UDC 691.32
SCOPUS CODE 2501
https://doi.org/10.36073/1512-0996-2023-3-103-114

ცემენტისფუძიანი კომპოზიტების ტენგამტარობის თეორია

ამირან საყვარელიძე ჰიდროტექნიკისა და სამოქალაქო ინჟინერიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68ზ
E-mail: a.sakvarelidze@gtu.ge

რეცენზენტები:
ა. ბაგრატიონ-დავითაშვილი, სტუ-ის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი
E-mail: adavitashvilli@gtu.ge
დ. ტაბატაძე, სტუ-ის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი
E-mail: tabatadze@gtu.ge

ანოტაცია. ცემენტისფუძიანი კომპოზიციური მასალების ტენგამტარობის თეორიის შექმნა და ტენგამტარობის პარამეტრების დადგენა აუცილებელია დატვირთვებისა და ზემოქმედებების სხვადასხვა პირობებში ნაგებობებისა და კონსტრუქციების საანგარიშო სრულყოფილი და გაუმჯობესებული მეთოდების შესაქმნელად.

მასალებში ტენის გადატანის პრობლემებისადმი მიძღვნილია არაერთი სამუშაო, რომლებშიც შესწავლილია სამშენებლო კომპოზიტების (სხვადასხვა სახის ტრადიციული და ახალი ბეტონები) ტენგამტარობის საკითხები. თუმცა აღსანიშნავია, რომ ცემენტისფუძიან კომპოზიტებში ტენგადატანის მრავალი კანონზომიერება მოითხოვს შესწავლასა და დაზუსტებას. საჭიროა შემუშავდეს ტენგამტარობის თეორია, რომლის მათემატიკური აპარატი იქნება საფუძველი სამშენებლო კომპოზიციურ მასალებში ტენგადაცემის რეალური სურათის დასადგენად.

სტატიაში გამოკვლეულია ცემენტისფუძიან კომპოზიციურ მასალებში ტენგადატანის პროცესები, ჩატარებულია ცდები კომპოზიტებში ტენგადაცემის პროცესებზე მკუმშავი დატვირთვის გავლენის შესაფასებლად.

დადგენილია, რომ მარტივი დატვირთვა, გარემოს ფარდობითი ტენიანობის ზღვრებში $\varphi = 0 \div 100\%$, ბეტონში ტენგადაცემის პროცესზე გავლენას არ ახდენს.

შექმნილია დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა, რომელიც ასახავს ცემენტისფუძიან სამშენებლო კომპოზიტებში ტენგამტარობის რეალურ სურათს, რომელიც განისაზღვრება მასალაზე ისეთი ფაქტორების ზემოქმედების სხვადასხვა პირობით როგორიც არის: ტენიანობა (W), ტემპერატურა (T) და ჰიდროსტატიკური წნევა (P).

შემუშავებული ფორმულებით განისაზღვრება კომპოზიტების ტენგამტარობაზე ტემპერატურის, ტენიანობისა და ჰიდროსტატიკური წნევის გრადიენტების (grad T; grad W; grad P) ზემოქმედების ყველა შესაძლო ასპექტი.

ფორმულები წარმოქმნის ჩაკეტილ სისტემას - სამი განტოლება სამი ფუნქციისთვის T, W და P.

შემუშავებულია ამ განტოლებების უფრო კომპაქტური ფორმულა. მოცემულია ფორმულებში კოეფიციენტების მნიშვნელობა.

საკვანძო სიტყვები: გრადიენტი; დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა; თეორია; ტენგამტარობა; ტენშემცველობა; ტემპერატურა; ფორმულა; ჰიდროსტატიკური წნევა.

შესავალი

ცემენტისფუძიანი კომპოზიციური მასალები კაპილარულ-ფოროვანი სხეულებია, რომლებშიც ტენი დაკავშირებულია სხეულის ჩონჩხთან სხვადასხვა ფიზიკური ბუნების ძალებით. მასალებში ტენგადატანის მექანიზმი განისაზღვრება [1]:

– ტენის კავშირის ფორმით სხეულთან;
– სხეულის სტრუქტურის თავისებურებებით;
– გარემოსთან სხეულის ურთიერთკავშირის თერმოდინამიკური პროცესებით.

ლიტერატურაში არსებობს მრავალრიცხოვანი მონაცემი სხვადასხვა მასალაში ტენგადატანის პრობლემების ექსპერიმენტულ-თეორიული გამოკვლევების შესახებ [1,2,3]. მიუხედავად ამისა, ბეტონებში ტენგადაცემის არაერთი კანონზომიერება მოითხოვს შესწავლას. აუცილებელია ცემენტისფუძიანი კომპოზიტების ტენგამტარობის სრულყოფილი თეორიის შემუშავება.

მასალებში ტენის გადატანის საკითხების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ფოროვან სხეულში ტენის დამატებითი გადატანა სითხისა და ორთქლის ფილტრაციული მოძრაობის შედეგად შესაძლებელია მხოლოდ ჰიდროსტატიკური წნევის გრადიენტის (grad P) არსებობის შემთხვევაში. ფოროვან სხეულში ფილტრაციული მოძრაობა (ორთქლისა და სითხის) შეიძლება წარმოიქმნას მათი მაღალ-ინტენსიური შრობის პროცესში (შრობა მაღალი სიხშირის დენით, კონტაქტური შრობა და ა.შ.), როდესაც ტენიან მასალაში წარმოიქმნება ტენიანი ჰაერის წნევის გრადიენტი.

ჩვეულებრივ კლიმატურ პირობებში (რომლშიც მუშაობს სამშენებლო კონსტრუქციების უმრავლესობა) ცემენტისფუძიან კომპოზიტზე მოქმედებს შედარებით დაბალი ტემპერატურა და ამიტომ მასში არ წარმოიქმნება ჰიდროსტატიკური წნევის გრადიენტი.

ასეთ შემთხვევებში მასალაში წნევის გადატანა ხორციელდება ძირითადად სითხისა და ორთქლის დიფუზიური გადატანით. ამავე დროს აღსანიშნავია, რომ ზოგიერთი სამშენებლო კონსტრუქცია (მაგ. ჰიდროტექნიკური კაშხლები ქვედა ბიეფებში, დაწნევითი გვირაბების კედლები) მუშაობს პირობებში, როდესაც მათზე მოქმედებს ჰიდროსტატიკური წნევა. ამის გამო მათ სხეულში ხდება ტენის დამატებითი გადატანა, რაც გამოწვეულია სითხის ფილტრაციული მოძრაობით.

ჩატარებულია გამოკვლევა ბეტონში ტენგადატანის პროცესზე დატვირთვის გავლენის შესასწავ-

ლად. კომპოზიტებში დატვირთვით გამოწვეული ტენის გადატანის კინეტიკაზე დაკვირვების მიზნით ჩვენ გამოვიყენეთ მასალის ელექტროგამტარობის გაზომვის მეთოდი [1,4]. ჩავატარეთ ექსპერიმენტების 4 სერია. გამოიცდებოდა $t_0 = 28$ დღის ასაკის ბეტონის ნიმუშები – ცილინდრები (ზომები: $d = 60$, $\ell = 40$ მმ) კუმშვაზე სპეციალური ხელსაწყოს გამოყენებით [1]. ნიმუშები დამზადების შემდეგ ინახებოდა და იცდებოდა სხვადასხვა ფარდობითი ტენიანობის ($\varphi = 100$, 70, 50 და 20%) გარემოში.

ჩატარებული გამოკვლევით დადგენილია: ჰიგროსკოპული თანასწორობის სფეროში (ა. ლიკოვის მიხედვით [2]) ანუ გარემოს ფარდობითი ტენიანობის $0 \div 100\%$ ზღვრებში, დატვირთვა ბეტონებში ტენგადატანის პროცესებზე გავლენას არ ახდენს. მარტივ დატვირთვებს შეუძლია გავლენა იქონიოს ტენგადატანის პროცესებზე მხოლოდ ცემენტისფუძიანი კომპოზიტების მაღალი დონის ტენშემცველობის დროს [1].

ძირითადი ნაწილი

განვიხილოთ ნებისმიერი სხეული (სხვადასხვა სახის ცემენტისფუძიანი კომპოზიტები):

ზოგად შემთხვევაში მოცემულია:

$$\left.\begin{aligned} &\text{ტემპერატურა - } T(X,Y,Z,t) = Z_1; \\ &\text{ტენიანობა - } W(X,Y,Z,t) = Z_2; \\ &\text{წნევა - } P(X,Y,Z,t) = Z_3; \end{aligned}\right| \qquad (1)$$

რომლებიც დამოკიდებულია (X,Y,Z) კორდინატებსა და t დროზე.

არსებობს ნაკადები:

$$\left.\begin{aligned} &\text{სითბოს – } \bar{q}_T \equiv \bar{q}_1; \\ &\text{ტენიანობის – } \bar{q}_W \equiv \bar{q}_2; \\ &\text{წნევის – } \bar{q}_P \equiv \bar{q}_3; \end{aligned}\right| \qquad (2)$$

და გრადიენტები T,W და P

$$\left.\begin{aligned} \bar{q}_1 \equiv \bar{q}_T = \operatorname{grad}T = \nabla T \\ \bar{q}_2 \equiv \bar{q}_W = \operatorname{grad}W = \nabla W \\ \bar{q}_3 \equiv \bar{q}_P = \operatorname{grad}P = \nabla P \end{aligned}\right| \qquad (3)$$

თუ არის ურთიერთკავშირი T,W და P-ს შორის, მაშინ ონზაგერის თანახმად [1,4,5]:

$$\left.\begin{aligned} \bar{q}_i = a_{ij} \cdot g_j = a_{ij} \cdot \bar{g}_1 + a_{i2} \cdot \bar{g}_2 + a_{i3} \cdot \bar{g}_3 \\ i = (1,2,3) \\ i = (1,2,3) \end{aligned}\right| \qquad (4)$$

$$\begin{aligned} i=1 \quad & \bar{q}_1 = a_{11}\bar{q}_1 + a_{12}\cdot\bar{q}_2 + a_{13}\cdot\bar{q}_3 \\ i=2 \quad & \bar{q}_2 = a_{21}\bar{q}_1 + a_{22}\cdot\bar{q}_2 + a_{23}\cdot\bar{q}_3 \\ i=3 \quad & \bar{q}_3 = a_{31}\bar{q}_1 + a_{32}\cdot\bar{q}_2 + a_{33}\cdot\bar{q}_3 \end{aligned} \tag{5}$$

ბალანსის განტოლება იქნება:

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} = -\operatorname{div}\bar{q}_i = -\operatorname{div}(a_{ij}\cdot\bar{g}_j) = -a_{ij}\cdot\operatorname{div}\bar{g}_j - (\operatorname{grad}a_{ij})\cdot\bar{g}_j \tag{6}$$

მნიშვნელობების შეტანით ბალანსის განტოლება (6) მიიღებს სახეს:

$$\frac{\partial z_i}{\partial t} = -a_{ij}\cdot\Delta z_i - (\operatorname{grad}a_{ij})\cdot\operatorname{grad}Z_j \tag{7}$$

სადაც $\Delta z_i \equiv \nabla^2\cdot z_i = \operatorname{div}\cdot\operatorname{grad}z_i = \nabla\nabla z_i$

∇^2 ლაპლასის ოპერატრია; ∇ – ჰამილტონის ოპერატორი

აღვნიშნოთ: $(\operatorname{grad}a_{ij})\cdot\operatorname{grad}Z_j = q_i^*$;

ამრიგად

$$\begin{aligned} q_1^* &= (\operatorname{grad}a_{11})\cdot\operatorname{grad}Z_1 + (\operatorname{grad}a_{12})\cdot\operatorname{grad}Z_2 + (\operatorname{grad}a_{13})\cdot\operatorname{grad}Z_3 \\ q_2^* &= (\operatorname{grad}a_{21})\cdot\operatorname{grad}Z_1 + (\operatorname{grad}a_{22})\cdot\operatorname{grad}Z_2 + (\operatorname{grad}a_{23})\cdot\operatorname{grad}Z_3 \\ q_3^* &= (\operatorname{grad}a_{31})\cdot\operatorname{grad}Z_1 + (\operatorname{grad}a_{32})\cdot\operatorname{grad}Z_2 + (\operatorname{grad}a_{33})\cdot\operatorname{grad}Z_3 \end{aligned} \tag{8}$$

(7)-დან როცა:

$$\begin{aligned} i=1 \quad & \dot{Z}_1 \equiv \frac{\partial z_1}{\partial t} = -a_{11}\cdot\Delta z_1 - a_{12}\cdot\Delta z_2 - a_{13}\cdot\Delta z_3 - \dot{q}_1 \\ i=2 \quad & \dot{Z}_2 \equiv \frac{\partial z_2}{\partial t} = -a_{21}\cdot\Delta z_1 - a_{22}\cdot\Delta z_2 - a_{23}\cdot\Delta z_3 - \dot{q}_2 \\ i=3 \quad & \dot{Z}_3 \equiv \frac{\partial z_3}{\partial t} = -a_{31}\cdot\Delta z_1 - a_{32}\cdot\Delta z_2 - a_{33}\cdot\Delta z_3 - \dot{q}_3 \end{aligned} \tag{9}$$

წარმოვადგინოთ (9) შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} a_{11}\cdot\Delta z_1 - a_{12}\cdot\Delta z_2 - a_{13}\cdot\Delta z_3 &= -q_1^* - \dot{z}_1 \\ a_{21}\cdot\Delta z_1 - a_{22}\cdot\Delta z_2 - a_{23}\cdot\Delta z_3 &= -q_2^* - \dot{z}_2 \\ a_{31}\cdot\Delta z_1 - a_{32}\cdot\Delta z_2 - a_{33}\cdot\Delta z_3 &= -q_3^* - \dot{z}_3 \end{aligned} \tag{10}$$

ზოგიერთი გარდაქმნის შემდეგ (10)-დან ვპოულობთ Δz_1; Δz_2; Δz_3

$$\begin{aligned} D\cdot\Delta z_1 &= -k_{11}(q_1^* + \dot{z}_1) - k_{12}(q_2^* + \dot{z}_2) - k_{13}(q_3^* + \dot{z}_3) \\ D\cdot\Delta z_2 &= -k_{21}(q_1^* + \dot{z}_1) - k_{22}(q_2^* + \dot{z}_2) - k_{23}(q_3^* + \dot{z}_3) \\ D\cdot\Delta z_3 &= -k_{31}(q_1^* + \dot{z}_1) - k_{32}(q_2^* + \dot{z}_2) - k_{33}(q_3^* + \dot{z}_3) \end{aligned} \tag{11}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}\cdot a_{22}\cdot a_{33} + a_{13}a_{21}a_{32} + a_{12}\cdot a_{23}a_{31} - a_{13}\cdot a_{22}\cdot a_{31} - a_{12}\cdot a_{21}\cdot a_{33} - a_{11}\cdot a_{23}\cdot a_{32}$$

ISSN 1512-0996
www.shromebi.gtu.ge

სადაც D სისტემის განმსაზღვრელია:

ხოლო კოეფიციენტები: $k_{ij}(i,j=1,2,3)$

$$k_{11}=(a_{22}\cdot a_{33}-a_{33}\cdot a_{32})\quad k_{21}=(a_{23}\cdot a_{31}-a_{21}\cdot a_{33})\quad k_{31}=(a_{21}\cdot a_{32}-a_{22}\cdot a_{31})$$
$$k_{12}=(a_{13}\cdot a_{32}-a_{12}\cdot a_{33})\quad k_{22}=(a_{11}\cdot a_{33}-a_{13}\cdot a_{31})\quad k_{32}=(a_{12}\cdot a_{31}-a_{32}\cdot a_{11})$$
$$k_{13}=(a_{12}\cdot a_{23}-a_{13}\cdot a_{22})\quad k_{23}=(a_{13}\cdot a_{21}-a_{11}\cdot a_{23})\quad k_{33}=(a_{11}\cdot a_{22}-a_{13}\cdot a_{21})$$

(11)-ის შეტანით (9)-ში მივიღებთ:

$$\left.\begin{aligned}\dot{Z}_1&\equiv\frac{\partial z_1}{\partial t}=-a_{11}\cdot\Delta z_1-\tilde{q}_1^{**}\\ \dot{Z}_2&\equiv\frac{\partial z_2}{\partial t}=-a_{22}\cdot\Delta z_2-\tilde{q}_2^{**}\\ \dot{Z}_3&\equiv\frac{\partial z_3}{\partial t}=-a_{33}\cdot\Delta z_3-\tilde{q}_3^{**}\end{aligned}\right| \tag{12}$$

$$\left.\begin{aligned}&\tilde{q}_1^{**}=q_1^*-\frac{(a_{12}\cdot k_{21}+a_{13}\cdot k_{31})}{D}\cdot(q_1^*+\dot{z}_1)-\frac{(a_{12}\cdot k_{22}+a_{13}\cdot k_{32})}{D}\cdot(q_2^*+\dot{z}_2)-\\&-\frac{(a_{12}\cdot k_{23}+a_{13}\cdot k_{33})}{D}\cdot(q_3^*+\dot{z}_3)\\&\tilde{q}_2^{**}=q_2^*-\frac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{D}\cdot(q_1^*+\dot{z}_1)-\frac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{D}\cdot(q_2^*+\dot{z}_2)-\\&-\frac{(a_{21}\cdot k_{13}+a_{23}\cdot k_{33})}{D}\cdot(q_3^*+\dot{z}_3)\\&\tilde{q}_3^{**}=q_3^*-\frac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{D}\cdot(q_1^*+\dot{z}_1)-\frac{(a_{31}\cdot k_{12}+a_{32}\cdot k_{22})}{D}\cdot(q_2^*+\dot{z}_2)-\\&-\frac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{D}\cdot(q_3^*+\dot{z}_3)\end{aligned}\right| \tag{13}$$

$\dot{z}_1$ - შედის (11) მარცხნივ და მარჯვნივ $\tilde{q}_1^{**}$ -ის მნიშვნელობაში გადავიტანოთ ის მარცხენა მხარეს. ასევე ვიმოქმედოთ $\dot{z}_2$ და $\dot{z}_3$ -თვის, მივიღებთ:

$$\left.\begin{aligned}&\left[1-\frac{(a_{12}\cdot k_{12}+a_{13}\cdot k_{31})}{D}\right]\cdot\dot{z}_1=-a_{11}\cdot\Delta z_1-q_1^{**}\\&\left[1-\frac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{D}\right]\cdot\dot{z}_2=-a_{22}\cdot\Delta z_2-q_2^{**}\\&\left[1-\frac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{D}\right]\cdot\dot{z}_3=-a_{33}\cdot\Delta z_3-q_3^{**}\end{aligned}\right| \tag{14}$$

ამ დროს

$$\left.\begin{aligned}&q_1^{**}=\left[1-\frac{(a_{12}\cdot k_{21}+a_{13}\cdot k_{31})}{D}\right]\cdot q_1^*+\frac{a_{11}\cdot k_{12}}{D}\cdot(q_2^*+\dot{z}_2)+\frac{a_{11}\cdot k_{13}}{D}\cdot(q_3^*+\dot{z}_3)\\&q_2^{**}=\left[1-\frac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{D}\right]\cdot q_2^*+\frac{a_{22}\cdot k_{21}}{D}\cdot(q_1^*+\dot{z}_1)+\frac{a_{22}\cdot k_{23}}{D}\cdot(q_3^*+\dot{z}_3)\\&q_3^{**}=\left[1-\frac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{D}\right]\cdot q_1^*+\frac{a_{33}\cdot k_{31}}{D}\cdot(q_1^*+\dot{z}_1)+\frac{a_{33}\cdot k_{32}}{D}\cdot(q_2^*+\dot{z}_2)\end{aligned}\right| \tag{15}$$

შევნიშნავთ რომ (14)-ში:

$a_{11} = -\lambda_T^{|}$ – თბოგამტარობის კოეფიციენტია;

$a_{22} = -\lambda_W^{|}$ – ტენგამტარობის კოეფიციენტია (დიფუზიის);

$a_{33} = -\lambda_P^{|}$ – ტენგამტარობის კოეფიციენტია (ფილტრაციის).

ზოგად შემთხვევაში:

$$\left.\begin{aligned} -a_{11} &= \lambda_T^{|} > 0 \\ -a_{22} &= \lambda_W^{|} > 0 \\ -a_{33} &= \lambda_P^{|} > 0 \end{aligned}\right|\quad\left|\quad \lambda_T^{|},\quad \lambda_W^{|}\text{, და } \lambda_p^{|} \text{ დამოკიდებულია (T, W, P) - ზე}\right.$$

აღვნიშნოთ

$$-\frac{a_{11}}{1-\dfrac{(a_{12}\cdot k_{21}+a_{13}\cdot k_{31})}{D}} = \lambda_W = a_{11} + \frac{(a_{12}\cdot k_{21}+a_{13}\cdot k_{31})}{k_{11}};$$

$$-\frac{a_{22}}{1-\dfrac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{D}} = \lambda_T = a_{22} + \frac{(a_{21}\cdot k_{12}+a_{23}\cdot k_{32})}{k_{22}};$$

$$-\frac{a_{33}}{1-\dfrac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{D}} = \lambda_P = a_{33} + \frac{(a_{31}\cdot k_{13}+a_{32}\cdot k_{23})}{k_{33}}.$$

ამ აღნიშვნების გამოყენებით (14) - იდან მივიღებთ:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda_T \cdot \Delta T - q_T^{**} \\ \frac{\partial W}{\partial t} &= \lambda_W \cdot \Delta W - q_W^{**} \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \lambda_P \cdot \Delta P - q_P^{**} \end{aligned}\right| \qquad (16)$$

სადაც

ISSN 1512-0996
www.shromebi.gtu.ge

$$\begin{aligned}
&q_T^{**}=\frac{D}{a_{11}\cdot k_{11}}q_1^{**}=q_1^*+\frac{k_{12}}{k_{11}}(q_2^*+\dot z_2)+\frac{k_{13}}{k_{11}}(q_3^*+\dot z_3)=\nabla z_1(\nabla a_{11}+\frac{k_{12}}{k_{11}}\nabla a_{21}+\\
&+\frac{k_{13}}{k_{11}}\nabla a_{31})+\nabla z_2(\nabla a_{12}+\frac{k_{12}}{k_{11}}\nabla a_{22}+\frac{k_{13}}{k_{11}}\nabla a_{23})+\nabla z_3(\nabla a_{13}+\frac{k_{12}}{k_{11}}\nabla a_{23}+\\
&+\frac{k_{13}}{k_{11}}\nabla a_{33})+\frac{k_{12}}{k_{11}}\cdot\frac{\partial W}{\partial t}+\frac{k_{13}}{k_{11}}\cdot\frac{\partial P}{\partial t};\\
&q_W^{**}=\frac{D}{a_{22}\cdot k_{22}}q_2^{**}=q_2^*+\frac{k_{21}}{k_{22}}(q_1^*+\dot z_1)+\frac{k_{23}}{k_{22}}(q_3^*+\dot z_3)=\nabla z_1(\nabla a_{11}+\frac{k_{21}}{k_{22}}\nabla a_{21}+\\
&+\frac{k_{23}}{k_{22}}\nabla a_{31})+\nabla z_2(\nabla a_{12}+\frac{k_{21}}{k_{22}}\nabla a_{22}+\frac{k_{23}}{k_{22}}\nabla a_{23})+\nabla z_3(\nabla a_{13}+\frac{k_{21}}{k_{22}}\nabla a_{23}+\\
&+\frac{k_{23}}{k_{22}}\nabla a_{33})+\frac{k_{21}}{k_{22}}\cdot\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{k_{23}}{k_{22}}\cdot\frac{\partial P}{\partial t};\\
&q_P^{**}=\frac{D}{a_{33}\cdot k_{33}}q_3^{**}=q_3^*+\frac{k_{31}}{k_{33}}(q_1^*+\dot z_1)+\frac{k_{32}}{k_{33}}(q_1^*+\dot z_2)=\nabla z_1(\nabla a_{11}+\frac{k_{31}}{k_{33}}\nabla a_{21}+\\
&+\frac{k_{32}}{k_{33}}\nabla a_{31})+\nabla z_2(\nabla a_{12}+\frac{k_{31}}{k_{33}}\nabla a_{22}+\frac{k_{32}}{k_{33}}\nabla a_{23})+\nabla z_3(\nabla a_{13}+\frac{k_{31}}{k_{33}}\nabla a_{23}+\\
&+\frac{k_{32}}{k_{33}}\nabla a_{33})+\frac{k_{31}}{k_{33}}\cdot\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{k_{32}}{k_{33}}\cdot\frac{\partial W}{\partial t}.
\end{aligned} \qquad (17)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ

$$\mathrm{grad}a_{ij}(W,T,P)=\frac{\partial a_{ij}}{\partial W}\cdot\mathrm{grad}W+\frac{\partial a_{ij}}{\partial T}\cdot\mathrm{grad}T+\frac{\partial a_{ij}}{\partial P}\cdot\mathrm{grad}P\ ;$$

ანუ $\mathrm{grad}a_{ij}=\frac{\partial a_{ij}}{\partial z_1}\cdot\mathrm{grad}Z_1+\frac{\partial a_{ij}}{\partial z_2}\cdot\mathrm{grad}Z_2+\frac{\partial a_{ij}}{\partial z_3}\cdot\mathrm{grad}Z_3\ ;$

(7) - დან $q_1^*=\mathrm{grad}Z_j\cdot\mathrm{grad}a_{ij}=\mathrm{grad}Z_j\cdot\frac{\partial a_{ij}}{\partial z_k}\cdot\mathrm{grad}Z_k$

(i, j, k=1, 2, 3)

როცა i=1

$$\begin{aligned}
&q_1^*=(\mathrm{grad}Z_1)^2\frac{\partial a_{11}}{\partial z_1}+(\mathrm{grad}Z_2)^2\frac{\partial a_{12}}{\partial z_2}+(\mathrm{grad}Z_3)^2\frac{\partial a_{13}}{\partial z_3}+\mathrm{grad}Z_1\cdot\\
&\cdot\mathrm{grad}Z_2\cdot(\frac{\partial a_{11}}{\partial z_2}+\frac{\partial a_{12}}{\partial z_1})+\mathrm{grad}Z_1\cdot\mathrm{grad}Z_3(\frac{\partial a_{11}}{\partial z_3}+\frac{\partial a_{13}}{\partial z_3})
\end{aligned}$$

ზოგად შემთხვევაში:

$$
\begin{aligned}
&q_1^* = \frac{\partial a_{i1}}{\partial T}(\mathrm{grad}T)^2 + \frac{\partial a_{i2}}{\partial W}(\mathrm{grad}W)^2 + \frac{\partial a_{i3}}{\partial P}(\mathrm{grad}P)^2 + \\
&+(\frac{\partial a_{i1}}{\partial W} + \frac{\partial a_{i2}}{\partial T})\mathrm{grad}T \cdot \mathrm{grad}W + (\frac{\partial a_{i1}}{\partial P} + \frac{\partial a_{i3}}{\partial T})\mathrm{gard}T \cdot \mathrm{grad}P + \\
&+(\frac{\partial a_{i2}}{\partial P} + \frac{\partial a_{i3}}{\partial W})\mathrm{grad}W \cdot \mathrm{grad}P
\end{aligned} \tag{18}
$$

(14); (15); (16); (17); (18) განტოლებები წარმოქმნიან 3 განტოლების ჩაკეტილ სისტემას სამი $z_1 = T$; $z_2 = W$; $z_3 = P$ ფუნქციისთვის [1].

ამ განტოლებების უფრო კომპაქტური ფორმულა მიიღება (9)-დან

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial t} &= -a_{11} \cdot \Delta T - a_{12} \cdot \Delta W - a_{13} \cdot \Delta P - q_1^* \\
\frac{\partial W}{\partial t} &= -a_{22} \cdot \Delta W - a_{21} \cdot \Delta T - a_{23} \cdot \Delta P - q_2^* \\
\frac{\partial P}{\partial t} &= -a_{33} \cdot \Delta P - a_{31} \cdot \Delta P - a_{32} \cdot \Delta W - q_3^*
\end{aligned} \tag{19}
$$

აღვნიშნავთ, რომ ზოგად შემთხვევაში W, T და P გრადიენტების ურთიერთქმედებისას კაპილარულ - ფოროვან სხეულში ხდება არა მარტო ტენგადაცემა, არამედ სითბოტენგადაცემაც. ამიტომ ტენგადაცემის დიფერენციალურ განტოლებებში (18) და (19), a_{11} და a_{33} კოეფიციენტების მნიშვნელობები იქნება რამდენადმე განსხვავებული მათი მნიშვნელობისგან (14) - ში. (18) და (19)-ში მოყვანილი კოეფიციენტები $a_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ თანახმად [1,2] ტოლია:

$$
a_{11} = a + \frac{\varepsilon \cdot r}{c} \cdot a_m \cdot \delta; \quad a_{12} = \frac{r \cdot \varepsilon}{c} \cdot a_m; \quad a_{13} = \frac{\varepsilon \cdot r}{c} \cdot a_m \cdot \delta_p; \tag{20}
$$

$$
a_{22} = a_m; \quad a_{21} = a_m \cdot \delta = (a_{m1}^T + a_{m2}^T); \quad a_{23} = \frac{k_p}{\rho_0} \tag{21}
$$

$$
a_{33} = (a_p - \frac{\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta_p); \quad a_{31} = \frac{-\varepsilon \cdot a_m}{c_p}; \quad a_{32} = \frac{-\varepsilon \cdot a_m}{c_p} \cdot \delta); \tag{22}
$$

სადაც a_m ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტია, ε – ორთქლად გარდაქმნის ფაზური კოეფიციენტი. როდესაც სხეულში ტენშემცველობის ცვლილება ხდება მხოლოდ სითხის გადატანის ხარჯზე ε=0. სითხის გადატანის არარსებობისას, როდესაც სხეულის ტენშემცველობის ცვლილება მის ნებისმიერ წერტილში ხდება მხოლოდ აორთქლების ხარჯზე ε=1.

r ფაზური გადასვლის ხვედრითი სითბოა; c – სხეულის ხვედრითი სითბოტევადობა; $a_m \equiv \lambda_w^|$ – ტენგამტარობის კოეფიციენტი (დიფუზიის);

$a_m^T \equiv a_m \cdot \delta = (a_{m1}^T + a_{m2}^T)$ – თერმოტენგამტარობის კოეფიციენტი (თერმოდიფუზიის);

$\delta = a_m^T / a_m$ – თერმოდიფუზიის ფარდობითი კოეფიციენტი;

k_p – ტენის ფილტრაციული გადატანის კოეფიციენტი;

$\delta_p = k_p / a_m \cdot \rho_0$ – ტენის ფილტრაციული ნაკადის ფარდობითი კოეფიციენტი;

ρ_0 – სხეულის ჩონჩხის სიმკვრივე; $a_p \equiv -\lambda_p^| = k_p / c_p \cdot p_0$ – კონვექციური ტენგამტარობის (ფილტრაციის) კოეფიციენტი; c_p – ფოროვან სხეულში ტენიანი ჰაერის ტევადობის კოეფიციენტი.

აქ და შემდგომ მიღებული სისტემის მიხედვით 1, 2 და 3 ინდექსები აღნიშნავს შესაბამისად სითხის ორთქლისმაგვარ, სითხისმაგვარ (წყალი) და მყარ (ყინული) შემადგენელს, მაგალითად:

a_m^T – ორთქლისმაგვარი ტენის თერმოდიფუზიის კოეფიციენტი;

a_{m2}^T – სითხისმაგვარი ტენის თერმოდიფუზიის კოეფიციენტი.

ინდექსი 0 მიეკუთვნება სხეულის ჩონჩხს, მაგალითად ρ_0 – სხეულის ჩონჩხის სიმკვრივე.

პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ სამშენებლო კომპოზიტებსა და კონსტრუქციებზე (აგებული ამ კომპოზიტებით) ძირითადად მოქმედებს სხეულისა და ტემპერატურის გრადიენტები. ამ შემთხვევაში ტენგადაცემის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას აქვს სახე:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial T}{\partial t} = -a_{11} \cdot \Delta T - a_{12} \cdot \Delta W - q_1^* \\ &\frac{\partial W}{\partial t} = -a_{22} \cdot \Delta W - a_{21} \cdot \Delta T - q_2^* \qquad i = 1,2 \end{aligned}\right| \tag{23}$$

$$q_1^* = \frac{\partial a_{i1}}{\partial T}(\mathrm{grad}T)^2 + \frac{\partial a_{i2}}{\partial W}(\mathrm{grad}W)^2 + \left(\frac{\partial a_{i1}}{\partial W} + \frac{\partial_{i2}}{\partial T}\right)\mathrm{grad}T \cdot \mathrm{grad}W \quad \Big| \tag{24}$$

W და T გრადიენტების ურთიერთქმედებისას, კაპილარულ-ფოროვან სხეულში განვიხილავთ ტენგადაცემის სამ კერძო შემთხვევას:

I. გვაქვს სისტემა (i=1,2) – ფოროვანი სხეული - სითხე - ორთქლი. ტენის გადატანა სხეულში ხდება ორთქლის და წყლის სახით.

II. გვაქვს სისტემა (i=2,3) – ფოროვანი სხეული – სითხე – წყალი. ყინულის სუბლიმაციის და ორთქლის ყინულში აბლიმაციის პროცესებს უგულებელვყოფთ.

III. გვაქვს სიტემა (i=1,3) – ფოროვანი სხეული – ორთქლი – ყინული. ვვარაუდობთ,რომ მთელი წყალი სხეულში გადაქცეულია ყინულად.

კოეფიციენტები $a_{11;}$ $a_{22;}$ a_{12} და a_{21} (23)-ში და (24)-ში იქნება [1]:

1. სისტემისთვის (i=1,2):

$$\left. \begin{aligned} & a_{11} = a + a_{m1}^{T} \frac{r_{12}}{c}; \qquad && a_{12} = a + a_{m1}^{T} \frac{r_{12}}{c}; \\ & a_{22} = a_m; && a_{21} = a_m^{T} = a_m \cdot \delta; \end{aligned} \right| \qquad (25)$$

2. სისტემისთვის (i=2,3):

$$\left. \begin{aligned} & a_{11} = a + (1-\varepsilon_3) \cdot a_{m2}^{T} \frac{r_{23}}{c}; \qquad && a_{12} = (1-\varepsilon_3) a_{m2} \frac{r_{23}}{c}; \\ & a_{22} = a_{m2}(1-\varepsilon_3); && a_{21} = (1-\varepsilon_3) a_{m2}^{T} = (1-\varepsilon_3) a_{m2} \cdot \delta_2; \end{aligned} \right| \qquad (26)$$

3. სისტემისთვის (i=1,3):

$$\left. \begin{aligned} & a_{11} = a + a_{m1}^{T} \frac{r_{13}}{c}; \qquad && a_{12} = a_{m1} \frac{r_{13}}{c}; \\ & a_{22} = a_{m1}; && a_{21} = a_{m1}^{T}; \end{aligned} \right| \qquad (27)$$

სადაც

ε_3 არის ყინულოვნობის კოეფიციენტი. $\varepsilon_3 = \frac{m_3}{m}$;

m_3 – ყინულის მასა/სხეულში, m – მთლიანი წყლის მასა სხეულში თუ სხეული არ შეიცავს ყინულს, $\varepsilon_3 = 0$, თუ მთელი წყალი გადაიქცევა ყინულად $\varepsilon_3 = 1$;

r_{12} – ტენის აორთქლების ხვედრითი სითბო; r_{23} – სითხის გაყინვის ხვედრითი სითბო;

r_{13} – ყინულის სუბლიმაციის ხვედრითი სითბო;

a_{m2}^{T} – სითხისმაგვარი ტენის თერმოდიფუზიის სითბო;

a_{m1}^{T} – ორთქლისმაგვარი ტენის თერმოდიფუზიის კოეფიციენტი;

ISSN 1512-0996
www.shromebi.gtu.ge

δ_2 – სითხისმაგვარი ტენის თერმოდიფუზიის ფარდობითი კოეფიციენტი $\delta_2 = a_{m2}^{T} / a_{m2}$;

a_{m1} – ორთქლისმაგვარი ტენის დიფუზიის კოეფიციენტი; a_{m2} – სითხისმაგვარი ტენის დიფუზიის კოეფიციენტი;

a_m – დიფუზიის კოეფიციენტი; a ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტი;

a_m^T – თერმოტენგამტარობის კოეფიციენტი;

განტოლებები (23) და (24) მართებულია არა მარტო არასტაციონარული, არამედ სტაციონარული მდგომარეობისთვისაც

$$\left(\frac{\partial W}{\partial t} = 0 \text{ ან } \frac{\partial W}{\partial t} = 0\right).$$

დასკვნა

გამოკვლეულია ცემენტისფუძიან კომპოზიტებში ტენგადატანის პროცესები. დაგენილია ბეტონებში მარტივი დატვირთვა გარემოს ფარდობითი ტენიანობის ზღვრებში $\varphi = 0 \div 100\%$ ტენგადაცემის პროცესებზე გავლენას არ ახდენს. შექმნილია კომპოზიტების ტენგამტარობის თეორია. შემუშავებულია დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა, რომელიც ასახავს ცემენტისფუძიან კომპოზიტებში ტენგამტარობის რეალურ სურათს.

შემუშავებული ფორმულებით განისაზღვრება კომპოზიტების ტენგამტარობაზე ტემპერატურის (T), ტენიანობისა (W) და ჰიდროსტატიკური წნევის (P) გრადიენტების ზემოქმედების ყველა შესაძლო ასპექტი.

ფორმულები (14), (15), (16), (17), (18) წარმოქმნის სამი განტოლების ჩაკეტილ სიტემას სამი ($z_1 = T$; $z_2 = W_j$; $z_3 = P$) ფუნქციისთვის შემუშავებულია ამ განტოლებების უფრო კომპაქტური ფორმულები (19), (23), (24) განსაზღვრულია ფორმულებში მოყვანილი კოეფიციენტების მნიშვნელობები (20), (21), (22), (25), (26), (27).

ლიტერატურა

1. Sakvarelidze A. (1999). *Same tasks of building composite materials.* (In Georgian);
2. Lykov, A. (1968). *Drying Theory.* Moscow: Energy. (In Russian);
3. Sakvarelidze, A. (2018). Thermal conductivity issues of new construction composites. GTU.
4. Onsager L. (1931). Reciprocal relations in irreversible processes I. *Physical Review Journals Archive, 37*(4), 405-426 pp.
5. Onsager L. (1931). Reciprocal relations in irreversible processes II. *Physical Review Journals Archive, 38*(12), 2265-2280 pp.

UDC 691.32
SCOPUS CODE 2501
https://doi.org/10.36073/1512-0996-2023-3-103-114

Cement-based Composites Moisture Conductivity Theory

Amiran Sakvarelidze Department of Hydroengineering and Civil Engineering, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68[b], M. Kostava Str.
E-mail: a.sakvarelidze@gtu.ge

Reviewers:
A. Bagration-Davitashvili, Professor, Faculty of Construction, GTU
E-mail: a.davitashvili@gtu.ge
D. Tabatadze, Professor, Faculty of Construction, GTU
E-mail: d.tabatadze@gtu.ge

Abstract. It is important to establish cement-based composites moisture conductivity theory and to determine its parameters at different influences and loads to create comprehensive and improved construction calculation methods.

A number of works are dedicated to the issues concerning building materials moisture transfer. It is worth mentioning that the whole raw of regularities need further clarification and study. It is necessary to develop moisture conductivity theory, which mathematical apparatus will be the base for determining the real picture of cement-based composites moisture transfer.

The issues concerning the processes of cement-based composites moisture transfer are investigated in the article. It is determined that in cements easy loads within the limits of environmental relative humidity have no impact on the processes of moisture transfer.

Composites moisture conductivity theory is created. A system of differential equations that precisely depicts the real picture of materials moisture conductivity is developed. Formulas determine temperature's (T), moisture's (W) and hydrostatic pressure's (P) gradients impact on composites moisture conductivity in every available aspect.

Formulas create closed system – three equations for three functions T, W and P. More compact formula of those equations is developed. In formulas coefficient values are given.

Keywords: differential; equation system; formula; gradients; hydrostatic pressure; moisture conductivity; temperature; theory.

განხილვის თარიღი 18.05.2023
შემოსვლის თარიღი 30.05.2023
ხელმოწერილია დასაბეჭდად 27.09.2023