



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

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ АРКОВОЇ МОСТОВОЇ СПОРУДИ З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто питання схеми роботи і спрощеного практичного розрахунку аркових мостових споруд з металевих гофрованих конструкцій (МГК) при несиметричному навантаженні. Це особливо актуально у випадку малої висоти дорожнього насипу над верхом споруди і порівняно великому (для таких споруд) прольоту, тобто, коли навантаження від транспортного засобу діє тільки на частину довжини прольоту арки. Схему роботи аркової мостової споруди розглянуто за умовами плоскої задачі – для арки одиначної ширини, «вирізаної» зі склепіння у найбільш навантаженій його частині. Для розрахунку використано стрижневу розрахункову модель і метод скінчених елементів (МСЕ). На прикладі розрахунку споруди у формі напівкруглої арки з МГК показано схему переміщень арки при несиметричному навантаженні. Показано, зокрема, як пов'язані значення прогину з переміщеннями арки у бік ґрунту і схему формування пружного опору ґрунту. За граничний стан системи «споруда – ґрунт» прийнято досягнення прогину арки, при перевищенні якого можливо небезпечне місцеве осідання поверхні дорожнього покриття над спорудою. Для визначення частки зовнішнього навантаження, яке сприймається тільки опором ґрунту, арку прийнято як «механізм» з жорстких дисків, які з'єднано шарнірами у місцях концентрації деформацій і напружень. При цьому геометричну незмінність такого «механізму» і статичну рівновагу системи «споруда – ґрунт» забезпечує додатковий зв'язок – стрижень, що моделює пружний опір ґрунту. Зусилля в цьому стрижні прийнято за величину рівнодіючої пружного опору ґрунту при допустимому значенні прогину арки. Величина зовнішнього навантаження, яке сприймається тільки опором ґрунту, розглядається як додаток до несучої здатності арки в системі «споруда – ґрунт» за рахунок опору ґрунту, якщо при цьому прогин арки залишається у межах допустимого.

Ключові слова: аркова мостова споруда; опір ґрунту;

переміщення; навантаження.

Вступ. Аркові мостові споруди з МГК (малі мости, шляхопроводи) – це ще порівняно нові об'єкти для транспортного будівництва багатьох країн. Масове поширення таких споруд і накопичення досвіду їх проєктування та будівництва в багатьох країнах зараз знаходиться ще на початковій стадії. Це стосується і транспортного будівництва України. Тому досить важливим є продовження досліджень і розробок з метою доповнення уявлень про особливості роботи цих споруд сумісно із ґрунтом дорожнього насипу. Це повинно бути основою для удосконалення і доповнення відповідних нормативних і методичних документів. Особливо в частині розрахунків, зокрема і на основі коректних та зрозумілих вихідних положень і розрахункових схем, у тому числі і спрощених.

Стан питання і аналіз публікацій. Для якісного проєктування й масового будівництва аркових мостових споруд з МГК потрібна наявність достатньо розвинутої нормативно-методичної бази.

В Україні перші нормативно-методичні документи з проєктування і будівництва дорожніх споруд з МГК було створено у 2007 р. [1; 2]. Формально ці документи містять необхідні дані про вимоги та умови створення таких споруд різних форм і розмірів. Вони містять всі основні вихідні положення щодо проєктування і будівництва, враховують особливості об'єктів з МГК під дорожнім насипом, як систем «споруда – ґрунт».

Але у частині розрахунків міцності й стійкості споруд з МГК вказані документи потребують удосконалення – корегування і доповнення, наприклад:

- спосіб перевірки за міцністю наведено тільки для круглих труб і чомусь тільки за зусиллям від стискання (що має сенс тільки за умови рівності вертикального і горизонтального навантажень) при тому, що труба в ґрунті працює водночас і на згин і на стискання, тому що навантаження нерівномірне, переважаючим є вертикальне;

- зовсім не розглянуто питання розрахунку споруд аркової та інших форм, крім загальних рекомендацій, використано метод скінчених елементів (МСЕ), а також розрахунок аркових споруд при несиметричному навантаженні і малій висоті насипу.

Мета і завдання роботи. Показати деякі можливості розширення уявлень про роботу аркової споруди з МГК під ґрунтовим насипом, надати пропозиції, які можуть бути використані при розробці доповнень існуючих нормативно-методичних документів у частині розрахунків таких споруд, зокрема при



несиметричному навантаженні і малій висоті ґрунтового насипу з використанням спрощених розрахункових схем.

Основна частина. Питання розрахунку аркових мостових споруд з МГК при несиметричному навантаженні і малій висоті дорожнього насипу розглянуто на прикладі півколової арки з радіусом $r = 12$ м (тобто з отвором малого мосту 24 м).

Порядок розрахунку розглянуто на конкретному прикладі. Прийнято арку з гофрама 380×140×5 (відповідно довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм) з площею перетину хвилі 0.698 см²/см). Метал арки – сталь з розрахунковим опором 240 МПа. Висота насипу від верху споруди до верху дорожнього покриття $h = 1$ м. Постійне навантаження – від маси конструкцій і маси ґрунту насипу з питомою вагою 19 кН/м³ (1.9 т/м³), модулем деформації $E = 20$ МПа і коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0.35$. Тимчасове рухоме навантаження за схемою НК-100, згідно з [3].

За умовами плоскої задачі розглянуто арку шириною, яка дорівнює довжині хвилі гофрів (380 мм). Розрахункову схему напівкруглої арки для розрахунку за МСЕ (і ПК Lira) прийнято зі 32 стрижнів з розмірами умовного прямокутного перетину (380×59,1 мм), при яких схема арки за згинальною жорсткістю еквівалентна гофрованій арці з прийнятими гофрама.

Постійне навантаження p від маси ґрунту (з коефіцієнтом надійності 1.3) над аркою прийнято рівномірно розподіленим в рівні верху арки вздовж її проєкції ($p = 1.9 \times 1 \times 1.3 \times 0.38 = 0.939$ тс/м). Навантаження тимчасове q від транспортного засобу НК-100 прийнято розподіленим в ґрунті під кутом 30° до вертикалі [3] (в дорожньому покритті, h_n , під кутом 45°), також у рівні верху арки і прикладено несиметрично – у центрі півпрольоту.

Значення тимчасового навантаження q , від транспортного засобу НК-100, яке отримане за вказаними вище умовами розподілення, з урахуванням величини площі (5.044×2.044=10.31 м²), на яку передається це навантаження в рівні верху арки (на глибині h) у центрі проєкції півпрольоту, з коефіцієнтом надійності 1.1, на одну хвилю гофрів (на арку шириною 380 мм) складає: $q = (12.5 \text{ тс} \times 4 \times 1.1 / 10.31 \text{ м}^2) \times 0.38 \text{ м} = 2.03 \text{ тс/м} = 20.3 \text{ кН/м}$ (рис. 1).

Власна несуча здатність арки (поза ґрунтом) з параметрами, які вказані вище, в пружній стадії її роботи, переважно на згин, дуже мала. Симетрична і несиметрична складові граничного розподіленого навантаження на арку поза ґрунтом, у рівні її верху, за результатами розрахунку дорівнюють, відповідно 0.078 тс/м і 0.081 тс/м.

Для визначення повної несучої здатності арки в системі «споруда – ґрунт» спочатку виконано розрахунок арки від навантаження p (симетрична складова) і q (несиметрична складова), при збереженні співвідношення між ними, з величиною, при якій прогин, тобто вертикальна складова переміщень всередину, приблизно дорівнює допустимому значенню (59 мм) за методикою [4] для визначення переміщень арки у бік ґрунту при допустимому прогині. Результати цього розрахунку – схему векторів переміщень вузлів, схеми арки і епюру їх переміщень показано на рис. 2 і рис. 3.

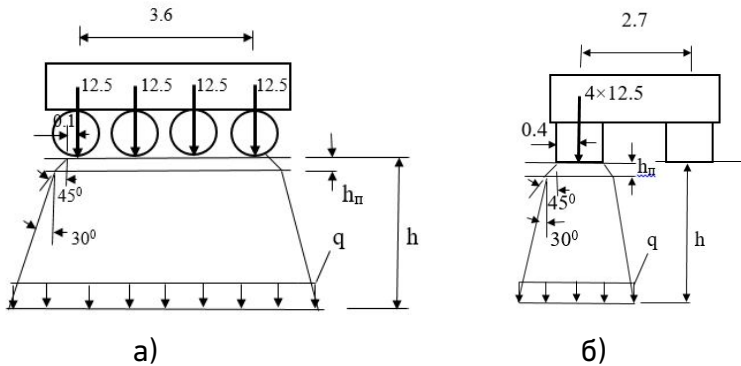


Рис. 1. Схеми до визначення навантаження на арку під насипом від транспортного засобу НК-100, переріз вздовж (а) і поперек (б) насипу (навантаження в тс, розміри в м)

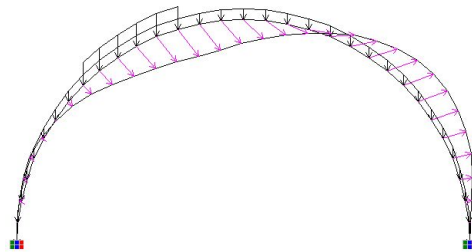


Рис. 2. Схема векторів переміщень арки при несиметричному навантаженні

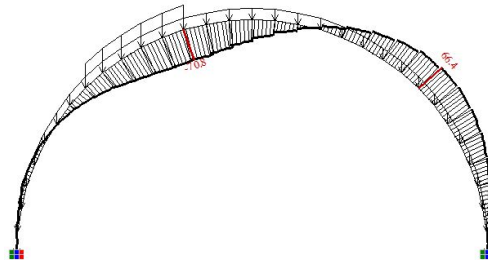


Рис. 3. Епюра переміщень арки при несиметричному навантаженні (максимальні значення – переміщення всередину 70.8 мм, вертикальна складова 59 мм, переміщення у біг ґрунту 66.4 мм)

Далі визначено площу епюри переміщень арки у бік ґрунту при допустимому прогині. Цю площу знайдено звичайними геометричними рішеннями як суму площ окремих чотирикутних (чи трикутних) фігур з координатами вузлів стрижневої моделі за МСЕ арки (i кутів фігур) до і після переміщень, згідно зі схемою на рис. 4.

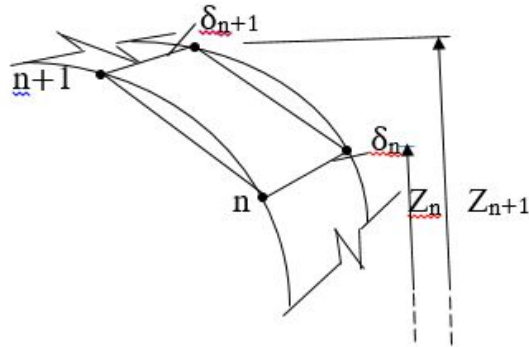


Рис. 4. Схема (фрагмент епюри переміщень) до визначення площі епюри переміщень арки у бік ґрунту ($n, n + 1$ – номери вузлів стрижневої моделі арки; $\delta, \delta + 1$ – переміщення вузлів $n, n + 1$; $Z, Z + 1$ – вертикальні координати вузлів $n, n + 1$)

Для прийнятих вихідних даних і розмірів арки за результатами розрахунку отримано: площа A епюри (і об'єм при ширині 1 м) переміщень арки у бік ґрунту, $A = 0.309 \text{ м}^2$; коефіцієнт пастелі ґрунту при $E = 20 \text{ МПа} = 2000 \text{ т/м}^2$, $\mu = 0.35$, $r = 12 \text{ м}$, за формулою Б. Г. Гальоркіна [5], дорівнює $k = 2000 / ((1 + 0.35)12) = 123.46 \text{ тс/м}^3$ (1234.60 кН/м^3); рівнодіюча R пружного опору ґрунту, для арки шириною 0.38 м, згідно з [5], складає $R = 0.38 A k = 0.38 \times 0.309 \times 123.46 = 14.5 \text{ тс}$ (145.0 кН).

Величину повної несучої здатності арки в системі «споруда – ґрунт» (гранично допустиме несиметричне навантаження $p_{гр}$ і $q_{гр}$) визначено за допомогою схеми арки як «механізму» з повними шарнірами (чотири шарніри) у місцях найбільших напружень від вигину, геометричну незмінність якого забезпечує додатковий зв'язок-стрижень, розташований відповідно до вектора переміщень у вузлі з найбільшим переміщенням в бік ґрунту, що моделює його опір (рис. 5).

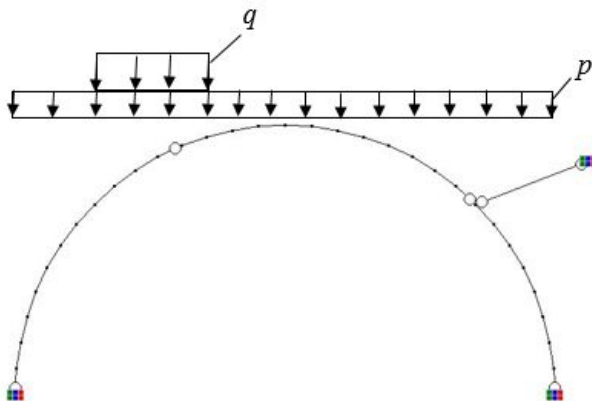


Рис. 5. Схема арки як «механізму» з повними шарнірами (чотири шарніри) і зі зв'язком-стрижнем, який моделює опір ґрунту

Зусилля в стрижні, який моделює опір ґрунту, приймається рівним визначеній рівнодіючій опорі ґрунту $R = 14.5$ тс при допустимому прогині. Звичайним підбором (зі збереженням співвідношення між p і q) визначена величина граничних навантажень $p_{гр}$ і $q_{гр}$, які відповідають стану статичної рівноваги «механізму». Величини цих навантажень складають: $p_{гр} = 2.389$ тс/м і $q_{гр} = 5.070$ тс/м (рис. 6) при зусиллі у зв'язку-стрижні 14.5 тс, тобто рівному визначеній раніше рівнодіючій опорі ґрунту $R = 14.5$ тс (рис. 6).

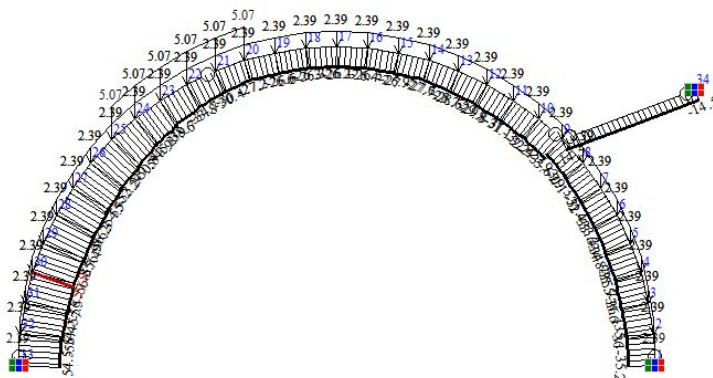


Рис. 6. Результат визначення граничних значень $p_{гр}$ і $q_{гр}$, при яких зусилля у стрижні, що моделює опір ґрунту, дорівнює $R = 14.5$ тс і еюра нормального (повздовжнього) зусилля у арки (максимальне значення 57,8 тс)

Розрахункові значення навантажень p і q , які визначено раніше, (відповідно, 0.961 тс/м і 2.03 тс/м) не перевищують гранично допустимих значень, $p_{гр}$ і $q_{гр}$ (відповідно, 2.39 тс/м і 5.07 тс/м) навіть без урахування власної несучої здатності арки. При цьому

120



напруження від повздовжнього зусилля також не перевищують розрахункового опору метала арки: $57800/0.698 \times 38 = 2179.16 \text{ кгс/см}^2 = 217.916 \text{ МПа} < 2400 \text{ кгс/см}^2 = 240 \text{ МПа}$.

Висновки. Викладені дані доповнюють уявлення про роботу аркових мостових споруд з гофрованого металу при несиметричному навантаженні і низькому насипу та показують один з можливих способів їх спрощеного розрахунку.

Існуючі нормативні і методичні документи з проектування й будівництва таких споруд доцільно доповнювати і удосконалювати у частині розрахунків, у тому числі і з використанням спрощених розрахункових схем.

1. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування 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. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Укравтодор. К. : ДерждорНДІ, 2007. 124 с.
3. ДБН В.1.2-15: 2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Державні будівельні норми України. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 66 с.
4. 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.
5. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская. М. : Транспорт, 1973. 120 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. Ukravtodor. K. : DerzhdorNDI, 2007. 124 s.
3. DBN V.1.2-15: 2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. 66 s.
4. Abramov V. M. Hranychni deformatsii dorozhnikh sporud z hofrovanoho metalu. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2023. Vyp. 1 (101). S. 143–149.
5. Metallicheskye hofryrovannye truby pod nasypiamy / N. M. Kolokolov, O. A. Yankovskiy, K. B. Shcherbyna, S. E. Cherniakhovskaia. M. : Transport, 1973. 120 s.

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

BEARING CAPACITY OF ARCH BRIDGE STRUCTURE MADE OF CORRUGATED METAL UNDER UNSYMMETRICAL LOADING

The issue of the scheme of work and simplified practical calculation of arched bridge structures made of metal corrugated structures (MCS) under asymmetric loading is considered. This is especially relevant in the case of a small height of the road embankment above the top of the structure and a relatively large (for such structures) span. That is, when the load from the vehicle acts only on part of the length of the arch span. The scheme of operation of an arched bridge structure is considered under the conditions of a flat problem – for an arch of unit width, "cut out" from the vault in its most loaded part.

The rod calculation model and the finite element method (FEM) were used for the calculation. On the example of the calculation of a structure in the form of a semi-circular arch from MCS, the diagram of the movement of the arch under asymmetric loading is shown. It is shown, in particular, how the values of the deflection are related to the movements of the arch towards the ground and the scheme of the formation of the elastic resistance of the ground. The limit state of the "building – soil" system is the achievement of the arch deflection, exceeding which dangerous local subsidence of the surface of the road surface above the building is possible.

To determine the fate of the external load, which is perceived only by soil resistance, the arch is taken as a "mechanism" made of hard disks, which are connected by hinges in places of concentration of deformations and stresses. At the same time, the geometric immutability of such a "mechanism" and the static balance of the "building – soil" system is provided by an additional connection – a rod simulating the elastic resistance of the soil. The force in this rod is taken as the value of the equivalent elastic resistance of the soil at the permissible value of the arch deflection. The magnitude of the external load, which is perceived only by the resistance of the soil, is considered as permissible, if at the same time the deflection of the arch remains within the permissible limits.

Keywords: arch bridge construction; soil support; movement; loading.