

MODELOVÁNÍ DEGRADACE VLÁKNOCEMENTOVÝCH FASÁDNÍCH PANELŮ POMOCÍ CELULÁRNÍCH AUTOMATŮ

Jan Podroužek¹, Drahomír Novák²

Tato práce naznačuje využití netradičního přístupu k modelování degradace prvků z vláknových kompozit na základě celulárních automatů. Ukazuje možnost aplikovat přístup v návaznosti na modelování porušování betonových konstrukcí pomocí software nelineární lomové mechaniky ATENA. Metodika je aplikována na fasádní panely.

Úvod

Mezi důsledky agresivních vlivů prostředí na betonové konstrukce patří mj. průnik chloridů či karbonátace betonu; stupeň ohrožení životnosti konstrukce pak hodnotíme podle příslušných mezních stavů. Obecně se jedná o složité difúzní procesy; v této práci je difúzní rovnice efektivně řešena pomocí speciální třídy evolučních algoritmů, pomocí takzvaných celulárních automatů (dále jen CA). Je tak naznačen nový přístup k modelování degradace betonových konstrukcí v agresivním prostředí – zde působení chloridů, s možností návaznosti na modelování porušování betonových konstrukcí pomocí pravděpodobnostního software FREeT-D

¹PODROUŽEK Jan, email: limajuliet@seznam.cz

²NOVÁK Drahomír, Prof., email: novak.d@fce.vutbr.cz

(TL1.1.3.2-4, resp. [8]), příp. i SW ATENA [6], pracující na základě nelineární lomové mechaniky.

Tato práce je zaměřena na určování koncentrace komponentů difúze, především pak na koncentraci chloridů ve vláknobetonové konstrukci, např. v důsledku působení kyselých dešťů na fasádní panely.

Difusní proces

Difúze je děj vyvolaný neuspořádaným pohybem částic. Následkem přítomnosti koncentračního gradientu převládá tok částic směrem klesající koncentrace nad tokem směrem opačným a tak dochází k přechodu částic do míst o nižší koncentraci. Diferenciální bilanci hmoty difusních složek, pokud hustota toku hmoty je dána prvním Fickovým zákonem, a když neprobíhá chemická reakce, které by se daná složka účastnila a za mnoha dalších zjednodušujících předpokladů, získáme rovnici, která se nazývá druhý Fickův zákon difúze:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad 1)$$

kde C je koncentrace komponentů difúze. Rovnice je parciální diferenciální rovnice druhého řádu parabolického typu, analytické řešení existuje v současné době pouze pro několik základních typů úloh. Obecná koncepce řešení komplexních geometrických okrajových podmínek tedy obvykle vyžaduje použití numerických metod. V následujícím přístupu je difusní rovnice efektivně řešena speciální třídou evolučních algoritmů, pomocí takzvaných celulárních automat.

Celulární automaty

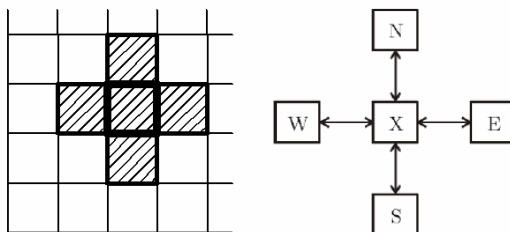
Historie

První zmínky o podstatě celulárních automatů pochází z prací J. von Neumanna, který se v 40. a 50. letech 20. stol. zabýval studiem sebe-reprodukčních automatů a možností univerzálních výpočtů. V období konce 50. let a 60. let se začíná hovořit o CA ve spojení s paralelními počítači, zkoumají se formální výpočetní schopnosti automatů a možnosti matematického modelování dynamických systémů. Mezi běžné aplikace jednorozměrných a dvourozměrných CA od padesátých let patří digitální zpracování obrazu (cellular logic systems), rozpoznání optických znaků, mikroskopické částicové sčítání a odstraňování šumu. Doposud nejpodrobněji se tematice CA věnoval S. Wolfram, jehož přehledový článek

o CA v roce 1983 vzbudil značný zájem a nepochybně přispěl k prohloubení studia CA ve fyzice.

Obecné poznámky

Pod pojmem celulární automat (CA) se obvykle rozumí nekonečně mnoho exemplářů nějakého konečného automatu propojených určitým uniformním způsobem. Jednotlivé automaty s konečným počtem stavu se nazývají buňkami. Každá buňka CA je propojena s několika buňkami sousedními, které tvoří okolí dané buňky. Všechny buňky pracují synchronně, což znamená, že změny stavu, k nimž dochází v diskrétních časových krocích (taktech), nastávají vždy ve všech buňkách současně. Přitom stav kterékoli buňky v následujícím taktu je určen současným stavem této buňky a buněk, které jsou v jejím okolí. Předpis, jímž se definuje stav uvažované buňky v následujícím taktu, se nazývá přechodová funkce této buňky. Aplikované schéma propojení buněk je na obr. 1, buňky zde tvoří čtvercovou mřížku (sít), přičemž každá buňka (např. X) je propojena se čtyřmi nejbližšími sousedy ve směrech severním (N), východním (E), jižním (S) a západním (W). Buňky označené N, E, S, a W tvoří tzv. Von Neumannovo okolí buňky X. Stav buňky X v následujícím taktu je obecně určen přítomným stavem celé pětičky uvažovaných buněk.



Obr. 1. Detail mřížky tvořené z pravidelně uspořádaných uniformních buněk; Von Neumannovo okolí buňky X

Tato práce řeší aplikaci celulárních automat na úrovni 2D, pracuje se tedy s dvourozměrnou čtvercovou mřížkou buněk. Každá buňka CA je v daném okamžiku právě v jednom z konečné množiny stavu. Buňky CA mají obecně jeden význačný stav, tzv. klidový stav. Jsou-li daná buňka i celé její okolí v klidovém stavu, pak i v následujícím taktu zůstane tato buňka ve

stavu klidovém. Proto také CA, jehož všechny buňky se nacházejí v klidovém stavu, zůstává trvale beze změny. Pokud se má stav CA měnit, musí tento automat obsahovat tzv. aktivní buňky, tj. buňky v jiném než klidovém stavu.

Každá buňka CA má v daném okamžiku specifikovanou hodnotu, reálné číslo, jež jednoznačně určuje stav této buňky. Hodnota tohoto čísla odpovídá stupni nasycení této konkrétní buňky komponenty difúze.

Adekvátní volba okrajových podmínek hraje významnou roli při aplikaci CA modelů, typ okrajových podmínek se volí na základě podstaty zkoumaného jevu (absorbující nebo reflektující hranice).

Přechodová funkce libovolné buňky X je funkcí pěti argumentů, z nichž jeden reprezentuje stav této buňky a zbývající pak stavy buněk z jejího okolí. Přechodové funkce mohou mít i stochastický charakter.

Přechodové funkce se aplikují opakovaně na všechny buňky CA mřížky a tím se simuluje vývoj zkoumaného systému. Simulace zpravidla končí po realizaci předem zadaného počtu taktů.

Řešení difusní rovnice

Simulace difusních procesů obecně patří mezi jedny z nejefektivnějších aplikací celulárních automat. Zmíněné difusní zákony lze při použití von Neumannova schéma okolí (Obr.2) modelovat v d dimenzích ($d=1,2,3$) pomocí přechodové funkce [4, 5]:

$$C_i^{k+1} = \phi_0 C_i^k + \sum_{j=1}^d (\phi_j^- C_{i-1j}^k + \phi_j^+ C_{i+1j}^k) \quad (2)$$

kde diskrétní proměnná $C_i^k = C(x_i, t_k)$ reprezentuje koncentraci komponentů difuze v buňce i v čase t_k . Hodnoty evolučních koeficientů ϕ_0 , ϕ_j^- a ϕ_j^+ ($j = 1, \dots, d$) musí vyhovovat podmínce normality:

$$\phi_0 + \sum_{j=1}^d (\phi_j^- + \phi_j^+) = 1 \quad (3)$$

aby byl splněn zákon zachování hmoty. Je zřejmé, že vzhledem k isotropické povaze materiálu musíme zavést podmínku symetrie

$\phi_j^- = \phi_j^+ = \phi_1 (j=1, \dots, d)$ abychom zabránili směrovým efektům. Velmi důležitá je „regulace“ celého procesu vzhledem k danému difusnímu koeficientu D správnou diskretizací v prostoru a čase, kdy velikost buňky Δx a časový krok Δt odpovídají následujícímu vztahu:

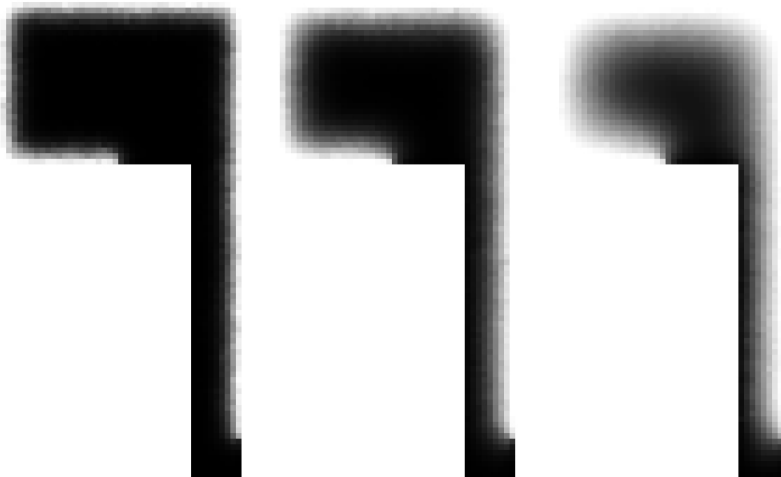
$$D = \phi_1 \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad 4)$$

Numerický příklad

Za účelem modelování difuze chloridových iontů do betonu je vyvíjen software CATES (deterministická a stochastická varianta 2D celulárních automatů), který umožňuje pracovat v součinnosti se softwarem nelineární lomové mechaniky ATENA 2D [6]. Za účelem ověření funkčnosti a demonstrace možností programu CATES vznikla řada numerických příkladů. V tomto odstavci je uveden ilustrativní numerický příklad týkající se aplikace navrženého postupu na vláknobetonové fasádní panely. Detail panelu kolem ztužujícího rámu v příčném řezu je vystaven účinkům agresivního prostředí (se stochastickými efekty) po obvodě s výjimkou vnitřní části vnitřního obvodu (okrajové podmínky patrné z obr. 2). Difúzní koeficient je uvažován jako funkce času:

$$D_t = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad 5)$$

kde D_t = difúzní koeficient v čase t , D_{28} = difúzní koeficient v čase $t = 28$ dní a m = konstanta (transportní model převzatý od autorského kolektivu Thomas et. al. 1998, [10]). Konkrétní parametry pro vláknocement nebyly v době vzniku článku k dispozici, byly použity hodnoty pro portlandský cement, tento příklad je třeba chápat jako pilotní studii. Oblasti koncentrace agresivních činitelů jsou patrné z obr. 2 a tyto je možno následně vyhodnotit pro účely změny materiálových parametrů vlivem degradace.



Obr. 2. Vizualizace postupné degradace vláknobetonových fasádních panelů: detail kolem ztužujícího rámu v příčném řezu s patrným šumem od stochastických efektů (černá barva představuje neporušený stav zatímco bílá vyjadřuje zvýšenou koncentraci chloridů)

Závěr

Tato práce popisuje netradiční metodu modelování degradace betonových prvků a konstrukcí včetně vláknových kompozitů pomocí celulárních automatů. Prezentovaný přístup informuje o prostorovém působení agresivních činitelů po časově diskrétních krocích. Hlavní výhoda tohoto postupu spočívá v možnosti obecného řešení difúzních jevů v čase při současném respektování komplexních okrajových podmínek. Vyvíjený software CATES je koncipován jako doplňkový nástroj pro spolehlivostní analýzu betonových konstrukcí, se zahrnutím vlivů degradace, umožňující posuzovat nejenom únosnost konstrukce, ale také její životnost. Na numerickém příkladě – aplikace na fasádní panely - byla předvedena efektivita uvedeného postupu.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci výzkumného centra MŠMT CIVAK - Centrum integrovaného výzkumu anorganických kompozitů, č. 1M06005. Částečně bylo využito výsledků získaných v rámci řešení projektu GAČR 103/07/0760.

Literatura

1. Křivý, I., Kindler, E. Simulace a modelování, Učební texty Ostravské Univerzity, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita 2001
2. Gaylord, R. J., Wellin, P. R. Computer Simulations with Mathematica. Explorations in Complex Physical and Biological Systems. New York: Springer-Verlag, 1994. ISBN 0-387-94274-2.
3. Gaylord, R. J., Nishikate, K. Modeling Nature. Cellular Automata Simulations with Mathematica. New York: Springer-Verlag, 1996. ISBN 0-387-94620-9.
4. Biondini, F., Bontempi, F., Frangopol, D. M., Malerba, P. G. Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 130, No. 11, 2004, pp. 1724-1737
5. Biondini, F., Frangopol, D. M., Malerba, P. G. Time-Variant Structural Performance of the Certosa Cable-stayed Bridge, Structural Engineering International 3/2006
6. Červenka, V., Pukl, R. ATENA Program Documentation, Cervenka Consulting, Prague, <http://www.cervenka.cz>, 2005
7. Wolfram, S. Cellular Automata And Complexity – Collected papers, WolfrAddison-Wesley, 1994
8. Teplý, B., Chromá, M., Matesová, D., Rovnaník, M. FREET- D Deterioration Module Program Documentation, BRNO/ČERVENKA CONSULTING, 2006
9. Papadakis, V.G., Roumeliotis, A.P., Fardis, C.G., Vagenas, C.G., 1996: Mathematical modelling of chloride effect on concrete durability and protection measures. In Proc. of International Conference on Concrete in the Service of Mankind (Concrete Repair, Rehabilitation and Protection – edited by Dhir, R.K. & Jones M.R.), Dundee, Scotland, UK, 165-174
10. Thomas, M., Bamforth, P. Modelling chloride diffusion in concrete; Effect of fly ash and slag, Cement and Concrete Research, 29 (1999) 487-495, Elsevier Science Ltd.