ŠABLONA PŘÍSPĚVKU DO PROGRAMU SYMPOZIA A SBORNÍKU

Tento soubor bude použit přímo pro reprodukci do sborníku, proto prosím dbejte na jeho kvalitní zpracování. **Za věcnou a grafickou správnost odpovídá autor**.

AUTOŘI PŘÍSPĚVKU

Autor 1 *(tituly, jméno, příjmení, firma, tel. číslo, e-mailová adresa)*

Jan Červenka
Červenka Consulting s.r.o., 220610018,
jan.cervenka@cervenka.cz

Autor 2 *(tituly, jméno, příjmení, firma, tel. číslo, e-mailová adresa)*

Jiří Rymeš
Červenka Consulting s.r.o., 220610018,
jiri.rymes@cervenka.cz

Autor 3 *(tituly, jméno, příjmení, firma, tel. číslo, e-mailová adresa)*

Mohamad Ahmad
Červenka Consulting s.r.o., 220610018,
mohamad.ahmad@cervenka.cz

Autor 4 *(tituly, jméno, příjmení, firma, tel. číslo, e-mailová adresa)*

Libor Jendele
Červenka Consulting s.r.o., 220610018,
libor.jendele@cervenka.cz

pokračujte na další stránce

INFORMACE O PŘÍSPĚVKU

Název příspěvku *(v jazyce příspěvku)*

Modelování trvanlivosti a koroze v nelineárních výpočtech železobetonových mostních konstrukcích

Název příspěvku v anglickém jazyce

Modelling of durability and corrosion in nonlinear analysis of reinforced concrete structures.

Anotace v českém jazyce

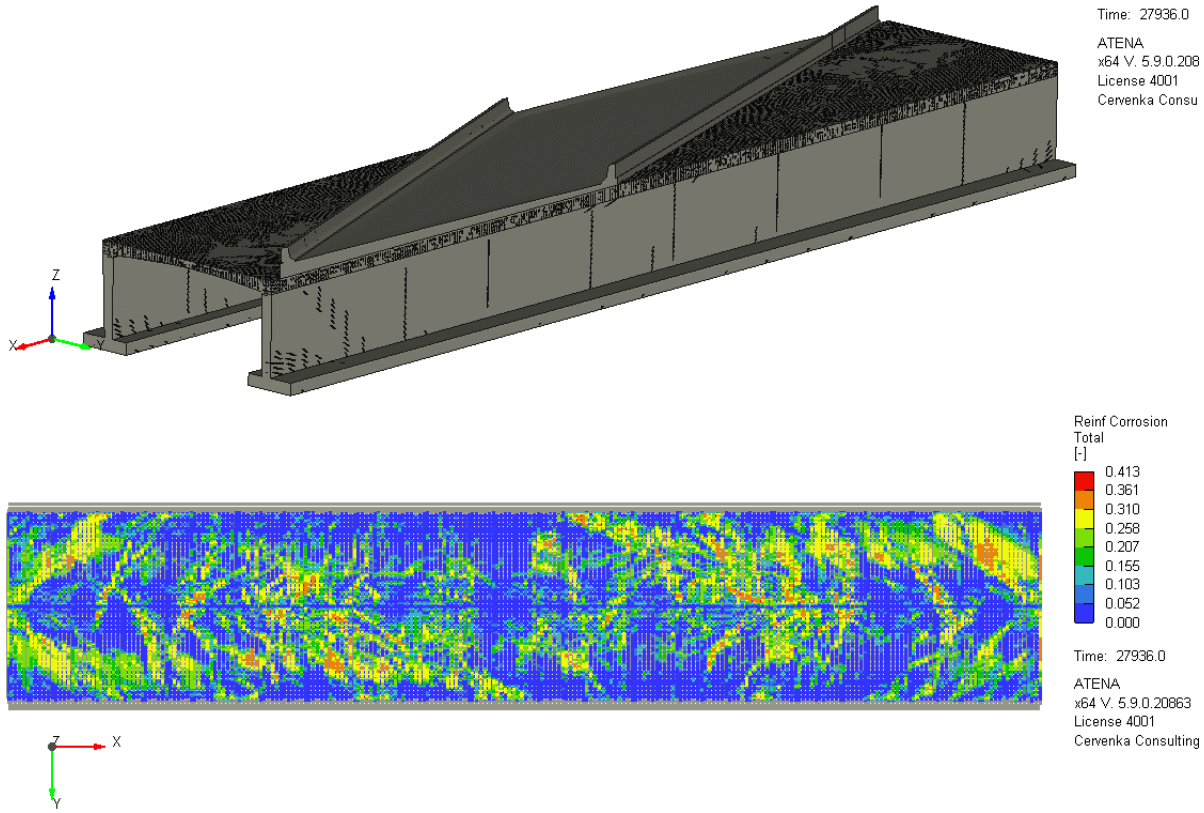
Koroze betonářské nebo předpínací výztuže vlivem chloridů nebo karbonatací betonu představuje významný degradační mechanismus železobetonových konstrukcí. Tento proces může ohrozit životnost železobetonových konstrukcí, jak dokumentují nedávná zhroucení mostních konstrukcí jako např. lávka v Praze Trói (2017), Morandiho most v Janově (2018) nebo most Carola v Drážďanech (2024).

Tento článek popisuje hlavní aspekty makroskopického modelu, který dokáže efektivně simulovat degradaci železobetonových konstrukcí v důsledku koroze betonářské výztuže. Prezentovaný chemo-mechanický model pokrývá iniciaci a šíření chloridů případně karbonatace pomocí jedno-rozměrného, časově závislého modelu, který bere v úvahu složení betonové směsi, velikost krycí vrstvy a šířku případných mechanických trhlin. Degradační model je možné kombinovat s nelineárními konstitutivními vztahy pro mechanickou odezvu betonu a výztuže a také s modelem soudržnosti mezi výztuží a betonem. Modely jsou implementovány v softwaru ATENA a ověřeny na experimentálních datech. Hlavní důraz článku je kladen na ukázku praktické aplikace degradačních modelů při analýze trvanlivosti a spolehlivosti železobetonové mostní konstrukce, které je poškozena nadměrným množstvím trhlin vzniklých v raném stáří konstrukce.

Anotace v anglickém jazyce

Reinforcement corrosion due to chloride ingress or carbonation is an important deterioration mechanism, which may compromise the service life of reinforced concrete structures. This paper presents an efficient macro-scale model, aiming to capture the most important aspects of the deterioration of reinforced concrete structures due to reinforcement corrosion. A chemo-mechanical model covers the initiation and propagation of chlorides using a 1D time-dependent model. This model is combined with the nonlinear modeling of cracking, bond failure, and reinforcement yielding. These models are implemented in the ATENA software and have been previously proven to provide a reliable prediction of structural performance deterioration. An example of an application from the consultancy practice is presented involving a reinforced concrete bridge damaged by cracking during the construction process.

Ilustrační fotografie příspěvku



Rozvoj trhlin a koroze výztuže v mostní konstrukci po 75 letech působení chloridů.

1. Úvod

Konstrukce zatěžované v blízkosti mezních stavů nebo konstrukce se složitou historií zatěžování často představují výzvy pro aplikaci klasických lineárně-elastických metod. Tyto tradiční postupy často nepřesně uvažují nelineárním chováním materiálů a komplexní procesy ve stárnoucí nebo poškozené konstrukci. V takových případech může nelineární simulace metodou konečných prvků (MKP) poskytnout další perspektivu k problému, protože dokáže realisticky simulovat jednotlivé mechanismy v konstrukci a následně zohlednit jejich kombinovaný vliv na mechanickou odezvu konstrukce. Pokročilé numerické nástroje mohou současně zohlednit více vzájemně se ovlivňujících jevů v betonu, jako je tepelné zatížení, dotvarování a smršťování betonu, nebo dokonce progresivní degradaci v důsledku vnikání chloridů a následné koroze výztuže.

Aplikace metody konečných prvků pro nelineární analýzu železobetonových konstrukcí se datuje od 70. letech 20. století a průkopnických studií Ngo a Scordelis [1], Rashid [2] a Červenka a Gerstle [3]. Během následujících desetiletí byla vyvinuta řada materiálových modelů pro železobeton, včetně významných příspěvků Suidana a Schnobricha [4], Lin a Scordelis [5], De Borst [6], Rots a Blaauwendraad [7], Pramono a Willam [8], Etse [9], Lee a Fenves [10] a Červenka [11],[12]. Tyto modely jsou obvykle implementovány do řešiče MKP, kde je každému integračnímu bodu přiřazen konkrétní materiálový model pro vyhodnocení vnitřních sil. Aby se vyřešila závislost na velikosti sítě, je často používán takzvaný „smeared crack“ model, ve

kterém je kombinovaný účinek několika trhlin v konečném prvku shrnut do jednoho konstitutivního zákona Bažant a Oh [13].

Tento článek představuje efektivní simulaci mechanického chování železobetonových konstrukcí ovlivněných korozí výztuže způsobenou chloridy. Model sleduje koncentraci chloridů v čase a hloubce betonu, přičemž zohledňuje vliv trhlin na jejich pronikání. Korozní model je propojen s nelineárním MKP řešičem, kde se automaticky snižuje plocha průřezu výztuže podle úrovně koroze.

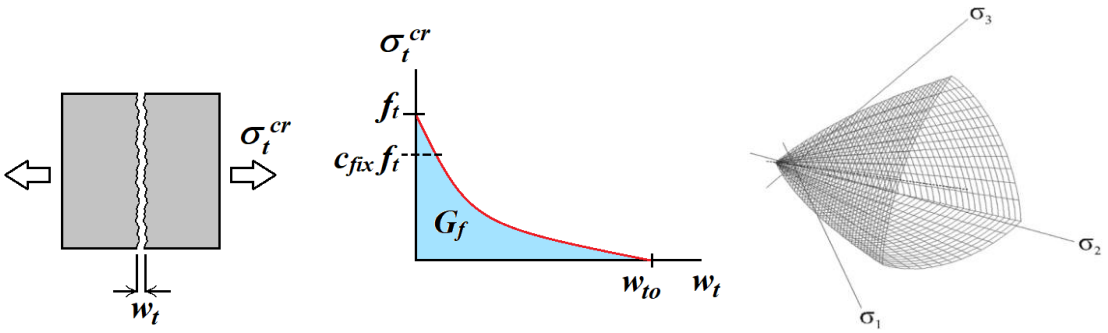
Příklad aplikace ukazuje analýzu železobetonového mostu s nadměrnými trhlinami, kde nelineární simulace objasnila jejich vznik a vliv na únosnost.

2. Model konstrukce

2.1 Materiálový model betonu

Nelineární simulace vyžaduje použití vhodných materiálových modelů, které dokáží realisticky simulovat skutečnou mechanickou odezvu materiálu. V této studii je použit lomově-plastický model publikovaný Červenkou et al. [11],[12] a implementovaný v softwaru ATENA [14]. Tento model rozlišuje nelineární odezvu materiálu v tahu a tlaku.

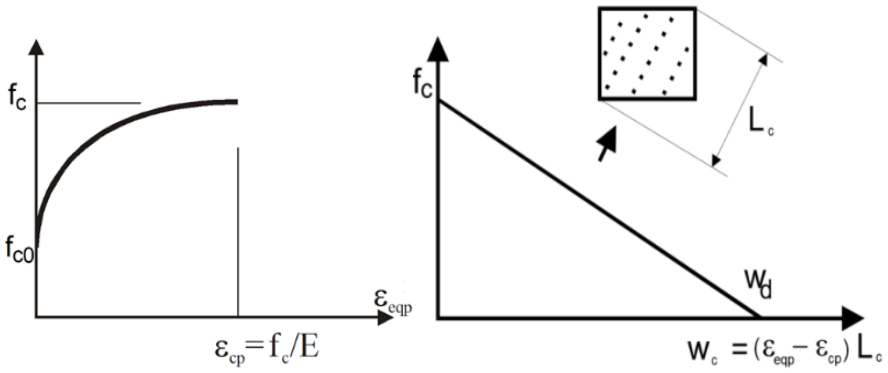
Ve chvíli, kdy je v tomto modelu překročena pevnost v tahu, nelineární změkčení je řízeno množstvím lomové energie uvolněné při procesu otevírání trhliny, jak znázorňuje Obr. 1 (vlevo). Pro lokalizaci trhlin je možné definovat limitní hodnoty maximální a minimální vzdálenosti trhlin, což umožňuje použít větší rozměry konečných prvků a tím dosáhnout výpočetní efektivity i pro typické inženýrské aplikace, kdy je nutné posuzovat velké konstrukce.



Obr. 1: Model tahového změkčení pro modelování vývoje napětí během otevírání trhliny (vlevo) a Menetrey & Willam kritérium pro trojosou napjatost betonu (vpravo).

Pro modelování odezvy materiálu v tlaku je použit model založený na teorii plasticity se zohledněním trojosého stavu napjatosti pomocí Menetrey a Willam kritéria [15] znázorněným na Konstitutivní zákon uvažuje nejprve zpevnění, typicky po překročení zhruba jedné třetiny tlakové pevnosti, a následně lineární změkčení po překročení tlakové pevnosti, obojí znázorněné na Obr. 2.

Výsledná sada nelineárních rovnic je řešena iterativním způsobem pomocí známých přístupů, jako je metoda Newton-Raphson [16] nebo metoda Arc-Length [17].



Obr. 2: Tlakové zpevnění a změkčení pro modelování chování betonu v tlaku.

2.2. Popis konstrukce a materiálů

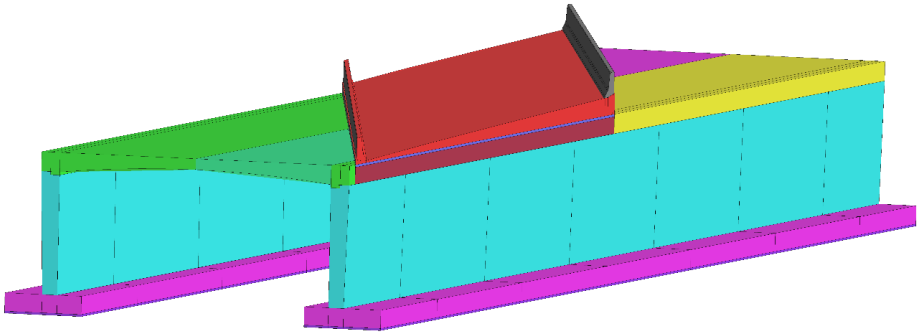
Degradační modely jsou podrobněji popsány pomocí příkladu praktické aplikace, kterou je železobetonová konstrukce o rozpětí 15,3 m podpírající nadjezdovou rampu na dálniční křižovatce. Konstrukce se skládá z opěrné stěny vystavené zemnímu tlaku a mostovky. Tloušťka opěrné stěny je 750 mm a tloušťka mostovky se pohybuje od 910 mm u líce opěrné stěny do 510 mm uprostřed rozpětí. Geometrie modelu je znázorněna na Obr. 3. Jedná se o konstrukci na severo-americkém kontinentě, ale protože se jedná o problematickou konstrukci, vlastník si nepřeje její podrobnější identifikaci.

Po dokončení stavby byly pozorovány značné trhliny zejména v mostovce. Při podrobnější analýze se vznik trhlin nepodařilo vysvětlit působícím mechanickým zatížením a předpokládalo se, že důvodem jejich vzniku byl nevhodný způsob betonáže. Po dokončení stavby se trhliny jevily jako stabilizované, nicméně bylo nutné potvrdit jejich původ a vyloučit jejich případný další růst. Přítomnost trhlin navíc nutně ovlivňuje trvanlivost konstrukce, takže bylo potřebné provést dlouhodobé hodnocení jejich vlivu na možnou korozi betonářské výztuže.

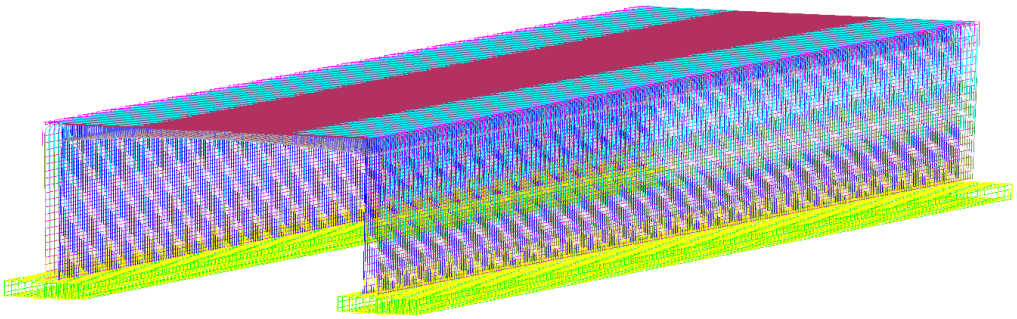
Odhadovaná pevnost použitého betonu v tlaku byla 30 MPa, z čehož byly odvozeny parametry nelineárního materiálového modelu shrnuté v Tab. 1.
Pro posouzení dlouhodobých vlastností konstrukce bylo uvažováno dotvarování a smršťování betonu podle modelu B3 [18]. Toto dotvarování a smrštění betonu bylo v modelu aplikované jako počáteční přetvoření. Z modelu B3 byl také odvozen dlouhodobý vývoj materiálových vlastností betonu. Důležité parametry modelu B3 jsou uvedeny v Tab. 2.

Betonářská výztuž byla modelována diskrétně s využitím 1D prvků a její rozmístění v konstrukci je ukázáno Obr. 4. Použité výztužné vložky jsou v rozsahu M15 až M35. Parametry materiálu výztuže jsou uvedeny v Tab. 3.

.



Obr. 3: Geometrie analyzované mostní konstrukce.



Obr. 4: Detailní model zohledňující rozložení a umístění betonářské výztuže.

2.3 Zatížení

Pro celkové hodnocení bylo zkoumáno více kombinací zatížení. V tomto článku prezentujeme výsledky posouzení stavu použitelnosti. Zatěžovací stavy zahrnují vlastní tíhu, proměnné zatížení, zemní tlak na opěrné stěny, tepelné zatížení, dotvarování, smršťování a korozi výztuže v důsledku přítomnosti chloridů.

Tab. 1: Parametry materiálového modelu pro beton.

Pevnost v tlaku	f_c [MPa]	-30.0
Youngův modul pružnosti	E [GPa]	25.6
Tahová pevnost	f_t [MPa]	2.2
Lomová energie	G_f [N/m]	70
Limit elastické odezvy materiálu v tlaku	f_{c0} [MPa]	-4.4
Plastická deformace při dosažení tlakové pevnosti	ε_{cp} [-]	-0.0013
Mezní stlačení betonu	w_d [mm]	-0.5

Tab. 2: Parametry modelu B3 pro dotvarování betonu

Vlhkost	h [-]	0.70
Měrná hustota betonu	ρ [kg/m^3]	2447
ACI typ betonu	-	normal
Vodní součinitel betonové směsi	w/c [-]	0.40
Podíl kameniva a cementu	a/c [-]	4.0
Typ ošetřování	-	vzduch
Konec ošetřování	[den]	4.0

Tab. 3: Materiálové parametry pro betonářskou výztuž.

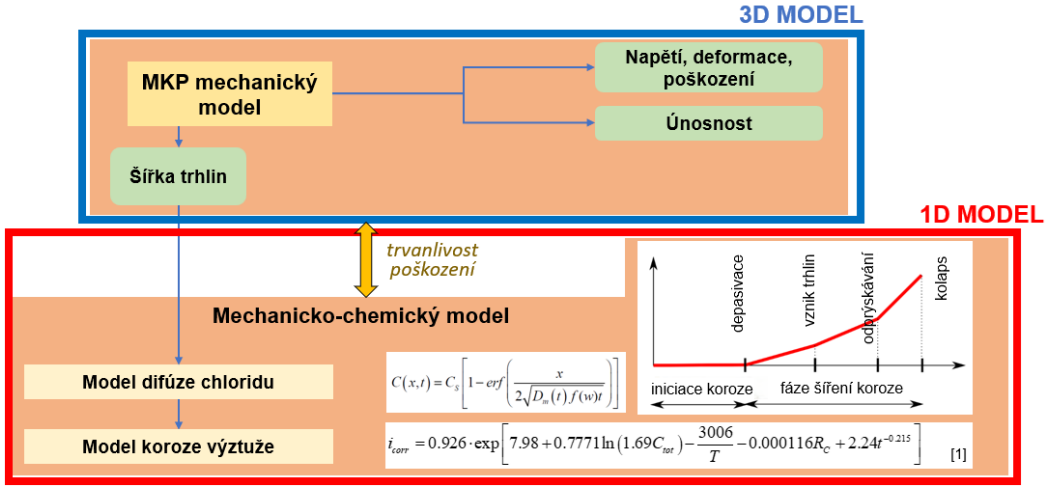
Youngův modul pružnosti	E [GPa]	25.6
Mez kluzu	f_y [MPa]	360
Tahová pevnost	f_u [MPa]	374
Mezní deformace	ε_u [-]	0.0045

Na rozdíl od lineárně-elastické analýzy, kde lze získat kombinovaný účinek více zatěžovacích stavů jejich superpozicí, jsou v nelineární analýze tyto zatěžovací stavy předepsány postupně (případně současně) podle skutečné historie zatížení.

Simulace zahrnuje fázi odbednění mostovky s tepelným zatížením, které vyvolalo rozdílné napětí mezi mostovkou a opěrami. Toto zatížení odpovídalo ochlazení betonu po hydrataci a bylo aplikováno jako počáteční přetvoření. Poté proběhla aplikace stálého a užitného zatížení s následnou simulací dotvarování, smršťování betonu a účinkem chloridů. Dlouhodobá analýza zahrnula časový úsek 75 let.

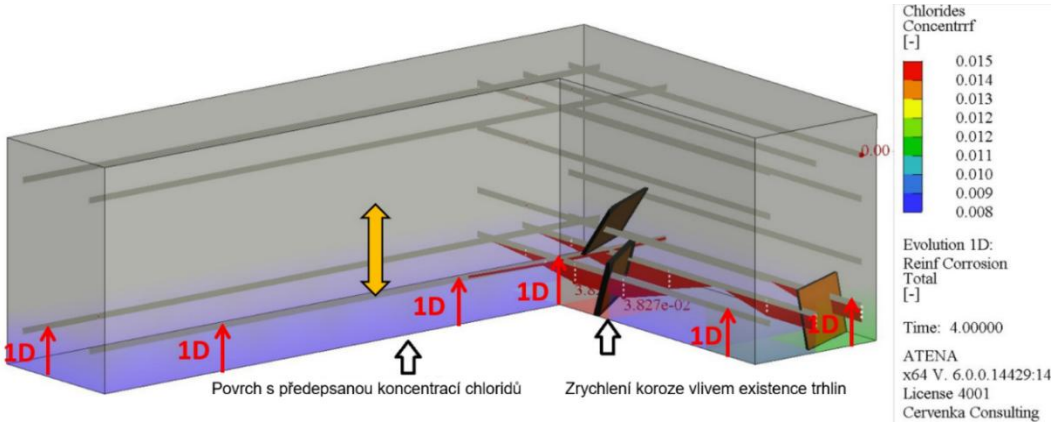
2.4 Modelování šíření chloridů a koroze

Trhliny přítomné v konstrukci mohou zásadně ohrozit trvanlivost konstrukce a urychlit vnější degradační procesy. Z tohoto důvodu byla provedena studie trvanlivosti, ve které byl uvažován vliv dlouhodobého působení chloridů a následné koroze výztuže na mechanickou odezvu konstrukce. To bylo provedeno pomocí sdruženého mechano-chemického modelu, který je schematicky znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5: Ilustrace provázání 1D modelu pro šíření chloridů a koroze výztuže s 3D modelem pro výpočet napjatosti a únosnosti konstrukce.

Degradační model zahrnuje dvě fáze: indukci a šíření. Indukční fáze popisuje difuzní proces [19] pronikání chloridů do betonové krycí vrstvy. Rychlost difuze je ovlivněna vlastnostmi materiálu, jmenovitě difuzním koeficientem a schopností vázat chloridy v cementovém gelu. Rychlost difuze chloridů je dále urychlována přítomností mechanických trhlin, například od stálého zatížení. Tento princip je schematicky ukázán na Obr. 6.



Obr. 6: Aplikace speciální okrajové podmínky pro šíření chloridů/karbonatace zohledňující vliv šířky trhlin.

Tab. 4: Parametry pro model šíření chloridů a koroze

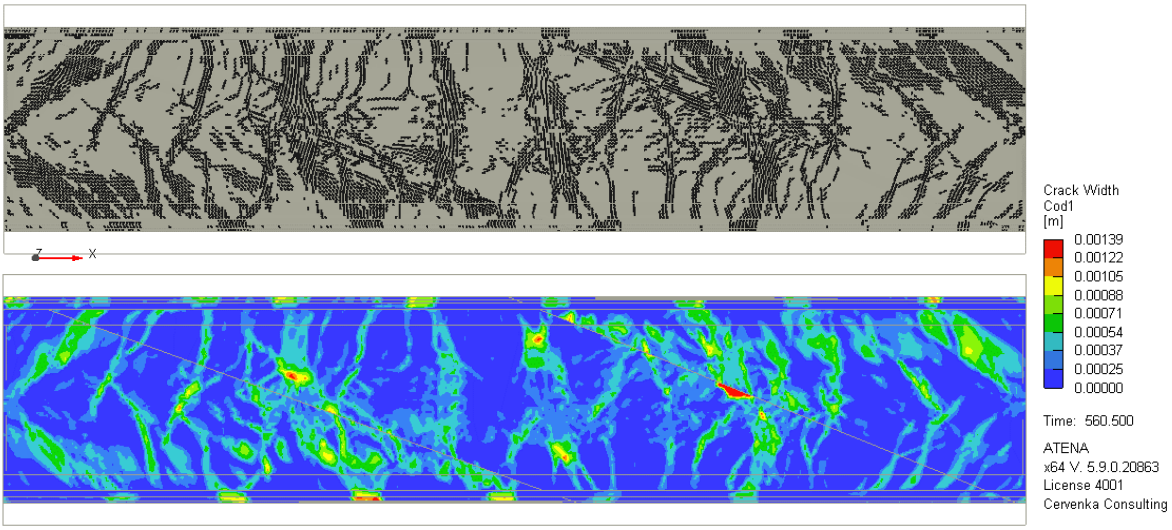
Obsah cementu [kg/m^3]	25.6
Typ cementu [-]	CEM I
Časový faktor [-]	0.37
Průměrný součinitel difuze chloride [m^2/s]	1.85×10^{-12}
Referenční součinitel difuze chloridů [m^2/s]	1.16×10^{-12}
Referenční čas pro součinitel difuze [rok]	20
Vstupní koncentrace chloridů na povrchu konstrukce [% cementu]	0.5
Kritická koncentrace chloridů [%]	0.4
Faktor pro lokalizaci koroze [-]	3
Rychlost koroze v okolním prostředí po odpadnutí krycí vrstvy [mm/rok]	0.0375

Mechanický problém je v úloze MKP řešen objemovými prvky, zatímco difuze chloridů je zjednodušena na jednorozměrný model s okrajovou podmínkou při zohlednění možné existence trhlin. Tento přístup zajišťuje výpočetní efektivitu a postačuje pro běžné inženýrské výpočty.

Model vychází z dat evropského projektu DuraCrete [19] a dlouhodobých experimentů [21]. Klíčové parametry jsou shrnuty v Tab. 4. Robustnost modelu byla ověřena v různých scénářích, přičemž další případové studie jsou dostupné v referencích [20], [22]-[24].

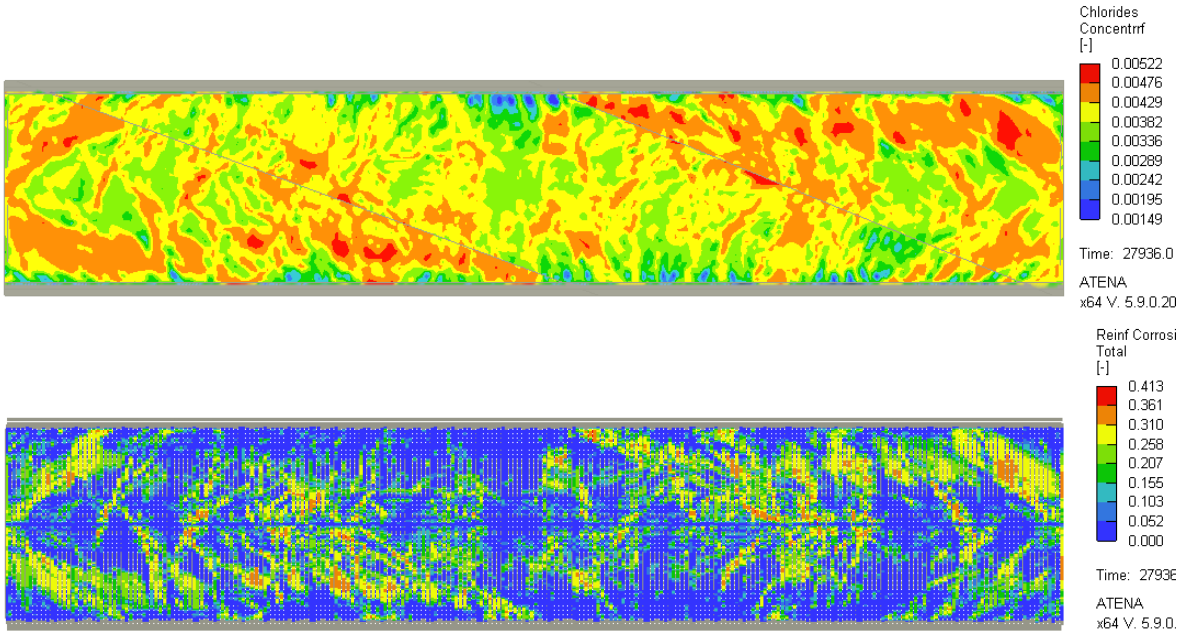
3. Výsledky

Obr. 7 ukazuje výstup z numerického modelu v podobě rozmístění a šířky trhlin na spodním povrchu mostovky. Tyto výsledky jsou ukázány v okamžiku řešení, který odpovídá uvedení mostu do provozu. Předepsané zatížení odpovídá charakteristické hodnotě stálého a užitného zatížení. Kromě toho bylo během fáze výstavby aplikováno zatížení teplotou simulující ochlazení mostovky ze zvýšené teploty během hydratace betonu.



Obr. 7: Rozmístění trhlin (nahoře) a jejich šířka (dole) na spodním povrchu modelované mostní konstrukce.

Z Obr. 7 je patrné, že se zde nachází více trhlin o šířce větší než 1 mm. Aby bylo možné předpovědět, jak tyto trhliny ovlivní pronikání chloridů do struktury betonu, bylo simulováno vystavení konstrukce účinkům chloridů pomocí výše popsaného postupu. Společně s účinky chloridů bylo modelováno dotvarování a smršťování betonu pomocí modelu B3 [16]. Výsledky po 75 let trvajícím vystavení těmto degradačním faktorům jsou znázorněny na Obr. 8, kde je vidět stupeň koroze spodní betonářské výztuže (tj. poměr zkorodované průřezové plochy k původní ploše výztuže) a koncentrace chloridů v její úrovni.



Obr. 8: Koncentrace chloridů v úrovni spodní výztuže desky (nahoře) a úroveň koroze (dole) spodní výztuže mostovky po 75 letech působení koroze, 0 – bez koroze, 1 – totální redukce plochy výztuže vlivem koroze.

Výsledky předpokládají, že maximální koncentrace chloridů přesáhne 0,5 % a více než 40 % plochy původního průřezu výztuže bude ztraceno v důsledku koroze v

nejvíce postižených oblastech mostovky. Kromě toho, v důsledku kombinovaného účinku dotvarování, smršťování a koroze výztuže, se během této doby předpovídá další růst trhlin na spodním povrchu mostovky.

4. Závěr

Tento článek představuje efektivní numerický metodu pro simulaci koroze betonářské výztuže vyvolané pronikáním chloridů do struktury betonu. Ukázaný přístup kombinuje jednorozměrný model pro difuzi chloridů a korozní model s trojrozměrným mechanickým modelem pomocí metody konečných prvků. Model difuze chloridů zohledňuje přítomnost mechanických trhlin a případně akceleruje penetraci chloridů směrem k betonářské výztuži. Tento kombinovaný přístup umožňuje realistické modelování účinků degradačních procesů na mechanickou odezvu konstrukce při zachování výpočetní efektivity.

V další části článku je uveden příklad z inženýrské praxe. Jedná se o železobetonový most, kde se brzy po dokončení stavby vytvořily významné trhliny. V numerickém modelu se podařilo reprodukovat rozmístění trhlin v konstrukce a model byl dále využit pro predikci koroze výztuže a dalšího šíření trhlin po dobu plánované životnosti konstrukce.

Výsledky prezentované v tomto příspěvku byly získány za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu TM04000012 "BRIHIS - A concrete bridge health interpretation system based on mutual boosting of big data and physical mechanism" v rámci programu Delta 2.

Literatura

[1] Ngo, D., Scordelis, A.C. 1967. Finite element analysis of reinforced concrete beams, J. Amer. Concr. Inst. 64, pp. 152-163.
[2] Rashid, Y.R. 1968. Analysis of prestressed concrete pressure vessels. Nuclear Engineering and Design 7 (4), 334-344.
[3] Červenka, V., Gerstle, K., 1971. Inelastic analysis of reinforced concrete panels. Part I : Theory. Publication I.A.B.S.E. 31 (11), 32-45.
[4] Suidan, M., Schnobrich, W.C. 1973. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, ASCE, J. of Struct. Div., Vol. 99, No. ST10, pp. 2108-2121
[5] Lin, C.S., and Scordelis, A. 1975. Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form, ASCE, J. of Struct. Eng., Vol. 101, No. 3, pp. 152-163.
[6] de Borst, R. 1986. Non-linear analysis of frictional materials. PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
[7] Rots, J.G., Blaauwendraad, J. 1989. Crack models for concrete: Discrete or smeared, Fixed, multi-directional or rotating? Heron 34 (1).
[8] Pramono, E., Willam, K.J. 1989. Fracture energy-based plasticity formulation of plain concrete. J. of Eng. Mech., ASCE 115 (6), 1183-1204.
[9] Etse, G. 1992. Theoretische und numerische untersuchung zum diffusen und lokalisierten versagen in beton. PhD Thesis, University of Karlsruhe.
[10] Lee, J., Fenves, G.L. 1998. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. J. of Eng. Mech., ASCE 124 (8), 892 - 900.

[11] Červenka J., Červenka V., and Eligehausen R., 1998, Fracture-plastic material model for concrete, application to the analysis of powder actuated anchors. In: Proceedings FRAMCOS (3), pp. 1107–16.
[12] Červenka J., and Papanikolaou V.K., 2008, Three dimensional combined fracture–plastic material model for concrete. Int J Plast., Dec 1;24(12):2192-220.
[13] Bažant, Z.P. & Oh, B.H., 1983. Crack band theory for fracture of concrete. Materials and Structures, RILEM 16 (3), 155–177.
[14] Červenka V., Jendele L., and Červenka J., 2024, ATENA Program Documentation: Part 1 Theory, Prague.
[15] Menetrey, P., and Willam, K.J., 1995, Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization, ACI Struct J. 92(3), 311-318.
[16] Bathe, K.J.(1982), Finite Element Procedures In Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-317305-4.
[17] Crisfield, M.A. (1983) - An Arc-Length Method Including Line Search and Accelerations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.19, pp.1269-1289.
[18] Bažant, Z.P., and Baweja S., 2000, Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3, ACI Special Publications, 194:1-84.
[19] The European Union-Brite EuRam III, 2000, Probabilistic performance-based durability design of concrete structures: Final technical report of Duracrete project.
[20] Hájková K, Šmilauer V, Jendele L, and Červenka J., 2018, Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. Eng Struct, 174:768-777.
[21] Luping T., Boubitsas D., Utgenannt P., Abbas Z., 2018, Chloride Ingress and Reinforcement Corrosion - After 20 years' field exposure in a highway environment.
[22] Rymeš J., Červenka J., and Radomír Pukl R., 2022, Advanced modelling of concrete structures for improved sustainability, Acta Polytechnica CTU Proceedings, 38: 190-195.
[23] Červenka J., and Rymeš J., 2022, Digital twin for modelling structural durability, In RILEM International Conference on Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures, Cham: Springer International Publishing, 2022.
[24] Červenka, J., Rymeš, J., Jendele, L., and Pukl, R., 2023, Digital twins for reinforced concrete structures. In International Symposium of the International Federation for Structural Concrete Cham: Springer Nature Switzerland, 1621-1630.