dla tych ostatnich, jako jedne z pierwszych, wprowadziły zjawisko wytyczne amerykańskie AASHTO dopiero w 1965 roku. O ważności problemów zmęczeniowych niech świadczy fakt, że w ostatnich latach notuje się na świecie znaczny wzrost publikacji na temat zmęczenia dotyczących różnych zagadnień z tego zakresu – m.in. autora artykułu [1, 5]. W analizowanych konstrukcjach gruntowo-powłokowych zjawisko to jest ważne ze względu na występowanie wielu newralgicznych miejsc – połączeń arkuszy blach falistych z użyciem śrub. Dodatkowo w dalszym ciągu analizowany jest wpływ zmęczenia na ośrodek gruntowy w tych konstrukcjach.

3. Nośność doraźna stalowych konstrukcji gruntowo-powłokowych w świetle przeprowadzonych badań

W ramach wdrożeń opisywanej technologii konstrukcji gruntowo-powłokowych w naszym kraju przeprowadzono badania tych konstrukcji, w tym kilka typów w skali naturalnej na stendzie badawczym. Badania te przeprowadzono zarówno pod obciążeniami statycznymi, dynamicznymi, jak i zmęczeniowymi.

Obejmowały również badania niszczące. Zostały one przeprowadzone pod kierunkiem autora w laboratorium IBDiM w Żmigrodzie. Część z tych wyników została opublikowana już wcześniej [7, 8, 9], a pierwsze ich podsumowanie znalazło się w referacie generalnym I Europejskiej Konferencji Buried Flexible Steel Structures Rydzyna 2007 [6].

Otrzymane podczas przeprowadzonych badań wartości odkształceń jednostkowych (naprężeń) i przemieszczeń dla powłok stalowych konstrukcji gruntowo-powłokowych są stosunkowo niewielkie, nawet przy obciążeniach znacznie przekraczających wartości obciążeń normowych. Podobnie niskie wyniki otrzymano w zakresie naporu gruntu [11].

Wszystkie przebadane konstrukcje okazały się nadzwyczaj sztywne. Głównym elementem nośnym tych konstrukcji jest grunt zasypki, a powłoka ze stali okazuje się być tylko „obudową”. Z uwagi na podatność omawianego typu konstrukcji są one również w znacznym stopniu odporne na trwałość zmęczeniową. Wykazał to m.in. autor niniejszego artykułu na podstawie licznych badań terenowych i laboratoryjnych m.in. pod kątem zmęczeniowym przeprowadzonych pod jego kierunkiem.

4. Badania parametrów zmęczeniowych stalowej konstrukcji gruntowo-powłokowej z blach falistych o przekroju skrzynkowym

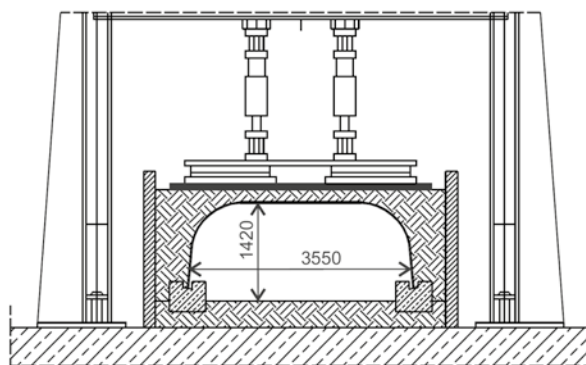
4.1. Wprowadzenie

Przedmiotem przeprowadzonych badań był model w skali naturalnej konstrukcji gruntowo-powłokowej o przekroju otwartym – skrzynkowym typu BoxCulvert. Badania przeprowadzono na modelu badawczym wykonanym w Ośrodku Badań Mostów, Betonów i Kruszyw Instytutu Badawczego Dróg i Mostów w Żmigrodzie. Próby badawcze były wykonywane na stanowisku do badań statycznych, dynamicznych i zmęczeniowych SBDZ [10]. Stanowisko to tworzy fundament żelbetowy o długości 80,0 m i szerokości 20,0 m wraz z halą oraz stalową ramą stanowiącą konstrukcję oporową dla hydraulicznych urządzeń wymuszających obciążenia. Celem badań było m.in. przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej konstrukcji gruntowo-powłokowej typu Box Culvert o wymiarach 3550 × 1420 mm, posadowionej na fundamentach żelbetowych.

4.2. Wykonanie modelu do badań

Budowa modelu do celów badawczych obejmowała wykonanie wszystkich etapów technologicznych wykonania przepustu zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami [10]. Szczególnie brano pod uwagę dokładność wykonania zasypki gruntowej konstrukcji osłonowej. W tym przypadku istniała konieczność stałego monitoringu stopnia zagęszczenia zasypki gruntowej układanej warstwami oraz szczególnej uwagi przy dokładnym zagęszczaniu strefy bocznej konstrukcji. Ujednolicenie warunków gruntowych, pozwalało na uzyskanie w jak największym stopniu miarodajnych wyników przeprowadzonych badań.

Zasadnicze wymiary przekroju poprzecznego modelu badawczego przedstawiono na rysunku 1. Natomiast widok modelu do badań – na rysunku 2.



Rys. 1. Zasadnicze wymiary przekroju poprzecznego modelu badawczego



Rys. 2. Widok gotowego modelu do badań zmęczeniowych

4.3. Program i metodyka badań

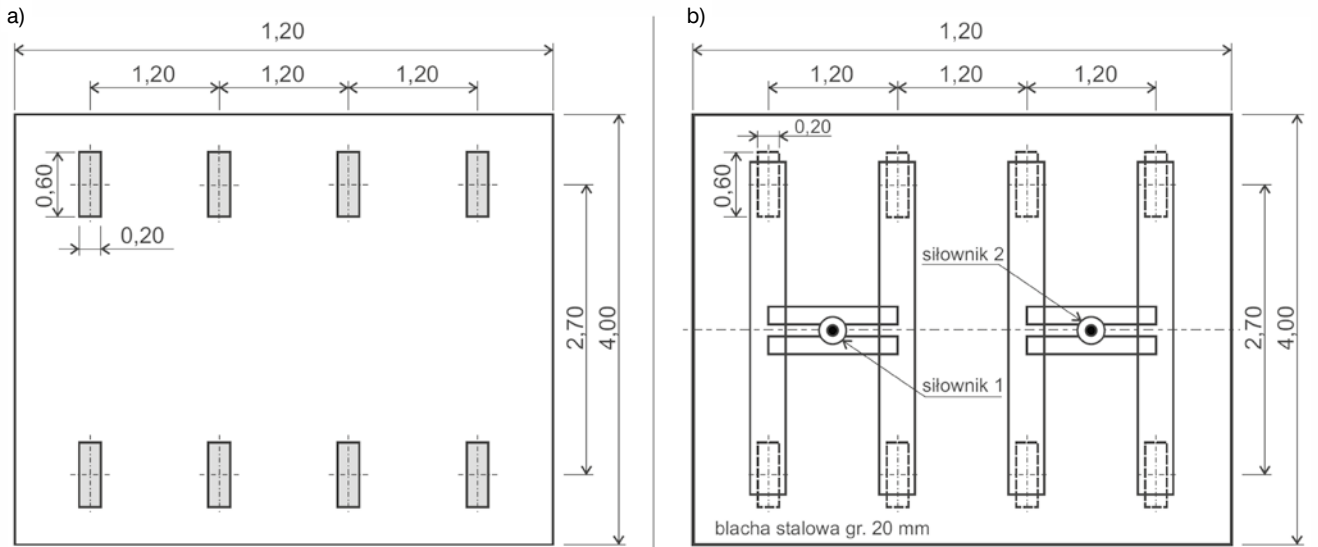
Zakres wykonanych badań obejmował wykonanie założonych procedur laboratoryjnych dla ustalonej wartości naziomu nad analizowaną konstrukcją wynoszącą 0,60 m. Badania zmęczeniowe obejmowały swoim zakresem, w szczególności badania konstrukcji pod obciążeniem zmęczeniowym, do liczby 500 000 cykli obciążeń. Podczas badań na bieżąco rejestrowane były wartości zarówno naprężenia, jak również przemieszczeń powłoki stalowej.

Równoległe w trakcie prowadzenia badań konstrukcji wykonywane były pomiary sił wywołanych parciem gruntu. W tym celu wykorzystano czujniki presjometryczne, rozmieszczone w newralgicznych punktach pomiarowych konstrukcji trakcie ich wykonywania.

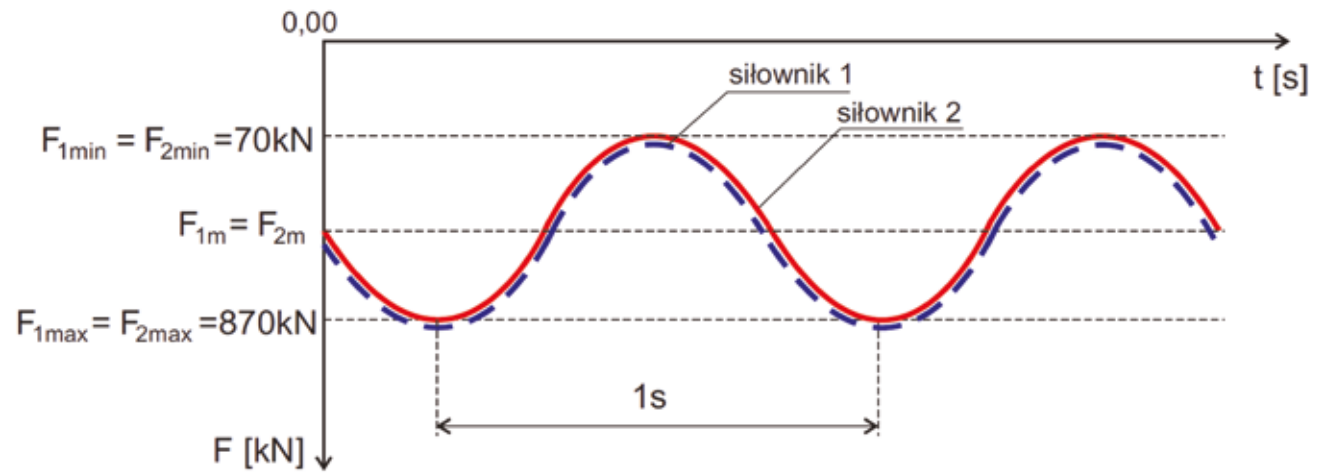
Wartość obciążenia zmęczeniowego

Badania zmęczeniowe zrealizowano dla sinusoidalnego cyklu zmian oddziaływań z założoną częstotliwością wynoszącą $f = 1$ Hz, przy pełnej synchronizacji obu siłowników F_1 i F_2 . W procedurach badawczych przyjęto obciążenie drogowe klasy A zgodnie z normą PN-S-10030 [12] pojazdem normowym $K = 800$ kN.

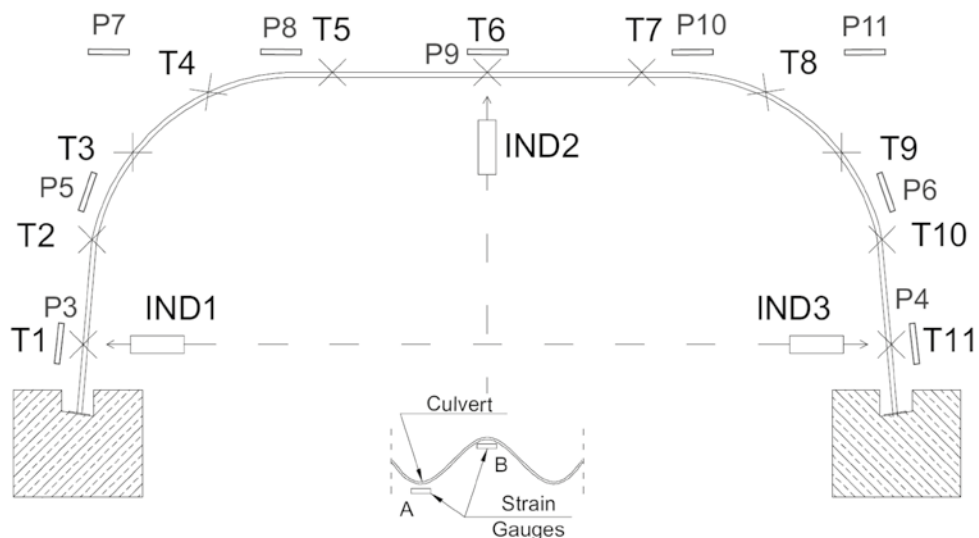
W badaniach, zmęczeniowych przyjęto liczbę cykli wynoszącą $N = 500\ 000$.



Rys. 3. Schemat obciążenia zmęczeniowego na badany model konstrukcji gruntowo-powłokowej: a) schemat obciążenia pojazdem normowym K, b) układ przeniesienia obciążenia zgodny z obciążeniem normowym



Rys. 4. Schemat obciążenia zmęczeniowego badanego modelu pojazdem normowym K 800



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia poszczególnych czujników (tensometrycznych T, indukcyjnych IND i presjometrycznych P) dla przebadanej konstrukcji gruntowo-powłokowej

Sumaryczne obciążenie dynamiczne konstrukcji wynosiło:

$$K_A = K + D_o \quad (1)$$

gdzie:

K – obciążenie pojazdem normowym $K = 800$ kN,
 D_o – zastępcze obciążenie q uwzględniające ciężar konstrukcji wymuszającej obciążenie.

Zatem:

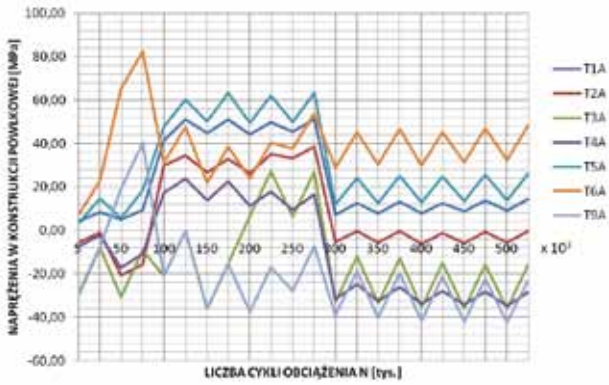
$$K_A = 800,0 \text{ kN} + 70,0 \text{ kN} = 870,0 \text{ kN} \quad (2)$$

W celu symulacji obciążenia normowego zastosowano układ konstrukcyjny przeniesienia obciążenia na badany model. Układ ten przedstawiono na rysunku 3. Pomiary wykonano bez uwzględniania historii obciążenia – układ został „wyzzerowany”. Przyjęty schemat obciążenia zmęczeniowego przedstawiono na rysunku 4.

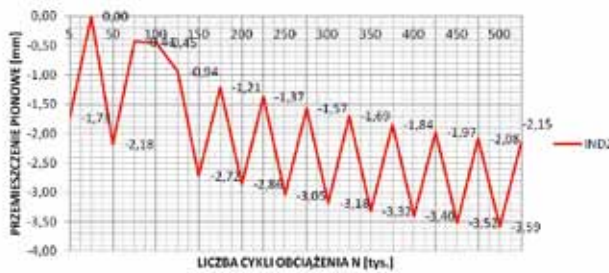
Pomiary przemieszczeń były wykonywane za pomocą czujników indukcyjnych usytuowanych w płaszczyźnie prostopadłej do jego osi poziomej i pionowej – oznaczonych dla potrzeby wykonania badań literą „IND”.

Tabela 1. Pomierzone wartości naprężeń i odkształceń badanej konstrukcji gruntowo-powłokowej dla zadanej liczby cykli obciążeniowych w zakresie od $5 \cdot 10^3$ do $500 \cdot 10^3$

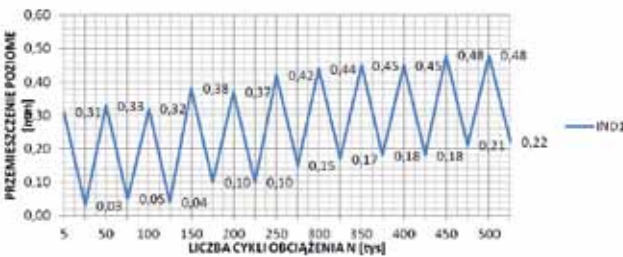
Obciążenie zmęczeniowe – naziom 0,60 m											
Liczba cykli	Wartość min/max	Naprężenia [MPa]							Przemieszczenia [mm]		
		T1A	T2A	T3A	T4A	T5A	T6A	T9A	IND3	IND2	IND1
5k	MAX	4,10	-5,50	-29,90	-7,40	3,10	7,00	-29,10	0,31	-1,73	0,31
	MIN	8,40	-1,00	-7,80	-2,10	14,80	23,00	-7,60	0,04	0,00	0,03
50k	MAX	4,92	-20,50	-30,80	-17,20	5,74	65,19	19,27	0,33	-2,18	0,33
	MIN	9,60	-15,60	-9,02	-10,50	18,45	82,62	40,39	0,05	-0,43	0,05
100k	MAX	41,40	29,70	-20,90	17,20	47,80	31,00	-20,90	0,50	-0,45	0,32
	MIN	51,00	34,60	-0,40	24,00	60,10	47,60	-0,40	0,08	-0,94	0,04
150k	MAX	44,90	26,70	-35,90	13,90	50,20	21,90	-35,90	0,34	-2,72	0,38
	MIN	51,00	33,00	-15,20	22,60	63,30	38,50	-15,20	0,08	-1,21	0,10
200k	MAX	44,30	26,50	6,60	11,30	49,60	23,80	-37,50	0,42	-2,86	0,37
	MIN	50,00	35,30	27,30	18,00	62,10	40,60	-16,80	0,15	-1,37	0,10
250k	MAX	45,50	33,40	6,20	9,40	50,00	37,70	-27,70	0,33	-3,05	0,42
	MIN	51,00	38,50	26,90	16,60	63,30	53,90	-7,20	0,06	-1,57	0,15
300k	MAX	7,20	-5,30	-32,80	-31,60	12,10	28,90	-39,00	0,46	-3,18	0,44
	MIN	12,70	-0,20	-11,90	-24,80	24,20	45,30	-18,70	0,20	-1,69	0,17
350k	MAX	8,00	-5,50	-33,40	-32,60	12,70	30,50	-40,20	0,50	-3,32	0,45
	MIN	13,10	-0,40	-12,90	-26,00	25,00	46,90	-19,70	0,23	-1,84	0,18
400k	MAX	7,80	-6,20	-35,50	-33,80	12,90	29,70	-41,60	0,49	-3,40	0,45
	MIN	12,50	-1,20	-15,00	-27,90	24,80	45,30	-21,30	0,22	-1,97	0,18
450k	MAX	8,80	-5,90	-35,90	-34,20	13,50	31,40	-42,00	0,52	-3,52	0,48
	MIN	13,70	-0,60	-15,60	-28,10	25,80	47,20	-22,10	0,26	-2,08	0,21
500k	MAX	9,00	-5,50	-36,10	-34,60	13,90	32,40	-42,40	0,53	-3,59	0,48
	MIN	14,40	-0,40	-16,00	-28,50	26,20	48,20	-23,00	0,27	-2,15	0,22



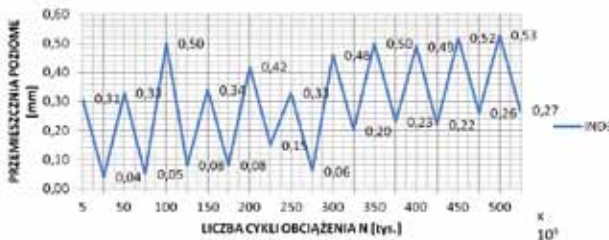
Rys. 6. Wykresy naprężeń w stalowej konstrukcji powłokowej dla poszczególnych czujników tensometrycznych T1-T6 oraz T9 pod cyklicznym obciążeniem zmęczeniowym



Rys. 7. Wykres przemieszczeń pionowych klucza stalowej konstrukcji powłokowej dla czujnika indukcyjnego IND 2 pod cyklicznym obciążeniem zmęczeniowym

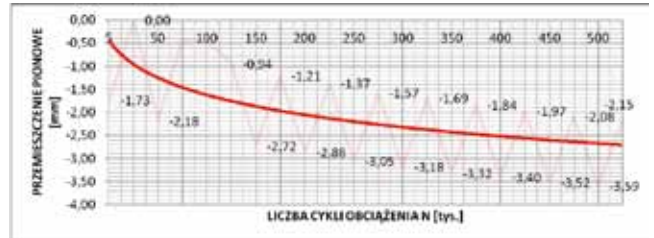


Rys. 8. Wykres przemieszczeń poziomych stalowej konstrukcji powłokowej dla czujnika indukcyjnego IND 1 pod cyklicznym obciążeniem zmęczeniowym

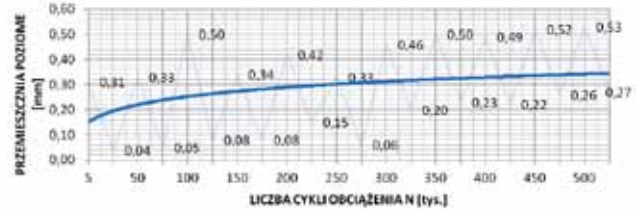


Rys. 9. Wykres przemieszczeń poziomych stalowej konstrukcji powłokowej dla czujnika indukcyjnego IND 3 pod cyklicznym obciążeniem zmęczeniowym

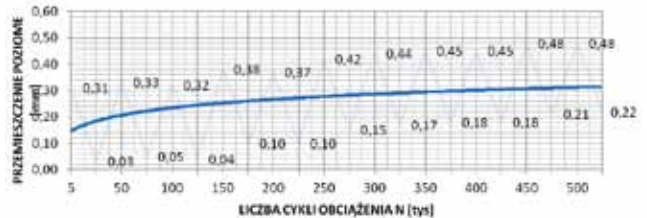
Wartości pomierzone naprężeń i odkształceń badanej konstrukcji gruntowo-powłokowej dla zadanej liczby cykli obciążeniowych w zakresie $5 \cdot 10^3$ do $500 \cdot 10^3$ zestawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Tendencja wzrostu przemieszczenia pionowego klucza stalowej konstrukcji powłokowej w skali logarymicznej w zależności od liczby cykli N obciążenia zmęczeniowego



Rys. 11. Tendencja wzrostu przemieszczenia poziomego stalowej konstrukcji powłokowej w obrębie fundamentu (czujnik IND 1) w skali logarymicznej w zależności od liczby cykli N obciążenia zmęczeniowego



Rys. 12. Tendencja wzrostu przemieszczenia poziomego stalowej konstrukcji powłokowej w obrębie fundamentu (czujnik IND 3) w skali logarymicznej w zależności od liczby cykli N obciążenia zmęczeniowego

Wykresy naprężeń w stalowej konstrukcji powłokowej dla poszczególnych czujników tensometrycznych przedstawiono na rysunku 6.

Wykres przemieszczeń pionowych klucza stalowej konstrukcji powłokowej dla czujnika indukcyjnego IND 2 (patrz schemat rozmieszczenia czujników) przedstawiono na rysunku 7. Wykresy przemieszczeń poziomych stalowej konstrukcji powłokowej dla czujników indukcyjnych IND 1 i IND 3 przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

5. Analiza wyników badań zmęczeniowych

Analiza wyników badań zmęczeniowych w skali naturalnej konstrukcji gruntowo-powłokowej zestawionych w punkcie 4.4 niniejszego artykułu wskazuje, że zarejestrowane naprężenia maksymalne w powłoce stalowej zawierają się w przedziale od $N = 5 \cdot 10^3$ – $300 \cdot 10^3$ cykli obciążenia zmiennego. W zakresie cykli $N = 300 \cdot 10^3$ – $500 \cdot 10^3$ wartości naprężeń

w powłoce stalowej maleją i ich przebieg osiąga wartość zbliżoną do liniowej (wykres na rysunku 6).

Zjawisko to jest, zdaniem autora, spowodowane konsolidacją gruntu otaczającego powłokę stalową do wartości optymalnej (granicznej wartości l_d) dla warunków laboratoryjnych. Analizując wartości otrzymanych przemieszczeń pionowych klucza oraz poziomych w obrębie fundamentu konstrukcji stalowej, należy stwierdzić, że odkształcenie powłoki rośnie wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia N . Dla pełnej ilustracji tego zjawiska tendencję wzrostu poszczególnych przemieszczeń w skali logarytmicznej przedstawiono na rysunkach 10–12. Biorąc pod uwagę powyższe, można zatem stwierdzić, że zjawisko zmęczenia w stalowych konstrukcjach gruntowo-powłokowych ściśle związane jest ze stopniem zagęszczenia zasyпки gruntowej. W początkowej fazie oddziaływania obciążeń wielokrotnie zmiennych wielkość poziomu przyrostu zarówno wartości naprężeń, jak również wartości przemieszczeń powłoki w odniesieniu do tej samej liczby cykli ma charakter maksymalny. Przy dalszym wzroście zadawanej liczbie cykli obciążeń, przyrost wielkości maleje.

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań można stwierdzić, że oszacowana graniczna wartość liczby cykli, po której następuje „stabilizacja” konstrukcji gruntowo-powłokowej (brak zauważalnego przyrostu zmęczenia), wynosi około $N = 300\ 000$ cykli obciążenia zmęczenia.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary pod obciążeniami zmęczeniowymi (obciążenia jednostajnie cyklicznie zmienne) wykazały, że dla wszystkich zarejestrowanych parametrów ich wartości zmieniają się w czasie wraz z przyrostem liczby cykli i mają tendencję rosnącą dla przebadanej skrzynkowej konstrukcji gruntowo-powłokowej.

Wstępna analiza tego zjawiska dowodzi, że wskutek obciążenia cyklicznego „zmęczeniu” (konsolidacji) ulega grunt zasyпки i tym samym góra sklepienia badanych przepustów przemieszcza się pionowo w dół. Grunt dodatkowo w tym przypadku tłumi oddziaływanie dynamiczne. Po osiągnięciu optymalnego stopnia zagęszczenia zasyпки gruntowej pomierzone parametry zarówno naprężenia, jak również przemieszczenia powłoki się stabilizują.

Zaobserwowany w trakcie badań konstrukcji zmniejszający się przyrost deformacji trwałych wraz ze wzrostem cykli obciążania konstrukcji jest wynikiem zagęszczania (konsolidacji) gruntu po każdym cyklu obciążenia. Badania wykazały, że długotrwałe oddziaływanie obciążeń wielokrotnie zmiennych „stabilizuje” konstrukcję zespoloną, jako ośrodek grunt-powłoka. Podczas przeprowadzonych badań nie stwierdzono jakichkolwiek uszkodzeń lub obluźowania się łączników (śrub) stalowej konstrukcji powłokowej, jak również przemieszczeń poszczególnych segmentów blach stalowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić następujące wnioski:

- intensywny rozwój mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych połączony z szerokim ich wdrażaniem do praktyki inżynierskiej wymaga poznania ich rzeczywistego

zachowania się w czasie. Ma to ścisły związek z późniejszym utrzymaniem, a także bezpieczeństwem tych konstrukcji w trakcie ich użytkowania;

- przeprowadzone badania wykazały zmienność w czasie zachowania się tych konstrukcji pod cyklicznym obciążeniem zmęczeniowym. Wielkość tego wpływu jest jednak stosunkowo niewielka, biorąc pod uwagę, że przeprowadzone badania symulacyjne odzwierciedlają obciążenie cykliczne, które konstrukcja dozna w całym okresie eksploatacyjnym, na który została zaprojektowana;
- ze względu na ważność problematyki, zdaniem autora, celowe jest prowadzenie dalszych podobnych badań dla innych podobnych typów konstrukcji z uwzględnieniem różnych parametrów. Ich wyniki pozwolą na wyciągnięcie szerszych wniosków na temat zachowania się zmęczeniowego tego typu złożonych budowli.

Artykuł był prezentowany na konferencji
Konstrukcje Zespolone 2017

BIBLIOGRAFIA

- [1] Czudek H., Wysokowski A., Trwałość mostów drogowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005
- [2] Janusz L., Madaj A., Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo, WKŁ, Wrocław, 2007
- [3] Machelski Cz., Obliczanie mostów gruntowo-powłokowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocławska Seria Wydawnicza Inżynierii Mostowej, Wrocław, 2008
- [4] Wysokowski A., Zagadnienia eksploatacyjne w mostach zespolonych – zmęczenie i trwałość, Jubileuszowa X Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra, 2014
- [5] Wysokowski A., Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych, IBDiM Studia i Materiały, zeszyt nr 53/2001, Warszawa
- [6] Wysokowski A., Janusz L., General conclusions base on the testing various type of shell soil bridge structure in laboratory in natural scale. I European Conference Buried flexible steel structures Rydzyna 2007, Archives of Institute of Civil Engineering, Publishing House of Poznań University of Technology, Poznań, 2007
- [7] Wysokowski A., Howis J., Influence of results of testing on manner of constructing culverts and animals passage made as buried flexible steel structures. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej, tom 12, 2012
- [8] Wysokowski A., Pryga A., Trwałość eksploatacyjna podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych, V Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, budowy oraz utrzymania mostów małych i średnich rozpiętości, Wrocław, 2004
- [9] Wysokowski A., Vaslestad J., Full scale fatigue testing of large-diameter multi-plate corrugated steel culverts, Archives of civil engineering XLVIII, 2002
- [10] Rowińska W., Wysokowski A., Pryga A., Zalecenia projektowe i technologiczne dla podatnych konstrukcji inżynierskich z blach falistych, GDDKiA, IBDiM, Żmigród, 2004
- [11] Pettersson L., Sundquist H., 2000, Design of long span flexible metal culverts. TRITA-BKN, Report 58, Brobygggnad, English edition, KTH, Stockholm, 2003

Za publikację w miesięczniku
„Przegląd Budowlany”
uzyskuje się 5 punktów

zgodnie z komunikatem MNiSW z dnia 23.12.2015 roku,
wykaz B, pozycja 1381.