

POČÁTKY A VÝVOJ BETONOVÝCH MRAKODRAPŮ: OD INGALLS K BURJ DUBAI

EMERGENCE AND DEVELOPMENT OF CONCRETE SKYSCRAPERS: FROM INGALLS TO BURJ DUBAI

MIR M. ALI

Článek popisuje historii vývoje vysokých betonových budov, evoluci betonových mrakodrapů, od patnácti poschodí vysokého the Ingalls Building po moderní mrakodrapy Petronas a Jin Mao. Vývoj a inovace probíhaly v technologiích výstavby, bednění, míchání betonu, jeho dopravy a pumpování, byly zavedeny nové příměsi a přísady, které zlepšily zpracovatelnost betonu a přispěly k jeho širšímu použití na vysokých a velmi vysokých budovách.

This paper has provided a broad overview of different historic developments for concrete high-rise buildings. The evolution of concrete skyscrapers from the first reinforced concrete high-rise, the Ingalls Building, which was 15 stories high to modern skyscrapers Petronas and the Jin Mao is discussed. How new innovations in construction technology such as the advances in formwork, mixing of concrete, techniques for pumping, and types of admixtures to improve quality have all contributed to the ease of working with concrete in high-rise construction is also briefly discussed in the paper.

Pouze beton, jako žádný jiný stavební materiál, dává architektům a inženýrům na výběr jakou užít technologii výstavby, ale také jaké vlastnosti bude mít použitý materiál. Jestliže se architekt s inženýrem rozhodnou pro konstrukci z betonu, musí specifikovat množství proměnných: jeho konečnou pevnost, trvanlivost, systém bednění, požadavky na náběh pevností, vlastnosti, množství a umístění výztuže, vzhled pohledových ploch a mnoho dalšího. Výsledkem je, že oblast vysokých betonových budov se neustále rychle mění a jejich limity jsou opakovaně dosahovány a překračovány. První použil kompozitní konstrukci u skutečně vysoké budovy Fazlur Khan ze Skidmore, Owings & Merrill (SOM) v roce 1960. To otevřelo cestu k současným velmi vysokým budovám typu Petronas Tower a Jin Mao.

Cestující v čase člověk pozná, že umění primitivní přípravy a použití betonu bylo známo římským stavitelům i v Egyptě za vlády faraónů. Současný vývoj a výzkum nastartovali koncem devatenáctého a začátkem dvacátého století takoví muži jako Monier, Hennebique, Ransome a Talbot. Beton ve svých návrzích a konstrukcích budov užívali architekti a inženýři, např. Frank Lloyd Wright, Pier Luigi Nervi, Robert Maillart a trochu později Fazlur Khan. Jistě, betonové mrakodrapy se začaly stavět až o něco později, ale každý z jmenovaných přispěl svým podílem k vývoji a užití betonu v té podobě, jak ho známe dnes.

DÁVNÁ HISTORIE

Velmi vysoké budovy jsou relativně mladým doplňkem měst po celém světě. Až technologie devatenáctého století umožnily jejich vývoj. Železo, beton a zdivo jsou známé v civilizacích už dlouhou dobu, ale v jiné podobě. Zdivo je nejstarší materiál. Beton je naopak ve své dnešní podobě nejmladší ze tří jmenovaných. Výzkum ukázal, že staré civilizace (Féničané a jejich kolonie, Mykénská kultura na Kypru, Minoanská kultura na Krétě, Egypt a Mezopotámie) používali vápenné jako vazný prvek ve svých maltách. V konstrukcích starších než 1 200 př. n. l. byly nalezeny leštěné betonové podlahy a plochy s tvrdou barvenou omítkou.

V prvních stoletích stejně jako dnes byly čas, peníze a lidské schopnosti velmi důležitými faktory při výběru stavebního materiálu [2]. Remeslná dovednost byla požadována pro vybudování bednění, ale nebylo snadné najít zručné řemeslníky v dobách, kdy všechny práce plnily velké skupiny obyčejných otroků [3]. S úpadkem Římského impéria se postupně zapomnělo i na možnosti, které poskytovaly cementové materiály. Pouze ruiny připomínaly římskou genialitu a historii betonu. Používání betonu bylo pro následující staletí ztraceno až do jeho znovuobjevení v devatenáctém století a postupně začal být využíván pro stavby velkých skladů, obytných budov a továren.

Za počátek historie a vývoje mrakodrapů lze považovat Stoletou výstavu uspořádanou v roce 1876 ve Filadelfii, USA. Nebyly zde ani mrakodrapy ani stavby, které by je připomínaly, byla zde však řada konstrukcí a dalších vystavených prvků, které byly těmi semínky, z nichž po několika impulzech začal klíčit další vývoj. Portlandský cement, už nějakou dobu známý a používaný v betonu a maltách převážně pro zdivo nízké jakosti, byl dovážen z Anglie a začal se uplatňovat ve významnějších zděných konstrukcích. Prvky ze železobetonu byly zatím vystavovány na výstavě jako neobvyklé kuriozity vzhledem ke svým specifickým možnostem, zatím však nebyla rozpoznána příležitost pro nejširší užití železobetonu. Pár vizionářů však již začalo tušit nové možnosti. To byla éra budování mostů, ne však vysokých. Ocelové válcovací stolice ustavily jejich standardizovaný vzhled, který se později promítnul i do tvaru ocelové kostry prvních mrakodrapů.

Objev moderního železobetonu přišel na přelomu devatenáctého a dvacátého století. Wilkinson z New Castle, Anglie, François Hennebique, Francie, a Thaddeus Hyatt, USA, přispěli k jeho vývoji v devatenáctém století. Roku 1884 si E. L. Ransome nechal patentovat kroucený drát pro jeho lepší soudržnost s betonem.

Roku 1904 vyšel první technický bulletin „Zkoušky vyztužených betonových nosníků“. Autorem byl Robert Talbot z University of Illinois at Urbana po sérii zkoušek, které byly uskutečněny v místních laboratořích.

Se zkoušením materiálu se rozšiřovalo i jeho použití v Evropě i v Americe. Beton byl používán na stavbách továren, skladů, bytových i rodinných domů. Nejprve byly obvodové stěny zatěžovány nosníky, sloupy a stropními systémy, které imitovaly dva oblíbené a dosud používané materiály – ocel a dřevo. Tyto aplikace však nevyužívaly plný potenciál železobetonu. Na přelomu let 1901 a 1902 si nechal Ransome patentovat systém vnějších věnců, které umožňovaly

stáhnout stěny jednotlivých podlaží nad sebou. Vyvinul také první prefabrikované stěnové prvky, které na stavbě kombinoval s monolitickými stropy a sloupy. Prefabrikovaný systém byl od počátku populární, neboť stavba probíhala rychleji a její průběh nebyl tolik ovlivňován chladným počasím. Tyto dvě inovace změnilly vnější zdi, které do teď pouze nesly zatížení, v prvek systému, který působí dohromady. To vytvořilo podmínky pro užití betonu pro nosný skelet budovy s výplňovými stěnami, které chránily vnitřní prostředí [3]. Další inovace, která nahradila ve stavebním průmyslu tradiční postupy imitující použití oceli a dřeva, byly ploché stropní desky Roberta Maillarta místo dosud užívaných průvlaků a kolmých nosníků, které přenášely zatížení. Tyto průlomové změny s poznáním požární odolnosti betonu, vysoké únosnosti v tlaku a snížením přenášení zvuku učinily z železobetonu materiál se vzrůstající oblibou ke stavbě továren i rodinných domů na přelomu století. Bylo na investorech, aby přesvědčili veřejnost, že beton lze užívat i ve složitějších konstrukčních systémech než jen pro stavbu nízkých rodinných domů. Jako ocel mohl sahat po mracích.

PRVNÍ BETONOVÉ MRKODRAPY

Historie vysokých betonových budov je svázána s dvacátým stoletím. Ransomeho systém zabetonování čtyřhranných kroucených drátů jako kostry desek a betonových vnějších stěn byl použit na stavbě Ingalls Building v Cincinnati, Ohio, prvním patnáctipodlažním betonovém mrakodrapu postaveném roku 1903 A. O. Elznerem. Počáteční spekulace médií a některých skeptiků předpovídaly, že až budou odstraněny podpěry a vzpěry, budova vlastní vahou popraská a rozdrolí se. Jeden reportér u budovy dokonce hlídkoval celou noc, aby o katastrofě mohl přinést první zprávu. Předpovědi byly našťastí mylné a budova zůstala stát. Následně obrovské požáry v měsících po celém světě zničily řadu z prvních mrakodrapů postavených z oceli. Ocel se ve vysokém žáru stala tvárnou gumou, což vyvolalo znepokojení. Beton byl v té době již znám svou výbornou protipožární odolností ze staveb továren a skladů. V roce 1904 A. O. Elzner zmínil ve svém článku další výhodu betonu oproti oceli „...beton je podstatně levnější. Ocel vyžaduje velký kapitál a zaří-

zení k výstavbě ocelárny, dlouhá přeprava a vysoké přepravní náklady je třeba také započítat“ [4]. Harmonogram výstavby je vždy napnutý a betonová konstrukce může začít předzásobením místa výztuží. A Elzner dále pokračuje o stavbě Ingalls Building [4]:

„Konstrukce je betonová krabice o stranách tlustých 8“, s betonovou podlahou a střechou, betonovými nosníky, betonovými sloupy a schody – žádná ocel. Ta je zastoupena výztužnými pruty v betonu, jejich konce jsou propojeny a tvoří tak z betonové konstrukce skutečný monolit pokrytý z vnějšku obkladem ze 6“ tlusté bílé mramorové desky v prvních třech podlažích, v dalších jedenácti glazovanými šedými cihlami a bíle glazovanou terakotou v posledním podlaží a na obvodové římse... Neobjevily se žádné smršťovací trhliny, budova vydržela vzdorovat silným větrům, nejsou zde patrné žádné otřesy, to vše s betonovými stěnami pouze 8“ silnými, bez potrhání desek plochy šestnácti čtverečných stop, a s bankovním sejfem na druhém podlaží, který váží nejméně sto tun (am. váh. jed. – pozn. red.).“

INOVACE VE STAVEBNÍCH TECHNOLOGIÍCH

Většina technologických změn ve výstavbě betonových konstrukcí se odehrála v první polovině dvacátého století. Pokrok v bednění, míchání betonu, technika pro pumpování a různé druhy přísad zlepšily výslednou kvalitu materiálu, ale přispěly i k jeho snazší zpracovatelnosti a jeho použití na vysokých budovách.

Bednění

Nejefektivnější koordinační plány pro vysoké budovy počítají s mnohonásobně opakovaným použitím bednění. Tradičně bylo používáno dřevěné bednění, ale vývoj technologií přinesl formy z kombinace dřeva a oceli, hliníkové, sklovláknové a plastové ad. Byly rovněž vyvinuty různé podpůrné systémy bednění, bednění rámové, nosníkové ad.

Pro bednění stropů lze vybrané systémové prvky bednění velmi brzo pro stavbu zapůjčit. Bednicí prvky jsou v unifikovaných rozměrech umožňujících jejich spojování do větších celků a také opakované použití na různých částech stavby. Stropní bednění je sestaveno z ocelové příhradoviny, dřevěných latí, překližky a sklovláknových bednicích desek.

Po uložení betonu, jeho dozrání do požadované pevnosti je bednění rozebráno, očištěno a přeneseno jeřábem na místo dalšího použití.

Posuvné bednění je jiný typ, který lze také brzo opakovaně použít. Tři typy zvedáků, šroubový, hydraulický a pneumatický, jsou používány po celém světě k posunu bednění do vyšší úrovně zatímco beton tvrdne. Šroubový zvedák je ovládán ručně a je používán v částech světa s omezenou mechanizací. Hydraulický a pneumatický zvedáky jsou plně automatizované a posunují bednění zcela plynule vzhůru, zatímco je pumpován beton.

Dalším typem opakovaně použitelného bednění je překládané bednění. Formy mají opět svůj zvedací systém, je však odlišný od předchozího. Po uvolnění spolek se desky odklopí od stěn (jako otevření dveří), očistí se, naolejují a přiklopí ke stěně o betonovanou úroveň výše.

Dopravní systémy

Použití betonu na vysokých stavbách bylo omezeno jeho obtížnou dopravou do výšky. Při stavbě Ingalls Building byly suroviny dováženy na staveniště a skladovány v suterénu. Míchání betonu probíhalo v místních míchačkách (byly vynalezeny v osmdesátých letech devatenáctého století). V roce 1913 začal převoz betonu na otevřených korbách nákladáků. Cestou na stavbu však docházelo k rozmišení směsi a na místě bylo nutné její nové přemíchání. Na stavby mrakodrapů bylo skutečně potřeba přepravit obrovské množství betonu a míchací vozy byly k dispozici až po roce 1920. V roce 1947 se objevil na scéně první hydraulicky ovládaný autodomíhač.

Doprava betonu byla jednou z vážných otázek při výstavbě vysokých budov a velkých projektů. Ruku v ruce s tím bylo třeba řešit, jak ukládat taková množství betonu. Postupy v této oblasti zůstávaly primitivní a vývoj stagnoval až do šedesátých let dvacátého století, kdy byly první hydraulicky ovládané pumpy montovány na automobilové podvozky. Od té doby je technologie dále zdokonalována a pumpování betonu je zcela běžnou záležitostí. V současnosti je beton pumpován do značných výšek. Stavitelé Jin Mao v čínské Šanghaji pumpovali vysokopevnostní beton do výšky 366 m. Pumpování je omezováno plastickými vlastnostmi betonu, typem dostupných pump

a trubkami potřebnými k dopravě čerstvého betonu na požadovanou úroveň. Pro takovou výšku jsou třeba vysokotlaké trubky. Také vlastnosti čerstvého betonu musely být upraveny, nejdříve bylo třeba zjistit, jak se bude pod tlakem v trubce chovat.

VÝVOJ TECHNOLOGIE BETONU

Spolu s pokrokem v dopravě betonu, typech bednění, ukládání betonu do vysokých výšek i jeho mechanické a chemické vlastnosti prošly v minulém století velkým vývojem. Opět byly mnohé z nich vyvinuty již v první polovině století, ale platí i pro současné aplikace a dočkaly se dalších vylepšení.

Lehký beton (LWC)

Lze ho vyrábět z různých druhů kameniva, např. škváry, pemzy, vermikulitu, perlitu, herkulitu a zrněk zpěněného polystyrenu. Velmi lehké kamenivo jako zrnka zpěněného polystyrenu, perlit a vermikulit umožňují vyrobit betony váhy kolem 800 kg/m^3 . Jejich tlaková pevnost je 0,69 a 6,9 MPa – nemohou nést zatížení, mají však velmi dobré izolační vlastnosti. Střední skupina lehkých betonů obsahuje pemzu, strusku nebo herkulit, má tlakovou pevnost 6,9 až 17,2 MPa. Konstrukční lehký beton má minimální tlakovou pevnost 17,2 MPa, ale dosahuje až hodnot 41,4 MPa. Jeho váha se mění od 1441 do 1922 kg/m^3 . Nasákavost a velikost zrn kameniva, jejich tvar a povrchová textura ovlivňují vlastnosti lehkého betonu.

Z lehkého betonu jako konstrukčního materiálu byly postaveny např. mnohaposchodové rámové konstrukce budov, fasády, střešní skořepiny, lomenicové konstrukce, je používán v prefabrikaci, na výrobu trubek a rour ad. Lehký beton je velmi vhodný pro mnohaposchodové budovy. Vyšší cena materiálu se vrátí v nižší váze konstrukce, což umožňuje menší průměry sloupů i základových prvků. Padesát dvě poschodí vysoký One Schell Plaza z roku 1971 v texaském Houstonu má konstrukci z lehkého betonu od shora až dolů a je dosud nejvyšší budovou na světě postavenou z lehkého betonu.

Vysokopevnostní beton (HSC)

HSC je znám také jako mikro silika beton nebo kondenzovaný silika fume beton (CSF). Silika fume je vedlejší produkt,

kteří vzniká při tavení křemíku a křemíko-železických slitin v pecích vyhřívaných elektrickým obloukem. Jeho první konstrukční užití bylo v Norsku v roce 1971. CSF obsahuje Portlandský cement, vodu, drcené kamenivo, žulu nebo vápenec, jemný písek a superplastifikátory. Vše smícháno dohromady vytvoří produkt, který má po vytvrnutí pevnost vyšší než 34,5 MPa, ale taky to může být až 138 MPa. HSC/CSF je vodonepropustný a vysoce pevný materiál, je však mnohem křehčí než běžný beton a musí být míchán a ukládán s velkou péčí.

Přestože HSC vyžaduje speciální zacházení, je stále více a více ve stavebním průmyslu používán. Současným trendem je pumpovat ho do výšek. Bylo vyvinuto nové zařízení, které brání rozměšování materiálu a zůstává tak zachována vysoká pevnost betonu. HSC je užíván na stavby vysokých obytných domů a mrakodrapů, jako ty co byly postaveny, nebo jsou stavěny v Malaysii, Číně nebo v USA. Přitažlivost tohoto materiálu je v tom, že s vyšší pevností mohou být nosné prvky budov menší. Velikost sloupů z HSC je menší, a tím zůstane větší podlahová plocha budovy a majitel z pronájmu získá více.

Vysoko užitný beton (HPC)

Užívání HPC skutečně začalo v roce 1927 když inženýři stavěli tunel pod Skalními horami nedaleko Denveru a potřebovali nějakým rychlým způsobem zajistit nadloží tunelu. V tom čase byl HPC ve stádiu vývoje, nebyl však ještě zralý pro trh. Inženýři přesvědčili vědce, aby umožnili jeho užití a tunel byl skutečně budován s použitím tohoto materiálu. Proč se stavitelé tak zajímali o HPC? Odpověď leží v jeho schopnosti nabývat odpovídající pevnosti během 24 hodin, zatímco u běžného betonu to bývalo 7 dnů. Nejen tímto se HPC odlišuje od běžného betonu, ale také obsahem přísad a příměsí.

HPC neznamená jen rychlejší nárůst pevnosti, je to směs, jejíž vlastnosti zahrnují vyšší pevnost a lepší užitné vlastnosti z hlediska trvanlivosti, ductility, hustoty, stability směsi a chemické odolnosti ad. Toho lze dosáhnout volbou správných přísad v kombinaci s cementem, kamenivem a vodou. Stavební manažeři se snaží dosáhnout větší efektivity stavby snížením času na betonáže rychlejším dosažením pevností betonů, sni-

žováním objemu materiálů, které budou přenášet zatížení stavby při zvýšení její stability a tuhosti.

Z údajů v literatuře je zřejmé, že HPC je velmi flexibilní z hlediska jeho aplikací na různých konstrukcích. Je dobře známo, že čas, mzdy a mzdové náklady významně ovlivňují stavební průmysl. HPC s jeho nižším poměrem vody a cementu mohou dosáhnout pevností 21,4 až 41,4 MPa za 24 hodin od betonáže. Tato skutečnost urychluje čas pro dokončení projektu a může snižovat náklady zkracováním délky prostojů, vyšším počtem opakovaného použití bednění ad. Vyšší pevnost, která může být dosažena u HPC, přináší také několik výhod do konstrukce, a to dělá tento beton zajímavější pro použití na vysokých budovách.

ROZVOJ KONSTRUKČNÍCH SYSTÉMŮ

Požadavky na návrh konstrukce vycházejí z přírodních podmínek a užívání objektu lidmi. Konstrukce musí být navržena tak, aby byla schopná odolávat gravitaci, větru, vysokým i nízkým teplotám, vibracím, unesla vnitřní vybavení a sníh, chránila proti explozím a absorbovala hluk. K tomu přistupují podmínky využití objektu lidmi, jako pronajimatelný prostor, potřeby vlastníka, estetika, cena, bezpečnost a pohodlí. Ačkoliv jedna skupina nevylučuje druhou, pečlivé plánování a zvažování je nesmírně důležité, aby bylo ve výsledku dosaženo zahrnutí všech požadavků do projektu.

Během historie výstavby vysokých budov došlo k obrovským změnám v technologiích. Část z nich byla vyvolána i změnou způsobu života lidí. V prvních letech mrakodrapů směřovaly v přízemí výklady obchodů přímo do ulice, nad nimi byly kanceláře a konečně v horních patrech byly byty obyvatel města. U těchto typů konstrukcí bylo obtížné navrhnout celkově výhodný konstrukční systém. Kanceláře měly velké nároky na otevřený prostor bez stěn a přiček s vysokou úrovní zatížení jak mechanického, tak na elektrické rozvody, byty nad nimi naopak vyžadovaly intimnější prostory s hustší sítí svislých konstrukcí, požadavky na větrání a elektrické sítě nebyly tak vysoké. V bytové části byla možná nižší světla výška místností, protože plocha bytu bývala pouze v jednom podlaží. Kanceláře mívaly vyšší žebrové nebo roštové

stropy se spuštěnými podhledy, které zakrývaly systémy vytápění, ventilace a klimatizace a umožňovaly pokrýt plochu elektrickými rozvody dle aktuálního dispozičního uspořádání.

S nárůstem automobilizmu přesunuli lidé své bydlení na předměstí a do práce začali pravidelně dojíždět. To omezilo smíšené požadavky na budovy a umožnilo vývoj nových forem vysokých budov, s většími rozpony svislých nosných prvků po celé výšce [5].

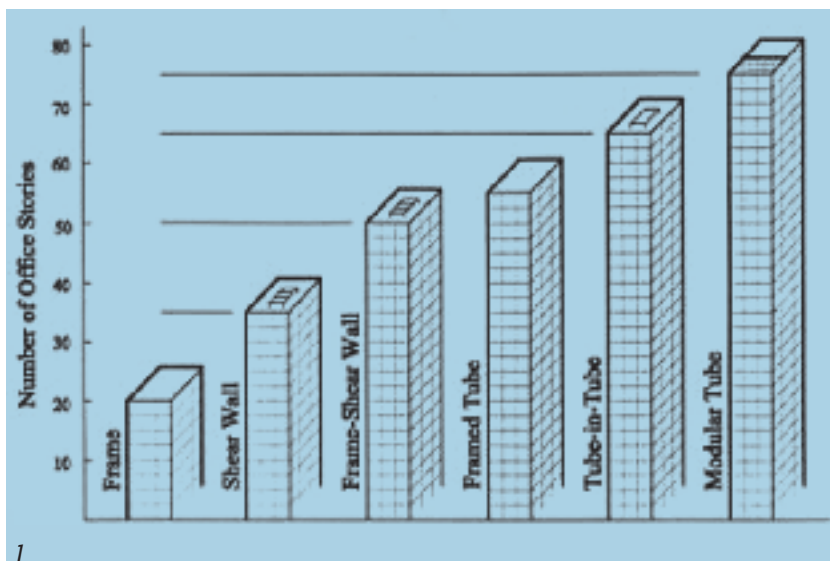
V posledních letech se vrací požadavky na smíšené užití vysokých budov. Obrat vyvolaly zvyšující se ceny ropy, nárůst zájmu o šetření přírodních zdrojů, vysoké časové nároky při každodenním dojíždění a stresy z dopravních komplikací během cesty. Architekti a inženýři se tedy vrátili k řešení otázek a výzev, jak vhodně strukturovat konstrukci, aby pokryla požadavky celodenního pobytu člověka. Vedle obchodů, služeb, kanceláří a bytů, potřebuje městský člověk taky někde zaparkovat své auto.

Pokud uvažujeme o konstrukci samotné, existují dvě hlavní kategorie vysokých konstrukcí, konstrukce navržené na svislé a vodorovné zatížení a konstrukce navržené primárně na svislá zatížení. Protože mrakodrapy musí především vzdorovat velkým vodorovným zatížením od větru, odolnost systému příčnému zatížení se stala velmi důležitou.

Když se železobeton začal používat jako stavební materiál, existovala omezení výšky konstrukce, která z něho směla být postavena. Statici se postupně naučili propojit vlastnosti železobetonu a konstrukčních systémů. Fazlur Khan způsobil revoluci v projektování vysokých budov z oceli a betonu, když přišel se svým dobře známým diagramem rozdělení vhodnosti konstrukčních systémů dle počtu podlaží budovy [6, 7]. Určité systémy jsou vhodné pro jiné počty podlaží než systémy jiné (obr. 1).

Smykové stěny

Systém se smykovými stěnami byl poprvé použit v roce 1940. Smykové stěny mohou být brány jako svislé, konzolové nosníky, které vzdorují příčnému zatížení větrem a seismickému zatížení, které je na ně přenášeno ze stropních konstrukcí, jež v tu chvíli působí jako membrány. Schopnost betonu tlumit vibrace a zajištění hmotnosti konstrukce z něj činí vhodnou volbu. Smykové stěny mají



mnoho tvarů, kruhové, křivkové, oválné, krabicové, trojúhelníkové nebo přímé. Často tvoří smykové stěny jádro budovy, kterým jsou vedeny hlavní svislé komunikační cesty, výtahy a schodiště, svislé rozvody TZB a jsou v něm umístěny sanitární jednotky, záchody, umývárny, kuchyně nebo skladové prostory. Někdy, aby vyhovely externím požadavkům, jsou uspořádány v diagonálním systému. Jsou-li tyto stěny pečlivě projektovány a navrženy, mohou se stát prvkem konstrukce, který se podílí

Obr. 1 Vhodnost různých betonových konstrukčních systémů dle počtu podlaží budovy

Fig. 1 Concrete systems that are suitable for different ranges of number of stories

Obr. 2 Budova De Witt-Chestnut Apartment v Chicagu

Fig. 2 DeWitt-Chestnut Apartment building in Chicago

Obr. 3 Centrum Onterie v Chicagu

Fig. 3 The Onterie Center in Chicago



na přenosu jak svislého, tak vodorovného zatížení. Vlastnost betonu pohlcovat zvuk je činí vhodnými pro užití v hotelech a bytových domech ke snížení přenosu hluku mezi vnitřními samostatnými jednotkami.

Rámový systém

Momentovému zatížení odolné rámy jsou konstrukce, které mají tradiční uspořádání prvků nosník – sloup. Ty přenášejí svislé zatížení ze stropního systému. Stropy mají funkci vodorovných ztužujících prvků a přenášejí vodorovná zatížení do nosníků a sloupů. V koncích, kde jsou nosníky podepřeny sloupy, přenášejí vysoké hodnoty momentového a smykového zatížení, a vše přebírají sloupy. Výsledkem je, že nosníky i sloupy musí mít poměrně velké průřezové rozměry.

Rámový systém se smykovými stěnami

Kombinovaný rámový systém se smykovými stěnami poprvé vážně studovaný Fazlurem Khanem [8] byl milníkem ve vývoji konstrukčních systémů vysokých betonových budov. V tomto systému centrální jádro nebo rozptýlené smykové stěny spolupůsobí s rámovou konstrukcí při spojení tuhými stropními konstrukcemi s membránovým chováním.

Třírozměrný rámový systém

Systém tvoří další krok ve vývoji konstrukčních systémů. V roce 1960 je Khan spokojen s jeho vývojem, představuje jeho spolehlivost a popisuje ho jako [9]: „třírozměrná prostorová konstrukce ze tří, čtyř i více rámu a příčného zavětrování nebo smykových stěn spojených přímo v krajích, nebo blízko nich, tvoří dohromady konstrukci podobnou svislému tubusu, která je schopná vzdorovat příčnému zatížení z kteréhokoliv směru vetknutím do základů.“

Tubusová konstrukce

Ze své podstaty tuhá trojrozměrná konstrukce zajišťuje spolupůsobení celé budovy na přenesení momentového zatížení. Tubus může zahrnovat smykové stěny, sloupy, nosníky, všechny prvky spojené tak, aby působily jako jeden celek. Hlavním rysem tubusu jsou hustě rozmístěné obvodové sloupy propojené vysokými příhradovými nosníky, které tvoří základní kostru budovy a zajišťují její odolnost vůči příčnému zatížení. Okenní otvory obvykle pokrývají asi 50% plochy fasády budovy. Velké otvory jako výlohy obchodů nebo vjezdy do garáží jsou možné díky mohutným nosníkům, jež tvoří jejich nadpraží, třebaže místně dochází k narušení uzavřeného tubusu konstrukce. Kon-

cept uzavřeného tubusu je konstrukčně i architektonicky vhodný pro beton jako použitý materiál, jak je to zřejmé z budovy De Witt-Chestnut Apartment v Chicagu (obr. 2), dokončené v roce 1965. Je první známou budovou postavenou Khanem v tomto konstrukčním systému.

Systémy vícetubusových konstrukcí

Existují různá uspořádání tubusových konstrukcí: pravoúhlé rámové, systémy šikmých vzpěr a rozpěr, tuhé jádrové stěnové tubusy, tubus v tubusu a svazek tubusů. Rámový nebo krabicový tubus je nejčastěji spojován s původní definicí tohoto typu konstrukčního systému. Budova DeWitt-Chestnut Apartment v Chicagu je rámový tubus.

Tubus se vzpěrami je trojrozměrně ztužen nebo přímo tvoří obrovskou trojrozměrnou příhradovinu. Jeho jedi-

Obr. 4 Brunswick Building v Chicagu

Fig. 4 The Brunswick Building in Chicago

Obr. 5 One Shell Plaza v Houstonu

Fig. 5 One Shell Plaza in Houston

Obr. 6 Budova One Magnificent Mile v Chicagu

Fig. 6 One Magnificent Mile building in Chicago



Literatura:

- [1] *Malinowski R. a Garfinkel Y.*: Prehistory of Concrete: Concrete Slabs Uncovered at Neolithic Archaeological Site in Southern Galilee, *Concrete International*, March, 1991, pp. 62–68
- [2] *Huxtable A. L.*: Reinforced Concrete Construction: The Work of Ernest L. Ransome... 1884–1911, *Progressive Architecture*, v. 38, September, 1957, pp. 138–142
- [3] *Harries K. A.*: Reinforced Concrete at the Turn of the Century, *Concrete International*, January, 1995, pp. 58–62
- [4] *Elzner A. O.*: The First Concrete Skyscraper, *The Architectural Record*, June, p. 515, 1904
- [5] *El Nimeiri M. M. a Khan F. R.*: Structural Systems for Multi-Use High-Rise Buildings, *Developments in Tall Buildings*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, p. 221, 1983
- [6] *Khan F. R.*: Influence of Design Criteria on Selection of Structural Systems for Tall Buildings, *Canadian Structural Engineering Conference*, Montreal, Canada, March, 1972, pp. 1–15
- [7] CTBUH, *Architecture of Tall Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Monograph 30, M. M. Ali and P. J. Armstrong, eds., McGraw-Hill, Inc., New York, 1995
- [8] *Khan F. R. a Sbarounis J. A.*: Interaction of Shear Walls and Frames in Concrete Structures under Lateral Loads, *Journal of the American Society of Civil Engineers*, 90 (ST3), June 1964
- [9] *Khan F. R. a Rankine J.*: Structural Systems, Tall Building Systems and Concepts, Council on Tall Buildings and Urban Habitat/American Society of Civil Engineers, Vol. SC, p. 42, 1980
- [10] *Ali M. M.*: The Art of Skyscraper: Genius of Fazlur Khan, Rizzoli International Publications, Inc., New York, 2001

nečnou vlastností je, že jeho prvky mají osovou a malou nebo žádnou ohybovou deformaci. Příkladem tohoto systému je Centrum Onterie v Chicagu (obr. 3).

Centrum Johna Hancocka, rovněž v Chicagu, je pozoruhodným příkladem stejného konstrukčního systému. Je postaveno z oceli.

Stěny jádra tubusu mohou buď přenášet veškeré vodorovné zatížení, nebo mohou působit v interakci s rámy. Brunswick Building v Chicagu (obr. 4) je příkladem, kde stěny jádra působí v interakci s vnějším rámem z hustě umístěných sloupů. To dává budově vzhled systému tubus v tubusu, přestože byla navrhována na principu spolupůsobení smykových stěn a rámu.

Tubus v tubusu je systém rámového tubusu a spolupůsobících vnitřních a vnějších smykových stěn. Celek je dobře odolný příčnému zatížení. Příkladem systému je budova One Shell Plaza v Houstonu (obr. 5).

Svazek tubusů bývá užíván v konstrukcích velmi vysokých budov jako způsob snižování plochy vystavené působení větru a možnosti vytváření intimějších bytových prostor v nejvyšších patrech. Násobné tubusy sdílejí vnitřní a přilehlé sloupy podle způsobu jejich vlastního spojení a propojení. One Peachtree Center in Atlanta nebo budova One Magnificent Mile v Chicagu (obr. 6) jsou příklady systému svazku tubusů. Sears Tower je z oceli, ale je pravděpodob-

ně nejznámějším zástupcem této kategorie.

Detaily o zmíněných budovách a více o vysokých budovách navržených Khanem lze najít v literatuře [10].

Výběr konstrukčního systému na současném stavebním trhu je velmi komplexní proces. V letech, kdy byl stavěn Ingall's Building, existoval pouze jeden systém. Postavit bednění bylo složité, ale sestavit budovu nebylo tak náročné jako u dnešních systémů. Vývoj ve světě betonu od roku 1960 probíhal převážně v rozvíjení jednotlivých konstrukčních systémů, zejména tubusů a v užití kompozitních konstrukcí. Současnou výzvou pro architekty je, aby všechny systémy pracovaly společně na maximum svých kapacit a vytvářely uvnitř prostředí obyvatelné lidmi.

Pokračování (Trendy ve stavbě vysokých budov) v příštím čísle časopisu.

Autor děkuje svým bývalým studentkám Cheryl Bicknell a Karen Hu za jejich pomoc a příspěvek k výzkumu, který předcházal přípravě tohoto článku.

Fotografie jsou z archivu autora. Redakce se omlouvá za jejich zhoršenou kvalitu. Fotografie v lepším rozlišení se nepodařilo získat.

Poprvé uveřejněno v Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 1, No. 1 (2001), pp. 2–14. V září 2008 aktualizováno autorem pro časopis Beton TKS.

*Mir M. Ali
Professor and Chairman, Structures Division
School of Architecture, University of Illinois
Urbana-Champaign, Champaign, IL 61820, USA
e-mail: mirali1@uiuc.edu*

ZAJÍMAVÉ INTERNETOVÉ ADRESY

<http://en.structurae.de/index.cfm> Structurae – Mezinárodní databáze a galerie staveb

<http://www.skyscraper.org/home.htm> Internetové stránky Muzea mrakodrapů v New Yorku. Do února 2009 probíhá výstava s názvem VERTICAL CITIES: HONG KONG | NEW YORK.

<http://www.greatgridlock.net/NYC/nyc.html> Studie o mrakodrapech v New Yorku s podtitulem Sto let výškových staveb.

<http://skyscraperpage.com/> Stránka pro milovníky mrakodrapů