

*Damian Bęben**

DEFORMACJE POWŁOKI MOSTU WYKONANEJ Z BLACH FALISTYCH PODCZAS ZASYPYWANIA GRUNTEM

1. Wprowadzenie

Specyfika mostów gruntowo-stalowych polega na tym, że są to konstrukcje złożone z dwóch całkowicie różnych ośrodków materialnych (gruntu i stali), przez co cały ustrój nośny staje się podatny. Dzięki wymuszonej współpracy pomiędzy elementami składowymi, tj. wzajemnym ich oddziaływaniem tworzy się „zespólny” układ nośny [1–4].

Tak ukształtowany układ konstrukcyjny pozwala na przenoszenie obciążeń zewnętrznych znacznie większych niż to wynika z traktowania samej tylko stalowej powłoki falistej jako głównego elementu konstrukcyjnego ustroju nośnego w takich obiektach, a także nie wywołuje w nich zwiększonych naprężeń i przemieszczeń. Wysoka nośność takich ustrojów wykazywana wielokrotnie podczas badań doświadczalnych [2, 5, 6].

Podczas budowy tego typu obiektów na etapie zasypywania stalowej powłoki gruntem nie ma jeszcze tak dobrej współpracy pomiędzy tymi ośrodkami zwłaszcza na początku układania kilku pierwszych warstw gruntowych. Stąd w niniejszej pracy podjęto próbę oceny stanu wyężenia powłoki od obciążenia kolejnymi warstwami gruntowymi. Dokonano tego za pomocą programu Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), opartego na metodzie różnic skończonych (MRS), z uwzględnieniem warstwy kontaktowej typu interface występującej na styku dwóch ośrodków [1].

W artykule przedstawiono wybrane wyniki obliczeń numerycznych opartych na metodzie różnic skończonych, które porównano z wartościami uzyskanymi z badań doświadczalnych (pomiar przemieszczeń i odkształceń) podczas zasypywania gruntem i jego zagęszczania. Opis konstrukcji tego mostu, szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych wykonywanych pod różnymi rodzajami obciążeń (statycznych i dynamicznych) i ich analiza, jak również zastosowana aparatura zostały przedstawione w pracach [1, 3–5].

* Katedra Geotechniki i Geodezji, Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska, Opole



Rys. 1. Przykłady wykonywania zasyпки gruntu wokół powłoki w mostowych konstrukcjach gruntu-stalowych w: a) Trzebiatów, b) Wrocławiu

2. Model mostu gruntu-stalowego z elementami interface

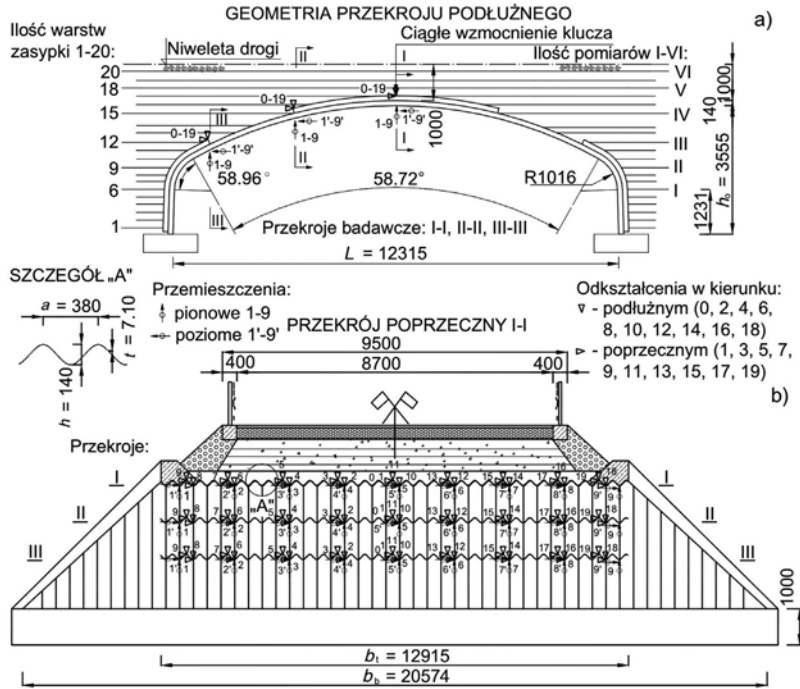
Obliczenia mostu gruntu-stalowego przeprowadzono przy wykorzystaniu programu FLAC 2D (ver. 3.4), który pozwala na rozwiązywanie wybranych problemów dotyczących analizy statycznej i dynamicznej.

Grunt został zamodelowany jako model Duncana-Changa (hiperboliczny związek naprężenie-odkształcenie). Nieliniowość zachowania się gruntu została aproksymowana poprzez analizę przyrostową, tj. przez zmianę właściwości gruntu. Wartości modułu stycznego i współczynnika Poissona zostały obliczone, ponieważ każda warstwa bazowała na założeniu, że pionowe i poziome naprężenia gruntu są naprężeniami głównymi [2, 7].

Zmianę modułu $E(z) = E_o + mz$ zdefiniowano jako powierzchnię modułu E_o i gradientu m . Parametry użyte do modelowania zagęszczonego gruntu (95% według Proctora Normalnego) to: współczynnik Poissona $\nu = 0,17$, kohezja $c = 0$, kąt tarcia wewnętrznego $\phi = 43^\circ$, gradient $m = 3,8 \text{ MPa/m}$, $E_o = 20 \text{ MPa}$, ciężar jednostkowy $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, kąt dylatacji $\psi = 10,0^\circ$, współczynnik $R_f = 0,96$. Natomiast stalowa konstrukcja była modelowana jako bilinearna sprężysta o modułach Younga $E_{1s} = 207 \text{ GPa}$ i $E_{2s} = 79,6 \text{ GPa}$, współczynnika Poissona $\nu_s = 0,30$, wytrzymałości stali $\sigma_{ys} = 300 \text{ MPa}$, grubości blach $t_s = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, momencie bezwładności $I_s = 2,07 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4/\text{m}$, polu przekroju poprzecznego $A_s = 8,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}$.

Obciążenie w postaci warstw zasyпки gruntu przykładano kolejno jako równomiernie rozłożone na szerokości 1 m. Analizę przeprowadzono dla 6 wybranych warstw gruntu (rys. 2), co odpowiadało warstwom (6, 9, 12, 15, 18 i 20), dla których wcześniej wykonano również badania doświadczalne w terenie [1, 3].

Obliczenia wykonano w oparciu o założenia opracowane przez Moora i Brachmana [8] i zmodyfikowane przez Rottera i Jumikisa [9]. Aby zamodelować sztywność osiową i na zginanie, jak również własności materiałowe blach falistych w kierunku obwodowym



Rys. 2. Most gruntowo-stalowy wykonany z blach falistych: a) geometria przekroju podłużnego i b) przekrój poprzeczny I-I. Usytuowanie czujników zegarowych oraz tensometrycznych na konstrukcji powłoki

należało wcześniej wyznaczyć równoważny obwodowy moduł Younga \bar{E}_s i równoważną grubość blach powłoki \bar{t}_s w oparciu o równania (1) i (2):

$$\bar{E}_s = \frac{12E_{1s}I_s}{t_s^3} \tag{1}$$

$$\bar{t}_s = \sqrt{\frac{12I_s}{A_s}} \tag{2}$$

gdzie:

E_{1s} — jest modułem Younga stali,

A_s — pole powierzchni przypadające na jednostkę długości blach falistych,

I_s — moment bezwładności przypadający na jednostkę długości blach falistych (o grubości t_s) pomierzone w kierunku obwodowym.

Do zamodelowania kontaktu pomiędzy gruntem i konstrukcją stalową zastosowano elementy interface, które reprezentowane są jako sztywność normalna (k_n) i poprzeczna (k_s) pomiędzy dwoma ciałami, które mogą się ze sobą kontaktować zgodnie z rysunkiem 3.



Rys. 3. Element typu *interface* reprezentowany przez dwie powierzchnie przylegania A (grunt) i B (konstrukcja stalowa)

Właściwości nieliniowego hiperbolicznego elementu *interface* są następujące: sztywność normalna $k_{n\text{int}} = 2,2 \cdot 10^8 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, sztywność poprzeczna $k_{s\text{int}} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt tarcia wewnętrznego $\phi_{\text{int}} = 30^\circ$, spójność $c_{\text{int}} = 1,0 \text{ kPa}$, współczynnik $R_{f\text{int}} = 0,85$, wytrzymałość na rozciąganie $T_{\text{int}} = 0$.

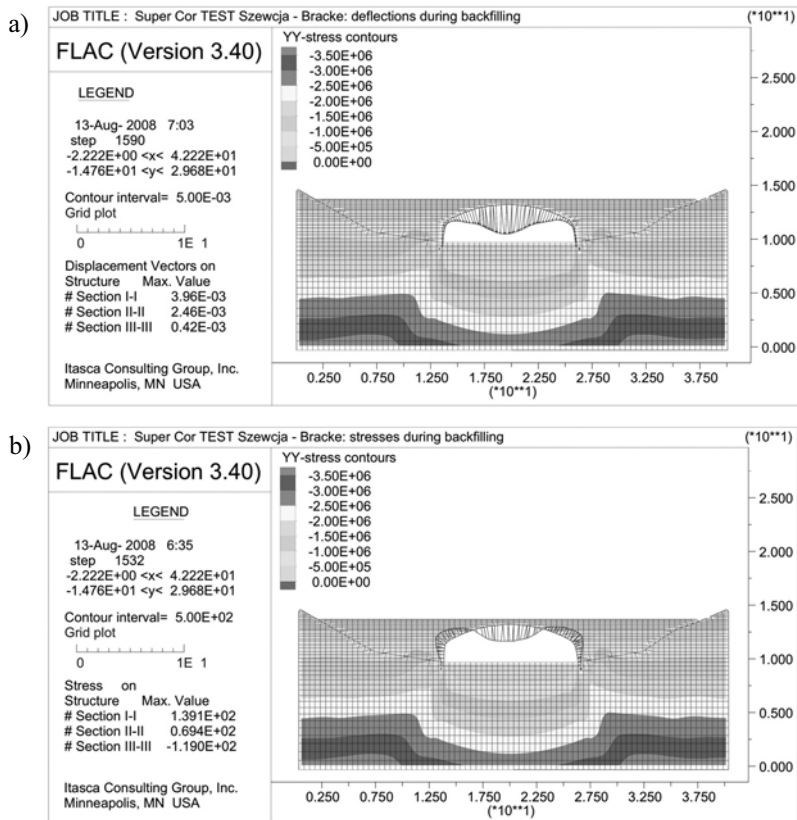
3. Analiza wyników uzyskanych z obliczeń i badań doświadczalnych

3.1. Przesunięcia pionowe

Największe przesunięcia pionowe w konstrukcji powłoki wykonanej ze stalowych blach falistych w przekroju I–I (w kluczu) uzyskano po ostatecznym zagęszczeniu 20 warstwą zasyпки (VI pomiar). Maksymalna wartość obliczona teoretycznie wynosiła $f_{vo} = 3,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (rys. 4a) natomiast pomierzona wynosiła $f_{vp} = 3,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ i zlokalizowana była w połowie szerokości powłoki. W kolejnym rozpatrywanym przekroju II–II największa wartość obliczeniowa przesunięcia pionowego była równa $f_{vo} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ i wystąpiła podczas zagęszczania 18 warstwą zasyпки, a z kolei wartość pomierzona wynosiła $f_{vp} = 2,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (umiejscowione były w połowie szerokości powłoki). Natomiast w przekroju III–III maksymalne obliczone ugięcia konstrukcji powłoki stalowej wynosiły $f_{vo} = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, podczas gdy wartość pomierzona była $f_{vp} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Wystąpiły one również w połowie jej szerokości, z tym, że podczas IV pomiaru, tj. po zagęszczeniu 15 warstwami gruntu (tabela 1).

3.2. Naprężenia normalne

Największe naprężenia normalne (odkształcenia) w stalowej konstrukcji powłoki, które uzyskano z obliczeń i pomiarów podczas zagęszczania poszczególnych warstw zasyпки, wystąpiły w przekroju I–I, po zagęszczeniu 20 warstwą zasyпки (VI pomiar), a ich maksymalna wartość obliczeniowa wyniosła $\sigma_{yo} = 139,0 \text{ MPa}$ ($\epsilon_{yo} = 679 \cdot 10^{-6}$). Występowała ona na górnych włóknach fal blach w kierunku podłużnym konstrukcji powłoki (rys. 4b), zaś wartość pomierzona była równa $\sigma_{yp} = 133,0 \text{ MPa}$ ($\epsilon_{yp} = 648 \cdot 10^{-6}$). W następnym analizowanym przekroju



Rys. 4. Przykładowe wykresy: a) przemieszczeń pionowych i b) naprężeń normalnych w stalowej powłoce otrzymane podczas zasypywania i zagęszczania warstw gruntowych

II–II, największe naprężenia normalne w kierunku podłużnym konstrukcji powłoki wystąpiły również podczas zagęszczania 20 warstwy zasypki, (VI pomiar), a ich wartość obliczona teoretycznie była równa $\sigma_{yo} = 114,0$ MPa ($\epsilon_{yo} = 555 \cdot 10^{-6}$) i ujawniła się na dolnych włóknach fal blach, natomiast wartość pomierzona wyniosła $\sigma_{yp} = 107,0$ MPa ($\epsilon_{yp} = 522 \cdot 10^{-6}$). Z kolei, w ostatnim analizowanym przekroju III–III, maksymalne naprężenia normalne uzyskane z obliczeń wynosiły $\sigma_{yo} = 119,0$ MPa ($\epsilon_{yo} = 581 \cdot 10^{-6}$), przy wartości pomierzonej równej $\sigma_{yp} = 123,0$ MPa ($\epsilon_{yp} = 599 \cdot 10^{-6}$). Wyniki uzyskano w kierunku podłużnym konstrukcji powłoki na górnych włóknach fal blach podczas zagęszczania 20 warstwy zasypki (tabela 1).

4. Wnioski

W oparciu o doświadczenia praktyczne uzyskane z obliczeń i badań doświadczalnych gruntowo-stalowej konstrukcji mostu można wyciągnąć następujące wnioski:

TABELA 1

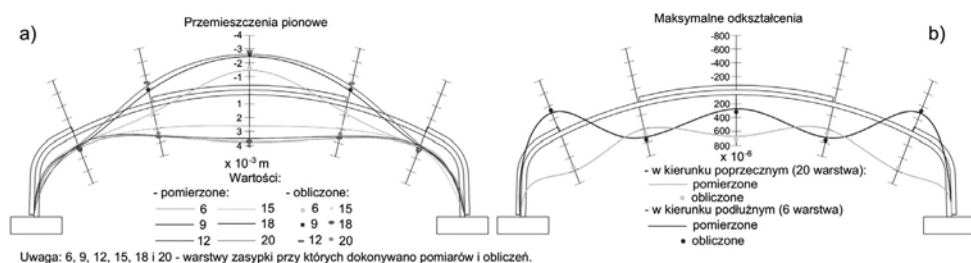
Maksymalne wartości przemieszczeń pionowych (10^{-3} m) i odkształceń (10^{-6}) stalowej powłoki uzyskane z pomiarów i obliczeń podczas zagęszczania gruntu

Warstwy zasypki	Przekrój I-I				Przekrój II-II				Przekrój III-III			
	Przemieszczenia pionowe											
	f_{vp} , mm	f_{vo} , mm	$(f_{vp}-f_{vo})/$ f_{vp} , %	f_{vp}/f_{vo}	f_{vp} , mm	f_{vo} , mm	$(f_{vp}-f_{vo})/$ f_{vp} , %	f_{vp}/f_{vo}	f_{vp} , mm	f_{vo} , mm	$(f_{vp}-f_{vo})/$ f_{vp} , %	f_{vp}/f_{vo}
I	-1,37	-1,49	8,75	0,92	0,67	0,64	4,47	1,04	1,03	1,13	-9,71	0,91
II	-2,34	-2,56	9,41	0,91	-0,83	-0,88	6,02	0,94	1,07	1,15	-7,47	0,93
III	-2,57	-2,75	7,00	0,93	-1,20	-1,33	10,83	0,90	1,02	1,07	-4,90	0,95
IV	2,65	2,87	-8,30	0,92	1,98	1,85	6,56	1,07	1,17	1,31	-11,96	0,89
V	3,56	3,82	-7,31	0,93	2,50	2,62	-4,80	0,95	0,99	0,89	10,10	1,11
VI	3,72	3,96	-6,45	0,94	2,62	2,46	4,58	1,04	0,35	0,42	-20,00	1,20
Odkształcenia w kierunku poprzecznym												
	ε_{yp} $\times 10^{-6}$	ε_{yo} $\times 10^{-6}$	$(\varepsilon_{yp}-\varepsilon_{yo})/$ ε_{yp} , %	$\varepsilon_{yp}/\varepsilon_{yo}$	ε_{yp} $\times 10^{-6}$	ε_{yo} $\times 10^{-6}$	$(\varepsilon_{yp}-\varepsilon_{yo})/$ ε_{yp} , %	$\varepsilon_{yp}/\varepsilon_{yo}$	ε_{yp} $\times 10^{-6}$	ε_{yo} $\times 10^{-6}$	$(\varepsilon_{yp}-\varepsilon_{yo})/$ ε_{yp} , %	$\varepsilon_{yp}/\varepsilon_{yo}$
Na górze fali												
I	211	236	-11,84	0,89	-163	-179	9,81	0,91	255	270	-5,88	0,94
II	148	178	-20,27	0,83	414	444	-7,24	0,93	374	388	-3,74	0,96
III	207	170	17,84	1,21	422	450	-6,63	0,94	381	395	-3,67	0,96
IV	263	287	-9,12	0,91	315	339	-7,62	0,93	366	375	-2,46	0,97
V	278	305	-9,71	0,91	303	328	-8,25	0,92	400	422	-5,50	0,94
VI	648	679	-4,78	0,95	400	449	-12,25	0,89	-599	-581	3,01	1,03
Na dole fali												
I	170	181	-6,47	0,94	163	178	-9,20	0,91	-192	-205	6,77	0,93
II	485	511	-5,36	0,95	163	170	-4,29	0,96	-167	-177	5,99	0,94
III	537	548	-2,05	0,98	159	165	-3,77	0,96	-167	-180	7,78	0,92
IV	537	561	-4,47	0,95	-148	-157	6,08	0,94	-152	-170	11,84	0,89
V	581	591	-1,72	0,98	-263	-266	1,14	0,98	-104	-90	13,64	1,15
VI	329	358	-8,81	0,92	522	555	-6,32	0,94	233	255	9,44	0,91

Uwagi: przemieszczenia pionowe: pomierzone f_{vp} i obliczone f_{vo} ; odkształcenia: pomierzone ε_{yp} i obliczone ε_{yo} .

- Zachowanie się podanej powłoki wykonanej z blach falistych nie budziło żadnych większych zastrzeżeń. Średnie wartości przemieszczeń i naprężeń normalnych (odkształceń) otrzymane z pomiarów były przeważnie mniejsze niż uzyskane z obliczeń wykonanych za pomocą metody różnic skończonych dla tego samego obciążenia warstwami gruntu.

- 2) Względna zmiana przemieszczeń i naprężeń normalnych (odkształceń) otrzymanych z obliczeń i pomiarów wskazuje na małe różnice pomiędzy tymi wartościami w poszczególnych przekrojach, co potwierdza bezpieczne zachowanie się powłoki mostu pod obciążeniem warstwami gruntu. Dla przemieszczeń uzyskano zakres 4,47–20,00% a dla naprężeń normalnych (odkształceń) 1,14–20,27%, podczas gdy zakres stosunków wartości pomierzonych do obliczonych wynosił 0,89–1,20 dla przemieszczeń i 0,83–1,21 dla odkształceń (tabela 1).
- 3) W wyniku przeprowadzonych obliczeń i pomiarów zauważono, że w miarę wykonywania kolejnych warstw zasypek wielkość przemieszczeń i naprężeń normalnych (odkształceń) w stalowej powłoce przeważnie ulega zwiększeniu, co wynikało przede wszystkim ze stopniowego zwiększania obciążenia działającego na powłokę oraz sumowania się następujących po sobie deformacji i wynikających stąd naprężeń szczątkowych (tabela 1).
- 4) W wyniku uzyskanych dość zbliżonych wartości obliczeń wykonanych w oparciu o MRS i badań doświadczalnych (rys. 5) zrealizowanych na obiekcie rzeczywistym, stwierdza się, że analiza dwuwymiarowa z elementami kontaktowymi typu interface na styku dwóch różnych materiałów może być używana do prognozy zachowania się tego typu stalowych powłok mostów podczas zasypywania gruntem.



Rys. 5. Porównanie wartości obliczonych i pomierzonych:
a) przemieszczeń pionowych, b) maksymalnych odkształceń

LITERATURA

- [1] *Bęben D.*: Współpraca gruntu i konstrukcji mostowych wykonywanych ze stalowych blach falistych. (Praca doktorska), Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska, 2005
- [2] *Kang J., Parker F., Yoo Ch.*: Soil–structure Interaction for Deeply Buried Corrugated Steel Pipes. Part I: Embankment installation. *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 30, nr 2, 2008, s. 384–392
- [3] *Manko Z., Beben D.*: Research on Steel Shell of a Road Bridge Made of Corrugated Plates during Backfilling. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 10, nr 5, 2005, s. 592–603
- [4] *Manko Z., Beben D.*: Dynamic Testing of a Corrugated Steel Arch Bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering*, National Research Council, Vol. 35, nr 3, 2008, s. 246–257

- [5] *Manko Z., Beben D.*: Static Load Tests of a Road Bridge with a Flexible Structure Made from Super Cor Type Steel Corrugated Plates. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 10, nr 5, 2005, s. 604–621
- [6] *McGrath T.J., Moore I.D., Selig E.T., Webb M.C., Taleb B.*: Recommended Specifications for Large-span Culverts. National Cooperative Highway Research Program Report 473, Transportation Research Board, NRC, Washington, D.C., 2002
- [7] *McVay M.C.*: Evaluations of Numerical Modeling of Buried Conduits. (Ph.D. Thesis), Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, Amherst, USA, 1982
- [8] *Moore I.D., Brachman R.W.I.*: Three Dimensional Analysis of Flexible Circular Culvert. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, nr GT10, 1994, s. 1829–1844
- [9] *Rotter J.M., Jumikis P.T.*: Non-linear Strain Displacement Relations for Axi-symmetric Thin Shell. Research Report R563, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, New South Wales, Australia, 1998