

Damian BĘBEN*
Politechnika Krakowska

BADANIA STALOWEJ KONSTRUKCJI POWŁOKI MOSTU PODCZAS ZASYPYWANIA GRUNTEM

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki i wnioski z badań doświadczalnych, które zostały przeprowadzone na powłoce wykonanej ze stalowych blach falistych typu *Super Cor* podczas jej zasypywania gruntem w trakcie budowy mostu położonego w miejscowości Gimån w Szwecji. Wnioski z tych badań, ze względu na swoją oryginalność, mogą być przydatne dla określenia zachowania się tego typu stalowo-gruntowych obiektów mostowych pod obciążeniem zasypką gruntową podczas ich budowy.

RESEARCH OF STEEL SHELL STRUCTURE OF BRIDGE DURING BACKFILLING

Summary. The paper presents the results and conclusions of research, which was conducted on the shell structure made of steel corrugated plates *Super Cor* type under backfilling during bridge construction located in Gimån in Sweden. Conclusions from these tests, due to their originality, can be helpful mostly for the assessment of behaviour of such type of steel-soil bridge structures under loads of soil during its construction.

1. Wprowadzenie

Przedmiotem pracy jest konstrukcja powłoki wykonana ze stalowych blach falistych *Super Cor* typu SC-56B (*box culvert* według wytycznych *AIL* z Kanady) położona nad rzeką Gimån na drodze nr 716 Bråcke – Holm w Szwecji (rys. 1).

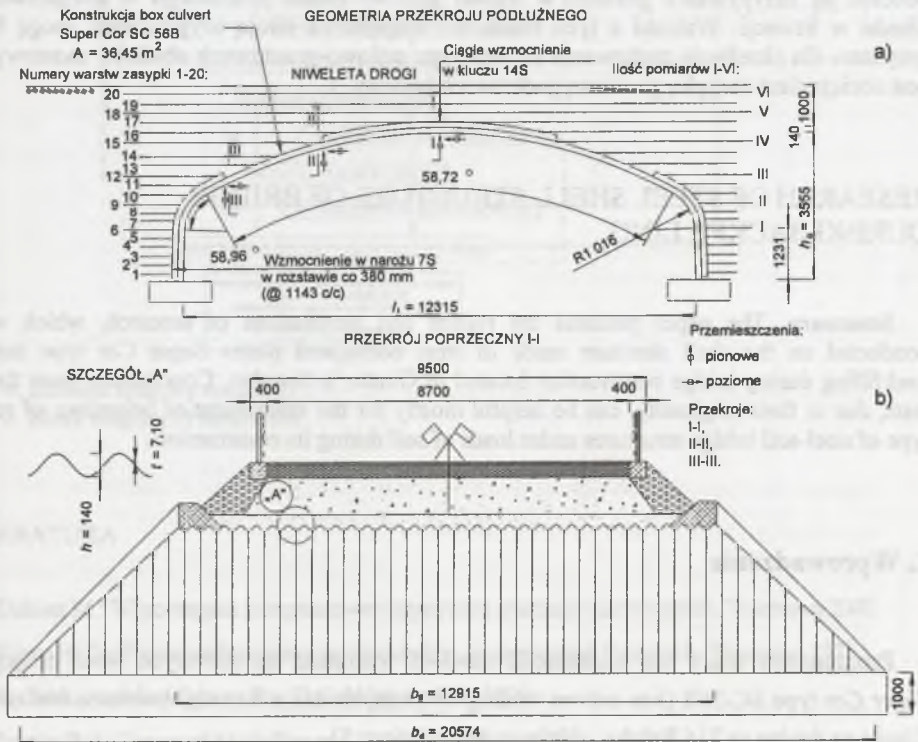
W pracy zaprezentowano zakres i sposób przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz niektóre wyniki podane w formie wykresów, otrzymane z pomiarów przemieszczeń i odkształceń podczas zasypywania powłoki gruntem. Przedstawiono również analizę wyników oraz wnioski końcowe z badań.

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań doświadczalnych powłoki mostu oraz sprecyzowanie wniosków końcowych jako podstawy określenia jej jakości i trwałości, stanu

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Zbigniew Mańko, prof. Pol. Wrocławskiej

wyświetlenia w wybranych punktach i przekrojach oraz możliwości dopuszczenia jej do dalszych prac budowlanych oraz do badań statycznych i dynamicznych, a następnie do normalnej eksploatacji [1].

Ze względu na ważność obiektu (duże obciążenia eksploatacyjne oraz strategiczne znaczenie drogi) był to pierwszy most wykonany w tej technologii w całej Skandynawii [1], [2]. Fakt, że mostów stalowych o tego typu podatnych konstrukcjach przęseł i o stosunkowo dużych rozpiętościach buduje się w Polsce i Europie stosunkowo jeszcze niewiele, w porównaniu np. z Kanadą czy USA, dlatego rozszerzono rutynowy zakres badań kontrolnych i odbiorczych tego obiektu o wszechstronne badania powłoki pod obciążeniem zasypką gruntową (możliwość wybooczenia i utraty stateczności) oraz o badania eksploatacyjne. Na poprzedniej konferencji zaprezentowano wyniki badań dynamicznych tego mostu [2], łącznie z przedstawieniem dokładnego opisu konstrukcji, stąd w niniejszej pracy opis ten pominięto.



Rys. 1. Most drogowy położony w Gimån w Szwecji wykonany ze stalowych blach falistych: a) przekrój podłużny wraz z rozmieszczeniem czujników zegarowych służących do pomiaru przemieszczeń, b) przekrój poprzeczny I-I

Fig. 1. The road bridge made of steel corrugated plates located in Gimån in Sweden: a) longitudinal section and localization of dial gauges served measuring the displacements, b) cross-section I-I



Rys. 2. Widok z góry na zmontowaną stalową powłokę mostu przed zasypywaniem
Fig. 2. Top view on the assembled steel bridge shell before backfilling

2. Zakres i sposób wykonania badań

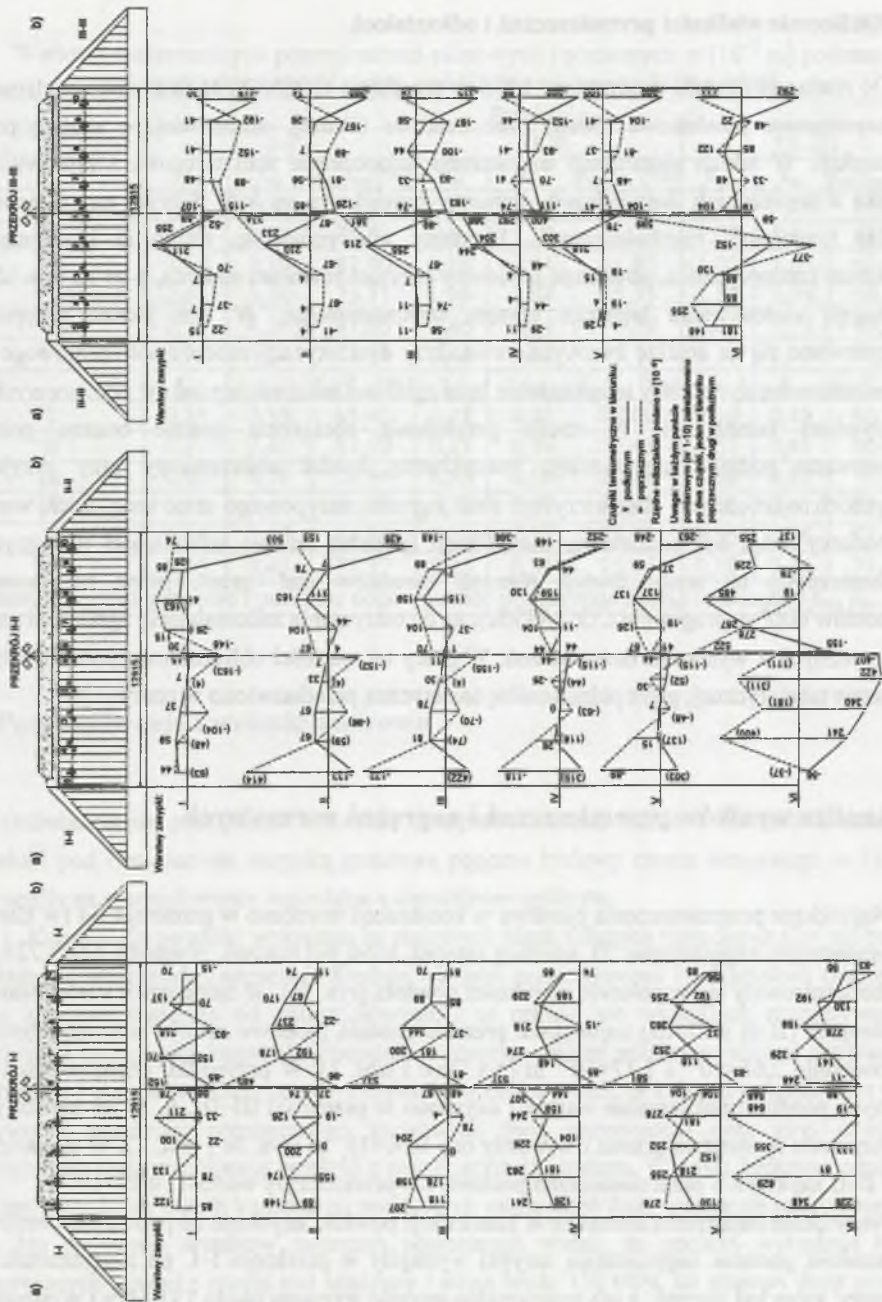
Badania wykonano na bazie dwóch układów pomiarowych, a mianowicie układu służącego do pomiaru odkształceń (tensometry) oraz przemieszczeń pionowych i poziomych (czujniki zegarowe). Ogólny schemat układu pomiarowego opisano w pracach [2], [3]. Stalową powłokę obsypano 20 warstwami zasyпки grunтовой. Pomiarów dokonywano sześciokrotnie po różnych ilościach warstw (rys. 1a). Po każdym zrealizowanym schemacie obciążenia (warstwie zasyпки) podczas budowy – w czasie zagęszczania gruntu wokół stalowej konstrukcji powłoki – przewidziano pomiary wielkości przemieszczeń poziomych i pionowych oraz odkształceń w kierunku podłużnym i poprzecznym powłoki w trzech rozpatrywanych przekrojach na długości przęsła, tj. w kluczu w środku rozpiętości teoretycznej (I–I) i na końcu wzmocnienia powłoki (II–II) oraz w jej narożu (III–III).

Pierwsze wskazania, tzw. odczyty zerowe, na urządzeniach pomiarowych wykonano przed rozpoczęciem zasypywania powłoki stalowej warstwami gruntu. Po zagęszczeniu pierwszych sześciu warstw gruntu dokonano po raz pierwszy pomiarów przemieszczeń pionowych i poziomych oraz odkształceń stalowej konstrukcji powłoki. Sześciokrotnie zrealizowano takie pomiary, przy czym pięć następnym po kolejnych 9, 12, 15, 18 i 20 warstwach zasyпки.

3. Wyniki pomiarów i obliczeń przemieszczeń oraz odkształceń

3.1. Wyniki uzyskane z badań

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych uzyskanych podczas zagęszczania gruntu wokół powłoki w kierunku poprzecznym przęsła, natomiast na rys. 4 pokazano wykresy maksymalnych odkształceń. Stosowane wykresy przemieszczeń i odkształceń w czasie zostały wykonane w zależności od liczby ułożonych warstw gruntowych i zestawione są w pracy [1].



Rys. 4. Wykresy maksymalnych odkształceń w kierunku poprzecznym przęsła podczas zagęszczania warstw gruntu wokół stalowej konstrukcji powłoki odpowiednio w przekrojach I-I, II-II i III-III: a) na górze i b) na dole fal

Fig. 4. Graphs of maximal strains in transverse direction of span during compaction layer of soil of steel shell structure in sections I-I, II-II and III-III respectively on: a) top and b) bottom, of corrugation

3.2. Obliczenie wielkości przemieszczeń i odkształceń

Do realizacji modelu dyskretnego MES w programie *COSMOS/M* zastosowano elementy dwuwymiarowe powłokowe (*Shell*) oraz belkowe (*Beam*), umożliwiające analizę pracy konstrukcji. W takich elementach rozpatrzono jednocześnie stan tarczowy i płytowy. Jak wynika z poprzednich doświadczeń, elementy powłokowe są dość dobrym narzędziem do analizy konstrukcji cienkościennych. Elementy trójwymiarowe, mimo iż kształtem są najbliższe rzeczywistości, powodują lawinowy przyrost rozmiaru zadania, a co za tym idzie, wymagają zastosowania lepszego sprzętu komputerowego. W tym jednak przypadku zdecydowano się na analizę dwuwymiarową. Przy dyskretyzacji modelu obliczeniowego 2D umieszczano węzły tak, aby ich położenie było zgodne z lokalizacją punktów pomiarowych na rzeczywistej konstrukcji. W strefie przyłożenia obciążenia (parcie boczne gruntu) zastosowano podział zagęszczony. Poszukiwany model obliczeniowy przy przyjęciu wszystkich niezbędnych charakterystyk stali i gruntu zasypowego oraz wszystkich warstw podbudowy drogi był poddawany modyfikacji (poprzez zmianę właściwości fizycznych i mechanicznych na styku dwóch różnych ośrodków stal-grunt, przez zastosowanie elementów *GAP* w programie *COSMOS/M*), aż do otrzymania zadowalającej zgodności analiz numerycznych z wynikami doświadczeń. W pracy tej wartości obliczeniowe podano jedynie w formie tabelarycznej, gdyż pełną analizę teoretyczną przedstawiono w pracy [1].

4. Analiza wyników przemieszczeń i naprężeń normalnych

Największe przemieszczenia pionowe w konstrukcji uzyskano w przekroju I-I (w kluczu) po ostatecznym zagęszczeniu 20. warstwą zasyпки, którą był tłuczeń. Wynosiły one $3,72 \times 10^{-3}$ m i koncentrowały się w połowie szerokości powłoki (rys. 3a). W następnych analizowanych przekrojach (II-II i III-III) największe przemieszczenia pionowe ustroju nośnego wynosiły odpowiednio $2,65 \times 10^{-3}$ i $1,17 \times 10^{-3}$ m (rys. 3b,c i tabl. 1). W przypadku przemieszczeń poziomych powłoki maksymalne wartości uzyskano w przekroju III-III, tj. w jej narożu przy zagęszczaniu 9. warstwą gruntu i wynosiły one $0,50 \times 10^{-3}$ m (rys. 3c i tabl. 1). W przekrojach I-I i II-II największe przemieszczenia poziome nie przekroczyły wartości $0,40 \times 10^{-3}$ m.

Największe naprężenia normalne w konstrukcji powłoki uzyskane na podstawie pomiarów odkształceń podczas zagęszczania zasyпки wystąpiły w przekroju I-I, po zagęszczeniu 20. warstwy, którą był tłuczeń, a ich maksymalna wartość wyniosła około 133 MPa i występowała w górnych włóknach fal w kierunku poprzecznym powłoki (rys. 4a). W następnych analizowanych przekrojach, tj. II-II i III-III, największe naprężenia normalne ustalone na podstawie pomiarów odkształceń w kierunku poprzecznym powłoki wystąpiły również podczas zagęszczania 20. warstwy zasyпки, a ich wielkość wyniosła odpowiednio 107 i 123 MPa (rys. 4a,b).

Tablica 1

Wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych w [10^{-3} m] podczas zagęszczania warstw gruntu wokół stalowej konstrukcji powłoki

Numery pomiarów	Przekroje								
	I-I			II-II			III-III		
	f_{vp}	f_{vo}	f_{vp}/f_{vo} [%]	f_{vp}	f_{vo}	f_{vp}/f_{vo} [%]	f_{vp}	f_{vo}	f_{vp}/f_{vo} [%]
I	1,37	1,80	76,11	0,67	1,15	58,26	1,03	1,58	65,18
II	2,34	2,98	78,52	0,83	1,50	55,33	1,07	1,82	58,79
III	2,57	3,10	82,90	1,20	1,94	61,85	1,02	1,65	61,82
IV	2,65	3,50	75,71	1,98	2,84	69,71	1,17	1,99	58,79
V	3,56	4,36	81,65	2,65	3,24	81,79	1,04	1,72	60,46
VI	3,72	5,10	72,94	2,65	3,50	75,71	1,15	1,66	69,27
	f_{hp}	f_{ho}	f_{hp}/f_{ho} [%]	f_{hp}	f_{ho}	f_{hp}/f_{ho} [%]	f_{hp}	f_{ho}	f_{hp}/f_{ho} [%]
I	0,26	0,38	68,42	0,18	0,25	72,00	0,10	0,15	66,66
II	0,27	0,40	67,50	0,21	0,29	72,41	0,33	0,41	80,48
III	0,30	0,38	78,94	0,35	0,50	70,00	0,50	0,63	76,92
IV	0,32	0,49	65,30	0,35	0,47	74,46	0,26	0,41	63,41
V	0,38	0,45	84,44	0,29	0,37	78,37	0,15	0,26	57,69
VI	0,35	0,45	77,77	0,25	0,33	75,75	0,10	0,14	71,42

Przemieszczenia pionowe i poziome odpowiednio: pomierzone f_{vp} , f_{hp} i obliczone f_{vo} , f_{ho} .

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Doświadczenia praktyczne w świetle przeprowadzonych badań i obliczeń konstrukcji powłoki pod obciążeniem zasypką gruntową podczas budowy mostu drogowego w Gimån pozwoliły na sformułowanie wniosków o charakterze ogólnym:

1. Konstrukcja powłoki wykonana ze stalowych blach falistych typu *Super Cor* nie budziła żadnych większych zastrzeżeń. Średnie wartości przemieszczeń i odkształceń (naprężeń) były znacznie mniejsze od obliczeniowych, i to prawie we wszystkich rozpatrywanych punktach i przekrojach konstrukcji powłoki. Przyczyny różnic między wynikami uzyskanymi z obliczeń i pomiarów tkwią przede wszystkim w obliczeniach, w których przyjęto zbyt małą sztywność przekroju poprzecznego konstrukcji (bez wzmocnień) oraz zbyt ostrożnie oszacowano małą współpracę powłoki z otaczającym ją gruntem. Wnioski końcowe odnośnie do zachowania się takich konstrukcji mostowych mogą mieć duże znaczenie praktyczne [4], [5]. Na podstawie wyników naprężeń normalnych widać, że poziom wyteżenia blach stanowiących powłokę mostu jest znaczący i sięga rzędu 130 MPa, co stanowi duży procent wytrzymałości obliczeniowej tej stali.

2. Porównanie otrzymanych z pomiarów przemieszczeń powłoki z obliczeniowymi wskazują na dość znaczne różnice pomiędzy tymi wielkościami w poszczególnych przekrojach na korzyść bezpiecznego zachowania się konstrukcji stalowej i wynoszą one w granicach 55,33–84,44%.

Tak duże różnice wynikać mogą z lepszej, niż pierwotnie zakładano w obliczeniach, współpracy pomiędzy elementami konstrukcji powłoki z otaczającym ją gruntem.

3. Niezwykle ważną sprawą w tego typu stalowo-gruntowych konstrukcjach mostowych jest zapewnienie odpowiedniej stateczności stalowej powłoki podczas zagęszczania gruntu zasypowego wokół jej konstrukcji. Cienka konstrukcja powłoki jest bardzo podatna na jakiegokolwiek siły działające na nią (szczególnie na boczne parcie gruntu). Przy pierwszych zagęszczanych warstwach klucz powłoki wypiętrza się do góry, a ścianki boczne powłoki przy fundamencie kierują się do środka ustroju. W miarę zagęszczania następnych warstw gruntu zasypowego elementy boczne konstrukcji powłoki zaczynają przemieszczać się w kierunku gruntu, a ich część górna (klucz) przemieszcza się w dół. Jednocześnie niezbędną jest także pomiar przemieszczeń poziomych w dwóch kierunkach prostopadłych do siebie, co pozwoli na lepszą ocenę zachowania się powłoki w czasie zasypywania gruntem z uwagi na dość znaczne przemieszczenia w kierunku poziomym, które jako imperfekcje geometryczne mogą szybciej przyczynić się do utraty stateczności przez cienką powłokę stalową.

LITERATURA

1. Bęben D., Mańko Z.: Budowa najdłuższego mostu drogowego w Skandynawii wykonanego ze stalowych blach falistych w technologii Super Cor. *Bezpieczne Drogi*, nr 11(59), Warszawa, listopad 2003, s. 18–22.
2. Bęben D.: Badania dynamiczne konstrukcji mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych. *IV Konferencja Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* z. 101, nr kol. 1595, Gliwice–Wisła, 20–21 listopada 2003, s. 79–86.
3. Bęben D., Mańko Z.: Badania mostu drogowego wykonanego ze stalowych blach falistych typu Super Cor. *XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2002 „Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa”*, Opole–Krynica, 15–20 września 2002, t. 4, s. 167–174.
4. Vaslestad J.: Long-span Corrugated Steel Structure at Dover. Observations of Earth Pressure Stresses, Deformations and Temperature. Internal Report no. 1134, *Norwegian Public Roads Administration, Norwegian Road Research Laboratory*, Oslo 1987.
5. Wysokowski A., Korusiewicz L., Kunecki B.: Sprawozdanie z wykonanych badań dla konstrukcji przepustów w systemie MultiPlate i rur DV/AROT OPTIMA. Część I: MultiPlate (TW 26999/W-374), IBDiM, Żmigród–Węglewo, luty 1999.