

УДК 691.32

ВЕРАГОДНАСНАЯ МАДЭЛЬ ДЛЯ ПРАГНАЗАВАННЯ ТЭРМІНА СЛУЖБЫ ЖАЛЕЗАБЕТОННОЙ КАНСТРУКЦЫИ ВА ЎМОВАХ КАМБІНАВАНАЙ КАРОЗІИ

С.М. Леановіч¹, Jijun Miao², Liu Junwei², А.У. Каладзеі¹

¹Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Рэспубліка Беларусь;

²Тэхналагічны ўніверсітэт Ціндао, Кітай

e-mail: leonovichsn@tut.by

У некаторых экстрэмальных каразійных асяроддзях эрозія іёнаў хларыду і вуглякіслага газу можа адбывацца адначасова, што прыводзіць да зносу жалезабетонных (ЖБ) канструкцый. Прадстаўлена верагоднасная мадэль для прагназавання тэрміну службы жалезабетонных канструкцый з улікам гэтага камбінаванага зносу. Прыведзены шэраг спрашчэнняў для ўдасканалення мадэлі. Для гэтага камбінаванага ўздзеяння распрацаваны паўэмпірычны метады. Шляхам верагоднаснага абагульнення гэты спрашчаны метады дазваляе хутка правесці першапачатковы аналіз надзейнасці, які заснаваны на шырокіх дадзеных. Параўнанне атрыманых вынікаў на мадэлях са спрашчэннямі і без іх пацвярджае значнасць гэтых удасканаленняў.

Ключавыя словы: жалезабетон, карозія, перанос хларыдаў, карбанізацыя, верагоднасны, прагноз тэрміну службы.

A PROBABLE MODEL FOR PREDICTING THE SERVICE LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE UNDER COMBINED CORROSION CONDITIONS

S. Leonovich¹, Jijun Miao², Liu Junwei², A. Kaladzei¹

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

²Qingdao University of Technology, China

e-mail: leonovichsn@tut.by

In some extreme corrosive environments, erosion of chloride ions and carbon dioxide can occur simultaneously, leading to deterioration of reinforced concrete (RC) structures. A probabilistic model is presented for predicting the service life of reinforced concrete structures taking into account this combined wear. A number of simplifications are given to improve the model. A semi-empirical method is developed for this combined effect. Through probabilistic generalization, this simplified method allows rapid initial reliability analysis that is based on extensive data. Comparing the results obtained on models with and without simplifications confirms the importance of these improvements.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, chloride transfer, carbonation, probable, service life prediction.

Увядзенне. Ініцыяванне карозіі адбываецца з-за пранікнення вольных іёнаў хлору, карбанізацыі або іх камбінаванага дзеяння [1-6]. Папярэднія даследаванні паказалі, што ўплыў тэмпературы і вільготнасці на перанос іёнаў быў значным [7-9]. Некаторыя працы, у якіх вывучаўся працэс карозіі арматуры, паказваюць на хуткае зніжэнне апорнай здольнасці жалезабетонных канструкцый пасля дэпасівацыі сталёвай арматуры [10-14]. Апорная здольнасць жалезабетоннай канструкцыі значна змяншаецца толькі пасля таго, як ступень карозіі перавысіць

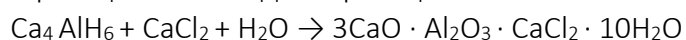
вызначаную мяжу. Гэтая характарыстыка вызначаецца як парог верагоднасці. Імавернасны аналіз зносу кародзіраваных жалезабетонных канструкцый перспектыўны для прагназавання тэрміну службы.

Надзейнасць хларыд-індукаванай карозіі вывучалася ў працах [15-25]. Аднак пранікненне іёнаў разглядалася з дапамогай простага раўнання дыфузіі, не ўлічваюцца ўплыў хларыдзлучальнай здольнасці, канвекцыі, тэмпературы і вільготнасці. Пры гэтым межавая канцэнтрацыя хларыду разглядалася толькі як звычайная выпадковая велічыня. Ні адна з гэтых імавернасных мадэляў не можа быць скарыстана для адзнакі зносу ЖБ у асяроддзі процігалалёдных соляў. У гэтым канкрэтным выпадку канцэнтрацыю хларыдаў на паверхні бетону мэтазгодна разглядаць як кавалачна-залежную функцыю і выкарыстоўваць стахастычныя працэсы для мадэлявання нявызначанасцяў, якія залежаць ад часу межавых умоў у імавернасным аналізе. Верагоднасць карбанізацыі на індуктаванай карозіі вывучалася ў працах [26-40]. Яны прагназавалі глыбіню карбанізацыі на базе эмпірычнай формулы.

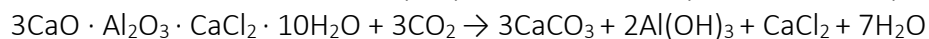
Хларыды ў большасці выпадкаў з'яўляюцца дамінантнымі механізмамі разбурэння. Аднак у некаторых экстрэмальных каразійных асяроддзях на ўваходзе і выхадзе з розных тыпаў марскіх тунэляў забруджванне вуглякіслым газам і пранікненне салянага туману з'яўляюцца вельмі значымі [31-33]. У некаторыя моманты інтэнсіўнага развіцця хуткасць карбанізацыі бетону будзе ў дзясяткі разоў вышэй за норму [31]. Іншы больш распаўсюджаны выпадак адбываецца на бетонных мастах у гарадах. З-за ўздзеяння выхляпных газаў транспартных сродкаў бетоннае пакрыццё схільна моцнаму зносу з-за карбанізацыі. У гэты момант пры выкарыстанні супрацьгалалёднай солі можа ўзнікнуць камбінаваная карозія бетону. Тэрмін службы жалезабетонных канструкцый у гэтых экстрэмальных умовах скарачаецца да адной траціны разліковага [32]. Вельмі важна вывучыць знос бетонных канструкцый у гэтых адмысловых умовах.

Многія эксперыменты паказалі, што карбанізацыя істотна ўплывае на пранікненне свабодных іёнаў хлору і вільгаці [34-43]. Аднак большая частка карозіі, выкліканай хларыдамі і карбанізацыяй, разглядаецца незалежна адзін ад аднаго ва ўсіх існуючых імавернасных аналізах [15-30], уключаючы шырока прызнаны мадэльны код FIB для разліку тэрміну службы [44]. Патрэбна больш дакладная імавернасная мадэль для разліку надзейнасці жалезабетонных канструкцый з камбінаваным зносам у экстрэмальных умовах. Механізм узаемадзеяння карбанізацыі і пранікненні хларыдаў быў вывучаны ў працах [32, 33]. Механізм уплыву можна рэзюмаваць наступным чынам: (1) зніжэнне здольнасці бетону звязваць хларыды ў выніку карбанізацыі; (2) змена крытычнага радыусу пор і сітаватасці бетону; (3) вызваленне свабодных іёнаў хларыду з звязанага хларыду; (4) змяненне парогавага зместу хларыдаў. Мінералагічны механізм выкліканага карбанізацыяй змены, якая злучае здольнасці хларыдаў і вызваленні вольных іёнаў хларыду з злучанага хларыду.

Механізм хімічнай сувязі паміж карбанізацыяй і перамяшчэннем хларыдаў. Пры трапленні вольных іёнаў хлору ў бетоне ўтвораецца соль Фрыдэля (звязаны хларыд). Гэты працэс хімічнай рэакцыі можна адлюстравіць



Адзначана, што працэс карбанізацыі працякае значна павольней, чым рух хларыду. Як толькі дыяксід вугляроду ўступае ў кантакт з ўтворанай солью Фрыдэля, вольныя іёны хларыду будуць вызваляцца на мяжы падзелу карбанізацыі з наступнай хімічнай рэакцыяй.



Імавернаснае абагульненне для гэтага камбінаванага дзеяння было прадстаўлена на аснове тэарэтычнай мадэлі [45]. Аднак складанасць гэтай мадэлі прыводзіць да павелічэння вылічальных затрат. Таму тэарэтычная мадэль дадаткова спрошчаная, і прадстаўлены шэраг

падыходаў для спрашчэння працэдуры рашэння і функцый гранічнага стану. Новы паўэмпірычны метада распрацаваны спецыяльна для хуткага разліку верагоднасці зносу пры камбінаваным уздзеянні пры вялікіх аб'ёмах дадзеных.

Разглядаецца мадэль надзейнасці для камбінаванага зносу. Прапануецца далейшае спрашчэнне шляхам аб'яднання функцый гранічнага стану ў адну для зыходнай імавернаснай мадэлі. Прыведзены таксама два спрошчаныя падыходы да вырашэння комплекснай імавернаснай мадэлі. Прапануецца новы полуэмпірычны метада для даследавання надзейнасці гэтага камбінаванага зносу.

2. Агляд мадэлі надзейнасці камбінаванага зносу

2.1. Асноўнае раўнанне і функцыі гранічнага стану

Раней [1, 46-49] перанос свабодных іёнаў хлору ў бетоне разглядаўся ў адпаведнасці з другім законам дыфузіі Фіка. Шырока выкарыстоўваецца аднамернае рашэнне дыфузіі ў прыватных вытворных. Глыбіня карбанізацыі была інтэрпрэтаваная як лінейна прапарцыйная квадратнаму кораню часу. Затым ён быў скарыстаны для прагназавання верагоднасці ўзнікнення карозіі, выкліканай карбанізацыяй, шляхам параўнання з таўшчынёй ахоўнага пласта бетону [26-30]. Аднак ні адна з гэтых мадэляў не можа ўлічваць эфект спалучэння карбанізацыі і ўздзеянні хларыдаў.

Каб выправіць недахоп аналітычнага аднамернага імавернаснага аналізу, у [45] распрацавана комплексная імавернасная мадэль карозіі арматуры. Асноўнае раўнанне пераносу свабодных іёнаў хлору пры карбанізацыі можна прадставіць у выглядзе [32]

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{fc}^{car} \nabla C_{fc}) + \nabla \cdot (C_{fc} D_h^{car} \nabla h) + Q_{rc} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{CO_2} \nabla C_{CO_2}) - Q_h, \quad (2)$$

дзе C_{fc} – утрыманне вольных іёнаў хлору (% мас. звязальнага);

Q_{rc} – хуткасць вылучэння вольных іёнаў хлору на мяжы падзелу карбанізацыі;

h – вільготнасць;

C_{CO_2} – канцэнтрацыя CO_2 у сітавінах бетону;

Q_h – хуткасць выдатку прадукта гідратацыі падчас рэакцыі карбанізацыі з удзелам $Ca(OH)_2$ і CSH і інш. [32];

D_h^{car} , D_{CO_2} – уяўныя каэфіцыенты дыфузіі свабодных іёнаў хлору, вільгаці і CO_2 пад уплывам карбанізацыі.

Затым уводзяцца дзве функцыі лімітавага стану для разліку верагоднасці ўзнікнення карозіі з-за сумеснага дзеяння хларыдаў і карбанізацыі, г.зн.

$$g_1(x, t) = \eta(x, t) C_{fc, th} - C_{fc}(x, t) \quad (3)$$

$$g_2(x, t) = pH(x, t) - pH_{th} \quad (4)$$

дзе x – вектар, які адлюстроўвае выпадковыя велічыні;

$C_{fc, th}$ – парогавае ўтрыманне хларыдаў;

$\eta(x, t) = \frac{C_{ch, d}}{[C_{ch, d}]_0}$ – папярэчыны каэфіцыент, які залежыць ад ступені карбанізацыі;

$C_{ch, d}$ і $[C_{ch, d}]_0$ – імгненная і пачатковая канцэнтрацыі раствараемага гідраксиду кальцыя ў працэсе пранікнення вуглякіслага газу адпаведна;

$pH(x, t)$ – імгненнае значэнне pH; і pH_{th} – крытычнае значэнне pH, пры якім можа пачацца карозія арматуры.

Паколькі індывідуальнае дзеянне абодвух агентаў можа выклікаць ініцыяванне карозіі, вобласць адмовы пры такім камбінаваным дзеянні павінна быць вызначана як аб'яднанне вобласці карозіі з-за пранікнення хларыдаў і вобласці карозіі з-за карбанізацыі (малюнак 1). Тады верагоднасць узнікнення карозіі пры камбінаваным уздзеянні $p_{f,comb}$ у момант часу t можа быць зададзена:

$$p_{f,comb}(t) = \int_{g_1(x,t) < 0 \text{ or } g_2(x,t) < 0} f(x,t) dx \quad (5)$$

Стахастычныя працэсы выкарыстоўваюцца для мадэлявання выпадковага характару параметраў навакольнага асяроддзя, якія змяняюцца ў залежнасці ад часу ўздзеяння, у тым ліку межавай тэмпературы T_b , межавай вільготнасці h_b , межавых канцэнтрацый хларыдаў $C_{fc,b}$ і вуглякіслага газу $C_{CO_2,b}$ [45-47].



Малюнак 1. – Прагназаванне ўзнікнення карозіі пры камбінаваным уздзеянні

2.2. Зменшаная колькасць выпадковых велічынь

Аднак мадэль сувязі, якая імітуе сумеснае ўздзеянне пранікнення хларыдаў і карбанізацыі, вельмі складаная [32]. З-за складанасці базавай тэарэтычнай мадэлі кожны развязальны дэтэрмінаваны выпадак патрабуе шмат часу ў метадзе Монтэ-Карла для рэальнай задачы.

У гэтым даследаванні ў якасці выпадковых велічынь для імавернаснага аналізу абраныя толькі сем ключавых параметраў. Гэтыя сем былі абраныя на аснове вынікаў выпрабаванняў на аднабаковую адчувальнасць, уключаючы $C_{fc,th}$, C_t , $\phi_{hc,0}$, d , k_f , $D_{fc,ref}$, $[C_{CaO}]_0$.

3. Іншыя далейшыя паляпшэнні імавернаснай мадэлі камбінаванай даўгавечнасці

3.1. Адзіная функцыя гранічнага стану

Паколькі ў зыходнай імавернаснай мадэлі ёсць дзве функцыі лімітавага стану немагчыма выкарыстоўваць простыя метады рашэння зыходнай мадэлі, акрамя складанага метаду Монтэ-Карла. Тут замест асобнай функцыі лімітавага стану ўводзіцца ступеністая функцыя $\beta(x, t)$, каб адлюстраваць ўклад карбанізацыі ў ініцыяванне карозіі. Затым раўнанні (3) і (4) інтэгруюцца, каб атрымаць адну функцыю лімітавага стану, т. е.

$$g_3(x, t) = \beta(x, t) \eta(x, t) C_{fc,th} - C_{fc}(x, t) \quad (6)$$

$$\beta(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{для } pH(x, t) - pH_{th} > 0 \\ 0 & \text{для } pH(x, t) - pH_{th} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Акрамя таго значэнне $\beta(x, t)$ супадае са значэннем $\eta(x, t)$. Значыць, $\beta(x, t) \times \eta(x, t)$ можна для прастаты наўпрост замяніць на $\eta(x, t)$. Тады верагоднасць адмовы пры камбінаваным зносе можна спрасціць і скарэктаваць наступным чынам:

$$P_{f,comb}(t) = \int_{g_1(x,t) < 0} f(x,t) dx \quad (8)$$

Пры такім спрашчэнні можна выкарыстоўваць для рашэння гэтай імавернаснай мадэлі іншыя аналітычныя метады, такія як метады паверхні водгуку.

3.2. Спрашчэнне алгарытму традыцыйнай працэдуры рашэння

Прапануецца спрашчэнне працэдуры рашэння імавернаснай мадэлі. Упершыню гэты метады быў прапанаваны Базантам у [48]. У гэтым спрошчаным метады агульны час прагонаў для тэарэтычных дэтэрмінаваных мадэляў уяўляе сабой падзеленыя інтэрвалы выпадковых велічынь n .

3.3. Метады паверхні водгуку

У актуальных задачах можа быць усяго некалькі выпадковых зменных з рознымі сярэднімі значэннямі і дысперсіямі. Тады няма неабходнасці запускарнаць пашыраны метады Монтэ-Карла для вырашэння асобных задач. Замест гэтага можа быць прынята мадэль паверхні водгуку. Для набору мадэляў, у якіх адрозніваюцца толькі некалькі выпадковых велічынь, гэты метады паверхні водгуку значна спросціць працэс разліку.

У адпаведнасці з кропкамі выбаркі першасных выпадковых велічынь вынік Монтэ-Карла можа быць пераўтвораны ў прастору выбаркі мадэлі паверхні водгуку.

1. Верагоднасць узнікнення карозіі эталоннага ўзору разлічваецца метадым Монтэ-Карла.
2. Вынік Монтэ-Карла для эталоннага ўзору выкарыстоўваецца для пабудовы паверхні водгуку.
3. Змяняючы сярэдняе значэнне выпадковай велічыні, верагоднасці ўзнікнення карозіі ў іншых узорах можна разлічыць па паверхні водгуку.

4. Паўэмпірычны падыход да імавернаснага даследавання камбінаванай даўгавечнасці

4.1. Размеркаванне канцэнтрацый свабодных іёнаў хлору з улікам карбанізацыі

Прапануецца паўэмпірычны метады для гэтай камбінаванай праблемы зносу. За выключэннем аналізу надзейнасці, яго простыя раўнанні падыходзяць для некаторых адмысловых умоў. У адпаведнасці з механізмам карбанізацыі і паступленнем хларыдаў [32] і механізмам хімічнай рэакцыі карбанізацыі [49, 50] мяркуецца, што ўплыў канцэнтрацыі іёнаў хларыду на хуткасць v рэакцыі карбанізацыі нязначная. Класічны выраз глыбіні карбанізацыі з t паранейшаму прымяняльны ў гэтай камбінаванай праблеме даўгавечнасці.

Тут частковая глыбіня карбанізацыі (зона працэсу карбанізацыі) уведзіцца для аптымізацыі аналітычнай формулы Пападакіса [49], г.зн.

$$c_{сфк} = \begin{cases} 0 & \text{для } t \leq \frac{c_{сар}^2 [C_{CaO}]_0}{2D_{CO_2} C_{CO_2,b}} \\ \sqrt{\frac{2D_{CO_2} C_{CO_2,b} \cdot t}{[C_{CaO}]_0}} & \text{для } t \leq \frac{c_{сар}^2 [C_{CaO}]_0}{2D_{CO_2} C_{CO_2,b}} \end{cases} \quad (9)$$

дзе $c_{сар}$ – цалкам і часткова карбанізаваныя глыбіні.

Папярэднія даследаванні паказалі, што хуткасць рэакцыі дыяксіду вугляроду з $Ca(OH)_2$ нашмат вышэй, чым з CSH і соллю Фрыдэля. Гэта азначае, што з'ява вылучэння вольных іёнаў хлору з солі Фрыдэля павінна адбывацца ў асноўным пасля таго, як $Ca(OH)_2$ цалкам паглынаецца вуглякіслым газам. Таму адпаведная гэтаму моманту крытычная ступень карбанізацыі

має істотнае значэнне для камбінаванага ўздзеяння хларыдаў і карбанізацыі. Тут зона частковай карбанізацыі вызначаецца як ступень карбанізацыі ў наступным дыяпазоне:

$$1 - P_{CSH} \leq \alpha_c < 1 \quad (10)$$

Аналіз лікавых вынікаў і эксперыментальных дадзеных у [32, 34, 36, 38] паказвае, што значэнне c_{par} залежыць ад каэфіцыента дыфузіі вуглякіслага газу. Гэта вызначаецца механізмам з'явы частковай карбанізацыі. Калі вуглякіслы газ пераносіцца занадта хутка, гідраксід кальцыю і CSH на мяжы падзелу не могуць цалкам яго паглынуць. Затым частка вуглякіслага газу праходзіць праз мяжу раздзелу і працягвае транспартавацца ўнутр бетону:

$$c_{пот} = 0,0158D_3 - 0,3702D^2 + 36656D + 5,945 \text{ для } 0,1 \leq D \leq 10 \quad (11)$$

дзе $D = \frac{D_{CO_2}}{D_{CO_2}}$ – безпамерны параметр;

$D_{CO_2} = 1 \times 10$ – каэфіцыент дыфузіі CO_2 .

Затым падзяляецца камбінаваны эффект карбанізацыі і пранікнення хларыдаў з дапамогай паўэмпірычнай мадэлі. Транспарт свабодных іёнаў хлору разглядаецца як асобная дыфузійная з'ява. Цалкам і часткова карбанізаваныя зоны бетону выдаляюцца, а новая паверхня карбанізацыі аднаўляецца як новая мяжа транспарта іёнаў хлору ва ўнутраную частку бетону.

Значэнне новай межавай умовы змяняецца з-за вызвалення вольных іёнаў хлору, выкліканага карбанізацыяй. Яго можна разглядаць як лінейную залежнасць ад глыбіні карбанізацыі. Нахіл гэтай лініі вызначаецца па прапорцыях сумесі бетону. Тэарэтычны механізм гэтага паўэмпірычнага падыходу такі. Звычайна глыбіня карбанізацыі вельмі малая і блізкая да канкрэтнай мяжы. Як толькі на мяжы карбанізацыі вылучаецца вялікая колькасць вольных іёнаў хлору, адбываецца працэс хуткай зваротнай дыфузіі ад мяжы карбанізацыі да мяжы бетону. Пікавае значэнне канцэнтрацыі хларыду на мяжы карбанізацыі звязана толькі з мінералагічнымі характарыстыкамі бетону і хуткасцю дыфузіі іёнаў хларыду.

Нахіл лінейнай змены канцэнтрацыі хларыдаў у карбанізаванай зоне бетону β_c уяўляецца наступным чынам:

$$\beta_c = -0,004f_{car}^3 + 0,048f_{car}^2 - 0,147f_{car} + 0,201 \text{ для } 1,5 \leq f_{car} \leq 5 \quad (12)$$

для звычайнага партландцэментнага бетону і

$$\beta_c = -0,009f_{car}^3 + 0,089f_{car}^2 - 0,340f_{car} + 0,399 \text{ для } 1,5 \leq f_{car} \leq 5 \quad (13)$$

для зольнага бетону; дзе f_{car} уяўляе сабой функцыю ўплыву карбоніёну на ўяўны каэфіцыент дыфузіі вольнага іёна хлору, і яе разліковы метада можна знайсці ў [32]. Глыбіня карбанізацыі прымаецца ў сантыметрах (см).

Тады паўэмпірычная формула для прагназавання канцэнтрацыі хларыдаў з улікам ефекту карбанізацыі можа быць выказана як:

$$C_{fc}(y) = (1 + \beta_c \cdot y) C_{fc,b} \quad (14)$$

для $y \leq c_{car+par}$; і

$$C_{fc}(y) = C_{fc,0} + \left[(1 + \beta_c \cdot y) C_{fc,b} - C_{fc,0} \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y - c_{car} - c_{par}}{2\sqrt{D_{fc,app} \cdot t}} \right) \right] \quad (15)$$

для $y > c_{car+par}$; дзе y – становішча разліковай кропкі, $C_{fc,0}$ – пачатковая ўмова для канцэнтрацыі хларыду.

Перавага гэтага паўэмпірычнага метада складаецца ў тым, што формулу размеркавання канцэнтрацыі хларыдаў з улікам ўплыву карбанізацыі можна атрымаць непасрэдна, замест

рашэння складаных раўнанняў у прыватных вытворных. Гэта дазволіць інжынерам і праекціроўшчыкам напрамую выкарыстоўваць функцыю простага выраза для прагназавання камбінаванага зносу канструкцый.

4.2. Эксперыментальная праверка і параўнанне з комплекснай камбінаванай мадэллю.

Паўэмпірычнае рашэнне

Для праверкі прапанаванага паўэмпірычнага рашэння выкарыстоўваецца папераменны тэст на пранікненне карбаніёнаў і хларыдаў [38]. У гэтым выпрабаванні тры звычайных партландцэментных бетонаў з рознымі прапорцыямі сумесі падвяргаюць карбанізацыі на працягу трох дзён у камеры.

Затым аб'ёмная доля CO₂ усталёўвалася роўнай 5%, тэмпература і вільготнасць таксама ўсталёўваліся пастаяннымі 20°C і 65% адпаведна для выпрабавальнай камеры. Затым пасля трохдзённай карбанізацыі гэтыя ўзоры змяшчаюць у раствор NaCl з канцэнтрацыяй 0,5 М.

Пікавае значэнне зместу іёнаў хлору ўзнікала на мяжы падзелу карбанізацыі, а не на межавай паверхні, што звязана з індукаванымі карбаніёнамі вызваленнем свабодных іёнаў хлору з звязанага хларыду. Вынікі, разлічаныя з дапамогай паўэмпірычнага рашэння, блізкія да якіх чаргуюцца эксперыментальным вынікам і комплексным камбінаваным лікавым вынікам.

4.3. Разлік верагоднасці

Паводле прыведзеных вышэй паўэмпірычных формул час пачатку карозіі вызначаецца як момант, калі ўтрыманне хларыдаў вакол сталёвага стрыжня перавышае парогавую канцэнтрацыю. Тады функцыі лімітавага стану фармулююцца наступным чынам:

$$g_4(x, t) = \gamma(x, t) C_{fc, th} - C_{fc}(x, t) \quad (16)$$

$$g_5(x, t) = c_m - c_{car}(x, t) - c_{par}(x, t) \quad (17)$$

дзе $\gamma(x, t)$ – безпамерны параметр, які адлюстроўвае выкліканае карбанізацыяй зніжэнне парогавога значэння канцэнтрацыі хларыдаў.

Новае значэнне парога ўтрымання хларыдаў залежыць ад колькасці гідраксиду кальцыя. За мяжу часткі прымаецца фронт зоны частковай карбанізацыі. У дыяпазоне зоны працэсу карбанізацыі змена $\gamma(x, t)$ для прастаты прынята лінейным. Тады $\gamma(x, t)$ фармулюецца як:

$$\gamma(x, t) = \begin{cases} 0 & \text{для } y \leq c_{car}(x, t) \\ \frac{1}{c_{par}(x, t)} [y - c_{car}(x, t)] & \text{для } c_{car}(x, t) < y \leq c_{car}(x, t) + c_{par}(x, t) \\ 1 & \text{для } y > c_{car}(x, t) + c_{par}(x, t) \end{cases} \quad (18)$$

Уклад карбанізацыі ў ініцыяванне карозіі быў адлюстраваны ў параметры $\gamma(x, t)$. Тады $g_5(x, t)$ можна ігнараваць. Верагоднасць гэтага камбінаванага пагаршэння павінна быць прыблізна вызначана як:

$$P_{f, comb}(t) = \int_{g_4(x, t) < 0} f(x, t) dx \quad (19)$$

Высновы.

1. Разгледжана комплексная мадэль для разліку дакладнасці каразійнага зносу з-за карбанізацыі, пранікнення хларыдаў і іх камбінаванага ўздзеяння.
2. Прапануюцца два спрошчаныя падыходы да працэдуры рашэння гэтай імавернаснай мадэлі.
3. Распрацаваны паўэмпірычны метады для прыблізнага прагназавання размеркавання канцэнтрацыі іёнаў хлору і хуткага разліку верагоднасці камбінаванага зносу.
4. Параўнанне з зыходнай няспрошчанай мадэллю паказвае, што ўсе гэтыя палепшаныя падыходы могуць значна спрасціць вылічальныя выдаткі, і што дакладнасць з'яўляецца прымальнай.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бёні, Х. (рэд.) Карозія ў жалезабетонных канструкцыях; Выдавецтва Вудхед : Оксфард, Вялікабрытанія, 2005 г.
2. Базант З.П. Фізічная мадэль карозіі сталі ў бетонных марскіх збудаваннях-тэорыя. ASCE J. Структура. Дзіўны. 1979, 105, 1137-1153.
3. Сафехіян, М.; Рамезаніянпур, А.А. Прагнаванне тэрміна службы жалезабетоннай канструкцыі ў выніку палявой доўгачасовай дыфузіі хларыдаў. Вылічыць. Канкр. 2015, 15, 589-606. [Скрыжаваная спасылка].
4. Квон, SJ; Кім, С.С. Склад бетоннай сумесі для забеспячэння тэрміна службы жалезабетонных канструкцый, схільных уздзеянню хларыдаў. Вылічыць. Канкр. 2012, 10, 587-607. [Скрыжаваная спасылка].
5. Хо, DWS; Льюіс Р.К. Карбанізацыя бетону і яе прадказанне. Сем. Канкр. Рэз. 1987, 17, 489-504. [Скрыжаваная спасылка].
6. Дэміс, С.; Пападакіс, В. Параўнальная ацэнка з дапамогай праграмнага забеспячэння ўплыву тыпу цэменту на карбанізацыю бетону і пранікненне хларыдаў. Вылічыць. Канкр. 2012, 10, 391-407. [Скрыжаваная спасылка].
7. На, О.; Кай, Х.; Хі, Y. Прагнаванне карозіі з дапамогай паралельнага мадэлявання метадам канчатковых элементаў для спалучанага хіміка-гірапераносу ў бетон у асяроддзі, багатай хларыдамі. Матэрыялы 2017, 10, 350. [Перакрыжаваная спасылка] [ПабМед].
8. Істэйта, М.; Хі, Y. Уплыў змены тэмпературы на пранікненне хларыдаў у бетон. Констар. Пабудаваль. Маці. 2017, 156, 73-82. [Скрыжаваная спасылка].
9. Хоман, Л.; Абабне, А.; Хі, Y. Уплыў пераносу вільгаці на пранікненне хларыдаў у бетон. Констар. Пабудаваль. Маці. 2016, 125, 1189-1195. [Скрыжаваная спасылка].
10. Озболт, Дж.; Арсанік, Ф.; Балабанік, Г.; Кустар, М. Мадэляванне пашкоджанняў бетону, выкліканых карозіяй арматуры: камбінаваная 3D-мадэль канчатковых элементаў. унутр. Дж. Фракт. 2012, 178, 233-244. [Скрыжаваная спасылка].
11. Озболт, Дж.; Балабанік, Г.; Кустар М. 3D Лікавае мадэляванне карозіі сталі ў бетонных канструкцыях. Корас. навук. 2011, 53, 4166-4177. [Скрыжаваная спасылка].
12. Цао, К.; Чэнг, М.; Чан, Б. Мадэляванне ўзаемадзеяння паміж выкліканай карозіяй расколінай у бетонным пакрыцці і хуткасцю карозіі сталі. Корас. навук. 2013, 69, 97-109. [Скрыжаваная спасылка].
13. Пантазапулу, С.; Папулія, К. Мадэляванне парэпанна пакрыцця з-за карозіі арматуры ў жалезабетонных канструкцыях. Дж. Інж. Мех. -ASCE 2001, 127, 342-351. [Скрыжаваная спасылка].
14. Чжу, Х.; Зі, Г. Двухмерная механа-хімічная мадэль для мадэлявання карозіі арматуры і пашкоджання бетону. Констар. Пабудаваль. Матэр. 2017, 137, 330-344. [Скрыжаваная спасылка].
15. Саассу, Б.; Лоўніс, З. Імавернаснае мадэляванне карозіі, выкліканай хларыдамі, у бетонных канструкцыях з выкарыстаннем метадаў надзейнасці першага і другога парадку. Сем. Канкр. камп. 2012, 34, 1082-1093. [Скрыжаваная спасылка].
16. Шын, К.; Кім, Дж.; Лі, К. Праграмнае забеспячэнне для разліку даўгавечнасці на аснове верагоднасцяў для бетонных канструкцый, схільных уздзеянню хларыдаў. Вылічыць. Канкр. 2011, 8, 511-524. [Скрыжаваная спасылка].
17. Конг, Дж.; Абабне, А.; Франгопаль, Д.; Хі, Y. Аналіз надзейнасці пранікнення хларыдаў у насычаны бетон. верагодна. англ. мех. 2002, 17, 305-315. [Скрыжаваная спасылка].
18. Сцюарт, М.; Маллард, Дж. Прасторавы аналіз надзейнасці каразійных пашкоджанняў у залежнасці ад часу і тэрміны першага рамонту жалезабетонных канструкцый. англ. Структура. 2007, 29, 1457-1464. [Скрыжаваная спасылка].
19. Сцюарт, М.; Суо, Q. Ступень прасторава-пераменнага каразійнага пашкоджання як паказчык трываласці і якая залежыць ад часу надзейнасці жалезабетонных бэлек. англ. Стр уктура. 2009, 31, 198-207. [Скрыжаваная спасылка].
20. Раян, П.; О'Конар, А. Імавернасны аналіз часу да карозіі, выкліканай хларыдамі, для розных самоуплотняющихся бетонаў. Констар. Пабудаваль. Маці. 2013, 47, 1106-1116. [Скрыжаваная спасылка].

21. Нагейра, К.; Леанэль, Э. Верагоднасны мадэлі, якія прымяняюцца для ацэнкі бяспекі жалезабетонных канструкцый, схільных пранікненню хларыдаў. англ. Памылка. Анал. 2013, 31, 76-89. [Скрыжаваная спасылка].
22. Штраўс, А.; Венднер, Р.; Бергмайстар, К.; Коста, К. Колькасць і эксперыментальная ацэнка надзейнасці бетоннага моста, схільнага зносу, выкліканаму хларыдамі. Дж. Інфраструктура. Сіст. 2012, 19, 166-175. [Скрыжаваная спасылка].
23. Вал, Д.; Трапер, П. Верагоднасць ацэнка часу ўзнікнення карозіі, выкліканай хларыдамі. Надзейны. англ. Сіст. Саф. 2008, 93, 364-372. [Скрыжаваная спасылка].
24. Саэтта, А.; Скота, Р.; Віталіні, Р. Аналіз дыфузіі хларыдаў у часткова насычаны бетон. Акі Матэр. Дж. 1993, 90, 441-451.
25. Суо, В.; Сцюарт, М. Абнаўленне прагнозу каразійнага парэпання руйнуецца жалезабетонных канструкцый з выкарыстаннем інфармацыі аб аглядзе. Надзейны. англ. Сіст. Саф. 2009, 94, 1340-1348. [Скрыжаваная спасылка].
26. Бастыдас-Артэага, Э.; Шэфс, Ф.; Сцюарт, М.; Ван, Х. Уплыў глабальнага пацяплення на даўгавечнасць кародзіруючых жалезабетонных канструкцый: імавернасны падыход. англ. Структура. 2013, 51, 259-266. [Скрыжаваная спасылка].
27. Дзюпра, Ф.; Ву, Н.; Селье, А. Паскораныя выпрабаванні на карбанізацыю для імавернаснага прагназавання даўгавечнасці бетонных канструкцый. Констар. Пабудаваць. Маці. 2014, 66, 597-605. [Скрыжаваная спасылка].
28. Дзюпра, Ф.; Ву, Н. Верагоднасць парог узнікнення карозіі, выкліканай карбанізацыяй. еўра. Дж. Навакольнае асяроддзе. Грамадзянскі. англ. 2013, 17, 478-495. [Скрыжаваная спасылка].
29. Лоліні, Ф.; Рэдаэлі, Э.; Бертоліні, Л. Аналіз параметраў, якія ўплываюць на імавернасныя прагнозы часу пачатку карозіі жалезабетонных канструкцый, выкліканай карбанізацыяй. Маці. Корас. 2012, 63, 1059-1068. [Скрыжаваная спасылка].
30. Май-Нху, Дж.; Селье, А.; Дзюпра, Ф.; Ружо, П.; Капрад, Б.; Хайверт, Н.; Францыска, П. Імавернасны падыход да даўгавечнага разліку бетоннага пакрыцця: прымяненне да карбанізацыі. еўра. Дж. Навакольнае асяроддзе. Грамадзянскі. англ. 2012, 16, 264-272. [Скрыжаваная спасылка].
31. Хуанг, Т. Эксперыментальнае даследаванне ўзаемадзеяння паміж карбанізацыяй бетону і пранікненнем хларыдаў пад нагруккай. магістра Дысертацыя, Чжэцзян Універсітэт, Ханчжоу, Кітай, 2013.
32. Чжу, ХJ; Зі, Г.; Цао, З.; Чэнг, Х. Камбінаваны эфект карбанізацыі і пранікнення хларыдаў у бетон. Констар. Пабудаваць. Маці. 2016, 110, 369-380. [Скрыжаваная спасылка].
33. Чжу, ХJ; Кім, С.; Квак, Д.; Беа, К.; Зі, Г. Параметрычны аналіз адначасовага пранікнення карбанізацыі і іёнаў хларыду ў жалезабетонныя секцыі. Дж. Карэя Інст. Структура. Мент. Удых. 2016, 20, 66-74.
34. Лі, М.; Юнг, С.; О, Б. Уплыў карбанізацыі на пранікненне хларыдаў у бетон. Акі Матэр. Дж. 2013, 110, 559-566. [Скрыжаваная спасылка].
35. Бэкус, Дж.; Макпалін, Д.; Башыр, М.; Лонг, А.; Холмс, Н. Уздзеянне на будаўнічыя растворы цыклічнага пранікнення хларыдаў і карбанізацыі. Дад. Сем. Рэз. 2013, 25, 3-11. [Скрыжаваная спасылка].
36. Тумідайскі, П.; Чан, Г. Уплыў сульфату і вуглякіслага газу на дыфузію хларыду. Сем. Канкр. Рэз. 1996, 26, 551-556. [Скрыжаваная спасылка].
37. Юн, І. Просты падыход да разліку каэфіцыента дыфузіі хларыдаў у бетоне з улікам карбанізацыі. Вылічыць. Канкр. 2009, 6, 1-18. [Скрыжаваная спасылка].
38. Юн, І. Пагаршэнне стану бетону з-за камбінаванай рэакцыі карбанізацыі і пранікнення хларыдаў: эксперыментальнае даследаванне. Ключ ангел. Маці. 2007, 348-349, 729-732. [Скрыжаваная спасылка].
39. Юн, І. Просты падыход да разліку каэфіцыента дыфузіі хларыдаў (не)карбанатнай бетону. Ключ ангел. Маці. 2008, 385-387, 281-284. [Скрыжаваная спасылка].
40. Юань, К.; Ніу, Д.; Луо, Д. Уплыў карбанізацыі на дыфузію хларыдаў у зольным бетоне. Катастрофа Дад. 2012, 5, 433-436.
41. Дельнаваз, А.; Ramezaniarpour, А. Ацэнка ўплыву карбанізацыі на дыфузію хларыдаў у бетоне на аснове мадэлі штучнай нейронавай сеткі. Чараўнік. Канкр. Рэз. 2012, 64, 877-884. [Скрыжаваная спасылка].

42. Нгала, В.; Page, С. Уплыў карбанізацыі на порыстую структуру і дыфузійныя ўласцівасці гідратаваных цэментавых паст. Сем. Канкр. Рэз. 1997, 27, 995-1007. [Скрыжаваная спасылка].
43. ЦЭБ-ФІП. Код модзе ці Fib для бетонных канструкцый; Wiley -VCH Verlag GmbH : Вайнхайм , Германія, 2010 г.
44. Чжан, С.; Чжао, Б. Даследаванне дыфузіі іёнаў хларыду ў бетоне, падвергнутым уздзеянню асяроддзя CO_2 . Вылічыць. Канкр. 2015, 15, 589-606.
45. Чжу, Хі; Зі, Г.; Лі, В.; Кім, С.; Конг, Дж. Імавернасны аналіз карозіі арматуры з-за камбінаванага дзеянні карбанізацыі і пранікнення хларыдаў у бетон. Констар. Пабудаваць. Маці. 2016, 124, 667-680. [Скрыжаваная спасылка].
46. Ганем Р.; Спанос, П. Стахастычныя канчатковыя элементы: спектральны падыход; Спрынгер: Нью-Ёрк, штат Нью-Ёрк, ЗША, 1991; стар 15-36.
47. Сю, Д. Лікавыя метады стыхастычных вылічэнняў: падыход спектральнага метаду; Выдавецтва Прынстанскага ўніверсітэта: Прынстан, штат Нью-Джэрсі, ЗША, 1991; стар 33-45.
48. Базант, ЗП; Лю, К. Выпадковая паўзучасць і ўсаджванне ў канструкцыях: выбарка. Дж. Структура. англ. ASCE 1985, 111, 1113-1134. [Скрыжаваная спасылка].
49. Пападакіс, В.; Ваенас, К.; Фардыс, М. Фундаментальнае мадэляванне і эксперыментальнае даследаванне карбанізацыі бетону. Акі Матэр. Дж. 1991, 88, 363-373.
50. Пападакіс, В.; Ваенас, К.; Фардыс, М. Эксперыментальнае даследаванне і матэматычнае мадэляванне праблемы карбанізацыі бетону. хім. англ. навук. 1991, 46, 1333-1338. [Скрыжаваная спасылка].
51. Ангст, Ю.; Эльзенер, Б.; Ларсен, К.; Веннесланд, Ø. Крытычнае ўтрыманне хларыдаў у жалезабетоне. Агляд. Сем. Канкр. Рэз. 2009, 39, 1122-1138. [Скрыжаваная спасылка].
52. Сойлеў, Т.; Франсуа, Р. Карозія арматуры ў сувязі з наяўнасцю дэфектаў на мяжы падзелу сталі і бетону. Дж. Матэр. Грамадзянскі. англ. 2005, 17, 447-455. [Скрыжаваная спасылка].
53. Шы, Дж.; Мін, Дж. Уплыў дэфектаў на мяжы сталь-будаўнічы раствор на каразійнае паводзіны сталі. Констар. Пабудаваць. Маці. 2017, 136, 118-125. [Скрыжаваная спасылка].
54. Хорн, Т.; Рычардсан, І.; Брайдсан, Р. Колькасны аналіз мікраструктуры інтэрфейсаў у жалезабетоне. Сем. Канкр. Рэз. 2007, 37, 1613-1623. [Скрыжаваная спасылка].
55. Ангст, Ю.; Эльзенер, Б.; Ларсен, К.; Веннесланд, Ø. Карозія арматуры, выкліканая хларыдамі: электрахімічны маніторынг стадыі ініцыяцыі і парогавых значэнняў хларыдаў. Корас. навук. 2011, 53, 1451-1464. [Скрыжаваная спасылка].
56. Чжан, Р.; Франсуа Р.; Кастэль, А. Уплыў дэфектаў паверхні падзелу сталь-бетон з-за ўплыву верхняга стрыжня на карозію арматуры, выкліканую хларыдамі. Чараўнік. Канкр. Рэз. 2011, 63, 773-781. [Скрыжаваная спасылка].