

РОЗРАХУНОК НЕСНОЇ ЗДАТНОСТІ АРКОВОЇ ДОРОЖНЬОЇ СПОРУДИ З ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ АНАЛІТИЧНИМ СПОСОБОМ

Анотація

Вступ. Розглянуто один з можливих варіантів спрощеного практичного розрахунку аркової дорожньої споруди (малого мосту) з гофрованого металу, який може розглядатися як такий, що передре більш детальному і трудомісткому розрахунку такої споруди під дорожнім насипом, як системи «споруда – ґрунт» за методом скінчених елементів.

Проблематика. Чинні норми і технічні документи з проектування і будівництва дорожніх споруд з гофрованого металу (водопропускних труб, малих мостів, шляхопроводів) містять спрощені формули для розрахунку міцності і деформацій таких споруд тільки у формі круглих труб. Це певною мірою стримує поширення цих раціональних і порівняно простих типів дорожніх споруд аркової форми.

Мета і завдання. Показати один з можливих варіантів розрахунку несної здатності аркової дорожньої споруди з гофрованого металу аналітичним способом на підставі загальноприйнятих вихідних положень і простої зрозумілої розрахункової схеми — є метою і завданням даної роботи.

Методи досліджень і результати. Методичною основою даної роботи є розрахунково-теоретичний аналіз взаємодії аркової гнучкої конструкції з гофрованого металу з ґрунтом дорожнього насипу. Показано, що таку аркову конструкцію доцільно розглядати як частину системи «споруда – ґрунт». Несна здатність її складається з власної несної здатності арки (поза ґрунтом) і опору ґрунту у відповідь на переміщення арки. Власна несна здатність арки (поза ґрунтом) у даній роботі визначена від дії вертикального рівномірно розподіленого навантаження на рівні верху арки від маси ґрунту і тимчасового навантаження. Для визначення опору ґрунту арку розглядали як «механізм» з повними шарнірами. Величину визначали як вертикальне рівномірно розподілене навантаження на арку, як на «механізм», при якому зусилля в додаткових стрижнях, які забезпечують геометричну незмінність «механізму» дорівнюють рівнодіючій цього опору.

Висновки. Показана можливість виконання спрощеного практичного розрахунку аркової дорожньої споруди з гофрованого металу аналітичним способом на підставі загальноприйнятих вихідних розрахункових положень і простої зрозумілої розрахункової схеми. Запропонований спосіб розрахунку може бути основою для подальших досліджень і розроблення доповнень до чинних норм з проектування таких споруд.

Ключові слова: аркова дорожня споруда, гофрований метал, несна здатність, опір ґрунту.

Вступ

Дорожні споруди (водопропускні труби під насипом, мали мості, шляхопроводи, оправа тунелів) з металевих гофрованих конструкцій (МГК) вже давно й успішно застосовуються у транспортному будівництві багатьох країн світу як альтернатива спорудам з типових масивних конструкцій. Основна перевага споруд такого типу полягає у сумісній роботі з ґрунтом насипу за рахунок передавання на нього частини вертикального навантаження.

Споруди з МГК аркової форми дозволяють отримати потрібні горизонтальні розміри отвору при відносно малій їх висоті. Тому важливо продовжувати дослідження для доповнення уявлень про особливості таких споруд, доповнення й удосконалення чинних норм їх проектування, насамперед у частині розрахунків, зокрема спрощених.

Основа частина

У чинних нормах і технічних документах України з проектування і будівництва дорожніх споруд з МГК достатньо детально викладено загальні правила, вимоги та умови [1, 2]. Але у частині розрахунків на міцність, стійкість і деформації є підстави для доповнення і удосконалення існуючих норм. Зокрема, формули для розрахунків за першою та другою груп граничних станів придатні тільки для споруд у вигляді труб круглої форми і за цими формулами, зокрема, визначають чомусь тільки нормальні зусилля без урахування зусиль від згину труби під насипом від переважаючого вертикального навантаження, а деформації визначають без зв'язку з можливим локальним осіданням дорожнього покриття над гнучкою спорудою.

Показати один з можливих способів спрощеного практичного розрахунку аркової дорожньої споруди з гофрованого металу на підставі загальноприйнятих вихідних розрахункових положень для споруд такого типу і простої зрозумілої розрахункової схеми — є метою і завданням даної роботи.

У роботі розглядається споруда у формі напівкруглого склепіння (арки, за умовами плоскої задачі) з МГК під дорожнім насипом (малий міст, шляхопровід тощо). Арка напівкруглої форми найбільш проста для проектування і монтажування, її елементи однакової кривизни найбільш зручні для транспортування і складування.

Основними вихідними розрахунковими положеннями є:

- у загальному випадку, переважним навантаженням на арку під ґрунтовим насипом є вертикальне, тому визначальними є зусилля від її згину;
- несна здатність арки складається з її власної несної здатності (поза ґрунтом) опору ґрунту від переміщення арки у бік ґрунту при її згині;
- власну несну здатність арки (поза ґрунтом) визначають від дії вертикального рівномірно розподіленого навантаження від маси ґрунту насипу й тимчасового колісного навантаження;
- опір ґрунту, як деяку величину на яку збільшують несну здатність арки в системі «споруда – ґрунт», визначають як вертикальне навантаження на схему арки у вигляді «механізму» з повними шарнірами у місцях найбільших деформацій і напружень у перерізах арки, яке сприймає ґрунт у відповідь на переміщення арки.

Основну розрахункову умову прийнято у вигляді:

$$p \leq (q_0 + q_c) m, \quad (1)$$

де p — розрахункове вертикальне рівномірно розподілене навантаження вздовж проєкції арки на рівні верху споруди від маси ґрунту насипу і тимчасового рухомого навантаження [1, 3];

$q_0 + q_c$ — несна здатність арки в системі «споруда – ґрунт», як сума її власної несної здатності q_0 і q_c за рахунок опору ґрунту переміщенням арки у бік ґрунту;

$m = 0,9$ — коефіцієнт умов роботи.

Несна здатність (граничне вертикальне рівномірно розподілене навантаження) q_0 напівкруглої арки радіусом r поза ґрунтом із жорстким обпиранням п'ят (рис. 1), згідно з [4, 5], для пружної стадії роботи визначається за формулою:

$$q_0 = \frac{M_{cp}}{0,1r^2}, \quad (2)$$

де $M_{cp} = W \sigma_m$ — граничний пружний згинальний момент для перерізів елементів арки з моментом опору W перерізу (арки одиничної ширини, наприклад 1 м) і границею текучості металу σ_m .

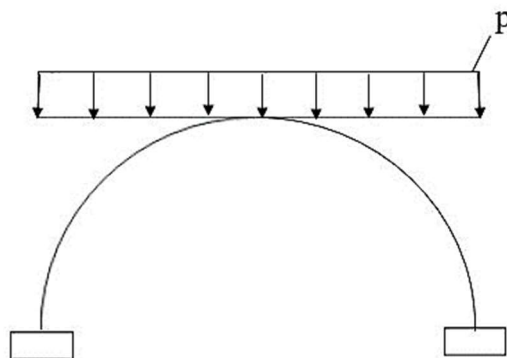


Рисунок 1 — Схема для визначення власної несної здатності арки (поза ґрунтом)

Граничну допустиму величину прогину арки за умови не перевищення можливих осідань дорожнього покриття над спорудою (S_{cp}) визначають згідно з методикою [6], за формулою:

$$f_{cp} = 1,15 S_{cp} (0,87 + (\frac{h}{r} + 0,5)0,67), \quad (3)$$

де h і r — відповідно відстань від верху арки до верху дорожнього покриття і радіус арки.

Несну здатність q_c за рахунок тільки опору ґрунту переміщенням арки, визначають як вертикальне рівномірно розподілене навантаження, при якому для схеми арки у вигляді «механізму» з повними шарнірами у місцях найбільших деформацій і напружень, зусилля у додаткових стрижнях, які моделюють опір ґрунту, дорівнюють рівнодіючій R цього опору (рис. 2).

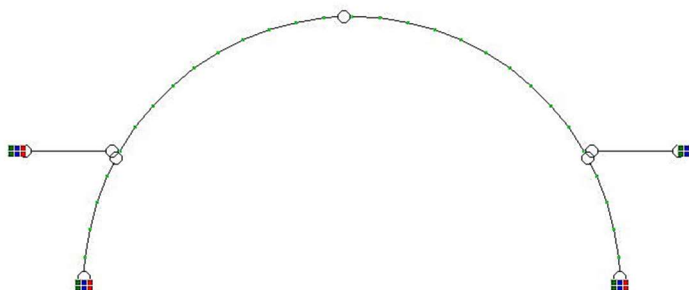


Рисунок 2 — Схема арки у вигляді «механізму» з повними шарнірами

Величину рівнодіючої R опору ґрунту визначають згідно з [7, 8] за формулою:

$$R = Ak, \quad (4)$$

де A — площа (за умовами плоскої задачі, при ширині арки, наприклад, 1 м) епюри опору ґрунту;

k — коефіцієнт пружного опору ґрунту (коефіцієнт постелі) за формулою Б. Г. Галеркіна [7, 8]:

$$k = \frac{E}{(1 + \mu)r}, \quad (5)$$

де E — модуль деформації ґрунту насипу (компресійний);

μ — коефіцієнт Пуассона для ґрунту насипу.

Площу епюри опору ґрунту A визначають згідно зі схемою на **рис. 3**.

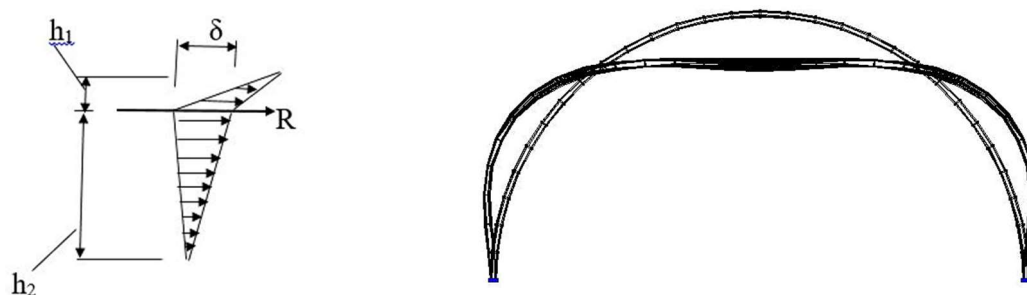


Рисунок 3 — Схема переміщень арки і епюри опору ґрунту (епюру показано з одного боку) з рівнодіючою на рівні максимальних переміщень арки у бік ґрунту

Величину площі епюри опору A (при кутових координатах її низу, максимуму і верху, відповідно 6° , 34° і 51°) знаходять за формулою:

$$A = 0,5 \delta (h_1 + h_2), \quad (6)$$

де δ — максимальне горизонтальне переміщення арки у бік ґрунту, яке за даними розрахунків складає певну частину від гранично допустимого прогину ($0,587f_{cp}$) і приймається зменшеним у чотири рази, $\delta = 0,587 \frac{f_{cp}}{4}$;

h_1, h_2 — висота трикутних частин епюри опору $h_1 = r (\sin 51^\circ - \sin 34^\circ) = 0,218 r$;

$h_2 = r (\sin 34^\circ - \sin 6^\circ) = 0,454 r$.

Для визначення величини q_e арку (її половину) розглядають як «механізм», при якому зусилля у додаткових стрижнях, які моделюють опір ґрунту приймають рівними R (**рис. 4**).

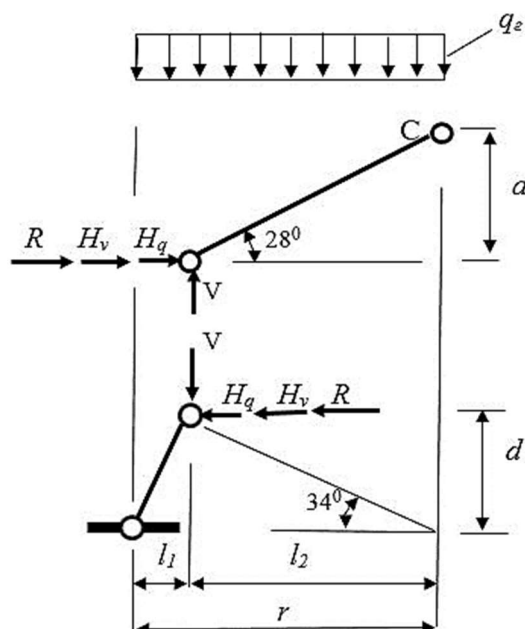


Рисунок 4 — Схема для визначення несної здатності арки від опору ґрунту

За умовою рівноваги верхньої частини схеми на **рис. 4** сума моментів відносно точки С дорівнює нулю :

$$\sum M_c = (R + H_q + H_v) a + q_e l_2 0,5l_2 - Vl_2 = 0, \quad (7)$$

де $R + H_q + H_v$ — горизонтальна реакція (розпір), відповідно від опору ґрунту R ;

$H_q = q_e l_1 0,5l_1 \frac{1}{d}$, від дії навантаження q_e на нижній стрижень «механізму» і

$H_v = q_e l_2 l_1 \frac{1}{d}$, від дії вертикальної реакції V на нижній стрижень;

$a = l_2 \tan 28^\circ$; $l_1 = r - r \cos 34^\circ$; $l_2 = r \cos 34^\circ$; $d = r \sin 34^\circ$; $V = q_e l_2$.

З урахуванням наведених вище складових рівняння (7) має вигляд:

$$Ra + 0,5q_e l_1^2 \frac{1}{d} a + q_e l_2 l_1 \frac{1}{d} a + 0,5q_e l_2^2 - q_e l_2^2 = 0. \quad (8)$$

З рівняння (8) отримаємо:

$$q_e = \frac{Ra}{-0,5l_1^2 \frac{a}{d} - l_2 l_1 \frac{a}{d} - 0,5l_2^2 + l_2^2}. \quad (9)$$

Приклад. Перевіримо несну здатність напівкруглої аркової споруди радіусом 3 м із МГК з розмірами перерізу 150×50×6 (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу, мм): момент опору перерізу $W = 0,863 \text{ см}^3/\text{см}$ [1]; метал з границею текучості $\sigma_m = 240 \text{ МПа}$; розрахункове (з відповідними коефіцієнтами надійності) навантаження $11,0 \text{ т/м}^2$ від маси насипу висотою над верхом арки $h = 4 \text{ м}$; ґрунт з модулем деформації $E = 40 \text{ МПа}$ ($4\,000 \text{ тс/м}^2$), коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0,25$ і питомою вагою $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$; тимчасове навантаження НК-100.

За формулою (2) для арки шириною 1 м (за умови плоскої задачі) отримаємо:

$$q_0 = 0,863 \cdot 100 \cdot 2\,400 / (0,1 \cdot 300^2) = 23,01 \text{ кгс/см} = 2,301 \text{ тс/м}.$$

Гранична допустима величина прогину арки (при $S = 4 \text{ см}$, для автомобільної дороги другої категорії [6]) за формулою (3) дорівнює:

$$f_p = 1,15 \cdot 4 (0,87 + ((400/300) + 0,5) 0,67) = 9,65 \text{ см}.$$

За формулою (6) площа епюри опору ґрунту складає:

$$A = (0,5 \cdot 0,587(0,096)/4) (0,654 + 1,362) = 0,014 \text{ м}^2.$$

Величина рівнодіючої R опору ґрунту за формулами (4) і (5) складає:

$$R = 0,014 \cdot 4\,000/3(1 + 0,25) = 14,933 \text{ тс} (149,330 \text{ кН}).$$

Несна здатність арки від дії опору ґрунту за формулою (9) з урахуванням значень компонентів формули (7) складає:

$$q_e = 14,933 \cdot 1,322 / (-0,104 - 1,006 - 3,093 + 6,185) = 9,970 \text{ тс/м} (99,700 \text{ кН/м}).$$

Основна розрахункова умова (1) для арки (шириною 1 м) виконується:

$$11,000 \text{ тс/м} < (2,301 + 9,970) \cdot 0,9 = 11,044 \text{ тс/м}.$$

Для порівняння, опір ґрунту, як додаткова складова до несної здатності, визначений за методом скінчених елементів (МСЕ) складає $10,6 \text{ тс/м} = 106,0 \text{ кН/м}$ (рис. 5).

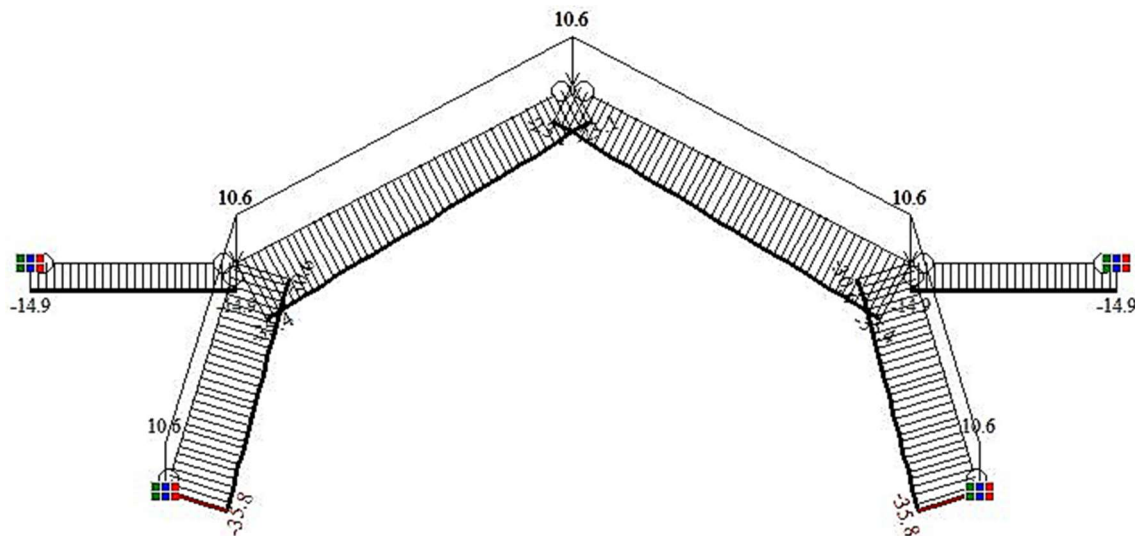


Рисунок 5 — Схема, навантаження і результати (епюра зусиль) розрахунку за МСЕ

При цьому різниця результатів, які отримано аналітичним способом ($99,7 \text{ кН/м}$) і за МСЕ ($105,0 \text{ кН/м}$, без урахування ваги конструкцій $1,0 \text{ кН}$ на 1 м проєкції арки), складає всього 5% .

Висновки

Показано один з можливих варіантів спрощеного практичного розрахунку аркової дорожньої споруди з МГК аналітичним способом на підставі загальноприйнятих вихідних розрахункових положень і простої зрозумілої розрахункової схеми.

Запропонований спосіб може бути прийнятий за основу при розробленні доповнень до відповідних чинних норм і технічних документів у частині методики спрощеного розрахунку аркових дорожніх споруд з МГК, який передувє більш точному і трудомісткому розрахунку системи «споруда – ґрунт» за методом скінчених елементів у режимі взаємовпливових деформацій.

Список літератури

1. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 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. Київ, 2007. 124 с.
3. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ, 2009. 66 с. (Інформація та документація)
4. Клейн Г. К. Посібник з практичних занять з курсу будівельної механіки (статика стрижневих систем). Вища школа. 1980. 348 с.
5. Новіков А. М. Таблиці для розрахунку труб, склепін та арок. Будвидав Наркомбуду. 1942. 340 с.
6. 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.

7. Абрамов В. М. Особливості розрахунку дорожніх споруд з металевих гофрованих конструкцій. *Вісник НУВГП. Технічні науки*: зб. наук. праць. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 1(101). С. 100–109.

8. Абрамов В. М. Спосіб розрахунку ґрунто-сталевих аркових гофрованих мостів за деформаційним критерієм з урахуванням нелінійної роботи. *Автомобіляри України*. 2012. № 3 (227). С. 45–48.

References

1. VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudy transport. Proektuvannya ta budivnytvo sporud z metalovykh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannya України (VBN V.2.3-218-198:2007. Transport facilities. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways). Kyiv, 2007. 49 p. [in Ukrainian].

2. Posibnyk do VBN B.2.3-218-198:2007 Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnytvo sporud z metalovykh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannya. (Transport structures. Design and construction in buildings made of metal corrugated structures. on public roads). Київ. 2007. 124 p. [in Ukrainian].

3. DBN B.1.2-15:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya i vplyvy (DBN V.1.2-15:2009. Transport structures. Bridges and pipes. Loads and influences). Kyiv, 2009. 66 p. (Informatsiya ta dokumentatsiya) [in Ukrainian].

4. Kleyn H. K. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po kursu stroitelnoy mekhaniki (statika sterzhnevnykh sistem) (Guide to practical lessons on the construction mechanics course (statics of rod systems)). Vysshaya shkola. 1980. 348 p.

5. Novikov A. M. Tablitsy dlya pashota trub, svodov i arok. Stroyizdat Narkomstroya. (Tables for calculating pipes, arches and arche). 1942. 340 p.

6. Abramov V. M. Osoblyvosti rozrakhunku dorozhnykh sporud z hofrovanoho metalu (Boundary deformations of road structures made of corrugated metal. Herald NUVHP). *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*: zb. nauk. prats. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 1(101). P. 100–109. [in Ukrainian].

7. Abramov V. M. Hranyichni deformatsiyi dorozhnykh sporud z gofrovanogo metalu. *Visnyk NUVHP (Peculiarities of calculating road structures from metal corrugated iron const). Tekhnichni nauky*: zb. nauk. prats. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 1(101). P. 143–149 [in Ukrainian].

8. Abramov V. M. Sposob rozrakhunku hrunto-stalevykh hofrovanykh mostiv za deformatsionnym kriteriєм z urakhuvannyam nelineynoyi roboty. (The method of calculating soil-steel arched corrugated bridges according to the deformation criterion, taking into account non-linear operation) *Avtoshlyakhovyk Ukrayiny*. 2012. No. 3 (227). P. 45–48 [in Ukrainian].

Volodymyr Abramov, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>

Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), Ukraine

CALCULATION OF THE LOAD CAPACITY OF AN ARCHED ROAD STRUCTURE FROM CORRUGATED METAL BY ANALYTICAL METHOD

Abstract

Introduction. One of the possible options for a simple, practical design of an arched road structure (small bridge) made of corrugated metal is considered, which can be considered as one that is more accurate and labor-intensive for the design of such a structure under the road pressure, as the “structure – soil” system for finite element method.

Problem Statement. Regular normative and methodological documents for the design and maintenance of road structures (culverts, small bridges, tunnels) made of corrugated metal provide a simple formula for the structure of the structure and deformation of the body for such structures round pipes. The world is constantly streaming a wider range of rational and fairly simple types of road structures.

Purpose. To show one of the possible ways of calculating an arched road structure made of corrugated metal on the basis of generally accepted initial provisions and a simple, understandable calculation scheme is the goal and task of this work.

Research methods and results. The methodical basis of this work is the computational and theoretical analysis of the interaction of an arched flexible structure made of corrugated metal with the soil of a road embankment. It is shown that there are reasons to consider such a structure as a component of the “structure – soil” system. Its bearing capacity consists of its own bearing capacity of the arch (outside the soil) and an addition from the action of soil resistance in response to the movement of the arch. The bearing capacity of the arch (beyond the soil) in this work is determined from the action of the vertical uniformly distributed load at the level of the top of the arch from the mass of the soil and the temporary load. To determine the addition to the load-bearing capacity, the arch is considered as a “mechanism” with full hinges. The value of this application is defined as a vertical uniformly distributed load, in which the forces in the additional rods, which ensure the geometric invariance of the “mechanism” and which simulate the soil resistance, are equal to the net effect of this resistance.

Conclusions. The possibility of performing a simplified calculation of an arched road structure made of corrugated metal based on generally accepted initial calculation provisions and a simple and understandable calculation scheme is shown. The proposed method of calculation can be the basis for further research and the development of additions to the current standards for the design of such structures.

Keywords: arched road construction, corrugated metal, bearing capacity, soil support.