



АРХІТЕКТУРА, БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.014:624.21

<https://doi.org/10.31713/vt3202424>

Абрамов В. М., к.т.н., доцент (Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), vr09@i.ua)

ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ РОЗРАХУНКУ АРКОВИХ СПОРУД З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ ПІД ДОРОЖНІМ НАСИПОМ

Розглянуто питання аналізу нормативної і науково-технічної літератури деяких країн світу, яка є у вільному доступі, з питань проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу на предмет наявності аналітичної методики несучої здатності таких споруд саме з аркою напівкруглої форми з прикладом практичного застосування цієї методики з виконанням порівняння результатів, отриманих за такої методикою і за методикою, яку розроблено для спрощеного розрахунку таких споруд і викладено у цій статті. Встановлено, що в такої методики, особливо з прикладами її практичного застосування, немає. Показано, які відмінності вихідних положень є у наявній методиці порівняно з методикою, відповідних норм України, зокрема стосовно вимог щодо критеріїв якості виконання ґрунтового насипу у зоні контакту із гнучкою гофрованою спорудою, стосовно врахування роботи гнучкої арки на згин, стосовно правил визначення навантаження на арку від ваги ґрунту над нею тощо. Для порівняння результатів розрахунку несучої здатності розглянутої споруди різними способами виконано і викладено приклад розрахунку за спрощеною аналітичною методикою, яку розроблено і викладено у цій статті. Ця спрощена аналітична методика, яку використано для порівняння результатів, базується на відомих загальноприйнятих закономірностях будівельної механіки і гіпотезі механіки ґрунтів щодо співвідношення величини переміщення конструкції у бік ґрунту і величини пружного опору ґрунту таким переміщенням. За цією методикою несуча здатність розглянутої споруди приймається як сума її власної несучої здатності (поза ґрунтом) у пружній стадії роботи і додатка до неї за рахунок опору ґрунту переміщенням арки в її допустимому деформованому стані при заміні її на «механізм» з повними шарнірами у місцях найбільших напружень і деформацій. За даними порівняння прикладів розрахунку

розглянутої споруди різними способами показано, що за спрощеною аналітичною методикою, яку розроблено на підставі простої зрозумілої розрахункової схеми і яку викладено у цій статті, результати майже не відрізняються.

Ключові слова: аркова конструкція; гофрований метал; несуча здатність; дорожній насип.

Стан питання і аналіз публікацій. Нормативно-методичні документи з проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу в Україні розроблено у 2007 році [1; 2]. Вони містять детальне викладення загальних питань проєктування й будівництва таких споруд. Але у частині розрахунків є потреба доповнювати і удосконалювати ці документи, тому що, наприклад, формула оцінки несучої здатності придатна тільки для споруд у формі круглих труб і тільки для випадку дії нормального зусилля, без урахування згину. Відсутня інформація стосовно розрахунку споруд аркової та інших форм. Проте саме аркова напівкругла форма таких споруд є найбільш простою для проєктування й будівництва через те, що при цьому використовуються гофровані елементи однакового викривлення, зручні для їхнього транспортування і монтажу.

Мета і завдання роботи. Виконати аналіз відповідної нормативної і науково-технічної літератури деяких країн світу, яка є у вільному доступі, з виявленням методики і прикладів розрахунку саме споруд з напівкруглою аркою та здійснити порівняння результатів розрахунку за існуючою методикою і за методикою спрощеного аналітичного розрахунку, яку розроблено і викладено у цій роботі, є метою і завданням цієї статті.

Основна частина. Огляд і аналіз спеціальної нормативної і науково-технічної літератури з питань проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу, яка є у вільному доступі, видавництва країн Північної Америки і деяких європейських країн (Швеції, Польщі, України [1–5]), показує, що відомості стосовно розрахунків за несучою здатністю таких споруд саме аркової форми з наведенням аналітичної методики і прикладів її практичного використання є тільки в нормах Американського інституту чавуну та сталі (видання Канади, Інституту гофрованих сталевих труб), 2007 р. [3].

Слід зазначити деякі суттєві відмінності вихідних положень методів розрахунку розглянутих споруд в нормах [3], від відповідних норм України [1]:

- у нормах [3] вимоги до якості виконання ґрунтового насипу у зоні контакті зі спорудою обмежено вказівкою про



забезпеченням його ущільнення не нижче 91–95% стандартного ущільнення, без вказання необхідного мінімального значення модуля пружності (у прикладах розрахунків [3] використано значення 12 МПа, що значно менше мінімального значення 30 МПа, вказаного у [1]);

- на відміну від норм [1] у нормах [3] розглядається робота гофрованих споруд і на нормальну силу і на згинальний момент;
- розрахунок виконується і для стадії експлуатації і для стадії будівництва;
- навантаження від ґрунту приймається з урахуванням також і ґрунту у зонах від рівня п'ят до рівня верху склепіння у межах його проєкції.

Розділ 6 норм США і Канади [3] містить приклади розрахунків за несучою здатністю металевих гофрованих дорожніх споруд різних форм і розмірів зокрема і аркової напівкруглої форми.

У прикладі 5 норм [3] розглянуто напівкруглу арку із гофрованих металевих елементів з гофрами 152 × 51 × 4 (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм) радіусом 3,05 м під насипом висотою над спорудою 1,1 м із ґрунту з питомою вагою 22 кН/м³ при тимчасовому навантаженні від тривісного автомобіля вагою 300 кН. За результатами наведеного у нормах [3] розрахунку показано, що несучої здатності арки з такими параметрами і в таких умовах достатньо зі значним запасом.

Для порівняння виконано розрахунок арки з такими ж параметрами за способом, який розроблено для спрощених практичних розрахунків і який викладено нижче.

За цим способом розрахунок зводиться до перевірки умови:

$$p + q \leq (p_0 + q_z)m, \quad (1)$$

де $p + q$ – розрахункове рівномірно розподілене вздовж проєкції арки у рівні її верху навантаження, відповідно, постійне (від ваги конструкцій і ґрунту насипу над спорудою) і тимчасове (від ваги транспортних засобів), на одиницю ширини арки (1 м);

$p_0 + q_z$ – відповідно, власна (поза ґрунтом) несуча здатність арки і її додаток за рахунок опору ґрунту переміщенням стінок гнучкої арки у бік ґрунту в допустимому деформованому стані, тобто за деформаційним критерієм (при допустимому прогині);

m – коефіцієнт умов роботи.

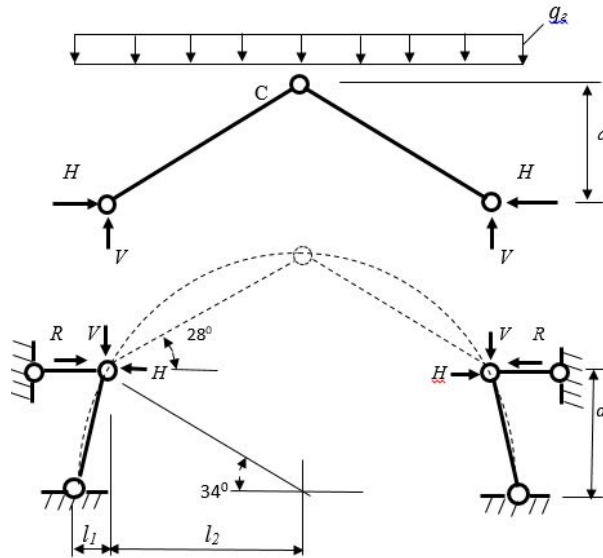


Рис. 2. Схема до визначення додатка до несучої здатності арки під насадом від опору ґрунту

Величина q_z визначається із умови статичної рівноваги системи, яку показано на рис. 2, і рівності нулю суми моментів відносно точки С від дії сил V, H, R і навантаження q_z на верхню частину схеми арки та на нижні елементи арки (у межах l_1) за формулою:

$$q_z = \frac{Ra}{0,5l_2^2 - (0,5l_1^2 + l_2l_1)\frac{a}{d}}, \quad (3)$$

де a, l_1, l_2, d – параметри схеми арки, які визначаються за формулами:

$$a = l_2 \operatorname{tg} 28^\circ = 0,53l_2, \quad (4)$$

$$l_1 = r - r \cos 34^\circ = 0,17r, \quad (5)$$

$$l_2 = r \cos 34^\circ = 0,83r, \quad (6)$$

$$d = r \sin 34^\circ = 0,56r. \quad (7)$$

Рівнодіюча R опору ґрунту з модулем деформації (компресійним) E і коефіцієнтом Пуассона μ визначається за формулою:

$$R = kA, \quad (8)$$

де $k = \frac{E}{(1 + \mu)r}$ – коефіцієнт пружного опору ґрунту (формула

Б.Г. Гальоркіна);

A – площа (за умовами плоскої задачі) епюри опору ґрунту, яку визначають як сумарну площу двох трикутників висотою h_1 і h_2 (рис. 1) при кутових координатах (від рівня п'ят) низу, максимуму й верху епюри, відповідно 6° , 34° і 51° , за формулою:

$$A = 0,5\delta(h_1 + h_2), \quad (9)$$

де $h_1 + h_2 = r(\sin 51^\circ - \sin 6^\circ) = 0,68r$,

$$\delta = 0,587 f_{sp}.$$

f_{sp} – граничний прогин напівкруглої арки радіусом r , якій визначається за умови не перевищення можливим місцевим осіданням насипу з дорожнім покриттям над гнучкою арковою спорудою (при відстані h від верху арки до верху покриття) допустимої величини S_{sp} згідно з методикою [7] за формулою:

$$f_{sp} = 1,15S_{sp}(0,87 + (\frac{h}{r} + 0,5)0,67). \quad (10)$$

Перевіримо виконання умови (1) для напівкруглої аркової споруди з вихідними даними, які:

- такі ж як у прикладі 5 [3]: $r = 3,05$ м; розмір гофрів $152,4 \times 50,8 \times 4$ (відповідно довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм); $h = 1,1$ м; границя текучості металу (і розрахунковий опір R_y) $\sigma_m = 230$ МПа; $W = 0,543$ см³/см; власна вага конструкцій $0,72$ кН на 1 м кв. проєкції арки; $q = 23,0$ кПа (табл. 6.8 [3]);

- інші ніж у прикладі 5 [3], або відсутні у ньому: $E = 30$ МПа; $\mu = 0,35$; питома вага ґрунту 19 кН/м³; коефіцієнт надійності $1,3$ для навантаження від ваги ґрунту, $1,05$ від ваги металу і $1,1$ для тимчасового навантаження; $S_{sp} = 4$ см (для автомобільної дороги другої категорії [7]); $m = 0,7$ (з урахуванням складних умов роботи споруди під насипом).

Використовуючи формули (1)–(10), для арки шириною 1 м, отримаємо:

$$P_0 = \frac{2300 \times 54,3}{0,1 \times 305^2} = 13,4 \text{ кгс/см} = 1,340 \text{ тс/м} = 13,400 \text{ кН/м},$$

$$f_{sp} = 1,15 \times 4(0,87 + (\frac{1,1}{3,05} + 0,5)0,67) = 6,655 \text{ см},$$

$$\delta = 0,587 \times 6,655 = 3,906 \text{ см},$$

$$h_1 + h_2 = 0,68 \times 305 = 207,400 \text{ см,}$$

$$A = 0,5 \times 3,906 \times 207,400 = 405,052 \text{ см}^2,$$

$$R = \frac{300}{(1+0,35)305} \times 405,052 \times 100 = 29512,0 \text{ кгс} = 29,512 \text{ тс} = 295,12 \text{ кН,}$$

$$d = 0,56 \times 305 = 170,800 \text{ см,}$$

$$l_1 = 0,17 \times 305 = 51,850 \text{ см,}$$

$$l_2 = 0,83 \times 305 = 253,150 \text{ см,}$$

$$a = 0,53 \times 253,150 = 134,170$$

$$\text{см, } q_2 = \frac{29512,0 \times 134,170}{0,5 \times 253,150^2 - (0,5 \times 51,850^2 + 253,150 \times 51,850)} \frac{134,170}{170,800} =$$

$$191,570 \text{ кгс/см} = 19157,0 \text{ кгс/м} = 191,570 \text{ кН/м,}$$

$$p + q = 1,9 \times 1,1 \times 1,3 + 0,072 \times 1,05 + 2,3 \times 1,1 = 2,717 + 0,076 + 2,530 =$$

$$53,230 \text{ кгс/см} = 5,323 \text{ тс/м} = 53,230 \text{ кН/м.}$$

Умова (1) задовольняється:

$$p + q = 53,230 \text{ кН/м} < (p_0 + q_2)0,7 = (13,400 + 191,570)0,7$$

$$= 143,479 \text{ кН/м.}$$

Стійкість арки при дії тільки осьової сили стиску $N = (p + q)r$ її стінки з площею перерізу $A_0 = 0,497 \text{ см}^2/\text{см}$, перевірено за формулою

$$\frac{N}{A_0 \varphi} \leq R_y m, \quad (11)$$

$$\text{де } \varphi = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_m} = \frac{2\sqrt{kE_0 J}}{A_0 \sigma_m} = \frac{2\sqrt{0,729 \times 2100000 \times 150,7}}{49,7 \times 2300} = 0,27 \text{ – коефіцієнт}$$

пониження несучої здатності для перевірки на стійкість стінки арки з модулем пружності сталі E_0 і моментом інерції перерізу J при визначенні критичного напруження ($\sigma_{кр}$) згідно з [8].

Умова (11) також задовольняється (коефіцієнт умов роботи $m = 0,9$):

$$\frac{N}{A_0 \varphi} = \frac{53,23 \times 305}{49,7 \times 0,27} = 1209,86 \text{ кгс/см}^2 < 0,9 R_y = 0,9 \times 2300 =$$

$$2070,00 \text{ кгс/см}^2.$$

При цьому коефіцієнт K_1 запасу складає від $K_1 = 2070,00/1209,86 = 1,71$ до $K_1 = 143,479/53,230 = 2,69$, що (при середньому значенні 2,20) майже не відрізняється від аналогічного коефіцієнту K_2 в прикладі 5 способу, з яким порівнювали (згідно з даними п. 8 розд. 6 норм [3], $K_2 = 1,0/0,456 = 2,19$).

Висновки. Встановлено, що нормативна і науково-технічна література з питань проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу деяких країн Америки і Європи, яка є у вільному доступі, не містить аналітичної методики і прикладів розрахунку несучої здатності саме аркових споруд з гофрованого металу під дорожнім насипом, крім норм Американського інституту чавуну та сталі, США (видання Канади, Інституту гофрованих сталевих труб, 2007 р.).

Показано, що результати розрахунку розглянутої споруди з гофрованого металу з напівкруглою аркою за способом, який розроблено для спрощених аналітичних розрахунків таких споруд і викладено у цій роботі, майже не відрізняються від результатів за способом, з яким виконано порівняння.

Спосіб, який розроблено для розрахунку розглянутих споруд аркової форми, може бути прийнятий за основу для розробки способів розрахунку споруд інших форм (круглої, еліптичної та ін.).

1. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проєктування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Відомчі будівельні норми України. Київ : Укравтодор, 2007. 49 с. 2. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проєктування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ : Укравтодор; Держдор НДІ, 2007. 124 с. 3. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute, 2007. 470 p. 4. Petterson L., Sundquist H. Design of Soil-Steel Composite Bridge. Stockholm : KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. 5. Zalecenia Projektowe i Technologiczne Dla Podatnych Konstrukcji Inzynierskich z Blach Falistych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2004. 74 с. 6. Клейн Г. К. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики (статика стержневых систем). М. : Высшая школа, 1980. 348 с. 7. Абрамов В. М. Граничні деформації дорожніх споруд з гофрованого металу. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 1(101). С. 143–149. 8. Виноградов С. В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. М. : Стройиздат, 1980. 135 с.

REFERENCES:

1. VBN V.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proiektuvannia ta budivnytstvo sporud z metalevykh hofrovanykh konstruktsii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. Kyiv : Ukravtodor, 2007. 49 s. 2. Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proiektuvannia ta budivnytstvo sporud z metalevykh hofrovanykh konstruktsiyi na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. Kyiv : 244



Ukravtodor; Derzhdor NDI, 2007. 124 s. **3.** Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute, 2007. 470 p. **4.** Petterson L., Sundquist H. Design of Soil-Steel Composite Bridge. Stockholm : KTN Royal Institute of Technology, 2007. 98 p. **5.** Zalecenia Projektowe i Technologiczne Dla Podatnych Konstrukcji Inzynierskich z Blach Falistych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2004. 74 c. **6.** Klein H. K. Rukovodstvo k prakticheskim zaniatyam po kursu stroytelnoi mekhanyky (statyka sterzhnevyykh system). M. : Vysshaya shkola, 1980. 348 s. **7.** Abramov V. M. Hranychni deformatsii dorozhnykh sporud z hofrovanoho metalu. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. Nauk. Prats. Rivne : NUVHP, 2023. Vyp. 1(101). S. 143–149. **8.** Vynogradov S. V. Raschet podzemnykh truboprovodov na vneshnye nahruzky. M. : Stroiyzdat, 1980. 135 s.

Abramov V. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), vr09@i.ua)

COMPARISON OF CALCULATION METHODS FOR ARCHED STRUCTURES MADE OF CORRUGATED METAL UNDER A ROAD EMBANKMENT

The issue of the analysis of the normative and scientific and technical literature of some countries of the world, which is freely available, on the design of road structures from corrugated metal for the availability of an analytical methodology for the bearing capacity of such structures with a semicircular arch, with an example of the practical application of this methodology with a comparison of the results obtained by this method and by the method developed for the simplified calculation of such structures and described in this article. It has been established that in most cases there is no such method, especially with examples of its practical application. It is shown what are the differences in the initial provisions of the existing methodology compared to the methodology of the corresponding norms of Ukraine, in particular, regarding the requirements for quality criteria for the execution of the soil embankment in the contact zone with the flexible corrugated structure, regarding the consideration of the work of the flexible arch for bending, regarding the rules for determining the load on the arch from feet of soil above it, etc. To compare the results of the calculation of the bearing capacity of the building in question, an example of calculation using a simplified analytical method, which was developed and presented in this article, was performed and presented in various ways. According to this

method, the load-bearing capacity of the structure in question is taken as the sum of its own load-bearing capacity (outside the soil) in the elastic stage of operation and the addition to it due to the resistance of the soil by moving the arch in its permissible deformed state when replacing it with a "mechanism" with full hinges in the places of the largest stresses and strains. According to the data of the comparison of the examples of the calculation of the construction in question by various methods, it is shown that according to the simplified analytical method, which was developed on the basis of a simple and understandable calculation scheme and which is presented in this article, the results are almost the same.

***Keywords:* arch structure; corrugated metal; bearing capacity; road embankment.**