

Simulace porušení železobetonové ropné těžní věže

Vladimír Červenka, Jana Margoldová

Nelineární analýza metodou konečných prvků je velmi účinným prostředkem k simulaci skutečného chování železobetonových konstrukcí. Úspěch zvoleného řešení závisí na správné formulaci pracovních diagramů použitých materiálů (beton, ocel) a na vhodně zvoleném výpočetním modelu konstrukce. Praktické použití nelineárního výpočtu je ukázáno na příkladu simulace křehkého porušení detailu těžní věže, které bylo příčinou zřícení celé konstrukce. Z ukázky je zřejmé, že zařazení nelineárních výpočtů pro řešení obtížných detailů může výrazně zvýšit kvalitu návrhu železobetonové konstrukce.

Nonlinear finite element analysis has become a powerful tool for simulation of the real behaviour of reinforced concrete structures. The success of the analysis depends mainly on the right formulation of constitutive laws and on the finite element discretization. The example of real application includes a complex case of brittle failure of an offshore structure. It is shown that the nonlinear FEA can be applied for solution of practical problems and that it can increase the quality of design.

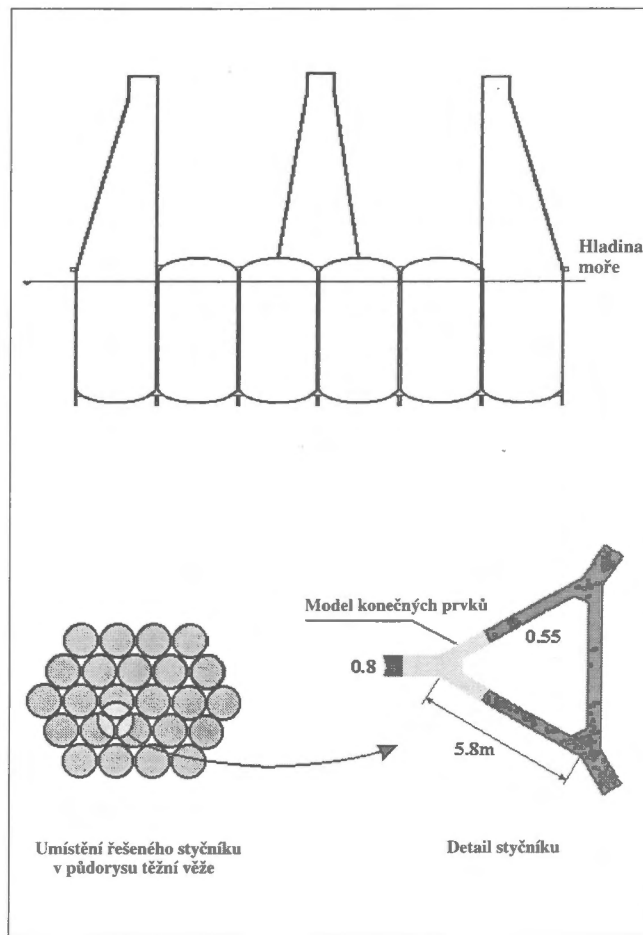
Úvod

Chyba v návrhu výztuže základu železobetonové ropné těžní věže Sleipner A v Severním moři způsobila její zřícení během stavby [1], což vedlo ke značným materiálovým i finančním ztrátám. Autoři byli vyzváni k vypracování počítačové simulace chování detailu konstrukce, který byl příčinou havárie. Článek ukazuje některé výsledky této studie, které jsou zajímavým příkladem využití nelineárních výpočtů konstrukcí v praxi, a názorně ukazuje význam malého detailu vyztužení pro bezpečnost velké konstrukce.

Pro zjištění příčiny havárie a výpočet chování konstrukce po navržených úpravách se použilo simulační řešení. Výpočet je proveden programem SBETA [2], který redukuje rozpor v běžně užívaných postupech navrhování mezi pružným výpočtem vnitřních sil v konstrukci a nelineárním modelem materiálu při dimenzování průřezů. SBETA program je dokladem toho, že *nelineární metody výpočtů již překročily hranice univerzit a výzkumných ústavů*. Platnost nelineárního materiálového modelu musí být ovšem ověřena srovnáním s experimenty pro všechny hlavní způsoby materiálového chování a pro jednoduché i složité typy konstrukcí.

Výpočet konstrukčního detailu

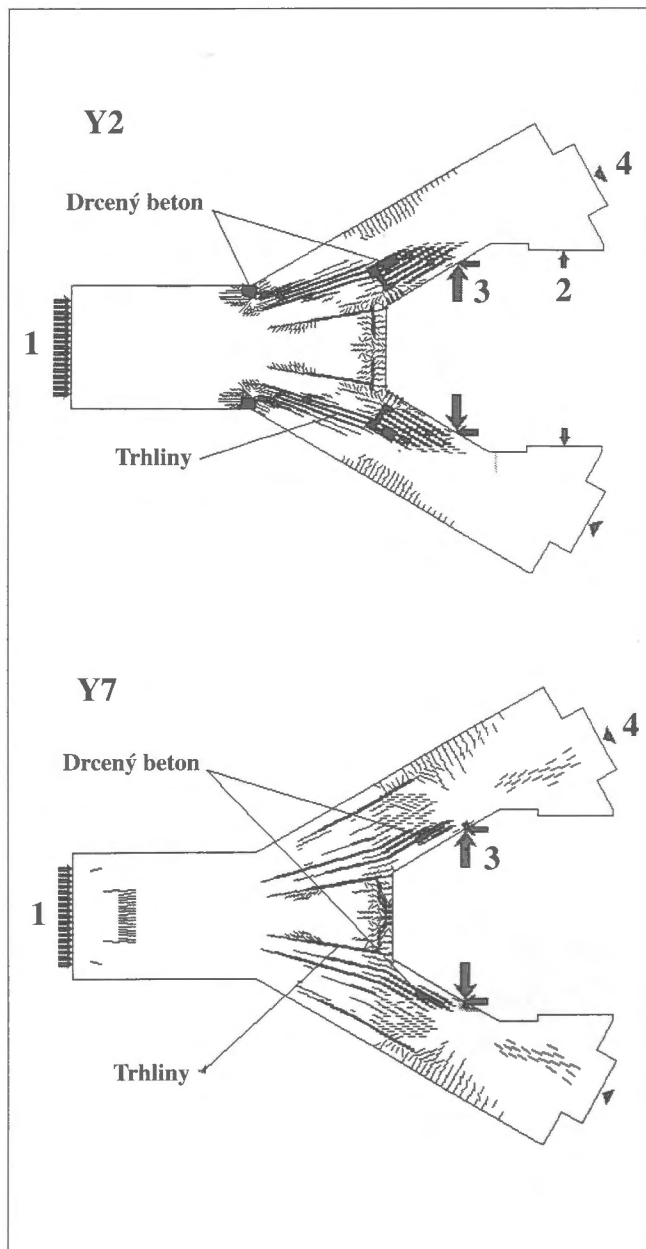
Těžní plošiny jsou obrovské konstrukce navrhované podle speciálních postupů. Vnitřní síly jsou staticky neurčitě, a tudíž závislé na nelineárním chování materiálu. Základ těžní plošiny Sleipner A tvořila železobetonová konstrukce připomínající obilní silo, *obr. 1*. Konstrukce byla vybetonována v doku, potom vyzvednuta, plavena po moři a usazena na místo na dně moře. Stěna zásobníku musela být tedy navržena tak, aby odolávala kolísavému tlaku vody.



Obr. 1 – Těžní plošina Sleipner A – pohled, řez a detail řešené části / Sleipner A platform – elevation, section and the detail investigated

Numerický model byl vytvořen pro symetrickou část spojení tří stěn. Geometrie modelu odpovídá části konstrukce, která byla experimentálně vyšetřována [3]. Pro výpočet byly připraveny dvě sítě konečných prvků, hrubá síť měla 549 a jemná 1695 prvků. Tlaková pevnost betonu byla 57,4 MPa. Ostatní materiálové parametry potřebné pro nelineární materiálový model byly odvozeny z tlakové pevnosti.

Tři zatěžovací síly simulovaly skutečné zatížení vyšetřovaného segmentu a působení okolní konstrukce, *obr. 2*: 1- osová normálová síla působící v rovině stěny; 2, 3 - smykové síly působící kolmo na stěnu a 4 - excentrická normálová síla (v podpoře) působící v šikmé stěně. Síla 3 reprezentovala tlak vody působící v prostoru mezi jednotlivými zásobníky, a v numerickém modelu byla nahrazena dvěma složkami. Pro numerickou simulaci se použila stejná historie zatížení a umístění působících sil jako pro zatěžování během experimentálních zkoušek. Zatěžovací síly měly navzájem neproporcionální historii zatížení odvozenou z tlaku vody na staticky neurčitou konstrukci a s uvážením vlivu výšky hladiny uvnitř zásobníků. Výška vnější vodní hladiny byla nezávislým ukazatelem úrovně zatížení.

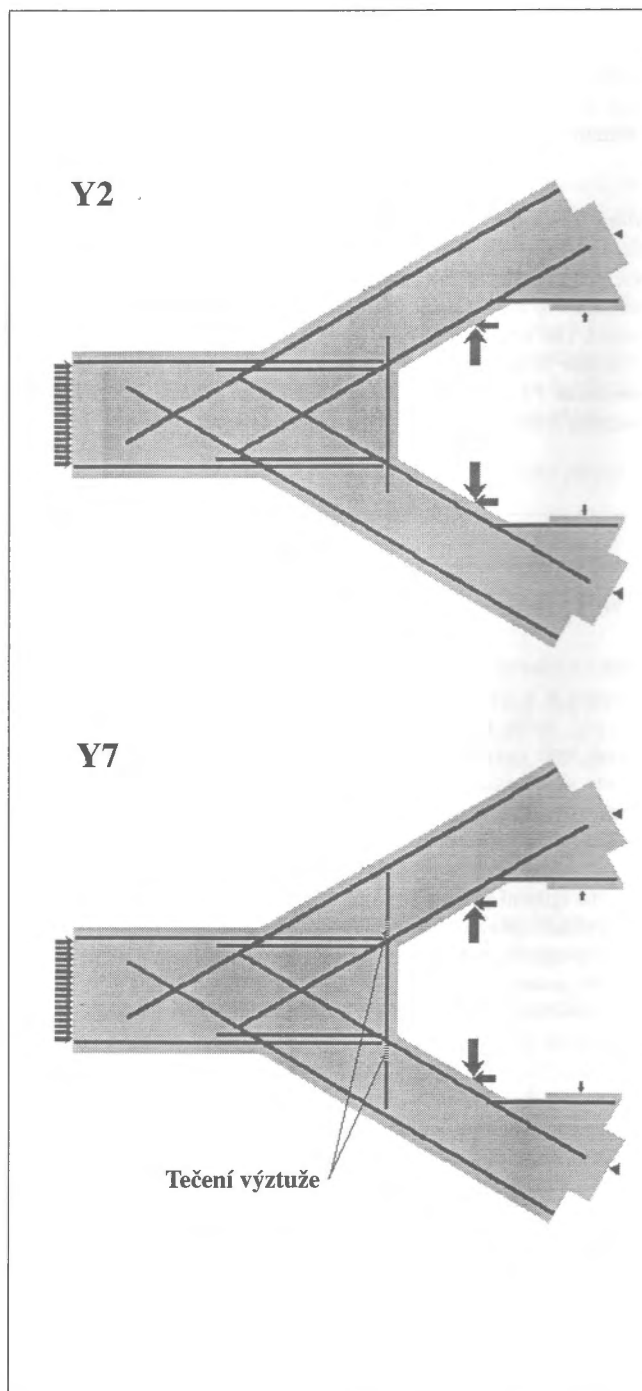


Obr. 2 – Způsoby porušení vyšetřovaného detailu pro případy Y2 a Y7 – obrazy trhlin a místa s drceným betonem / Failure modes of the cases Y2 and Y7 – crack patterns with concrete crushing

Výpočet umožnil sledovat chování problematického detailu v celé historii zatěžování. V tomto článku je však pozornost zaměřena pouze na vybrané výsledky ze stavu porušení konstrukce. Pro uvedenou část řešení se použil model rotačních trhlin.

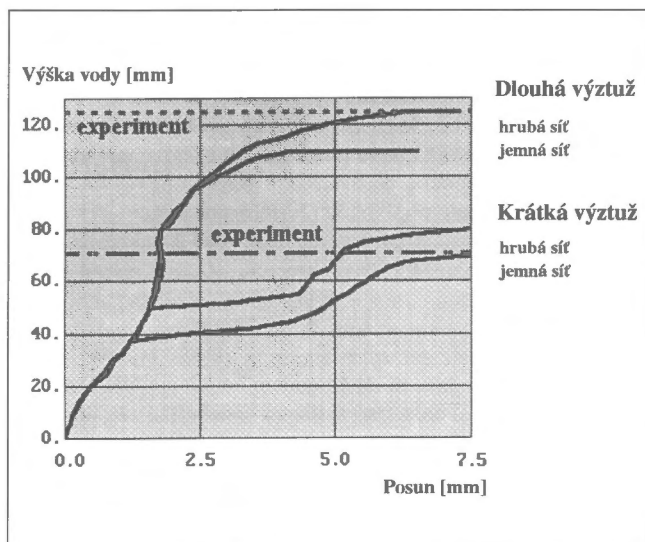
Výztuž je ukázána na obr. 3. Smyková oblast vyšetřovaného segmentu je vyztužena pruty s T-hlavicemi pro jejich kotvení. Délka těchto prutů je rozhodující pro smykovou únosnost konstrukce. V rámci zadání úlohy se simulovaly dva způsoby vyztužení: případ Y2 s jedním krátkým prutem podle skutečného stavu a případ Y7 s dlouhým prutem podle návrhu opravy. Hlavice prutů nebyly ve výpočtu zohledněny. Toto místní zjednodušení nemělo na celkové výsledky vliv. Zobrazené pruty hlavní výztuže mají profil 25 mm s mezi tečení 550 MPa. Na počátku výpočtu se vždy předpokládá úplná soudržnost mezi výztuží a betonem. Případné porušení soudržnosti betonu a výztuže během výpočtu lze modelovat vznikem a šířením trhlin rovnoběžných s výztuží bez použití speciálních kontaktních prvků.

Porušení vyšetřovaných segmentů konstrukce Y2 a Y7 jsou pro jemné sítě prvků zobrazena na obr. 2 a 3. V obou případech bylo porušení způsobeno kombinací účinků normálové a smykové síly. V případě Y2, tj. krátkého výztužného prutu, došlo k vyčerpání únosnosti při zatížení, které odpovídá výšce vody 70 m. Selhání konstrukce bylo způsobeno pouze tahovým porušením betonu. Hlavní trhlinka obchází hlavici prutu. V případě Y7, tj. dlouhého výztužného prutu, došlo k porušení při „výšce vody“ 110 m. Výztuž byla aktivována a porušení betonu již nebylo tak výrazně koncentrováno jako v prvním případě. Deformace se rozdělily na širší oblast. Poškození konstrukce bylo způsobeno tečením příčné výztuže a současným drcením betonu.



Obr. 3 – Vyztužení vyšetřovaného detailu podle skutečnosti (Y2) a podle návrhu úprav (Y7) / Reinforcement of the detail investigated: Y2 – according to reality, Y7 – according to the re-design

Diagramy zatížení - posun sledovaného bodu konstrukce pro oba řešené případy jsou na obr. 4. Z dosažených výsledků je zřejmé, že užití delších výztužných prutů výrazně zvyšuje (o 57 %) smykovou únosnost konstrukce. Pro srovnání jsou v diagramu vyznačeny hodnoty zatížení, kdy došlo k porušení zkušebních prvků během experimentálního zatěžování [5]. Hodnota zatížení (výška vody) při porušení zjištěná numerickou simulací je v dobré shodě s experimentálními výsledky. Hrubá i jemná síť konečných prvků dávají velmi podobné hodnoty výsledků. Rozdíly v oblasti smykového porušení jsou způsobeny křehkým chováním betonu a měkčí odezvou jemné sítě. Použití hrubší sítě vytváří tužší model konstrukce a hodnota zatížení při porušení konstrukce je vyšší.



Obr. 4 – Diagramy zatížení – posun sledovaného bodu konstrukce pro případy Y2 a Y7. / Load – displacement diagrams for the cases Y2 and Y7

Závěr

Na závěr ukázky praktického použití programu SBETA je možno uvést několik poznámek, které mají obecnou platnost. *Ačkoliv nelineární numerická analýza nabízí možnosti velmi realistického zobrazení stavu části konstrukce, podrobná simulace celé konstrukce je zatím příliš velký úkol.* Pro nalezení kritických detailů konstrukce a stanovení nejnepříznivější kombinace zatížení je třeba provést lineární výpočet celé konstrukce umožňující superpozici účinků. Proto je vhodné použít kombinaci obou způsobů výpočtu. Lineárně pružný výpočet celé konstrukce poskytne rozdělení vnitřních sil na konstrukci. Podrobné vyšetření vybraných kritických míst a oblastí se následně provede nelineárním výpočtem. Při tomto postupu může nelineární analýza sloužit pro posouzení či optimalizaci navržené výztuže v konstrukci. *Nelineární numerický model určité oblasti může zohlednit většinu vlivů a faktorů, které chování konstrukce ovlivňují, zejména navrženou výztuž a redistribuci napětí vlivem nelineárního chování materiálu.* Rozsah oblasti, která může být pokryta nelineárním výpočtem, je větší než oblast určitého průřezu, na který se vztahují pravidla a postupy pro klasické navrhování a posuzování výztuže. V praktické situaci oblast uvažovaná pro nelineární numerickou analýzu představuje konstrukční prvky (stěny, nosníky), jejich spoje, styčníky, detaily kotvení atd. Zkušenosti z používání programu SBETA ukazují, že

nelineární numerickou simulaci lze použít nejen pro výpočet mezního zatížení, jak ukazuje uvedený příklad, ale rovněž pro vyšetřování stavu použitelnosti konstrukce, tzn. šířky trhlin, jejich vzdálenosti a deformace konstrukce [4, 5].

Nelineární numerická analýza je moderní a velmi účinný nástroj pro navrhování železobetonových konstrukcí. Pokud je analýza založena na modelu rozptýlených trhin, což je obvyklý přístup, zaručuje i dostatečnou spolehlivost použití. Použitý materiálový model musí být schopen reprodukovat všechny způsoby porušení, které je třeba brát v úvahu pro danou konstrukci a její chování pod uvažovaným zatížením. V betonových konstrukcích s výskytem trhlin musí materiálový model vystihnout nelokální charakter tahového porušení, což lze zajistit uvážením lomové energie. Na konstrukční úrovni se mohou vyskytovat chyby způsobené nevhodnou diskretizací. Tyto chyby nesmí přesáhnout stanovený limit a jejich kontrola řešení je založena na rovnováze vnějších a vnitřních sil, přičemž vnitřní síly jsou výslednicí napětí určených na základě nelineárních materiálových modelů. Protože odhad diskretizační chyby není vždy možný, zkušenost doporučuje provést výpočet pro různé typy sítí (hrubou a jemnou).

Poděkování

Tento článek byl napsán na základě zakázky pro norskou firmu *Dr. techn. Olav Olsen*. Jejich spolupráce a podpory během zpracování náročného úkolu si velmi ceníme a vážíme.

Literatura

- [1] Olsen, T. O., OLSEN, O.: The Loss of the Sleipner Platform, Computer Modelling of Concrete Structures, Proc. of EURO-C 1994 International Conference held in Innsbruck, Austria, 22nd-25th March, 1994, Edited by Mang, Bicanic, De Borst, Pineridge Press Ltd., s. 1061-1069.
- [2] SBETA.: Programová dokumentace, Červenka Consulting, Praha 1996, s. 369.
- [3] Holand, I.: The Loss of the Sleipner Condeep Platform, DIANA Computational Mechanics 94, Proc. of the First International DIANA Conference on Computational Mechanics, Edited by G.M A Kusters, M A N Hendriks, Kluwer Academic Publishers, s. 25-36.
- [4] Červenka, V., Margoldová, J.: Tension Stiffening Effect in Smeared Crack Model, Proc. of 10th ACSE EMD Speciality Conference, May 21-24, 1995, University of Colorado, Boulder, USA, Edited by Stein Sture, Published by the ASCE New York, pp. 655-659.
- [5] Červenka, V.: Nichtlineare FE-Berechnungen von ebenen Stahlbetontragwerken, Finite Elemente in der Baupraxis, FEM '95, Tagung der GACM, 23-24. Feb., 1995, Universität Stuttgart, s. 269-276.

Dr. Vladimír Červenka, Ing. Jana Margoldová, CSc., Červenka Consulting, Předvoje 22, 162 00 Praha 6

Zložky a vlastnosti vysokohodnotných betónov

Juraj Bilčík, Igor Hudoba

Pre veľmi pevný a zároveň trvanlivý betón bolo zavedené pomenovanie vysokohodnotný betón. Vysokohodnotný betón pozostáva minimálne z piatich zložiek: cementu, kameniva, vody, superplastifikátora a kremičitého úletu. Na sérii skúšok bol sledovaný časový priebeh pevnosti v tlaku a priepustnosti betónov vyrobených zo zložiek dobre dostupných na Slovensku, s rôznym obsahom kremičitého úletu (0, 5, 10 a 15 %).

Concrete is described as a high-performance concrete when it can satisfy especially high demands with respect to durability and strength. High-performance concrete in the fresh state consists at least of five components: cement, aggregate, water, superplasticizer, silica fume. An investigation was carried out to evaluate the compressive strength and permeability of concrete with various contents of silica fume (0, 5, 10, 15 %) made from components easily available in Slovakia.

Nové inžinierske diela s veľkými výškami a rozpätiami, resp. diela vystavené agresívnemu prostrediu si vyžadujú zvýšené nároky na kvalitu stavebných materiálov. Na betón, ako najrozšírenejší materiál, sú v súčasnosti kladené najmä požiadavky na zvýšenie jeho pevnosti a nepriepustnosti. Obidvom požiadavkám je možné vyhovieť ak použijeme vysokohodnotný betón.

Po roku 1980 možno pozorovať v niektorých vyspelých krajinách Európy a sveta prudký nárast záujmu o vysokohodnotný betón (VHB) zo strany vedcov, výskumníkov, ale aj stavebnej praxe. Vysokohodnotný betón ako kvalitatívne lepší konštrukčný materiál v porovnaní s obyčajným betónom (OB) láka inžinierov využiť ho v praxi, nakoľko ponúka nové, doteraz nepoznané a nevyužitú možnosti. Využitie VHB pre prax je podmienené dôkladným oboznámením sa s vlastnosťami tohto kvalitatívne nového materiálu, ako aj prijatím potrebných technických noriem a pravidiel.

Materiály pre VHB

Zlepšenie vlastností OB sa spája s výberom vhodných zložiek na výrobu betónovej zmesi, to znamená kameniva, piesku, cementu a vody. Zistilo sa však, že výraznejšie zlepšenie kvality betónu súvisí s lepším vyplnením medzier medzi jednotlivými zrnami v mikroštruktúre zatvrdnutého betónu. Vstup chémie a možnosti využitia nových vysokoúčinných plastifikátorov pri výrobe betónovej zmesi, a tým výrazné zmenšenie objemu pórov v štruktúre betónu, umožnili výrobu betónov vysokých pevností.

Kamenivo

Pre správny návrh betónovej zmesi OB býva spravidla rozhodujúca krivka zrnitosti použitého kameniva. Výsledky výskumu, ako aj príklady využitia VHB v praxi dokazujú, že veľkosť zrn plniva je kľúčovým problémom. V snahe dosiahnuť homogénnejšiu štruktúru sa pre návrh betónovej zmesi VHB používa spravidla vysoko-kvalitné kamenivo menších frakcií (do 16 mm).

V prípade VHB je aj pevnosť kameniva určujúca pre pevnosť zatvrdnutého VHB. Svedčí o tom pohľad na lomovú plochu vzorky VHB po jej porušení - lomová plocha prechádza cez kamenivo.

V uplynulých rokoch sa docielili vo svete (Nórsko, Japonsko, Francúzsko a USA) veľmi dobré výsledky aj pri použití ľahkého kameniva pre VHB.

Cement

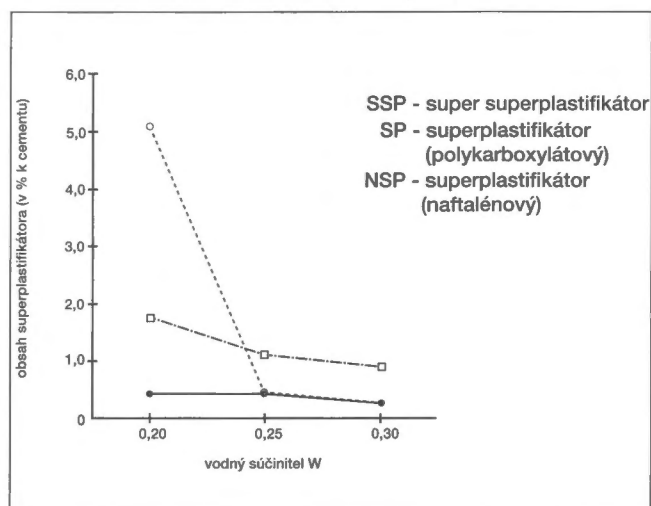
Okrem bežne vyrábaných cementov vyšších značiek, najmä portlandských cementov, sa v niektorých krajinách (napr. Francúzsko) vyvinuli nové, tzv. energeticky modifikované cementy (EMC). Princíp týchto nových cementov je založený na tom, že obsahujú asi 10 % kremičitého úletu, alebo iných modifikátorov. Rovnako obsahujú superplastifikátor vo forme prášku a jemného filera, ktoré sa spracúvajú spolu s portlandským cementom vo vibračnom mlyne v procese výroby. Výhodou EMC v porovnaní s cementom portlandským je vyššia pevnosť cementového kameňa približne o 30 %.

Prímеси

Okrem tradičných prímеси do betónovej zmesi pre VHB, ako sú kremičitý úlet (KÚ) dodávaný v rôznej podobe (nezahustený, zahustený alebo suspenzia) sa dosiahli dobré výsledky s použitím lietajúceho popolčeka, jemnomletej granulovanej vysokopepnej trosky a vápencového prášku.

Prísady

Novovyvinuté stekucovacie prísady vyrábané na báze melamínu alebo naftalénu, označované ako superplastifikátory (SP) a super superplastifikátory (SSP) majú vynikajúcu schopnosť disperzie cementu v betónovej zmesi aj pri hodnote vodného súčiniteľa nižšej ako $w = 0,25$. Zároveň zabezpečujú vysokú pohyblivosť betónovej zmesi pre VHB počas betonáže. Na obr. 1 vidieť závislosť medzi množstvom stekucovacej prísady a hodnotou vodného súčiniteľa pre konkrétnu betónovú zmes, obsahujúcu 10 % KÚ a s priemerom roztečenia kužeľa pri skúške spracovateľnosti $\varnothing 550$ mm.



Obr. 1 – Vzťah medzi množstvom stekucovacej prísady a hodnotou vodného súčiniteľa ($\varnothing 550$ mm, obsah KÚ 10 %) / Relationship between the amount of plasticizer and the w/c ratio