

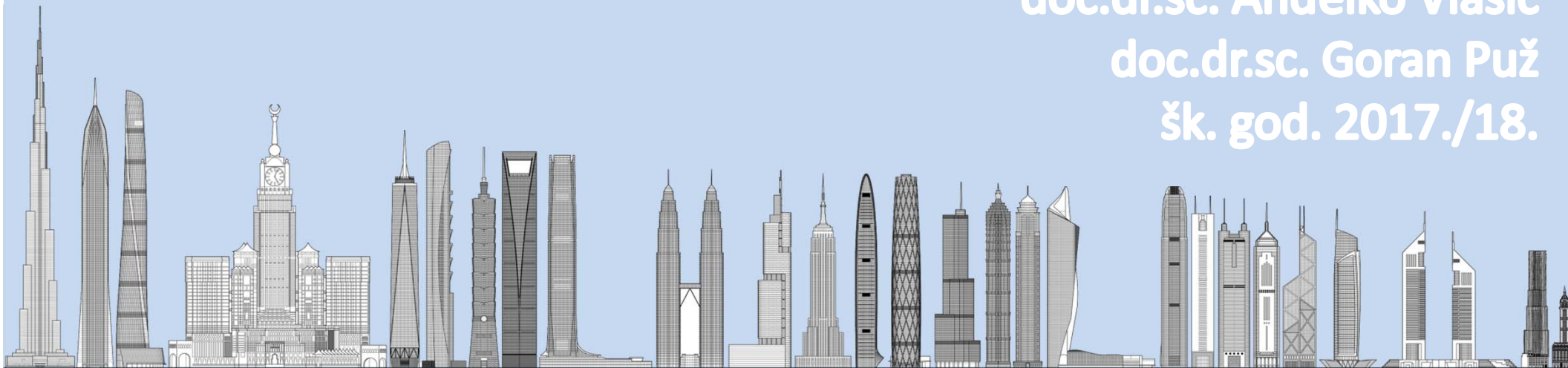
Građevinski Fakultet
Sveučilište u Zagrebu

VISOKE GRAĐEVINE

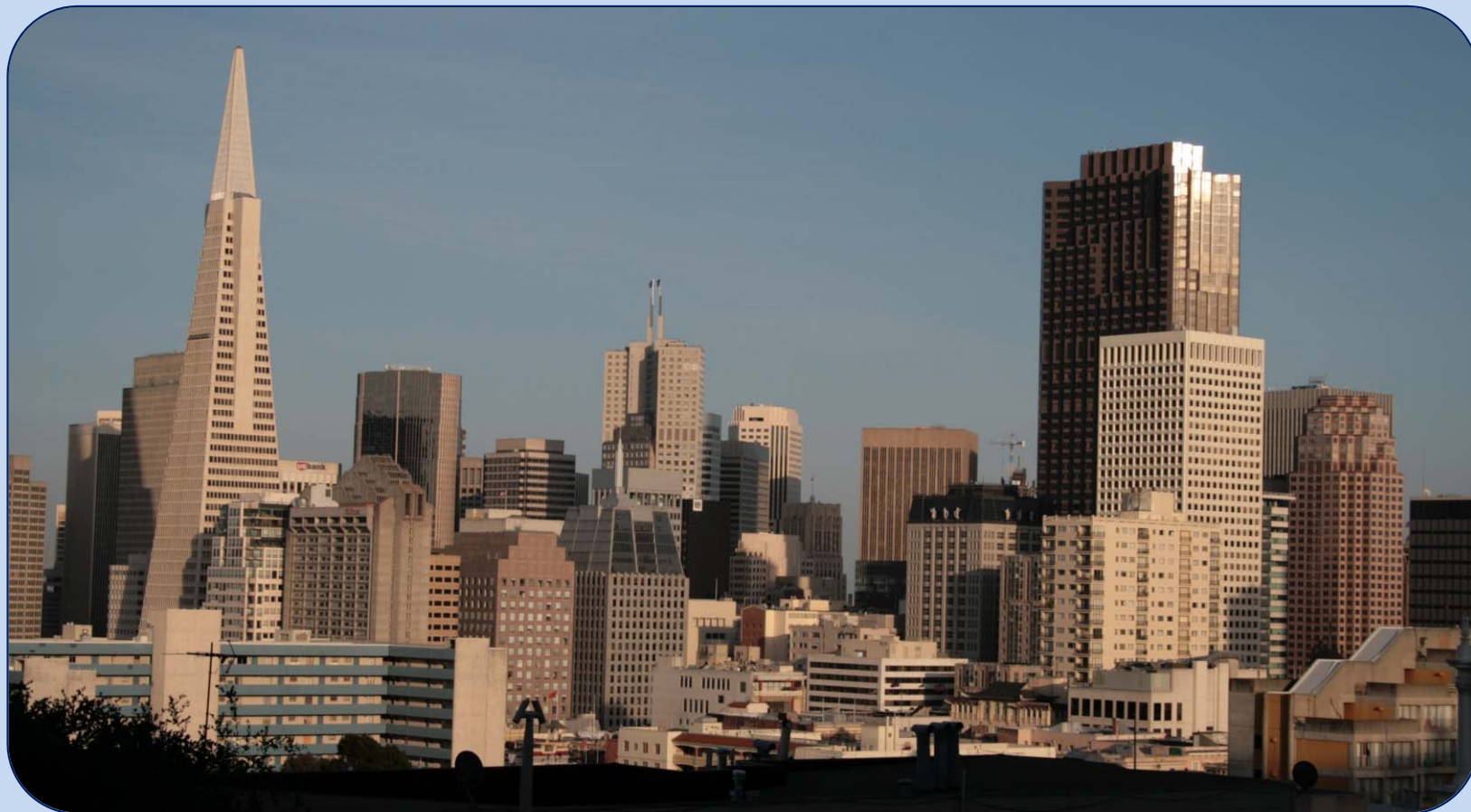
3. Predavanje

Konstrukcijski sustavi - općenito

doc.dr.sc. Anđelko Vlašić
doc.dr.sc. Goran Puž
šk. god. 2017./18.



1. Osnovna načela
2. Mjere konstrukcijske učinkovitosti
3. Tipovi konstrukcijskih sustava



- **Konstrukcijski sustav – sustav za preuzimanje horizontalnih djelovanja (dominantno vjetar i potres)**
- **Idealno bi bilo kada bi konstruktor sam mogao odabrati najučinkovitiji sustav**
- **Idealna konstrukcijska rješenja rijetko se primjenjuju u praksi**

Ograničenja odabira
konstrukcijskog sustava

Planiranje prostora unutar građevine (namjena građevine)

Arhitektonski zadani vanjski izgled i veličina zgrade

Ograničenja lokacije

Raspoložive i ekonomski opravdane metode gradnje

Odabrani materijali

Veličina vanjskih opterećenja (poglavito horizontalnih)

Potrebe vrsta i položaja instalacija

Izbor konstrukcijskog sustava ovisi o optimalnom rješenju koje zadovoljava arhitektonske, konstrukterske, ekonomske i društvene čimbenike

- Učinkovitost različitih konstrukcija uspoređuje se preko vlastite težine po metru kvadratnom tlocrtne površine

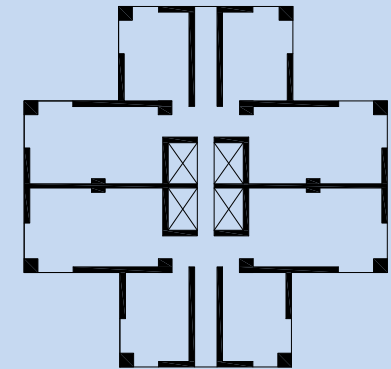


- Međukatna konstrukcija je vertikalno opterećenje koje ovisi samo o rasponu, ne i o visini građevine
- Opterećenje od stupova je također vertikalno, linearno ovisno o visini građevine
- S druge strane, opterećenje od konstrukcije koja preuzima horizontalna opterećenja (vjetar, potres) je barem kvadratna funkcija visine građevine

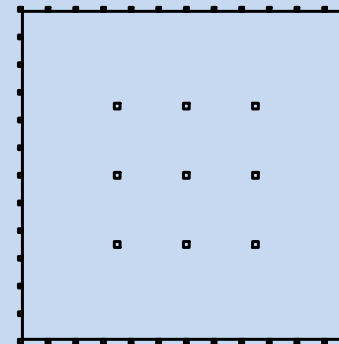
- Pojednostavnjeno, visoka građevina djeluje kao konzola sa temeljima upetim u tlo

Razlikujemo dva glavna slučaja djelovanja ove konzole:

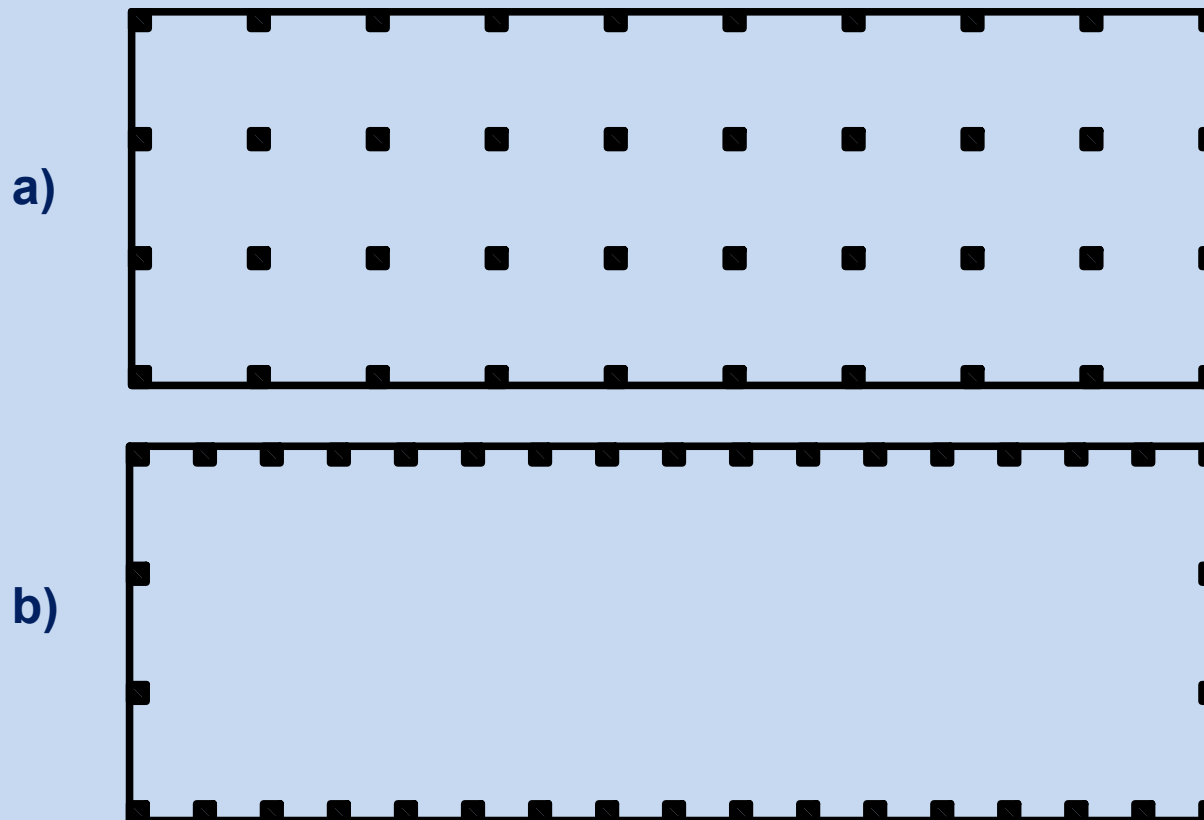
- Vertikalna konzola se sastoji od više odvojenih konzola (posmični zidovi, jezgre) koje (više ili manje) zajednički mogu djelovati koristeći krutost horizontalnih spojnih elemenata (ploče etaže, vezne grede, međukatne konstrukcije)



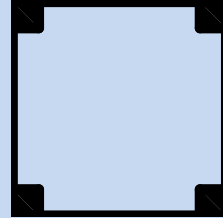
- Vertikalna konzola se sastoji od većeg broja stupova i/ili zidova koji su povezani u zajedničko spregnuto djelovanje kao pojasevi te konzole, sa posmičnim elementima poput spregova ili okvirnih greda



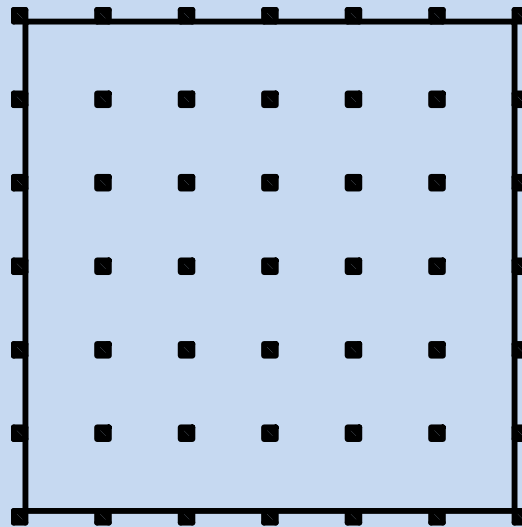
- Evidentno je da je tipični presjek visoke građevine prikazan na slici (a) sa stupovima smještenim po rubovima i unutar tlocrtnih kontura, nije jednako krut na savijanje kao i građevina kod koje su svi stupovi smješteni na vanjskom rubu kao što je prikazano na slici (b)
- takva učinkovitost na savijanje može se opisati preko parametra koji se naziva “Indeks krutosti na savijanje” (Bending Rigidity Index – BRI)



- Kako bi se mogla uspoređivati učinkovitost na savijanje za različite tlocrtne rasporede, najveći index BRI = 100 dodjeljen je za kvadratni oblik sa stupovima samo u kutevima kvadrata:



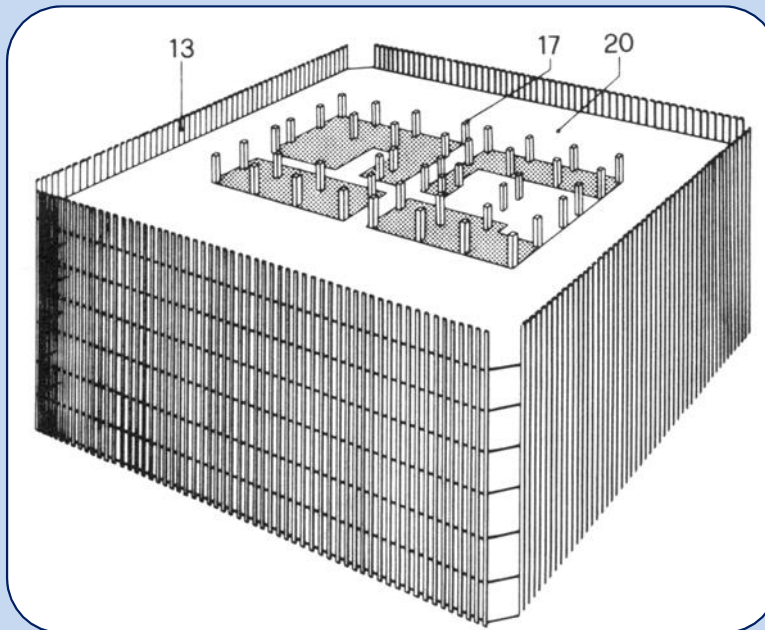
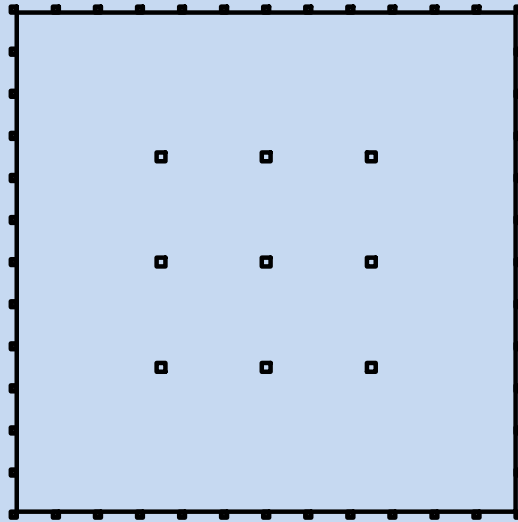
- BRI predstavlja ukupni moment inercije svih stupova u odnosu na središnju os
- Empire State Building se odupire horizontalnom opterećenju pomoću svih stupova – rubnih i unutrašnjih:



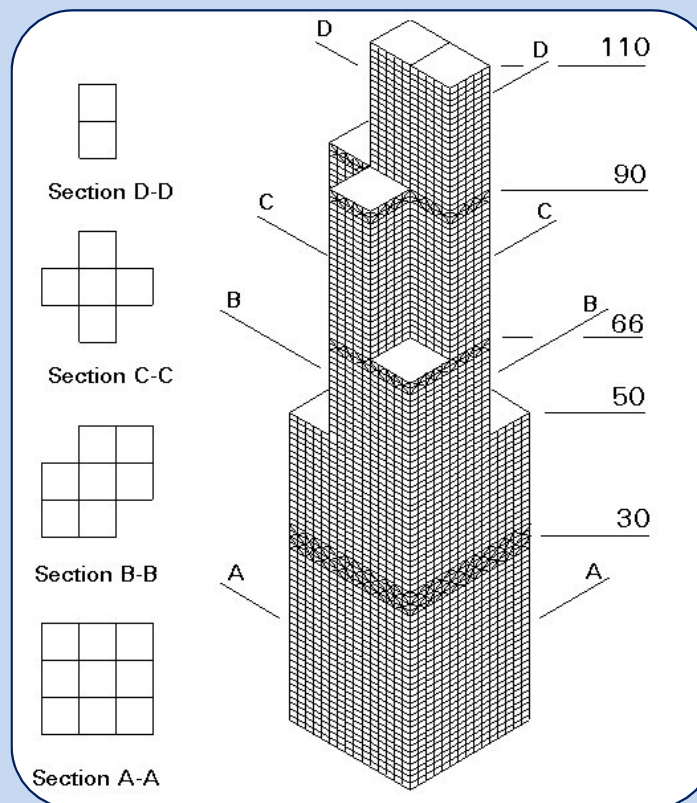
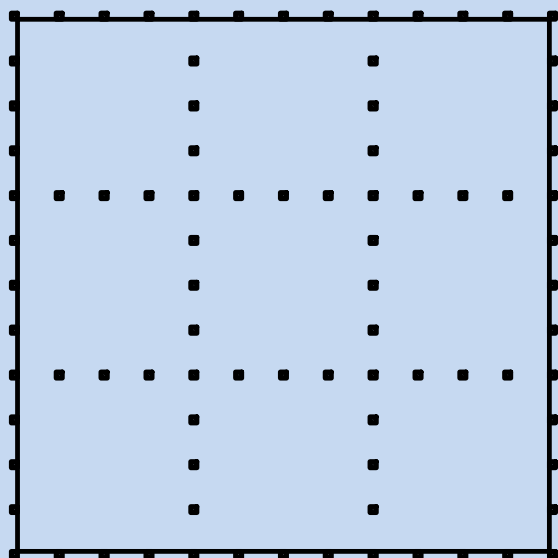
- BRI za ovakav tlocrt iznosi 33, što znači da je učinkovitost konstrukcije za savijanje samo 33%



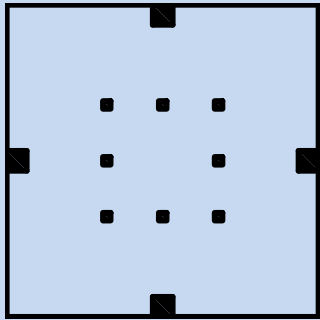
- moderne građevine imaju zgusnutiji raspored vanjskih (rubnih) stupova bez unutarnjih stupova do jezgre dizala formirajući tako “cijev” (“tube”)
- prve građevine koncipirane i izgrađene prema ovom načelu bili su neboderi World Trade Center



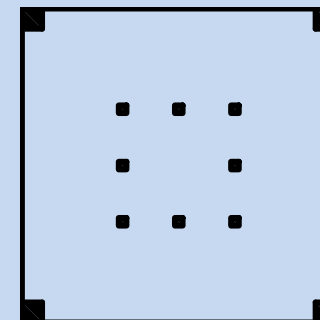
- Sears u Chicagu su sastavljeni od 9 cijevi



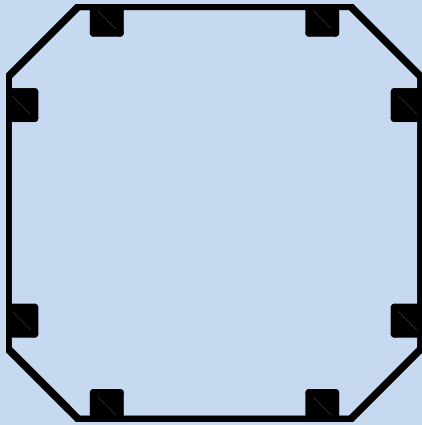
- Citicorp tower prikazan na slici nema stupove smještene u kuteve, tako da mu je BRI pao na 31%:



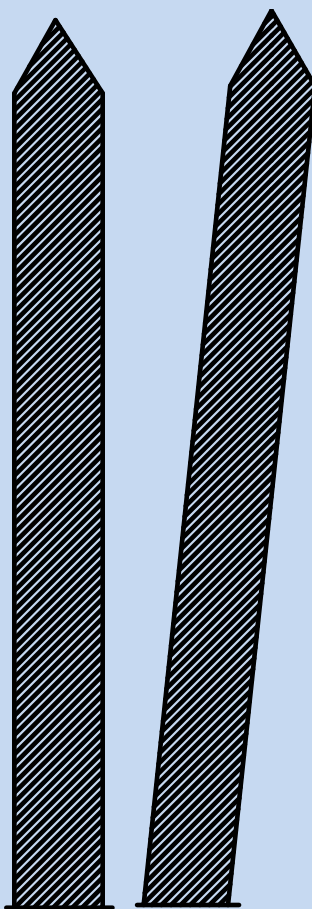
- Da su stupovi smješteni u kuteve BRI bi bio 56%:



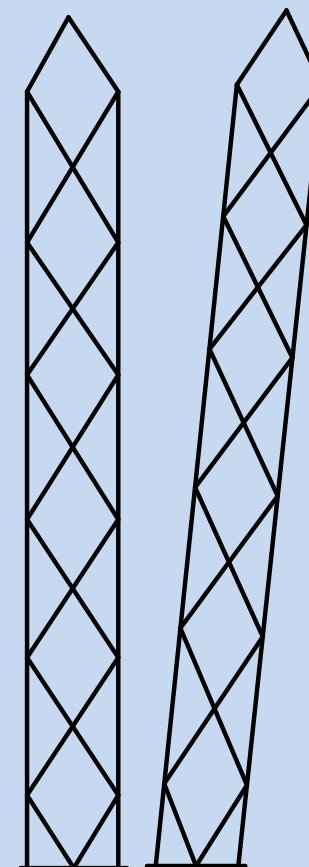
- Bank of South West Tower u Houstonu (neizgrađeni) ima $BRI = 63\%$:



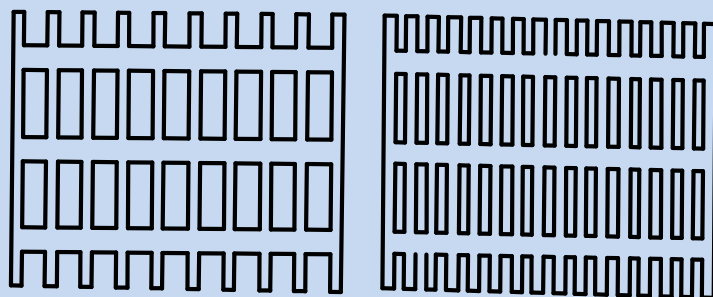
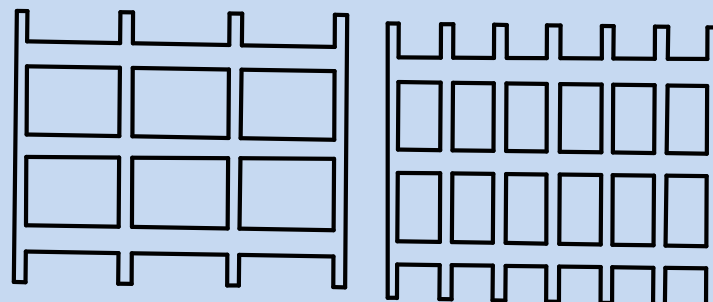
- stupovi visoke građevine moraju se ponašati kao dijelovi sustava za preuzimanje horizontalnih djelovanja, formirajući djelotvoran posmično kruti sustav, koji je predstavljen preko Indeksa posmične krutosti (Shear Rigidity Index – SRI)
- idealni SRI = 100 sastoji se samo od zidova, bez otvora



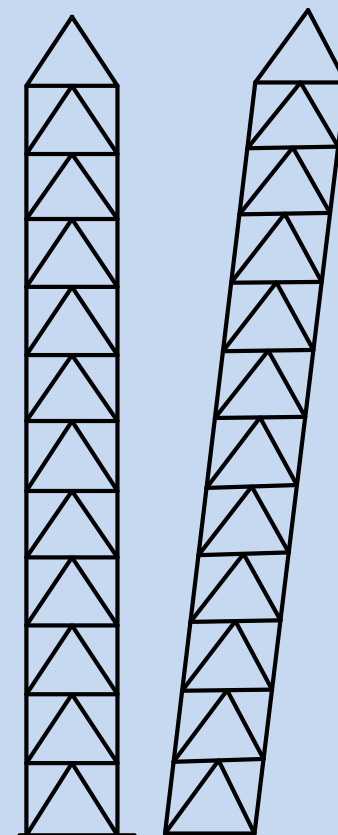
- sustav sa dijagonalama pod kutem od 45° ima SRI = 62.5



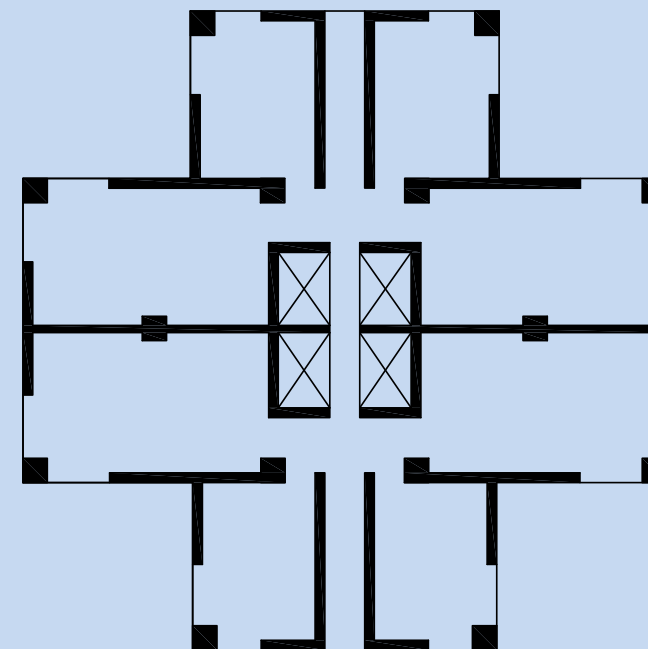
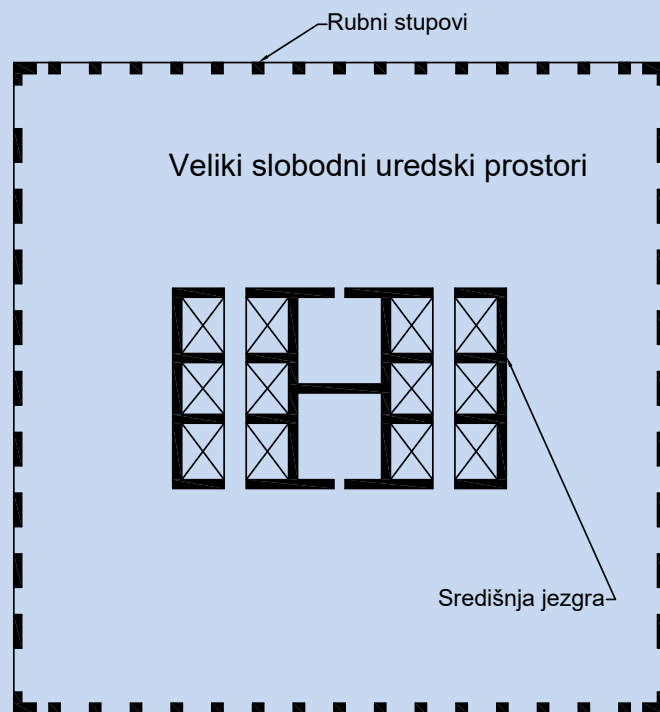
- spreg koji se uobičajeno koristi u praksi sastoji se od horizontalnih prečki i dijagonala i ima $SRI = 31.3$
- moderni posmični sustavi koji su sačinjeni od krutih okvira imaju veći SRI koji ovisi o odnosima raspona i visine (debljine) pojedinih elemenata



- kada su sve četiri strane građevine sastavljene od ovakvih okvira onda oni formiraju “cijevi”, a to je sustav koji je trenutno najnapredniji

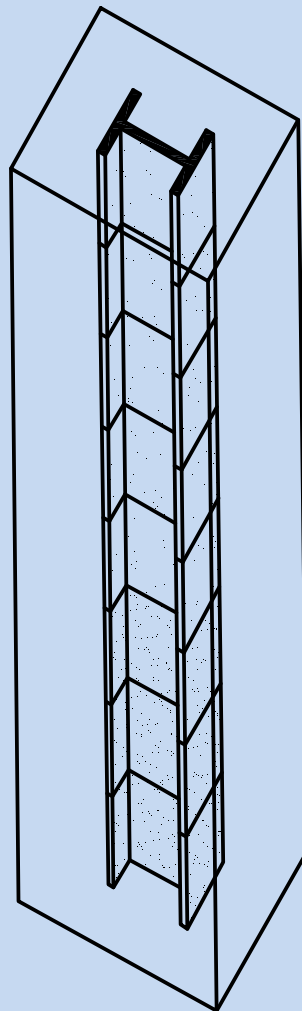


FUNKCIJA PROSTORA NASPRAM KONSTRUKCIJSKOM SUSTAVU

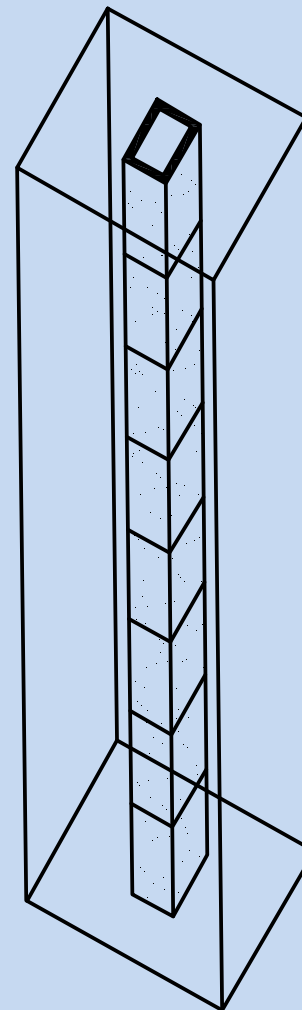


- uredski prostori trebaju biti veliki i otvoreni sa što je moguće više prostora sa pogledom prema van
- prostor treba biti podijeljen sa laganim pregradama
- glavni vertikalni elementi (stupovi) smješteni su po rubovima
- instalacije se vode horizontalno po katovima i smještene su u stropovima
- tipična visina kata za poslovne zgrade iznosi 3.5 m ili više
- visina 40-ero katne poslovne zgrade iznosi oko 140 m
- stambeni i hotelski prostori imaju jednoliku podjelu prostora po visini
- vertikalni elementi konstrukcije mogu biti skriveni unutar pregrada
- instalacije se vode vertikalno
- visoke stropne konstrukcije nisu potrebne, osim eventualno na hodnicima
- tipična visina kata za stambene i hotelske zgrade iznosi 2.7 m ili više
- visina 40-katne stambene zgrade iznosi oko 108 m ili 80% visine poslovne zgrade za isti broj katova

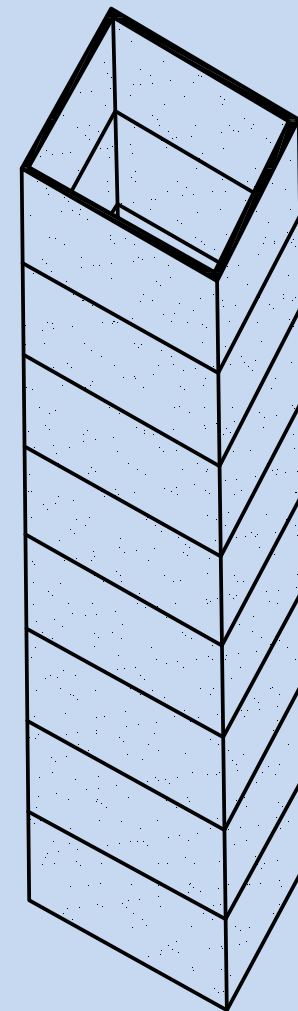
- Kruti okviri
- Okviri sa spregovima
- "Ispunjeni" okviri
- Posmični zidovi
- Okviri sa zidovima, povezani zidovi
- Cijevi, cijev u cijevi, povezane cijevi
- Outrigger sustavi
- Viseći sustavi
- Konstrukcije sa jezgrom
- Prostorne konstrukcije
- Mješane konstrukcije



Unutarnji posmični zidovi

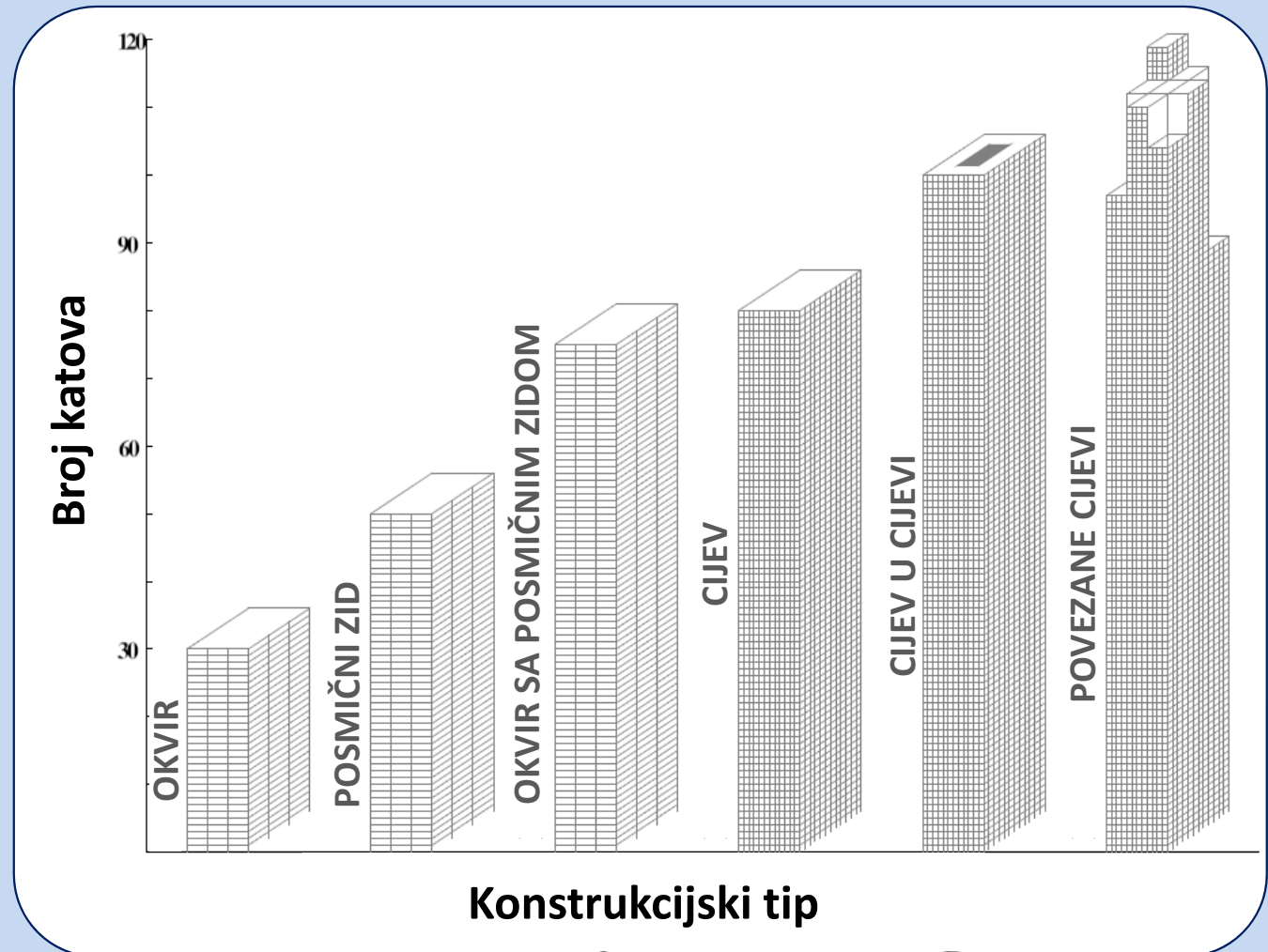


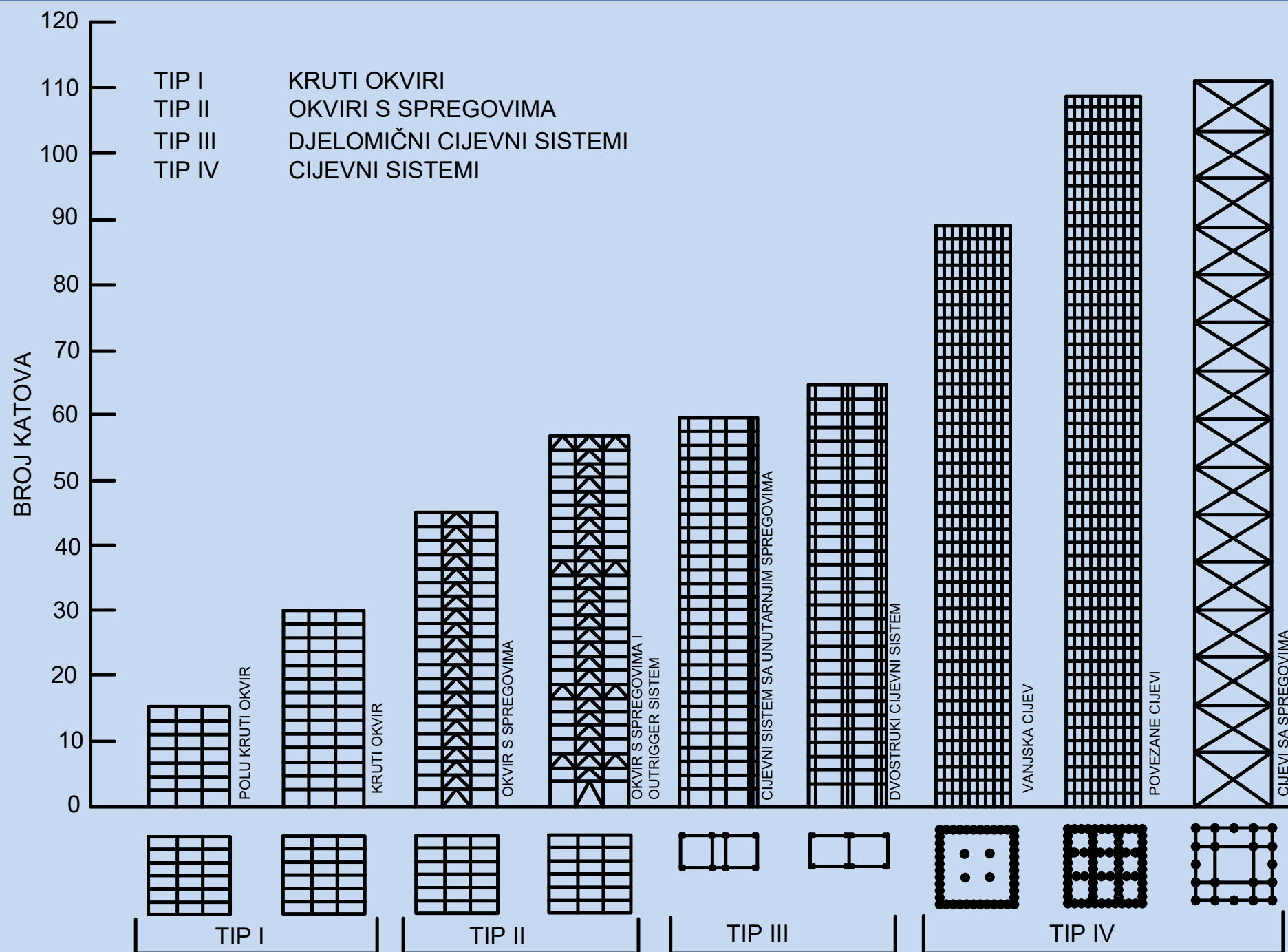
Središnja jezgra

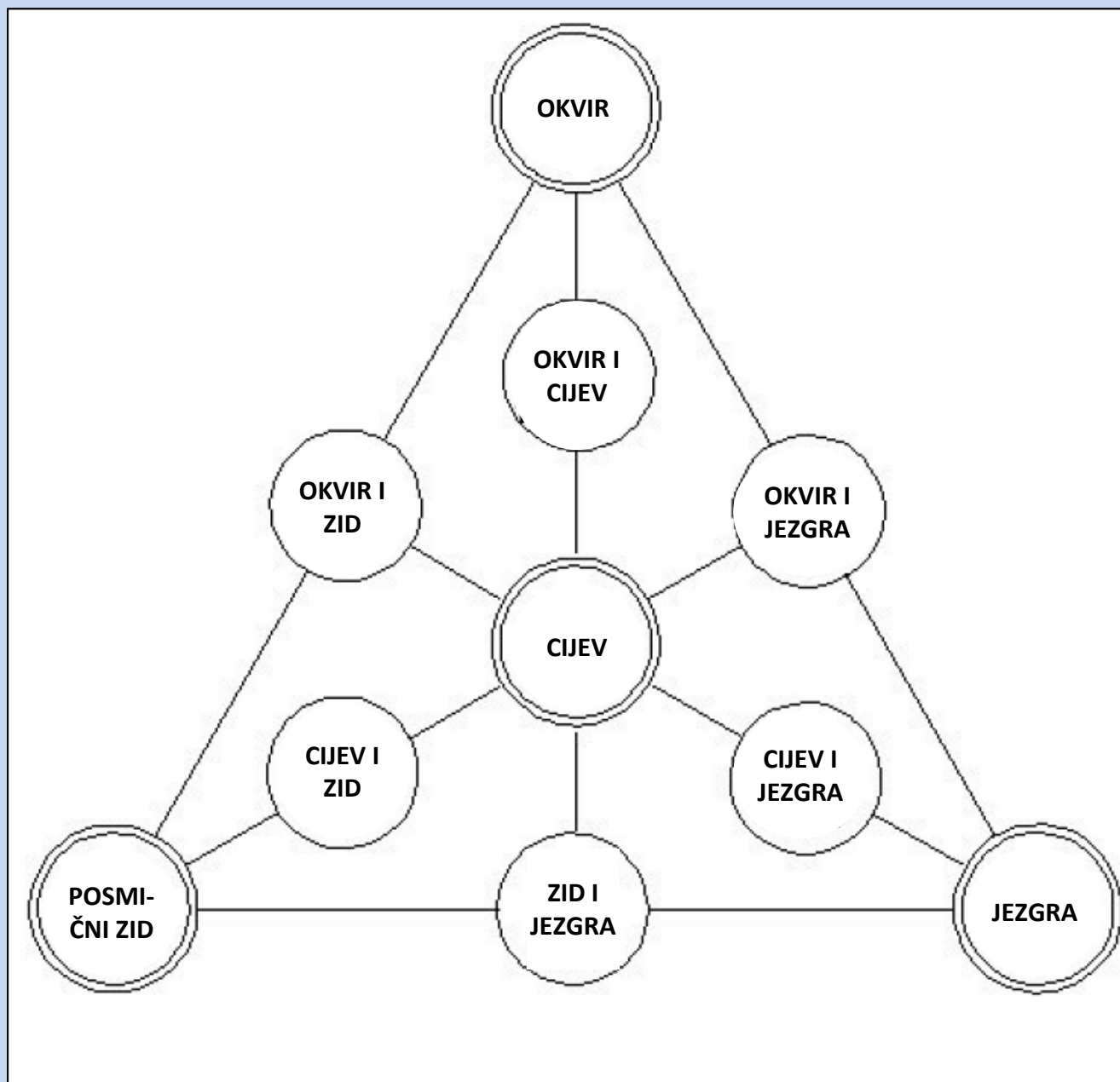


Cijev

- Kruti okviri
- Okviri sa spregovima
- "Ispunjeni" okviri
- Posmični zidovi
- Okviri sa zidovima, povezani zidovi
- Cijevi, cijev u cijevi, povezane cijevi
- Konzole sa spregovima
- Viseći sustavi
- Konstrukcije sa jezgrom
- Prostorne konstrukcije
- Mješane konstrukcije







- Općenito svi ovi tipovi mogu biti izvedeni i od betona i od čelika
- Ipak, neki su primjereniji i karakteristični za pojedine materijale

Karakteristični čelični konstrukcijski tipovi

- Okviri sa spregovima
- Cijevi
- Outrigger sustavi
- Viseći sustavi
- Prostorne konstrukcije

Karakteristični armirano-betonski konstrukcijski tipovi

- Kruti okviri
- Ispunjeni okviri
- Posmični zidovi
- Povezani zidovi
- Konstrukcije sa jezgrom

- Pojedini od ovih sustava su najekonomičniji kada se koriste kombinacije čelika i armiranog betona (npr. konstrukcije s jezgrom)

Čelični sustavi:

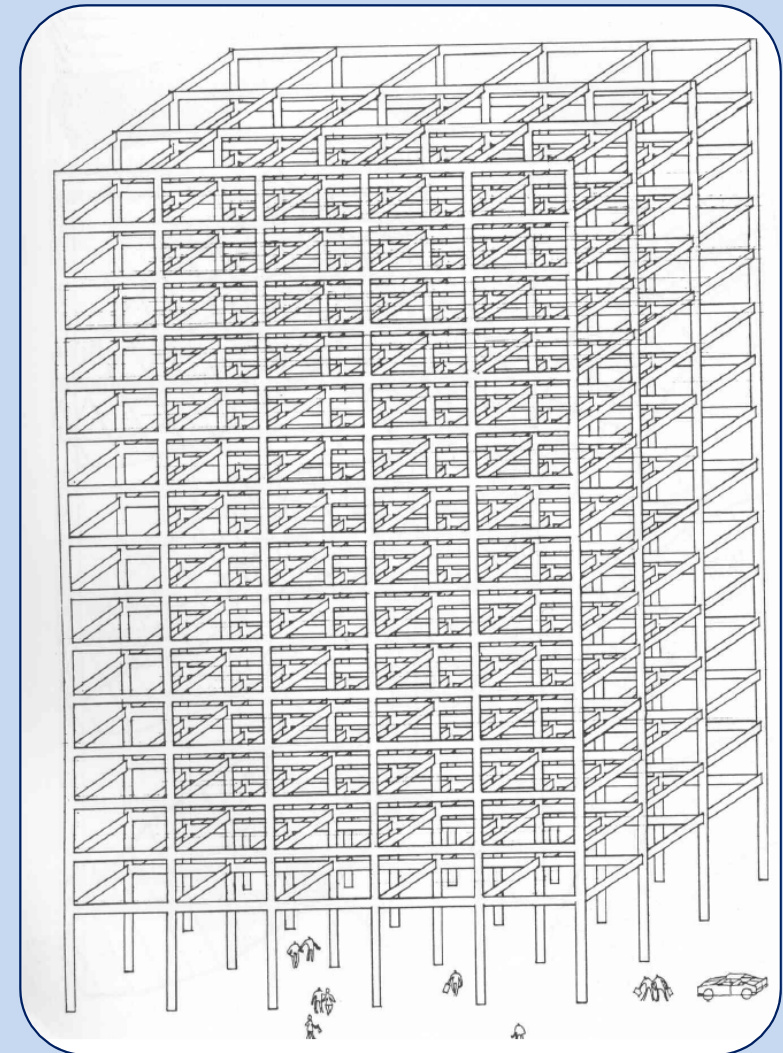
- **Pojavio se kao prvi materijal za izvedbu visokih zgrada – dominira u upotrebi u prvoj polovici 20.st.**
- **Odigrao je značajnu pionirsku ulogu pri pojavi i razvoju pojedinih od ovih konstrukcijskih sustava**
- **Zbog najboljeg odnosa čvrstoće i težine, čelik je materijal rezerviran za najviše građevine**
- **Omogućuje veće raspone, predgotovljenost elemenata i bržu izvedbu**
- **Jedini materijal za izvedbu visećih sustava i sustava prostornih rešetki**
- **Nedostaci su mu potrebna protupožarna i antikorozivna zaštita, potreba za skupim fasadnim oblogama, i potreba za spregovima ili skupim i složenim momentnim spojevima okvira**

Armirano-betonski sustavi:

- Beton se je počeo koristiti dva desetljeća nakon čelika u izvedbi visokih zgrada
- Primarno su AB sustavi imitirali do tada poznate sustave iz čelika bazirane na elementima stupa i grede
- Nakon 1940.g. je beton postao primarni materijal za ravne ploče i krute okvire
- Veliki iskorak u korištenju AB su bili sustavi posmičnih zidova koji tada omogućuju savladavanja granice od 25 katova koja je vrijedila za okvirne AB sustave (naslijeđene od čelika)
- Danas, uz ove konstrukcijske sustave i betone visokih čvrstoća, dosegnuta je visina AB zgrada od 100 katova

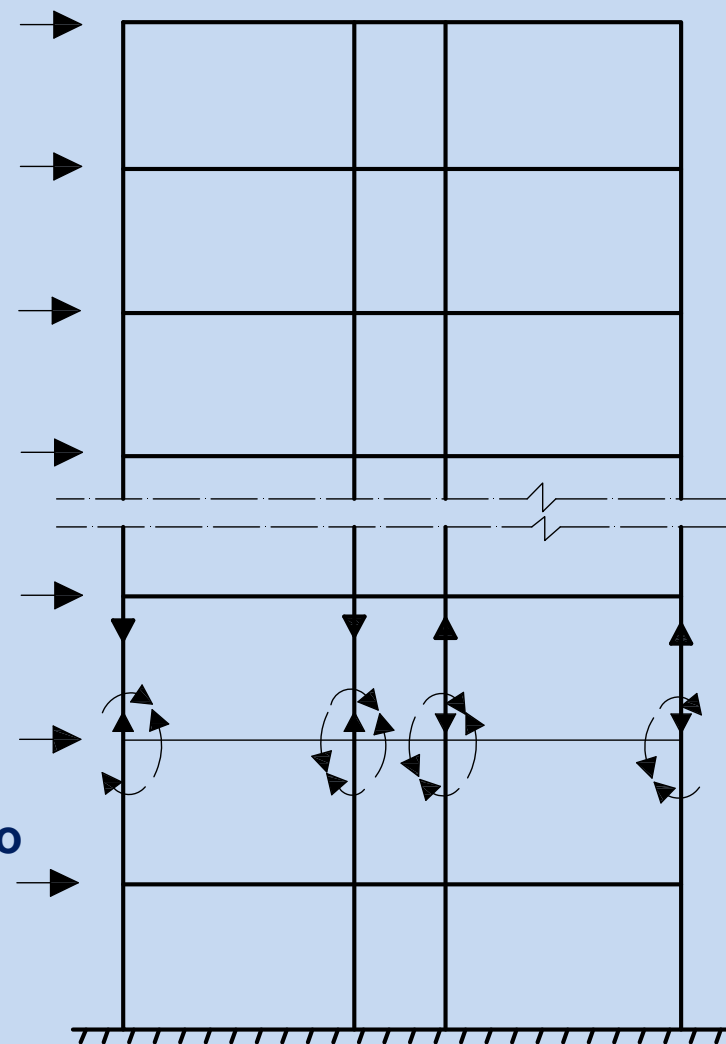
KRUTI OKVIRI (FRAME)

- kruti okvir bio je izvanredan napredak u konstrukterskom promišljanju, rođen 1885. uporabom čelika i postao je najvažniji proizvod “druge generacije” konstrukcija
- problem koji se javlja, kod tih sad već tradicionalnih konstrukcijskih sustava, je “gužva” koja se stvara posebno u području jezgre, gdje dizala, stubišta i instalacije onemogućuju ekonomično i estetsko korištenje prostora



KRUTI OKVIRI (FRAME)

- kruti okviri su sustavi sačinjeni od greda i stupova povezanih krutim vezama
- horizontalna krutost ovisi o krutosti stupova, greda i njihovih međusobnih veza
- bitna prednost krutih okvira su veliki otvori koji ostavljaju mogućnost slobodnog planiranja prozora i vrata
- kruti okviri se uobičajeno koriste za raspone od 6 – 9 m
- kada se koriste kao jedini sustav za preuzimanje horizontalnih djelovanja, ekonomični su za zgrade do 25 katova
- iznad te visine postaju prefleksibilni, a povećanje izmjera elemenata nije ekonomično rješenje
- kruti okviri idealni su za AB konstrukcije zbog inherentne (svojstvene) krutosti spojeva
- kod čeličnih okvira kruti spojevi (otporni na savijanje) povećavaju cijenu
- izmjere stupova i greda na bilo kojoj razini direktno ovise o veličini posmičnog (horizontalnog) opterećenja tako da se povećavaju prema dnu
- stropne konstrukcije sukladno nisu jednake na svim etažama kao kod okvira sa spregovima, nego im se visina povećava prema dolje zbog potrebnih većih greda, tako da visina katova varira



KRUTI OKVIRI (FRAME)

- Tipičan AB okvir za 12-katni luksuzni hotel na Markovom otoku (Florida) :



KRUTI OKVIRI (FRAME)

Home Insurance Building

- prva zgrada na svijetu sa sustavom krutih čeličnih okvira
- postaje prva zgrada “druge generacije” konstrukcija
- sagrađena u Chicagu (1885)
- Chicago je bila prirodna sredina za ovaj iskorak jer je u to doba bio središte američke željezničke mreže (željeznica znači čelik – iako je ova zgrada sagrađena od kovanog željeza)
- fasade su i dalje davale izgled masivne građevine, što je bilo uobičajeno za to doba
- projektanti još uvijek nisu u potpunosti razumjeli uporabu novog materijala – čelika



KRUTI OKVIRI (FRAME)

- Usporedba: Home Insurance Building (1885) desno i “prava” masivna zgrada Manadock Building (1891) lijevo



KRUTI OKVIRI (FRAME)

Woolworth Building (New York)

- dovršena 1913.g., 60 katova
- za nju je izmišljen naziv “neboder” (skyscraper)
- statički sustav su kruti čelični okviri koji se oslanjaju na unutrašnje masivne zidove, koji pružaju bočnu otpornost na horizontalne sile od vjetrova



KRUTI OKVIRI (FRAME)

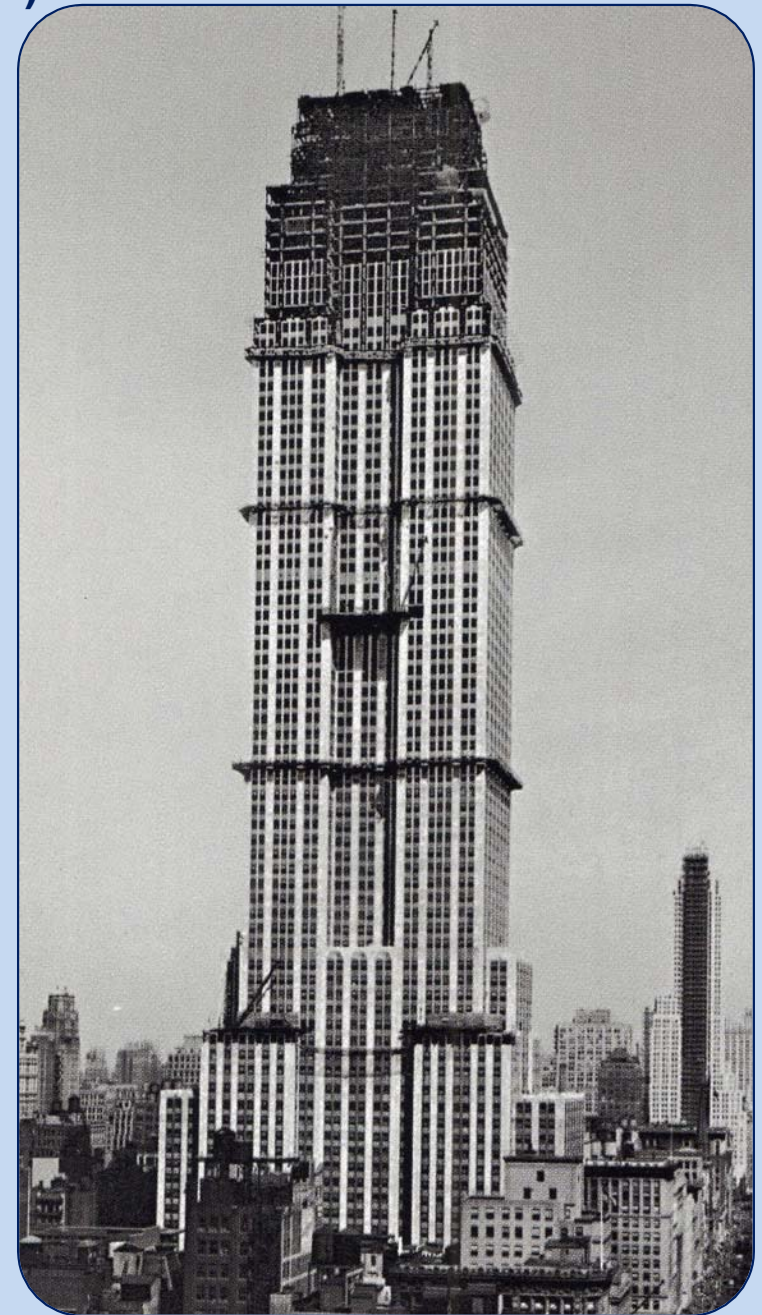
Woolworth Building (New York)



KRUTI OKVIRI (FRAME)

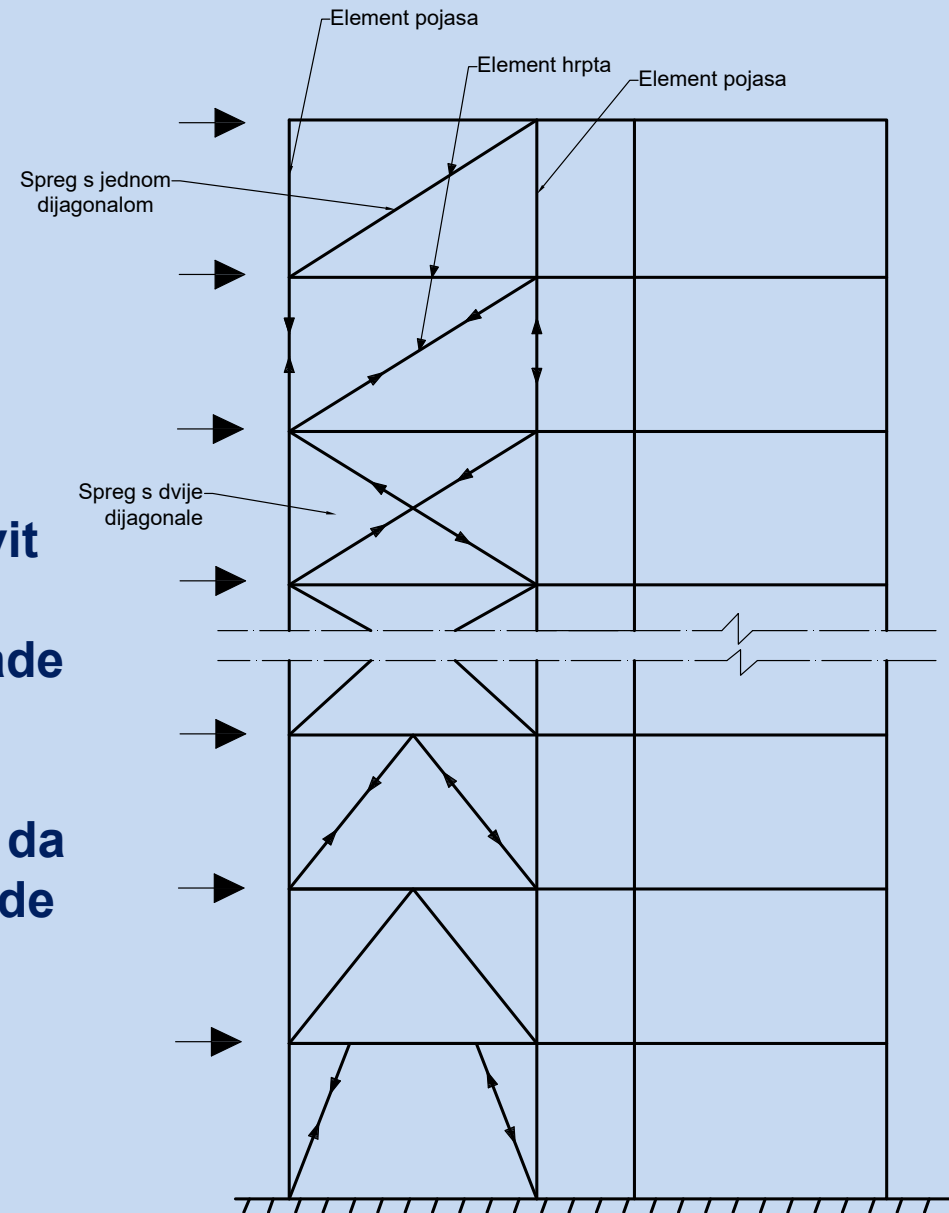
Empire State Building (New York)

- Empire State je također kruti okvir
- sagrađena je 1931. godine , dva tjedna prije početka velike depresije i postaje najviša zgrada na svijetu
- osnovni konstrukcijski sustav je čelični okvir ubetoniran u beton sa dodatkom zgure
- 70 000 tona čelične konstrukcije montirano je u samo 23 tjedna
- težina konstrukcije bila je 210 kg/m^2 naspram svega 53 kg/m^2 koliko je bilo potrebno za WTC



OKVIRI S SPREGOVIMA (BRACED FRAME)

- kod okvira sa spregovima otpornost na horizontalna djelovanja ostvarena je preko “hrptova” koje čine dijagonale spojene na grede
- tako se formiraju vertikalne rešetke, gdje stupovi djeluju kao pojasevi
- horizontalnom posmiku odupiru se komponente elemenata sprega
- ovaj sustav je izuzetno ekonomičan i učinkovit za preuzimanje horizontalnih sila neovisno o visini zgrade, pa je prikladan i za najviše zgrade
- još jedna prednost ovakvih trokutastih spregova je da grede sudjeluju vrlo malo u preuzimanju horizontalnog opterećenja, tako da stropna konstrukcija nije ovisna o visini zgrade
- dijagonalni spregovi ometaju unutarnje planiranje prostora (vrata, prozori)
- zato su uobičajeno smješteni oko dizala, stubišta i servisnih okana
- relativno skupi za izvedbu



OKVIRI S SPREGOVIMA



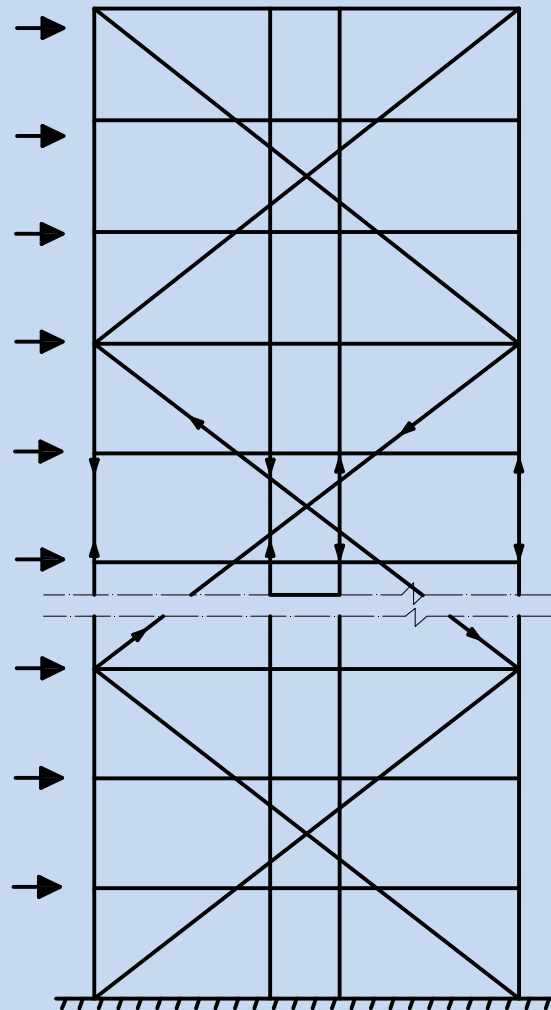
OKVIRI S SPREGOVIMA

- čelični okvir sa spregovima, zgrada na donjem Manhattanu:



OKVIRI S SPREGOVIMA

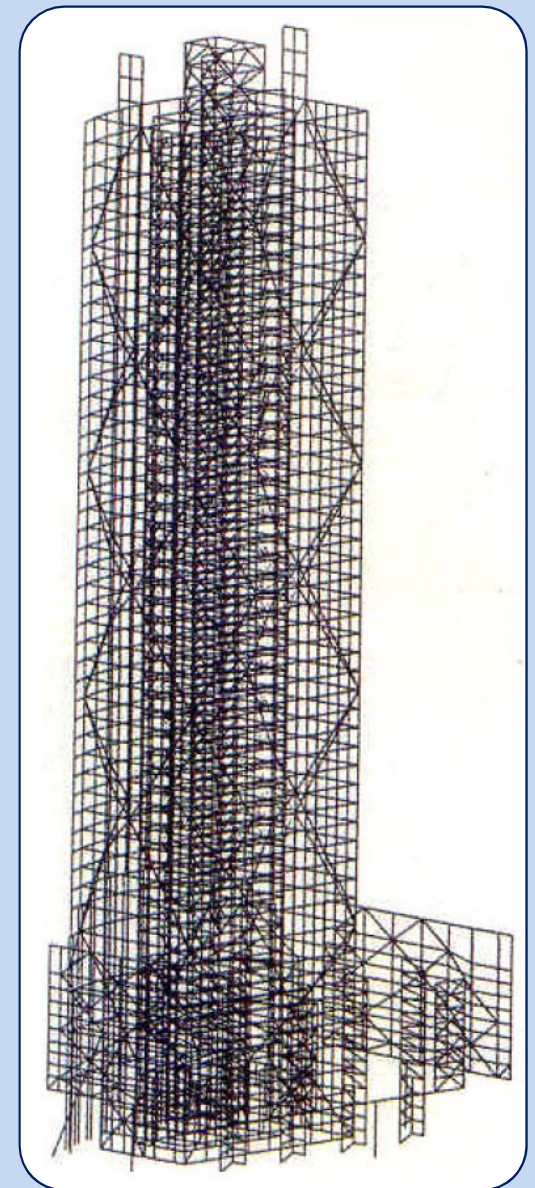
- u prošlosti su dijagonale bile raspoređene po katovima
- danas su sve češći sustavi sa dijagonalama koje se protežu preko više katova i više raspona („mega” spregovi ili „super” spregovi)
- jedan primjer je zgrada Torre Mayor u Mexicu (slijedeći slide)



OKVIRI S SPREGOVIMA

Torre Mayor (Mexico City)

- zgrada sa 57 katova visine 225 m
- najviša zgrada u Južnoj Americi
- sagrađena je 2004., cijena 250 milijuna USD
- nema spregova unutar dvije središnje linije, osim na tri mjesta, gdje skup dijagonala dijamantnog oblika povezuje super-X sustave
- prigušivači su postavljeni na južnoj i sjevernoj fasadi na mjestima tih dijamantnih spregova
- tako se povećava prigušenje konstrukcijskog sustava stvarajući “prigušene veze” (damped link) između super-X sustava



OKVIRI S SPREGOVIMA

Torre Mayor (Mexico City)

- super-X spregovi posebno su učinkoviti za otpornost na potresno djelovanje
- poprečni spregovi formiraju Super-X sustav na istočnoj i zapadnoj fasadi gdje X sustav obuhvaća cijelu širinu tornja zgrade
- na južnoj i sjevernoj fasadi nalaze se po dva skupa super-X sustava



OKVIRI S SPREGOVIMA

Torre Mayor (Mexico City)

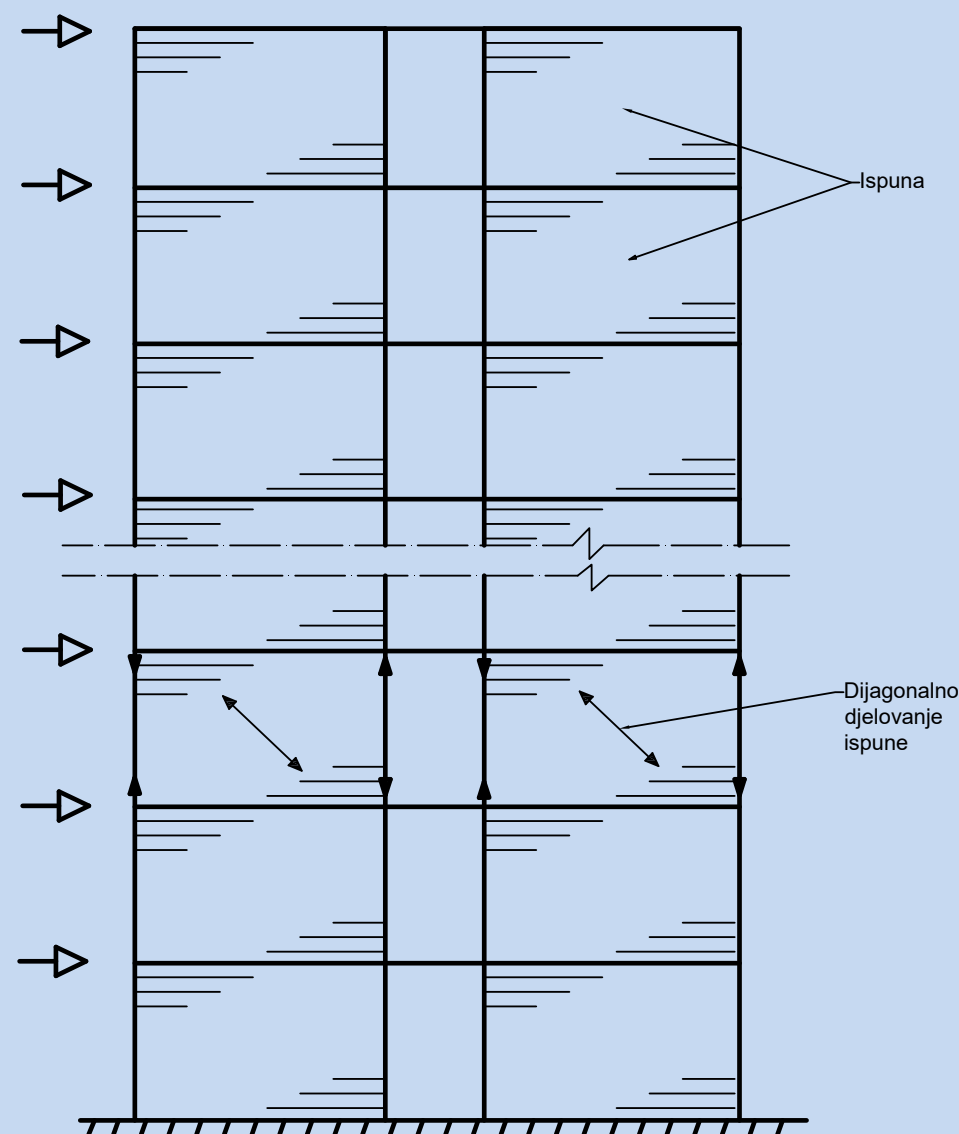


- detalji super-X spregova na Torre Mayor
- dodatni prigušivači smanjuju međukatni pomak (sway interstory drift)
- ukupni pomak zgrade smanjen za 60 cm



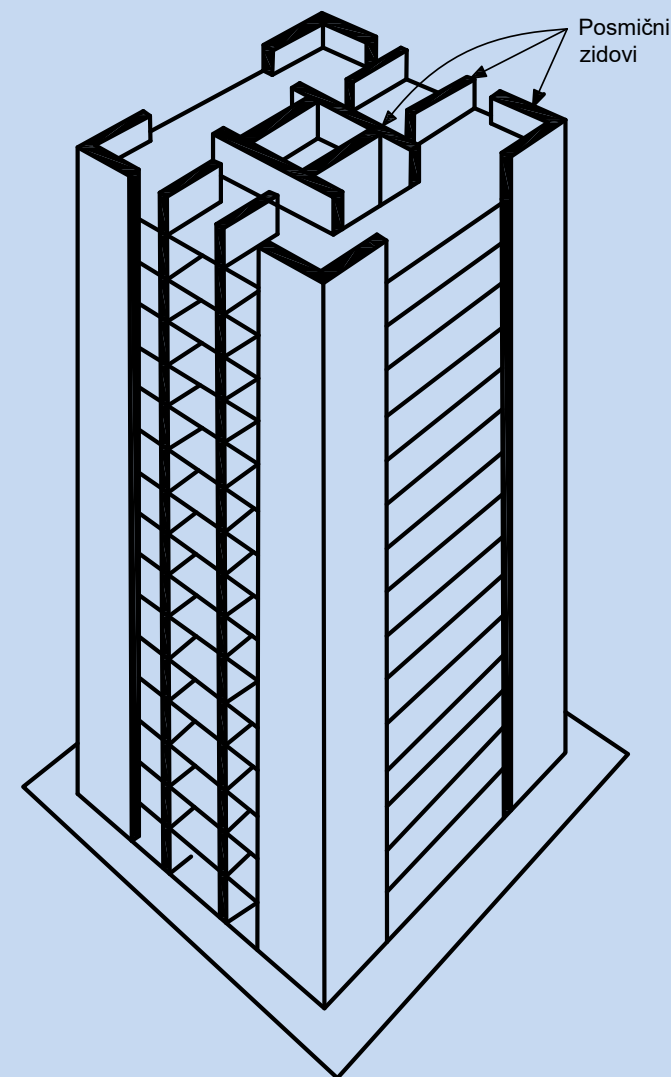
OKVIRI S ISPUNOM

- statički sustav okvira s ispunom često se koristi u Europi za zgrade visoke do 30 katova
- osnovni armirano-betonski okvir, koji čine stupovi i grede, ispunjava se zidovima (panelima) od opeke ili betona izvedenog na licu mjesta
- za horizontalne napadne sile ispuna djeluje kao tlačna dijagonala i tako ukružuje okvir
- okvir s ispunom nije lako proračunati zbog nejasnog toka preuzimanja bočnih horizontalnih djelovanja i zbog često nedovoljno poznatih karakteristika materijala ispune
- osim toga, često se događa da budući stanari uklone neke zidove, čime se otpornost okvira nepredvidivo slabi



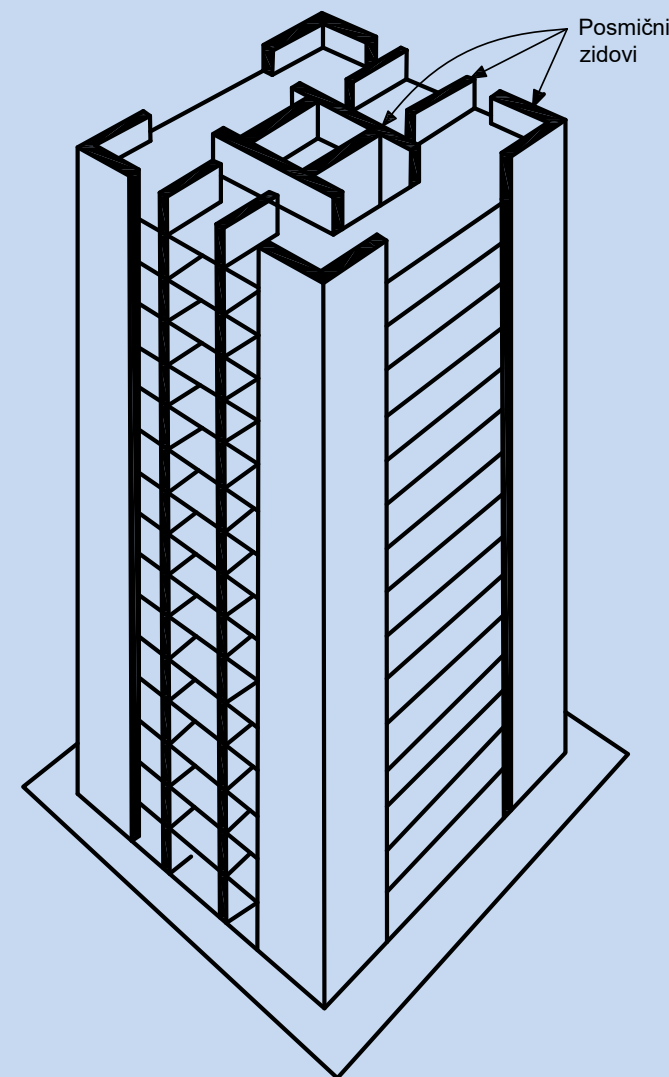
POSMIČNI ZIDOVI

- posmični zidovi od armiranog betona mogu poslužiti kao arhitektonske i konstrukcijske pregrade, koje preuzimaju vertikalna i bočna djelovanja
- njihova vrlo velika ravninska krutost i čvrstoća čine ih idealnim elementima za stabilizaciju visokih zgrada
- kod zgrade s posmičnim zidovima, ti zidovi daju osnovnu otpornost na bočna djelovanja
- posmični zidovi djeluju kao vertikalne konzole
 - kao pojedinačni zidovi u ravnini (membrane)
 - kao prostorni povezani sklopovi, obično oko liftova, stepenica i servisnih okana



POSMIČNI ZIDOVI

- posmični zidovi su krući od krutih okvira i ekonomični do visine od oko 35 katova
- ograničenja u planiranju posmičnih zidova čine ih pogodnim samo za hotele i zgrade za stanovanje
- stropne konstrukcije se ponavljaju, a kontinuirani vertikalni zidovi služe istovremeno za zvučnu izolaciju i zaštitu od požara između pojedinih prostora
- kad se posmični zidovi primjenjuju u kombinaciji s okvirima, oni praktično preuzimaju sva horizontalna djelovanja, tako da se okviri dimenzioniraju većinom na vertikalna djelovanja
- raspored posmičnih zidova mora se planirati tako da su vlačna naprezanja od horizontalnih djelovanja manja od tlačnih naprezanja od vertikalnih djelovanja
- posmični zidovi se dobro ponašaju za potresna djelovanja, zbog njihove velike duktilnosti



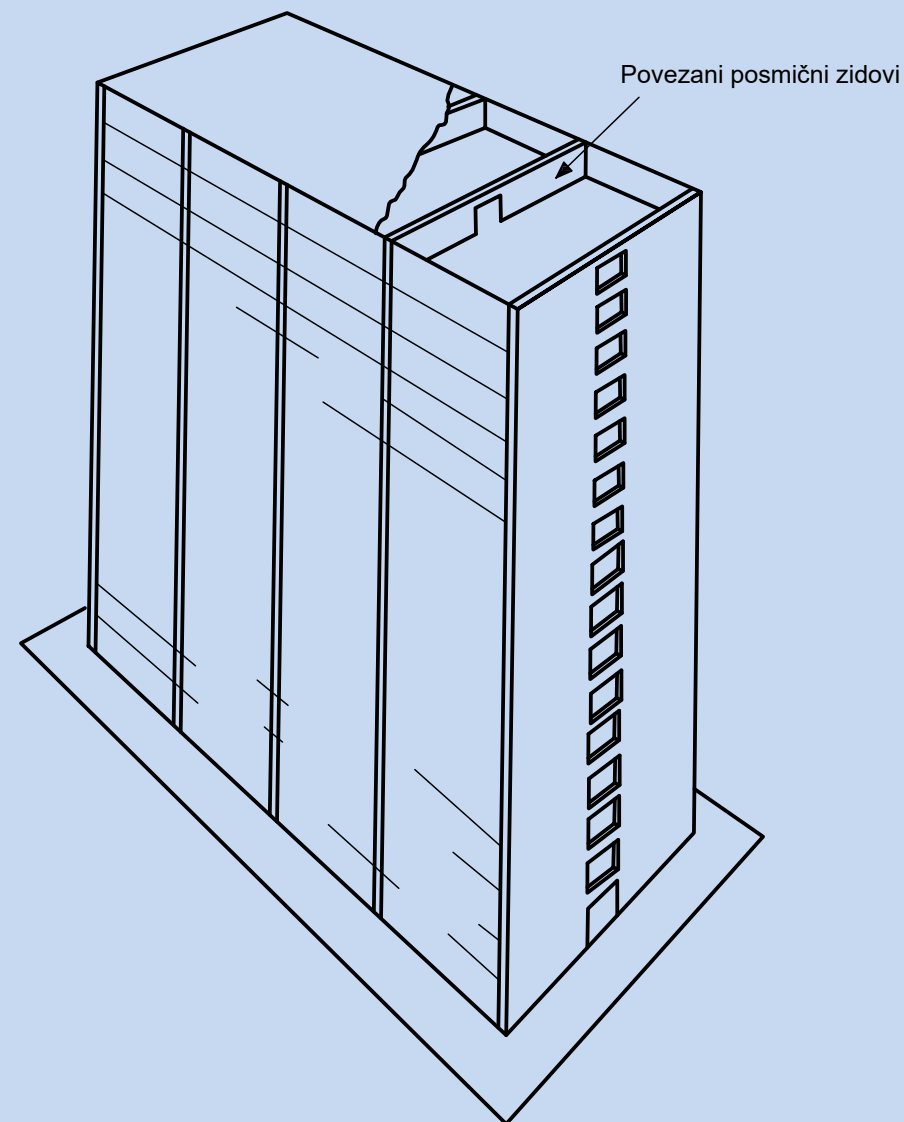
POSMIČNI ZIDOVI

- **tipični „kondominij” (velika stambena zgrada) u Miami-u, koju čine jaki stupovi po obodu i unutrašnji posmični zidovi, horizontalno međusobno povezani prednapetim nosivim pločama**



POVEZANI ZIDOVI (COUPLED WALLS)

- konstrukcijski sklopovi s povezanim zidovima su uobičajeni statički sustavi od posmičnih zidova, sa dva ili više zidova u istoj ravnini povezana na razinama stropova gredama ili krutim pločama
- time se ostvaruje spregnuto djelovanje skupa zidova oko zajedničke težišne osi
- horizontalna krutost je naravno neusporedivo veća od krutosti zbroja nepovezanih zidova, koji djeluju pojedinačno
- povezani zidovi se uobičajeno koriste kod stambenih zgrada od armiranog betona
- u pojedinačnim slučajevima i kod čeličnih okvira primjenjene su jake čelične ploče na mjestima najvećih posmičnih sila, kao npr. kod podnožja okana za dizala



POVEZANI ZIDOVI (COUPLED WALLS)

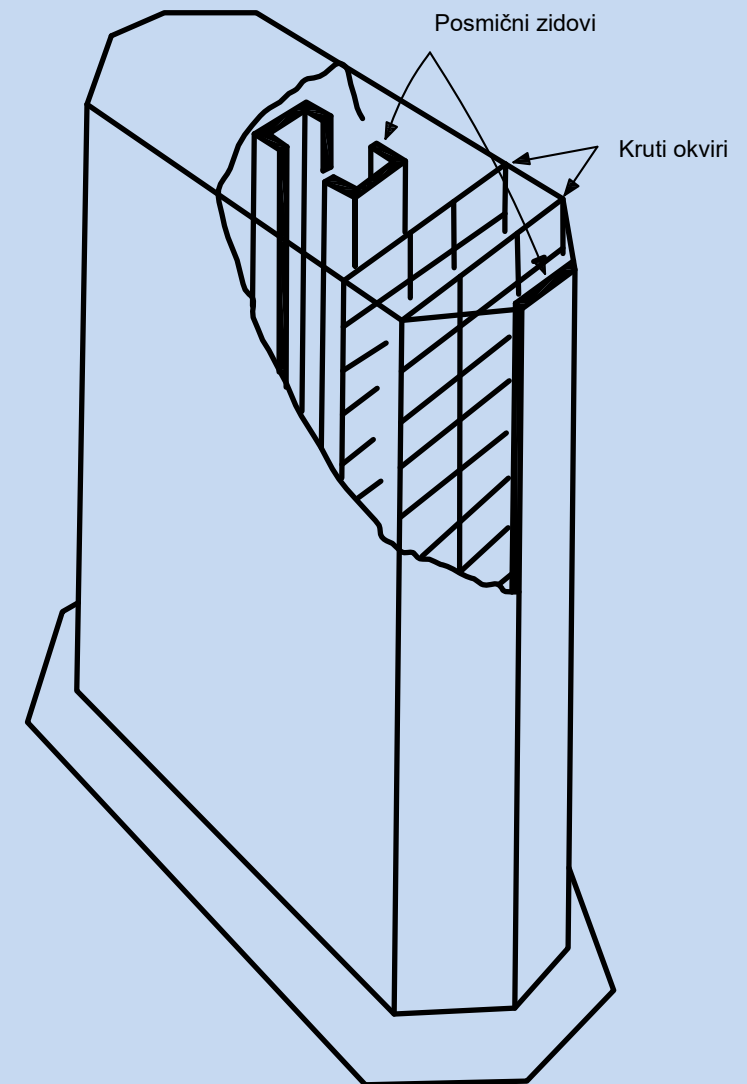
Espiritu Sancto neboder (Miami)

- dovršena 2003.
- projekt: Kohn Pederson Fox Associates
- dramatična prednja fasada je geometrijski rezultat presjeka valjkaste plohe, nagnute ravnine i valjka
- zgrada (toranj) sadrži hotel na donjim etažama, urede na srednjim etažama i stanove na vrhu



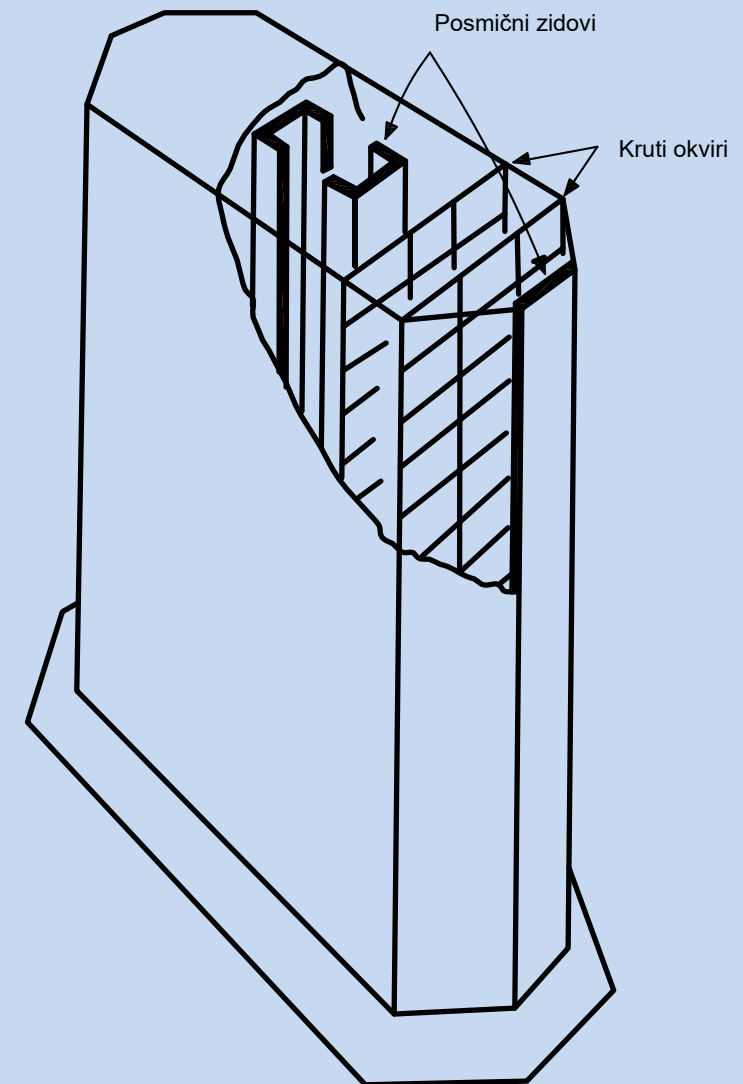
KONSTRUKCIJA OD ZIDOVA I OKVIRA (WALL FRAME)

- ako se otpornost konstrukcije postiže zajedničkim djelovanjem posmičnih zidova i okvira (wall-frame structure)
- konstrukcija zauzima zajednički deformirani oblik za oba konstrukcijska sustava, što se postiže horizontalnom krutosti greda i katnih ploča
- samostalni zidovi se deformiraju prema momentu savijanja (savojna deformacija), a samostalni okviri prema poprečnoj sili (posmična deformacija)
- zidovi i okvir horizontalno međusobno djeluju, poglavito na vrhu zgrade, čime se dobiva krući i jači konstrukcijski sklop
- zajednička deformacija povezanih zidova i okvira je povoljnija nego kod samostalnih sustava
- tim dvojnim sustavom ekonomičnost se diže do razine od 65 katova, daleko više nego za pojedinačno djelovanje bilo krutih okvira bilo posmičnih zidova



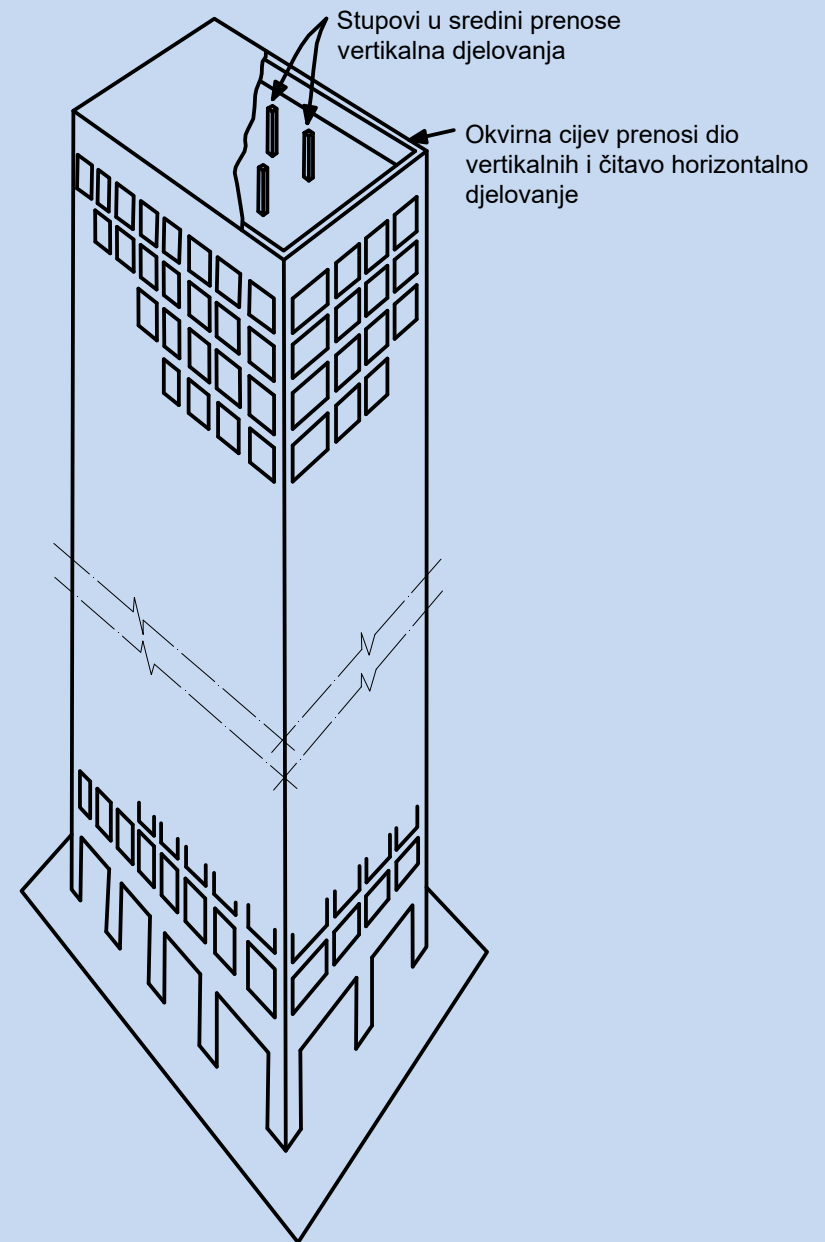
KONSTRUKCIJA OD ZIDOVA I OKVIRA (WALL FRAME)

- uz pažljivo podešavanje, posmik u okviru može biti približno nepromjenjiv po cijeloj visini građevine, što omogućuje izvedbu jednakih katnih (stropnih) konstrukcija – ponavljanje
- većina ovakvih sklopova je od armiranog betona
- kod čeličnih zgrada slično djelovanje (horizontalna interakcija) može se ostvariti ugradbom vertikalnih spregova
- čelični okviri sa spregovima pri savijanju pokazuju ponašanje s posmičnim odgovorom slično kao i kruti okvir pa se mogu jednako efikasno koristiti u konstrukcijama sa zidovima



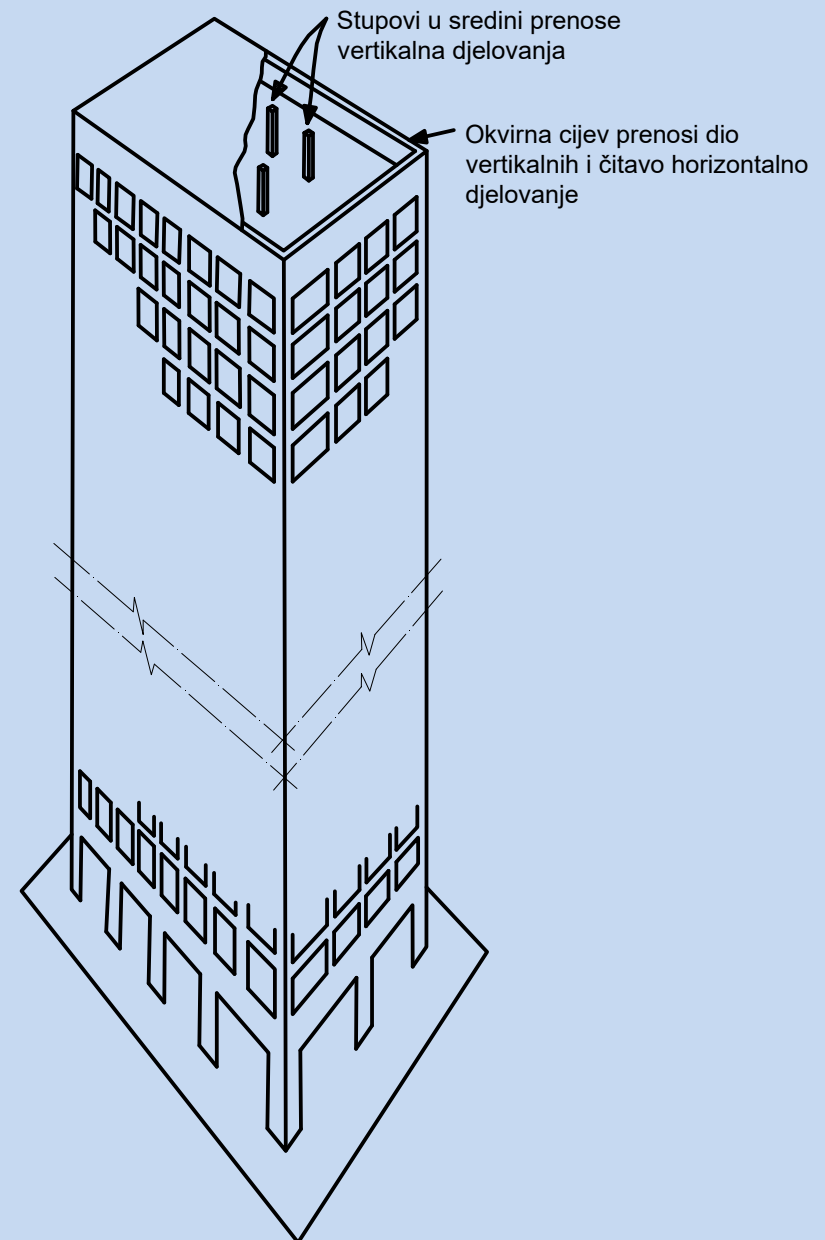
OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

- okvirne cijevne konstrukcije tvore četiri vrlo kruta okvira, otporna na savijanje, koji oblikuju „cijev“ („tube“) oko oboda zgrade
- okviri se sastoje od stupova na malom razmaku (tipično 2-4m), međusobno povezanih visokim horizontalnim gredama
- na razini ulice mali razmaci stupova moraju se prekinuti, a za prijenos sila koriste se jake prijelazne (transfer) grede
- vanjska cijev preuzima 100% horizontalnih djelovanja i 75-90% vertikalnih djelovanja
- preostala vertikalna djelovanja preuzimaju stupovi (ili posmični zidovi) jezgre
- za horizontalna opterećenja obodni okviri u smjeru opterećenja djeluju kao hrptovi masivne konzolne cijevi
- preostala dva okvira okomita na smjer opterećenja djeluju kao pojasevi štapa konzole



OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

- najčešća tlocrtna konfiguracija je kvadratna (WTC i Sears) ali su također moguće i kružne (Petronas) i trokutne
- ova konstrukcijska forma prikladna je i za čelik i za armirani beton za visine od 45 do 110 katova
- vrlo ponavljajuća struktura omogućuje ekonomičnu prefabrikaciju
- ova konstrukcijska forma predstavlja najznačajniji moderni iskorak kod visokih zgrada
- poboljšanja su potrebna, jer pojasevi trpe od posmičnih deformacija (shear lag)
- te posmične deformacije uzrokuju da su stupovi u sredini manje opterećeni od kutnih pojasnih stupova
- stoga srednji stupovi ne doprinose u potpunosti krutosti pojaseva

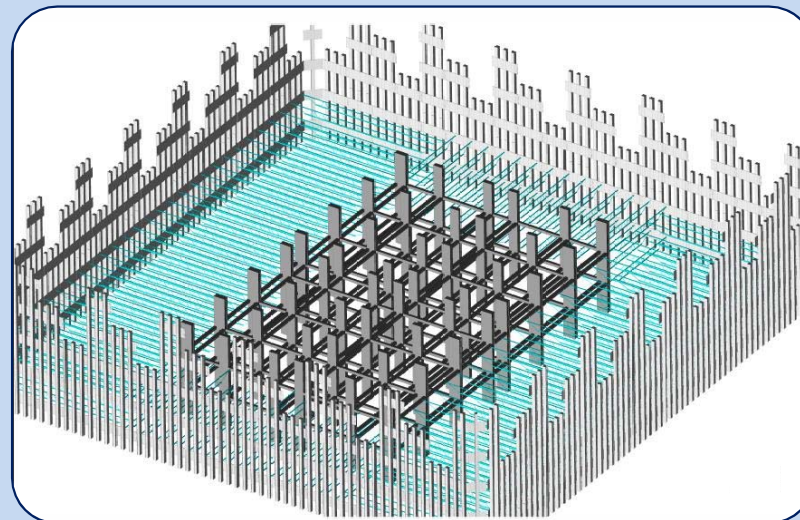


OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

World Trade Center (New York)



- južni toranj dovršen je 23.12.1970, a sjeverni toranj 1972
- to su bile prve okvirne cijevi, koje su dostigle visinu od 110 katova
- cijev je sačinjena od vertikalnih čeličnih stupova 356x356 mm, na osnom razmaku od 102 cm
- vertikalni stupovi povezani su horizontalnim gredama na razini svakog kata
- izgradnja WTC-a inicirala je novu generaciju konstrukcijskih sustava visokih građevina



OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

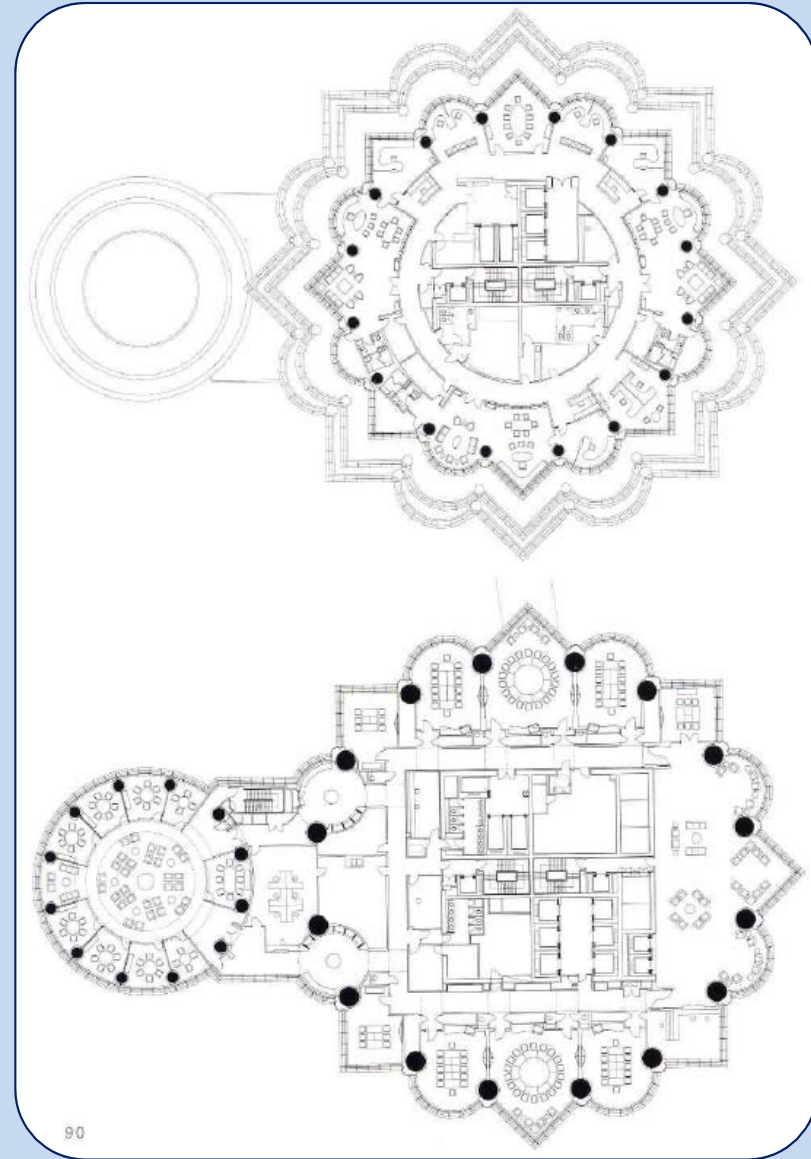
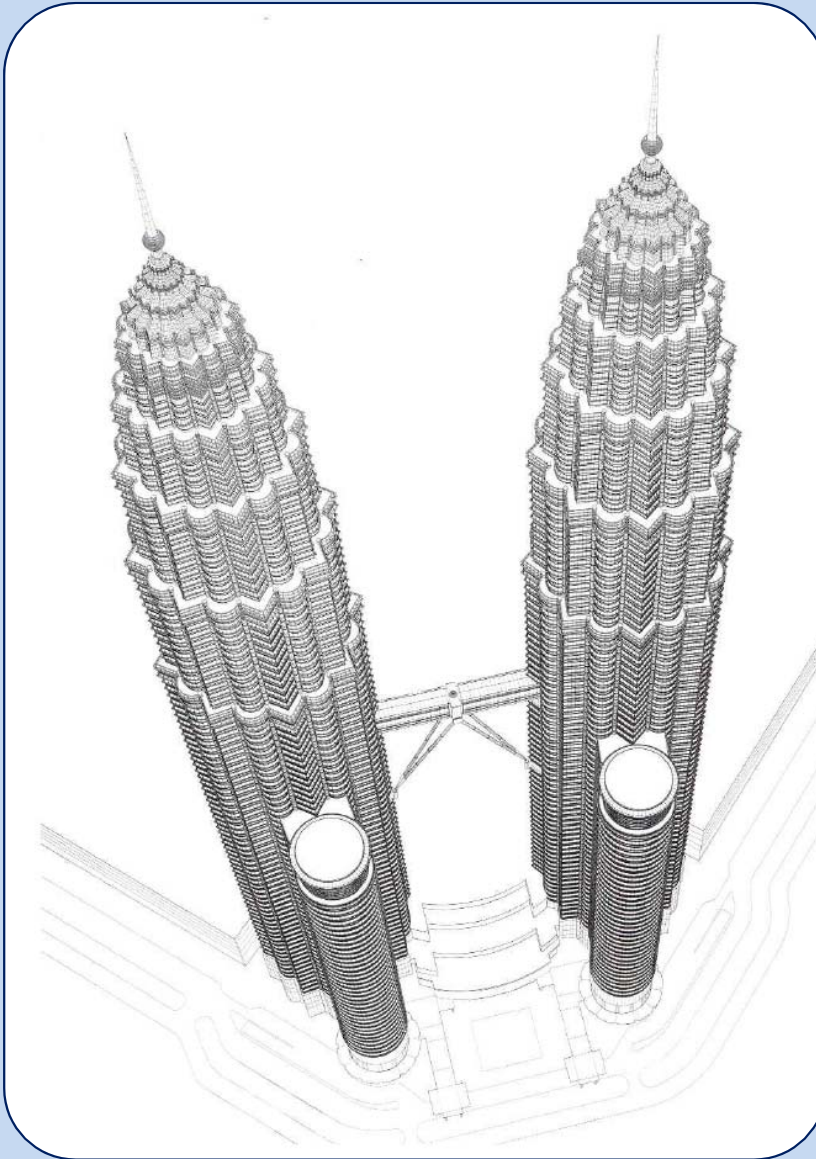
Prudential Building (Chicago)

- čista i učinkovita uporaba konstrukcijskog sustava okvirne cijevi



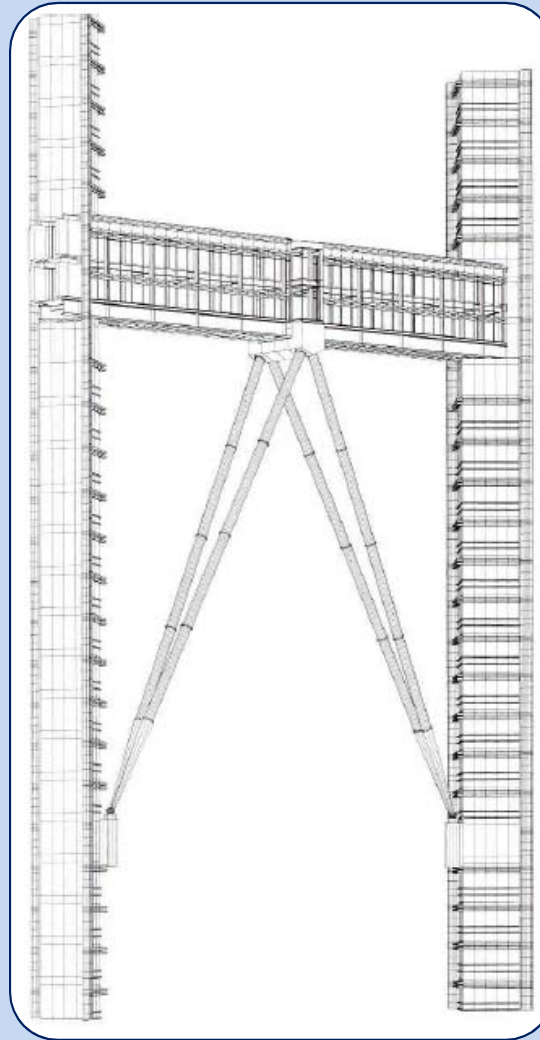
OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

Petronas Towers (Kuala Lumpur - Malezija)



OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

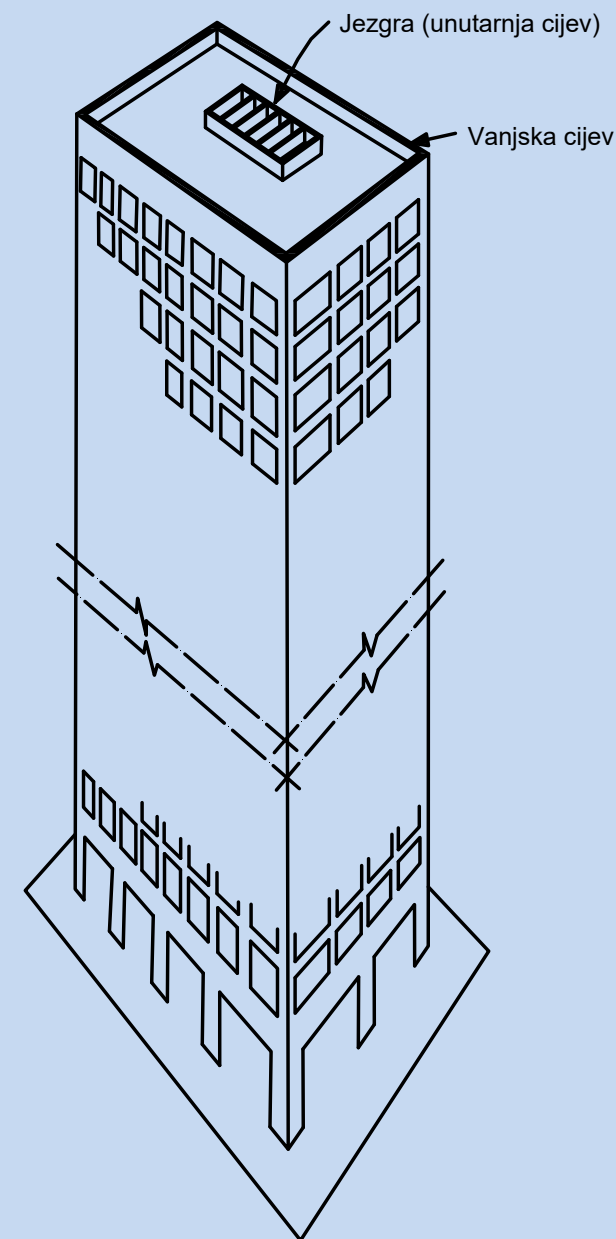
Petronas Towers (Kuala Lumpur - Malezija)



- Petronas tornjevi visine 452 m (10m viši od Sears Tower-a u Chicagu) dovršeni su 1988
- tornjevi imaju 88 numeriranih razina, ali ustvari imaju 95 katova (broj „8“ je sretni broj za Kineze)
- korišten je armirani beton za središnju jezgru i obodne stupove sa prstenastim gredama od betona tlačne čvrstoće 80 Mpa
- svaki toranj je valjkastog oblika promjenjivog promjera sa 16 stupova

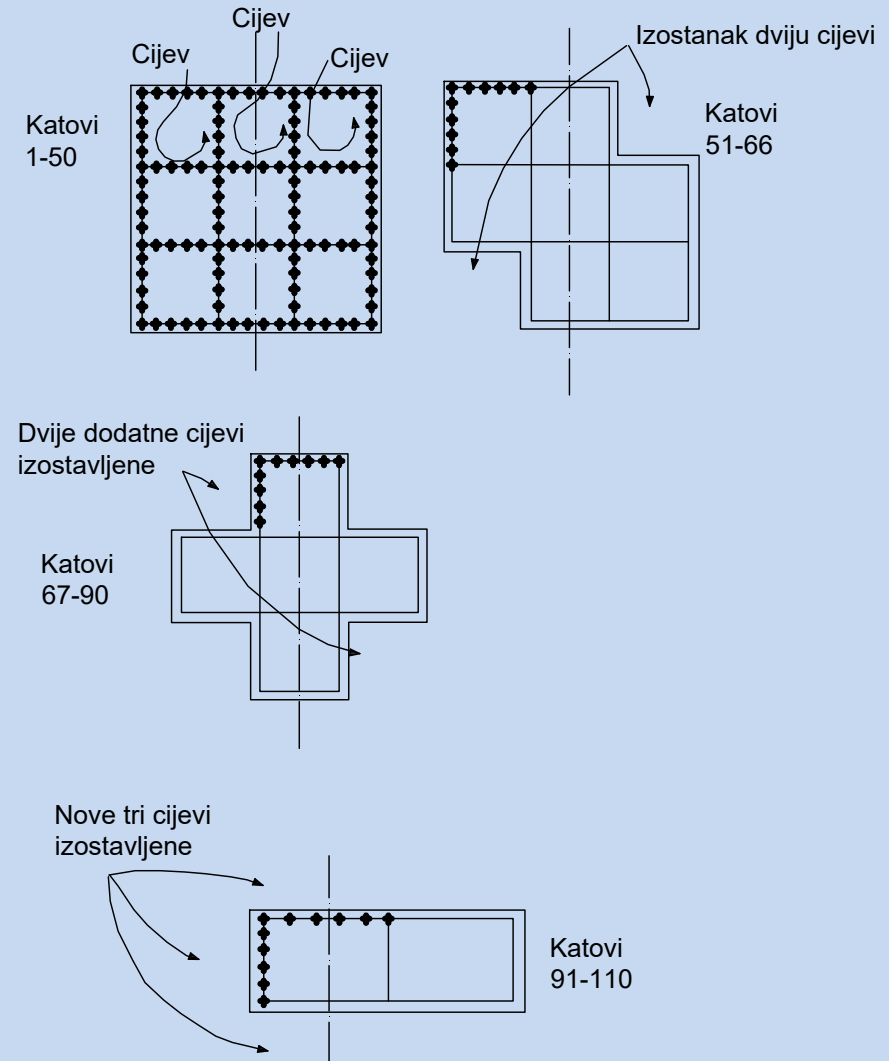
CIJEV U CIJEVI (TUBE IN TUBE)

- konstrukcijski sustav s jezgrom ili cijev u cijevi (Tube-in-Tube) konstrukcija
- varijanta oblika okvirne cijevi može se ostvariti zamjenom unutrašnjih stupova ili stupova i zidova jezgre sa drugom cijevi
- tako trup (ili vanjska cijev) i nova cijev jezgre zajedno preuzimaju i vertikalna i horizontalna djelovanja
- ta unaprijeđena forma zove se cijev u cijevi (tube-in-tube) ili trup-jezgra (hull-core) konstrukcija
- kod čeličnih zgrada unutrašnja cijev jezgre može se formirati od okvira sa spregovima
- kod armirano betonskih zgrada jezgru čine posmični zidovi
- vanjska okvirna cijev (trup) i unutrašnja jezgra međusobno djeluju kao posmične i savojne komponente konstrukcije od zidova i okvira (wall-frame)
- prednost je bitno povećana bočna krutost
- vanjska cijev (trup) naravno uvijek dominira zbog svoje veće konstrukcijske visine (tlocrta)
- pretpostavlja se da se ovim konstrukcijskim sustavom ekonomično mogu izvesti građevine do 120 katova



POVEZANE CIJEVI (BUNDELED TUBE)

- Konstrukcijski sklopovi od cijevi, povezanih u snopove (Bundled-Tube)
- prirodna evolucija forme WTC-ovih okvirnih cijevi bila je primjena više međusobno povezanih cijevi
- povezani skup cijevi ostvaruje veću krutost od pojedinačne cijevi
- ovaj konstrukcijski sustav prvi puta je primijenio svjetski poznati arhitekt Fazlur Khan za Sears Tower u Chicagu 1974.
- novi unutrašnji hrptovi bitno smanjuju utjecaj posmične fleksibilnosti (shear lag) u pojasevima naprezanja u stupovima su sukladno raspoređena ravnomjernije nego kod konstrukcijskog sustava s jednom cijevi
- konstrukcijski sklopovi od cijevi povezanih u sklopove tako ostvaruju mnogo veću bočnu (horizontalnu) krutost, nažalost na račun ograničavajućeg unutrašnjeg planiranja



OKVIRNE CIJEVI (FRAMED TUBE)

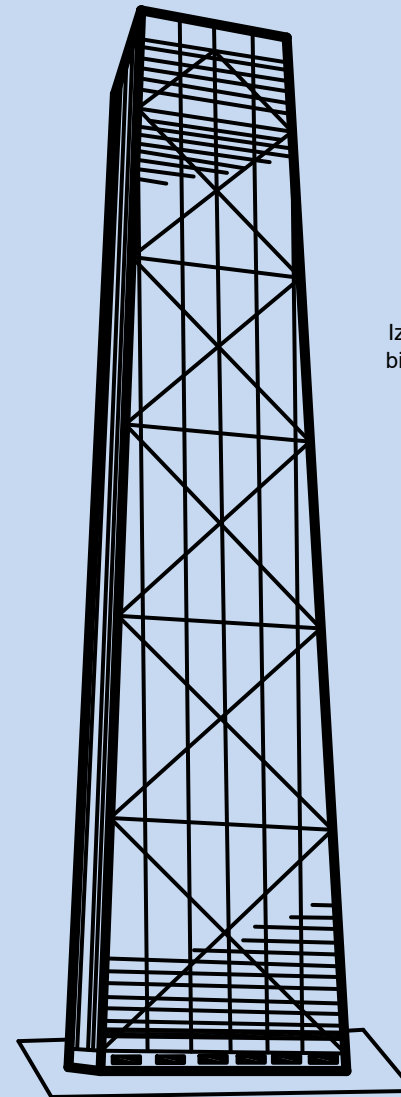
Sears Tower (Chicago)

- Sears Tower je 1974, postao najviša zgrada na svijetu, pretevši prvo mjesto WTC, koji ga je držao od 1970
- konstrukcijskim sustavom od cijevi povezanih u snopove, koji je razvio Fazlur Khan, ostvarena je mnogo veća horizontalna krutost građevine

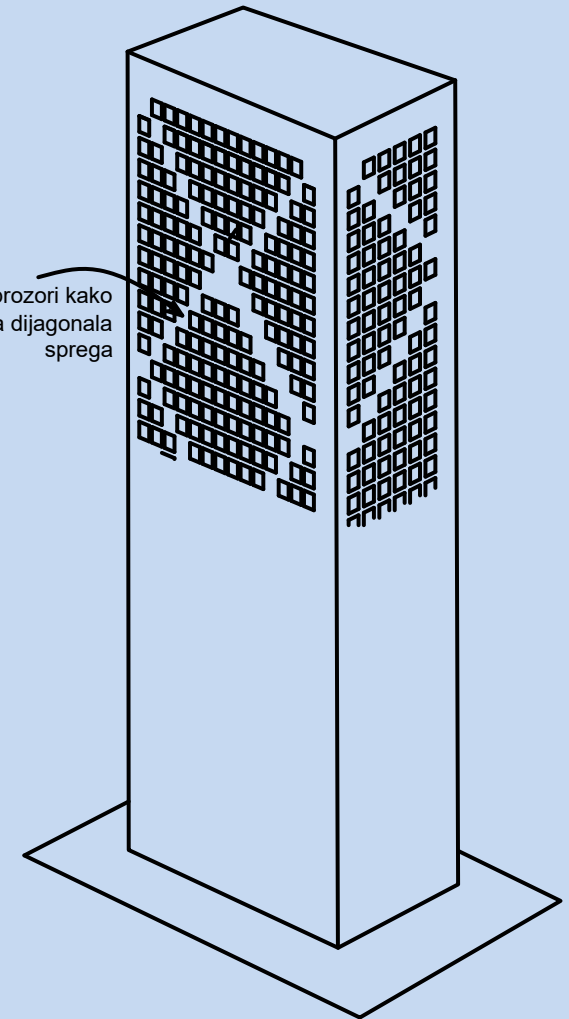


CIJEVI SA SPREGOVIMA (BRACED TUBE)

- učinkovitost okvirnih cijevnih konstrukcija može se povećati dodavanjem dijagonalnih spregova na fasadama
- to omogućuje veće visine i veći razmak između obodnih stupova
- obzirom da su dijagonale cijevi sa spregovima spojene na stupove na svakom križanju, one gotovo potpuno eliminiraju utjecaj posmičnih deformacija (shear lag) i u okvirima pojasevima i u okvirima hrptovima
- konstrukcijski sklop se za bočna (horizontalna) djelovanja sukladno ponaša slično kao okvir sa spregovima (braced frame)
- deformacija savijanja u štapovima okvira je tako bitno smanjena
- stoga stupovi mogu biti postavljeni na većem razmaku, što omogućuje mnogo veće prozore nego kod konvencionalnih cijevi



Izostavljeni prozori kako
bi se oformila dijagonala
sprega



CIJEVI SA SPREGOVIMA (BRACED TUBE)

- prva čelična cijev sa spregovima primjenjena je za zgradu John Hancock sa 97 katova, izgrađenu u Chicagu 1969.



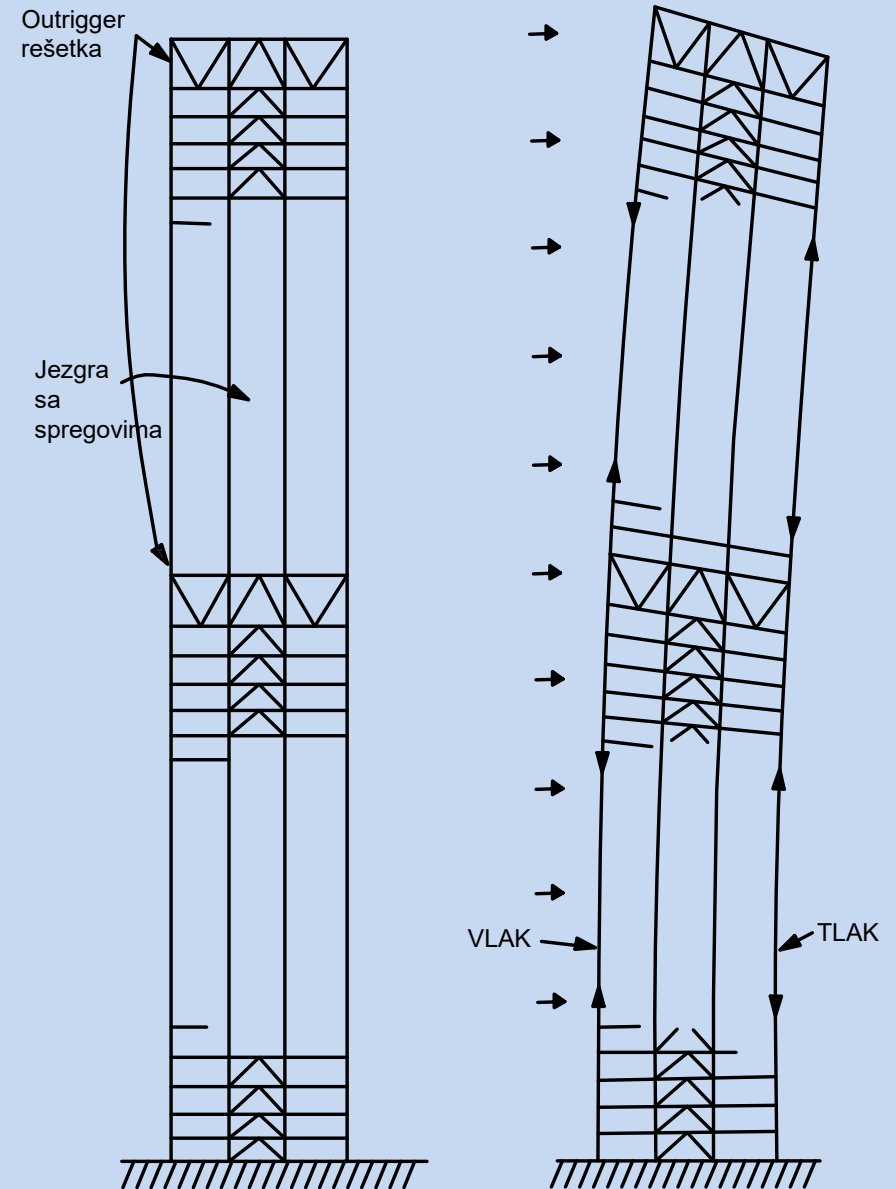
CIJEVI SA SPREGOVIMA (BRACED TUBE)

- 780 Third Avenue Building u New Yorku, zgrada od armiranog betona, dovršena 1985.
- spregovi su oblikovani kao dijagonalni sustav betonskih ploča (panela), veličine prozora, betoniranih zajedno s okvirom



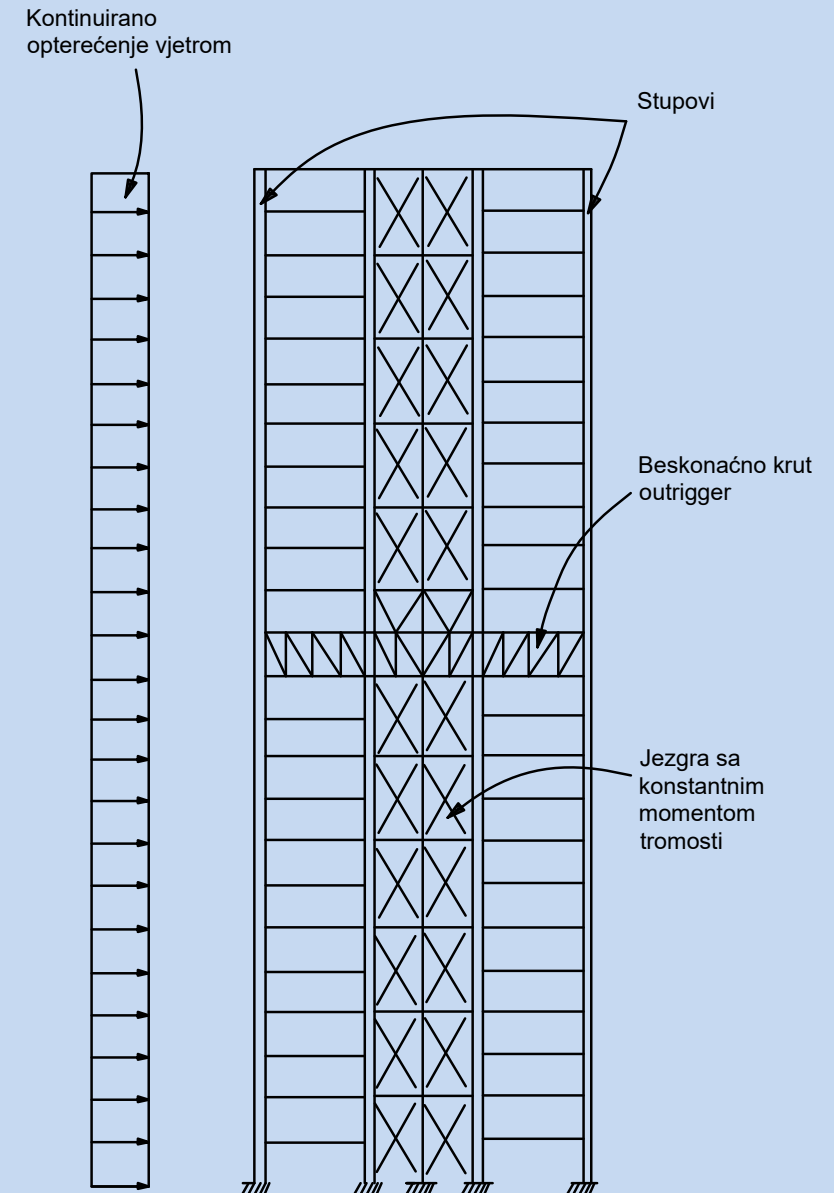
"OUTRIGGER" SUSTAVI

- taj konstrukcijski sustav čine središnja jezgra sa spregovima, koja je ili okvir sa spregovima ili posmični zidovi, i horizontalne konzolne rešetke ili visoki nosači, koji povezuju jezgru s vanjskim stupovima
- za horizontalna djelovanja rotaciju jezgre u vertikalnoj ravnini sprečavaju konzole vlakom u stupovima na privjetrini i tlakom u stupovima u zavjetrini
- efektivna konstrukcijska visina zgrade je bitno povećana
- sukladno je povećana bočna (horizontalna) krutost i smanjeni su horizontalni pomaci i momenti savijanja jezgre
- konzole vežu vanjske stupove na jezgru i konstrukcijski sustav se ponaša kao djelomično spregnuta konzola
- obodni stupovi mogu se uključiti u prijenos sila, ako se povežu horizontalnom rešetkom ili nosačem po obodu zgrade na razini konzola



"OUTRIGGER" SUSTAVI

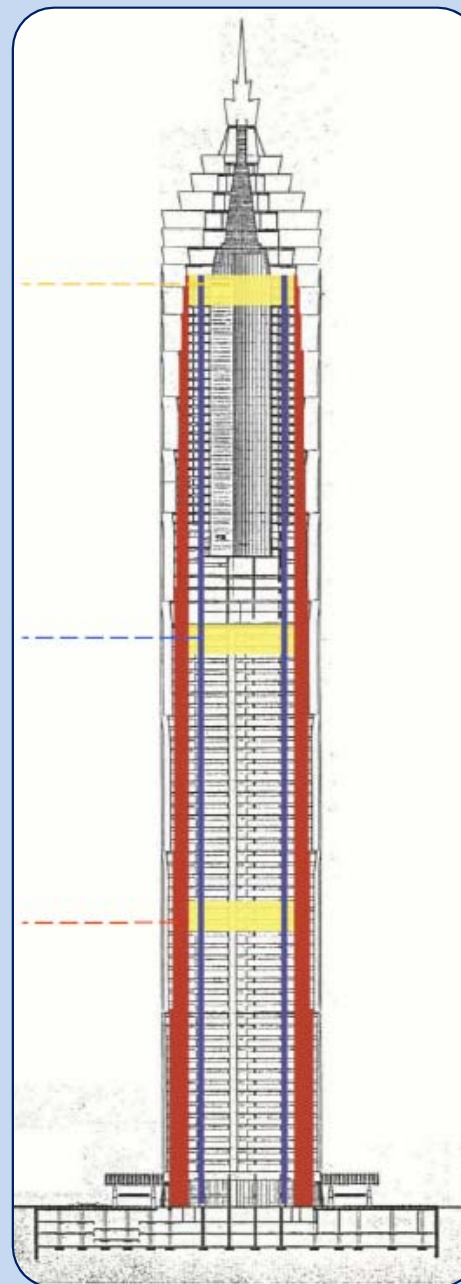
- konzole veće od visine jednog kata sve se češće koriste, jer dodaju građevini mnogo veću bočnu krutost
- međutim, ekonomska granica visine konzola je reda veličine 4-5 katova
- visina konzola je uobičajeno visine dva kata i ti katovi su obično servisni katovi za smještaj svih instalacija i tehnoloških uređaja za funkcioniranje zgrade
- ovaj konstrukcijski sustav primjenjen je do visine od 70 katova
- ako su tlocrtne dimenzije zgrade velike, ovaj konstrukcijski sustav omogućuje i mnogo veće visine
- učinkovitost ovog konstrukcijskog sustava bitno ovisi o vezi obodnih stupova i jezgre pomoću konzola



"OUTRIGGER" SUSTAVI

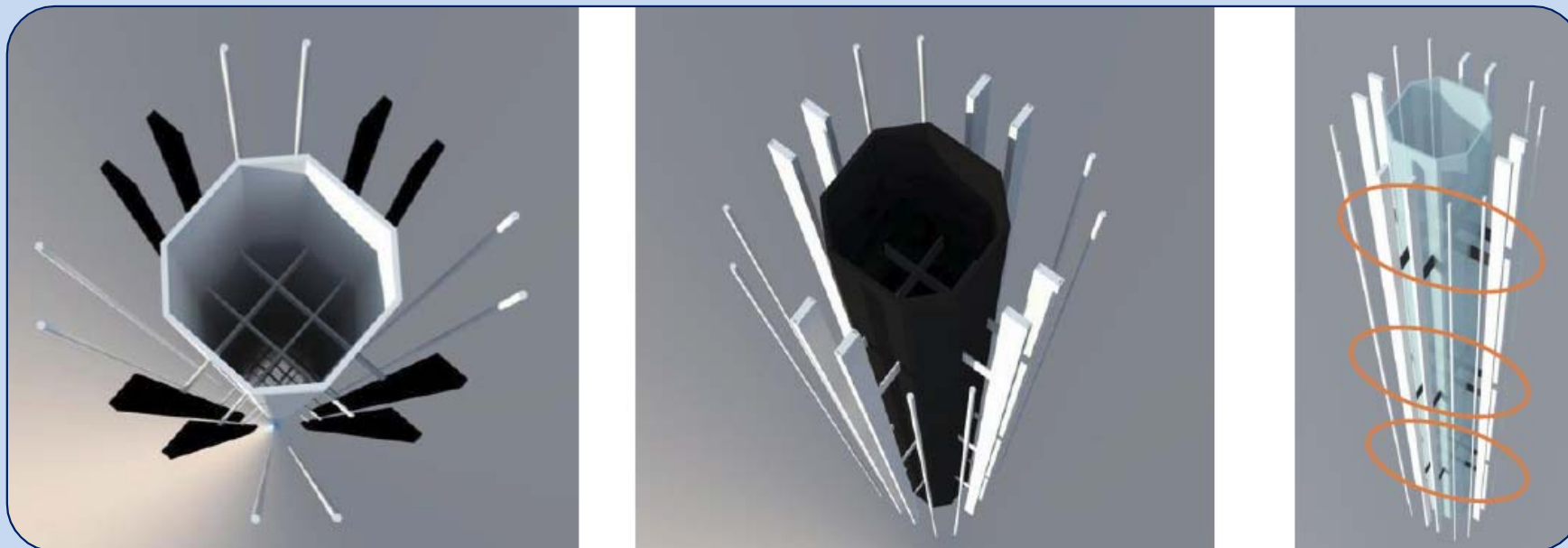
Jin Mao Tower, Shanghai

- još jedan toranj sa 88 katova ili 421m
- 50 katova za uredske prostore, 36 katova za hotel, 2 kata restorana i vidikovac
- konstrukcijski sustav čini središnja osmerokutna armirano-betonska jezgra, povezana s vanjskim spregnutim mega stupovima pomoću konzolnih rešetki
- debljine pojaseva posmičnih zidova su promjenjive od 84 cm na spoju s temeljom do 46 cm na razini 87
- tlačna čvrstoća betona iznosi od 35 MPa do 52 MPa



"OUTRIGGER" SUSTAVI

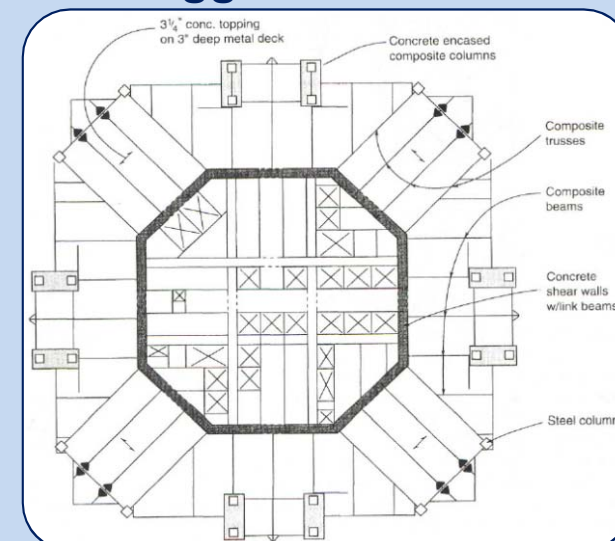
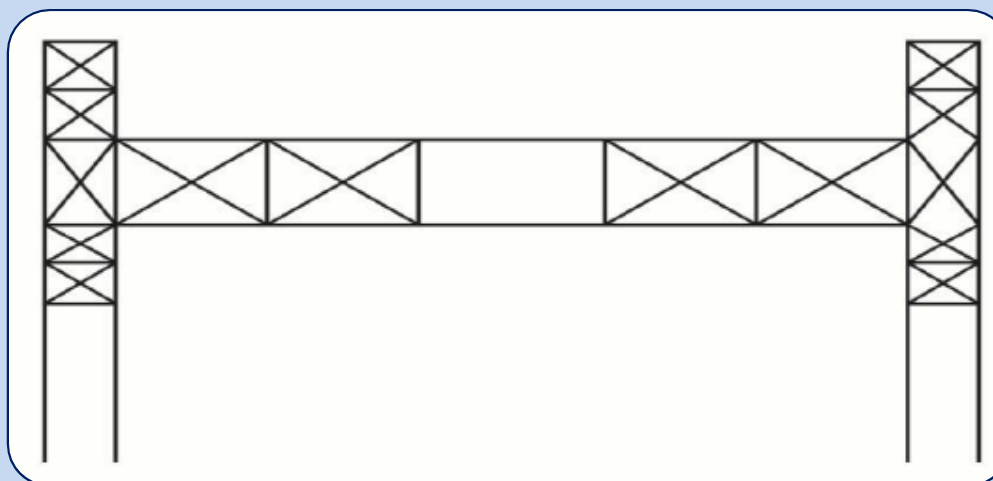
Jin Mao Tower, Shanghai



Vanjski „mega“ stupovi

Jezgra

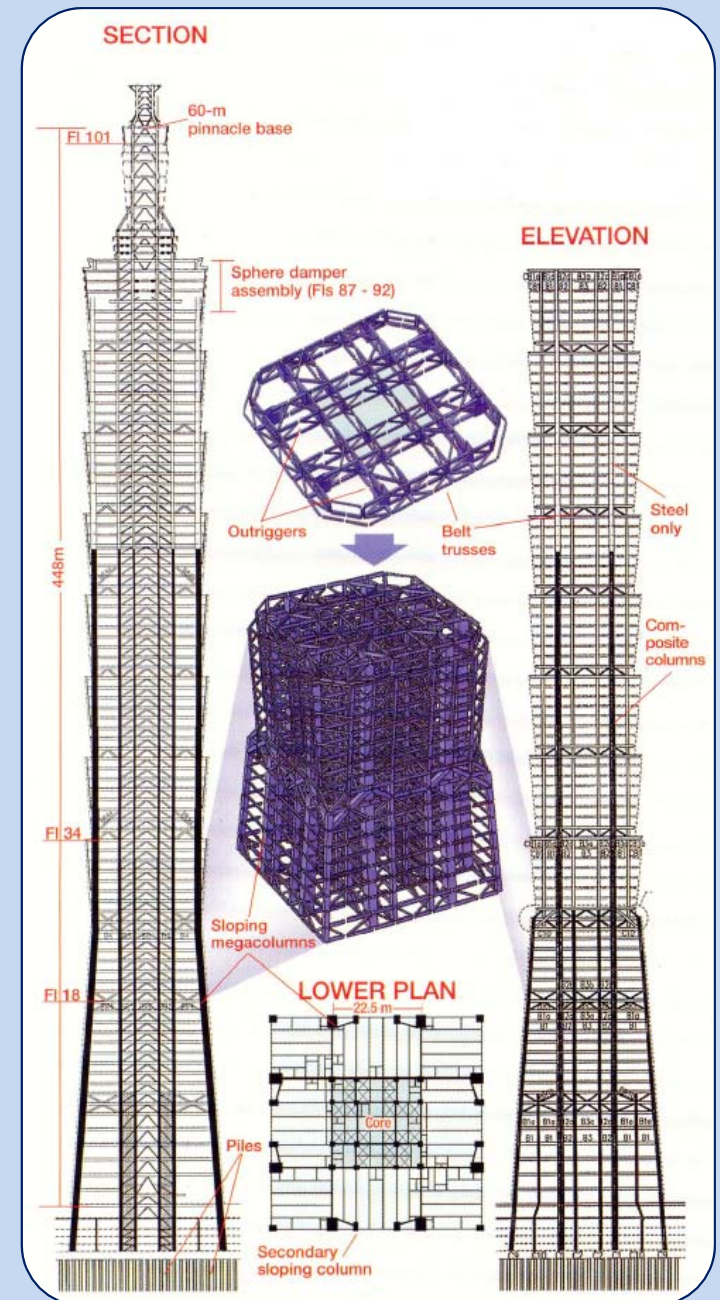
Outrigger rešetke



"OUTRIGGER" SUSTAVI

Taipei 101 Building (Taipei – Taiwan)

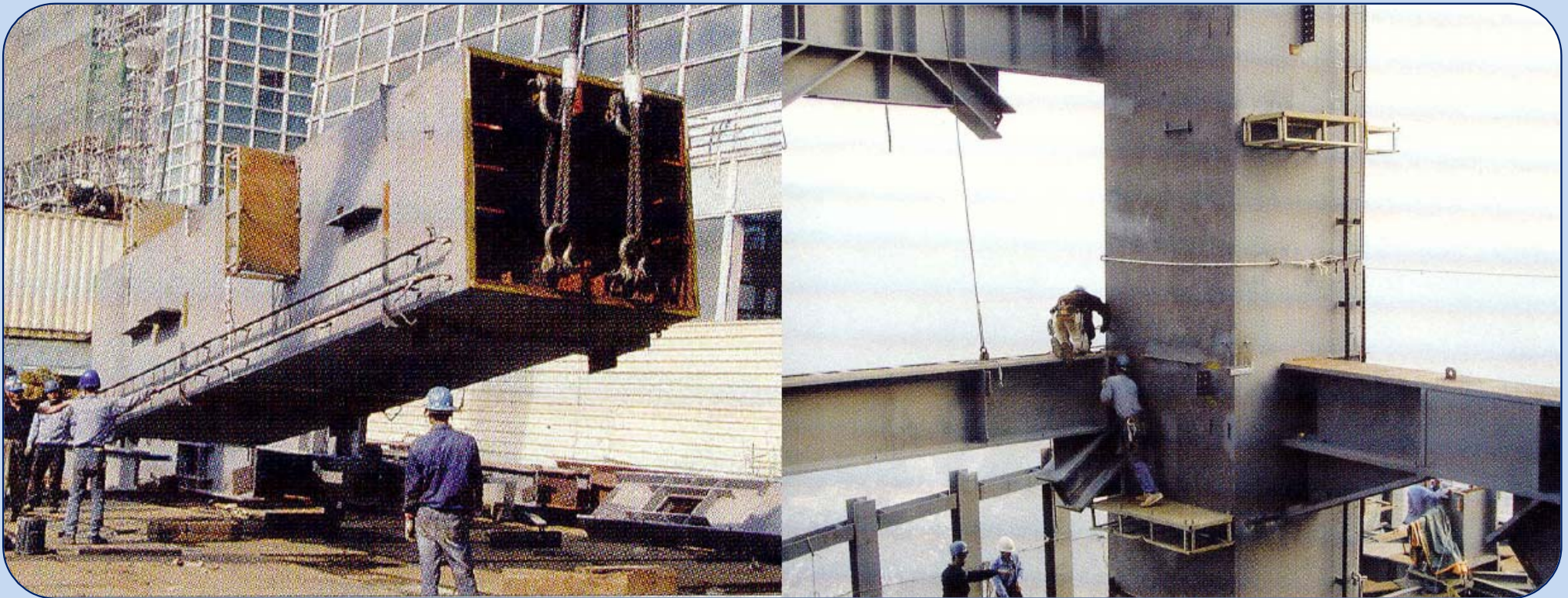
- zgrada Taipei 101 je 2003. postala najvišom građevinom na svijetu, nadmašivši Petronas Towers u Kuala Lumpuru
- unutrašnja cijev (jezgra) izvedena je od rešetke, a vanjska cijev (trup) je okvir s spregovima



"OUTRIGGER" SUSTAVI

Taipei 101 Building (Taipei – Taiwan)

- mega stupovi na vanjskom obodu



"OUTRIGGER" SUSTAVI

AT&T Building (New York)

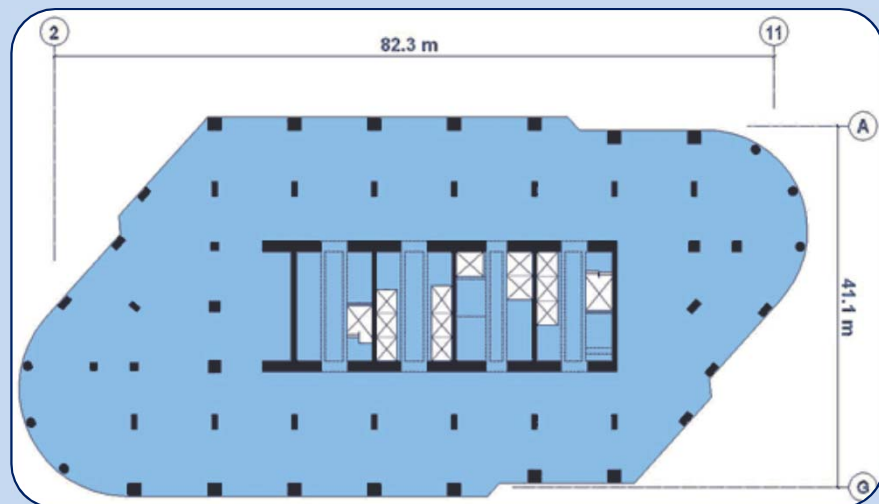
- arhitekt: Philip Johnson
- konstrukcijski projekt: Leslie Robertson and Associates
- osnovni konstrukcijski sustav čini cijev od krutih čeličnih okvira po obodu zgrade
- dodatna krutost po širini zgrade ostvarena je ugradbom unutarnje četiri vertikalne čelične rešetke
- na svakom se osmom katu dva zida od čeličnih ploča I presjeka sa otvorima za ventilaciju pružaju od rubova rešetki do vanjskih stupova na istoj liniji stupova
- čelični zidovi djeluju kao konzolne rešetke i mobiliziraju punu širinu zgrade u otpornosti na horizontalna djelovanja
- horizontalni posmik u podnožju zgrade preuzima se s dva divovska čelična sanduka



"OUTRIGGER" SUSTAVI

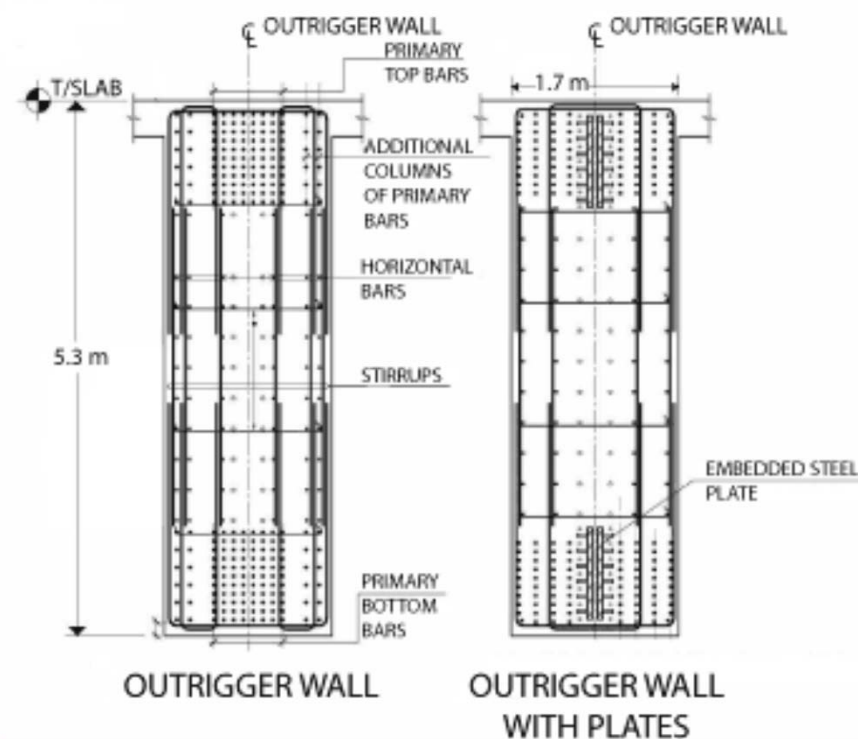
Trump International Hotel

- 92 kata, 345 m
- betonska jezgra povezana je sa vanjskim čeličnim stupovima
- betonska jezgra sastoji se od zidova I i C presjeka debljine 46 – 120 cm
- outrigger nosači su masivni AB zidovi sa čeličnim pločama debljine 120 cm i visine 530 cm i nalaze se na tri pozicije po visini (servisne etaže)
- outrigger nosači ovdje također imaju ulogu transfer greda jer se u njihovom nivou mijenja tlocrt (izmještaju se stupovi)



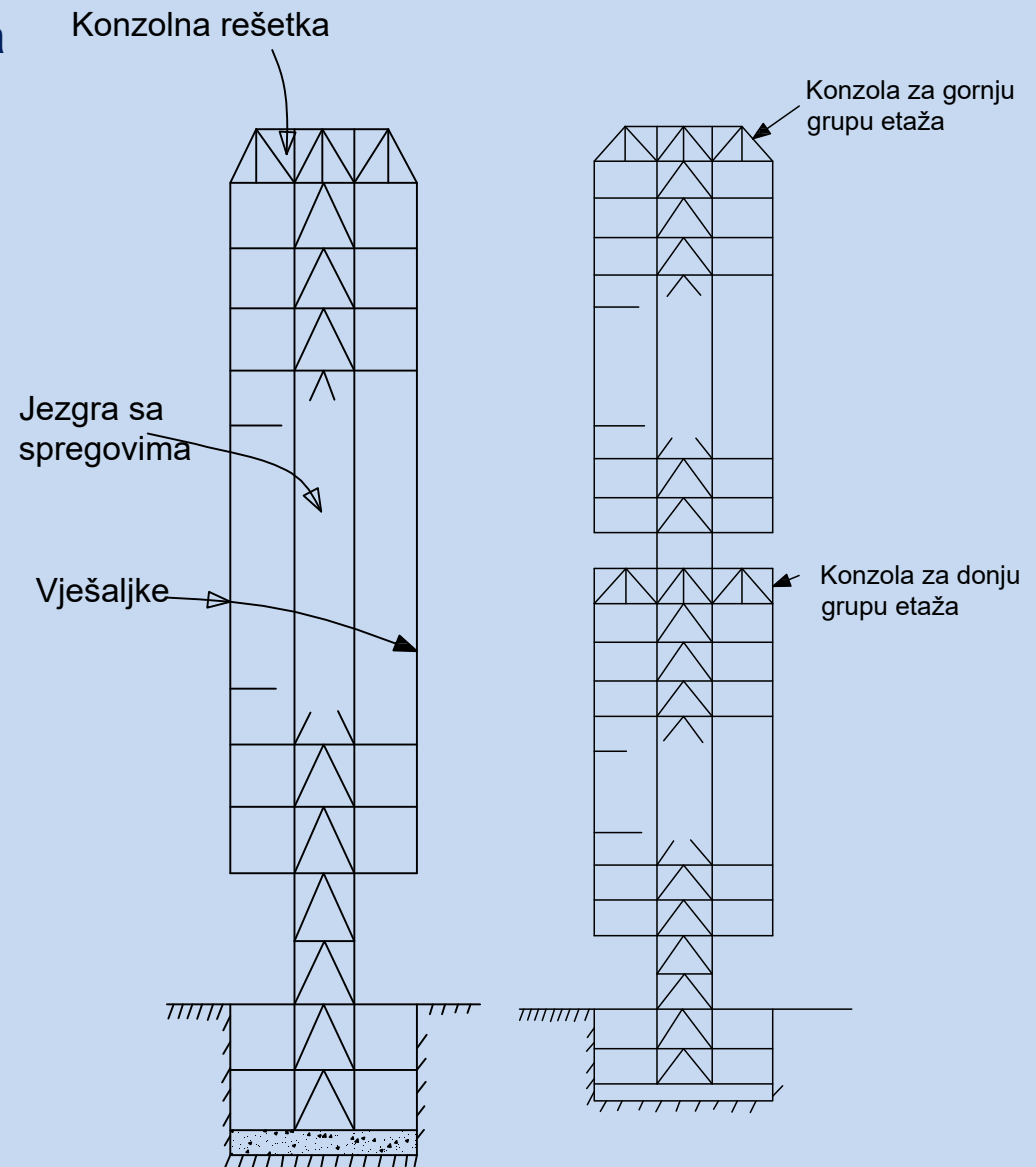
"OUTRIGGER" SUSTAVI

Trump International Hotel



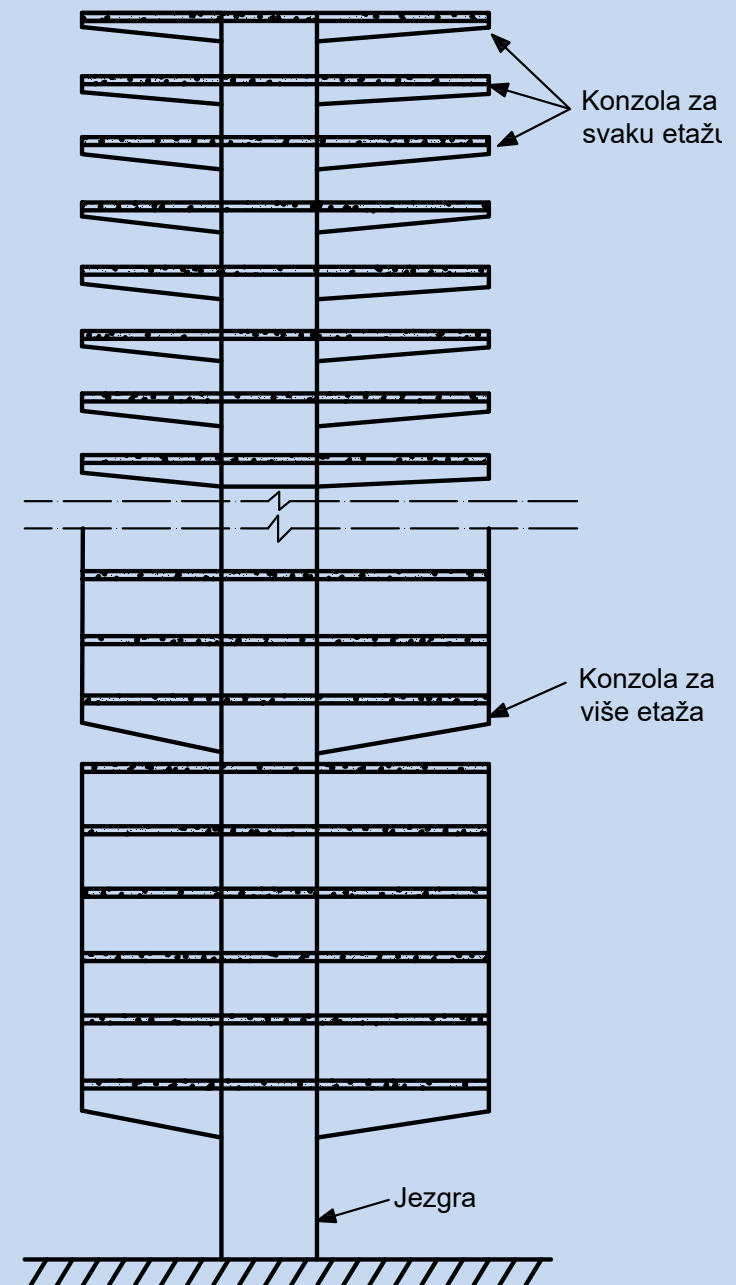
OVJEŠENI SUSTAVI

- ovješeni konstrukcijski sklop čini središnja jezgra sa horizontalnim konzolnim rešetkama na razini krova, s koje su obješene vertikalne vješaljke od čeličnih užadi
- stropne ploče vezane su na te kabele
- to omogućuje da na najdonjem katu na razini tla nema obodnih stupova i prostor je potpuno otvoren
- vješaljke imaju vrlo mali poprečni presjek naspram stupova i mogu se ubetonirati oko prozorskih okvira
- dodatna prednost je da se stropne konstrukcije mogu betonirati na tlu i onda podići u konačan položaj
- ovaj konstrukcijski sustav dopušta relativno male visine zgrade do oko 10-15 katova, zbog konstrukcijskih mana, kao npr. ograničene izmjere jezgre i varijacije veza između stropova za pokretna djelovanja



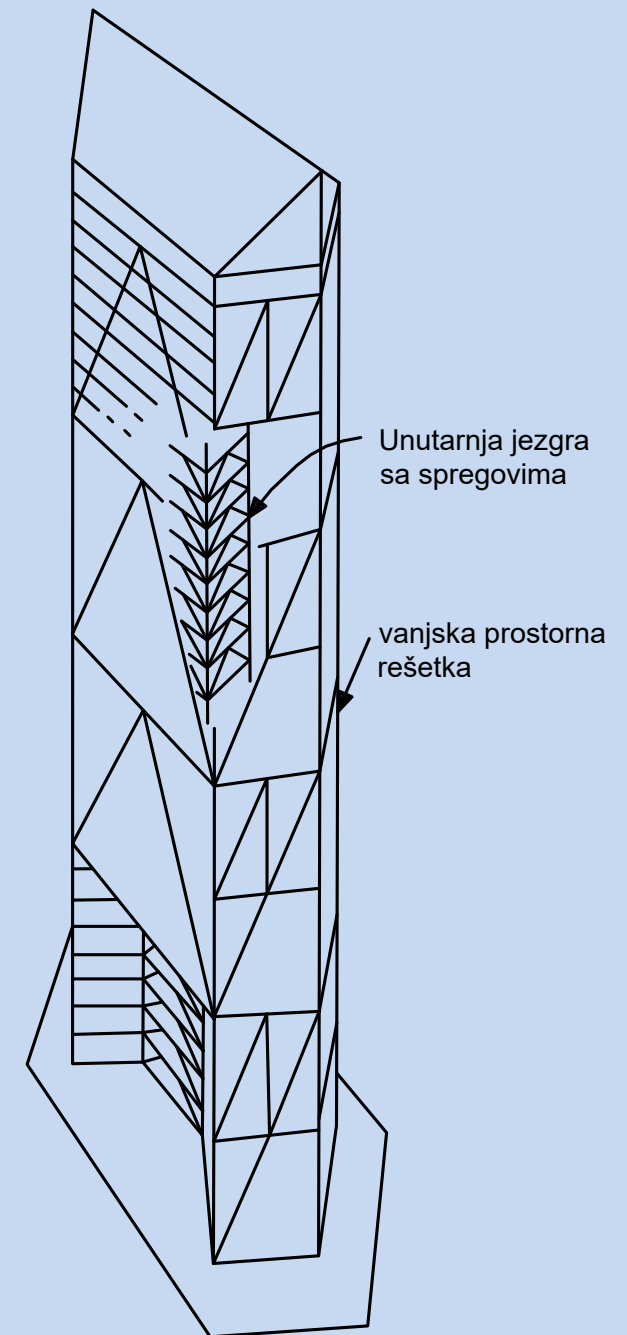
SUSTAV S JEZGROM (CORE)

- jedna jezgra preuzima sva vertikalna i horizontalna djelovanja
- konstrukcijsko djelovanje je slično ovješnom sklopu, ako su obodni stupovi na razini tla izbačeni
- moguće varijante su: sa jednom konzolom u podnožju zgrade koja preuzima sve katove iznad, nekoliko konzola duž visine zgrade ili sa pojedinačnim konzolama na razini svake etaže
- Prednost ovog sustava je samo arhitektonsko oblikovanje
- ovaj sustav je prilično neučinkovit jer samo jezgra malih dimenzija preuzima horizontalna djelovanja



PROSTORNE KONSTRUKCIJE

- prostorni okviri: trodimenzionalne trokutaste konstrukcije, bitno se razlikuju od prethodno opisanih ravninskih okvira
- prostorni okvir preuzima vertikalna i horizontalna djelovanja
- jedan od najučinkovitijih konstrukcijskih oblika
- horizontalna djelovanja preuzima oblikom
- trokutasta prostorna rešetka ima pogodnost da se u štapovima rešetke razvijaju samo uzdužne sile
- mala težina i velika učinkovitost omogućuju postizanje najvećih visina građevina
- proračun prostornih okvira je obično složen
- teško je projektirati odgovarajuće nosive spojeve između katnih konstrukcija i glavnog okvira
- ti spojevi su skupi i nekad ružno izgledaju



PROSTORNE KONSTRUKCIJE

Bank of China Building, Hongkong

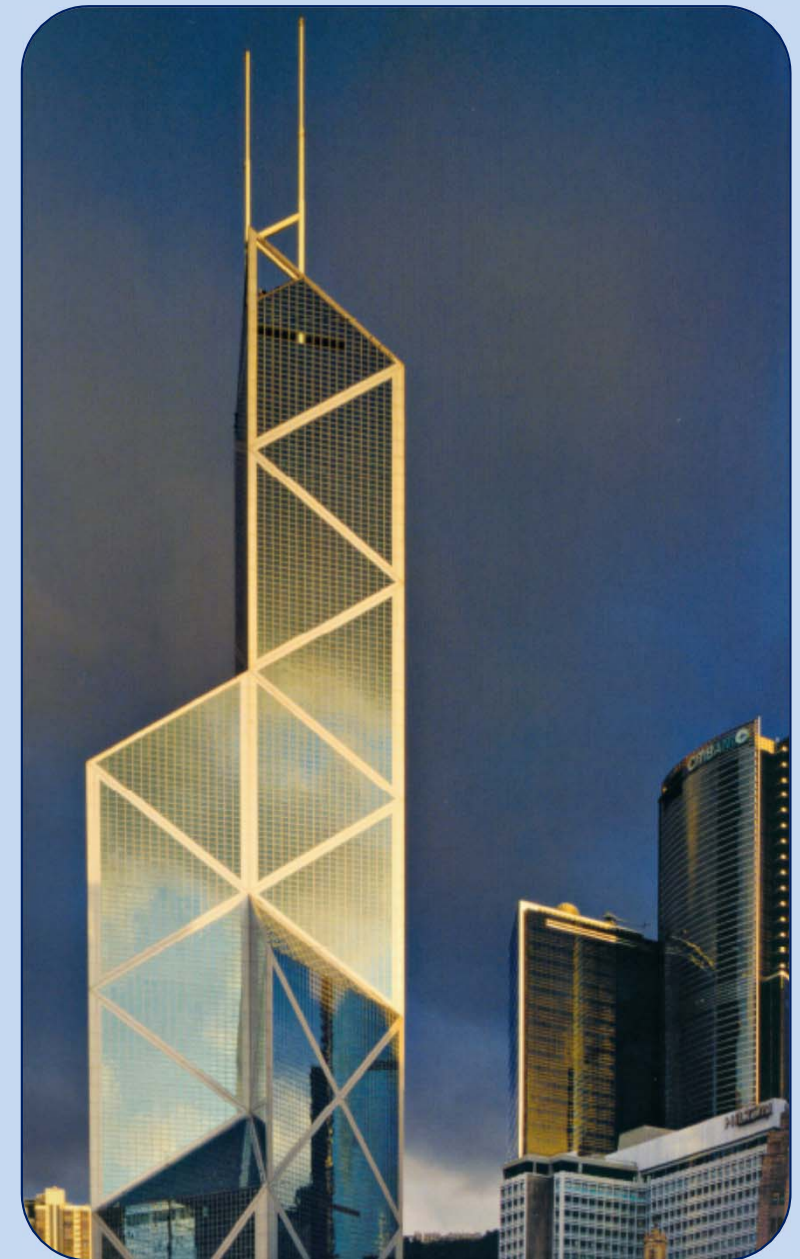
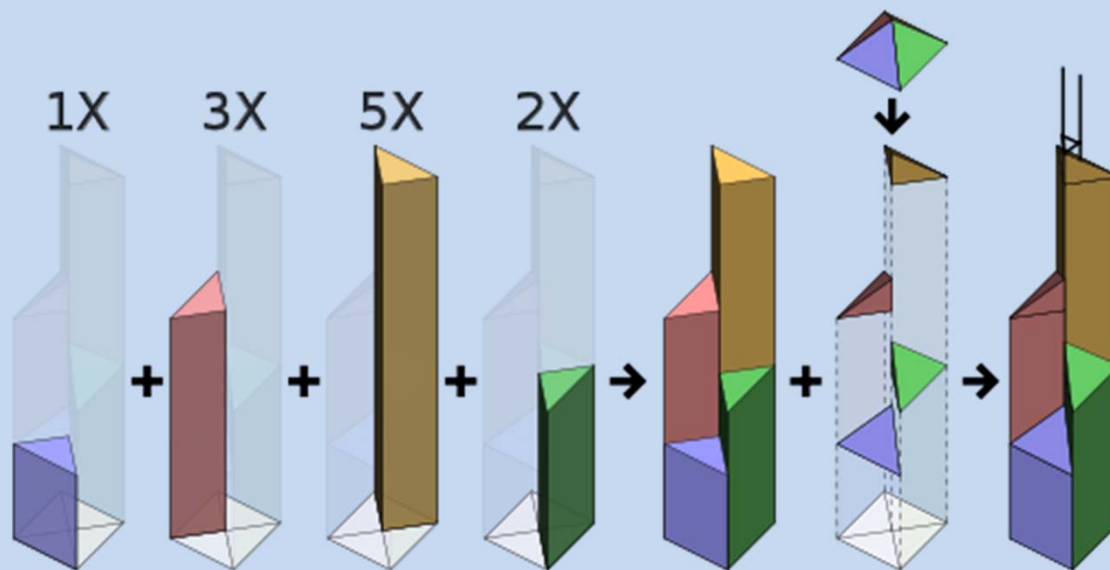
- Bank of China sa 76 katova dovršena je 1989 i predstavlja izvrstan primjer prostorne rešetke sa poprečnim spregovima
- arhitekt: I.M. Pei
- konstrukcijski projekt: Leslie Robertson and Associates
- konstrukcijski sustav 369m visoke građevine je prostorna rešetka sa poprečnim spregovima (cross-braced space truss)
- prostorna rešetka preuzima gotovo ukupnu težinu građevine i istovremeno horizontalna djelovanja od tajfunskih vjetrova
- i horizontalna i gravitacijska opterećenja prenose se na četiri spregnuta stupa, smještena u kutovima zgrade, čime je ostvaren slobodni raspon od 52m u podnožju građevine
- peti spregnuti stup u središtu zgrade počinje na 25 katu i proteže se do vrha
- sile od tog stupa prelaze na kutne stupove na razini 25 kata



PROSTORNE KONSTRUKCIJE

Bank of China Building, Hongkong

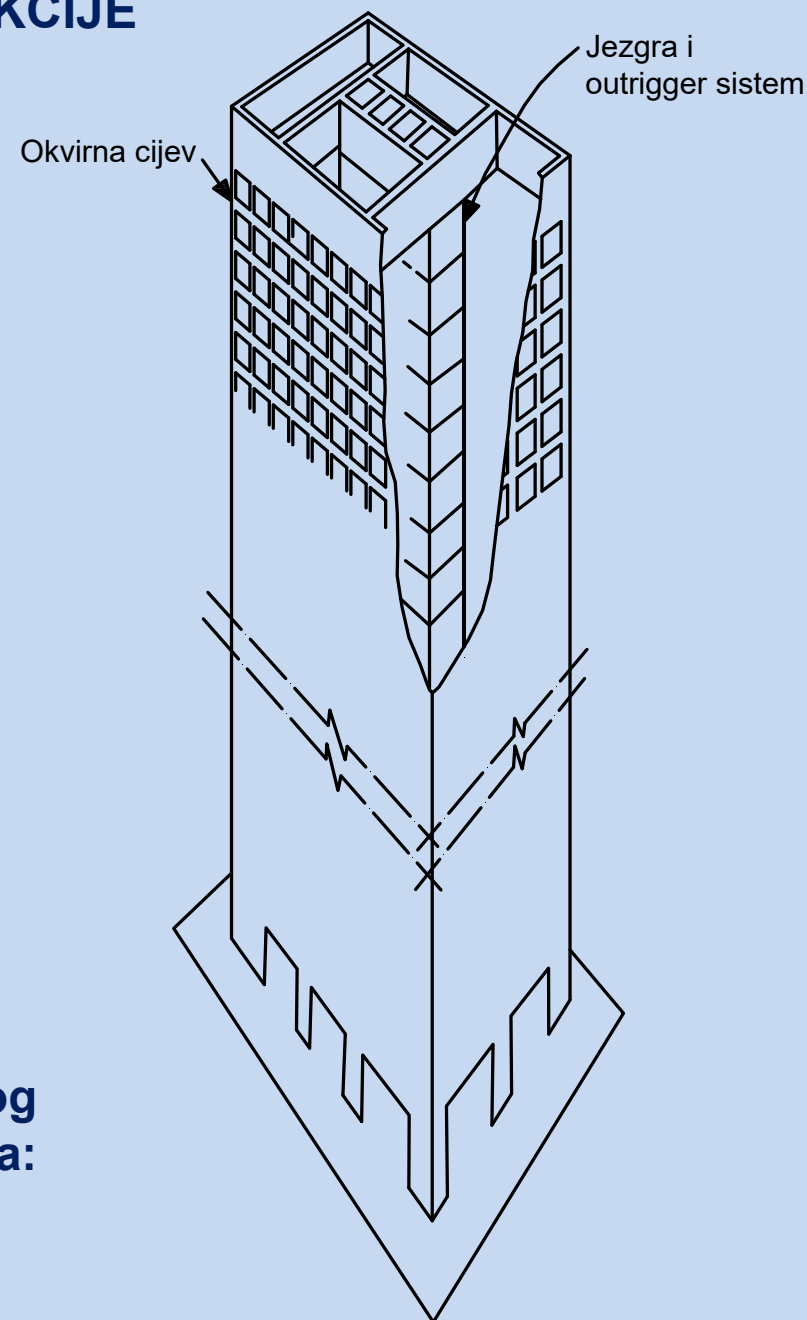
- izmjere glavnih stupova u kutovima na razini temelja iznose 4,3x8 m
- veličina čeličnih dijelova spregnutih stupova smanjuje se prema vrhu
- promjena izmjera iznosi više od 3,1 m
- izvedbom spojeva od ubetoniranih čeličnih elemenata izbjegnuta je potreba za skupim čeličnim 3-D spojevima (priključcima) u kutovima zgrade



HIBRIDNE KONSTRUKCIJE

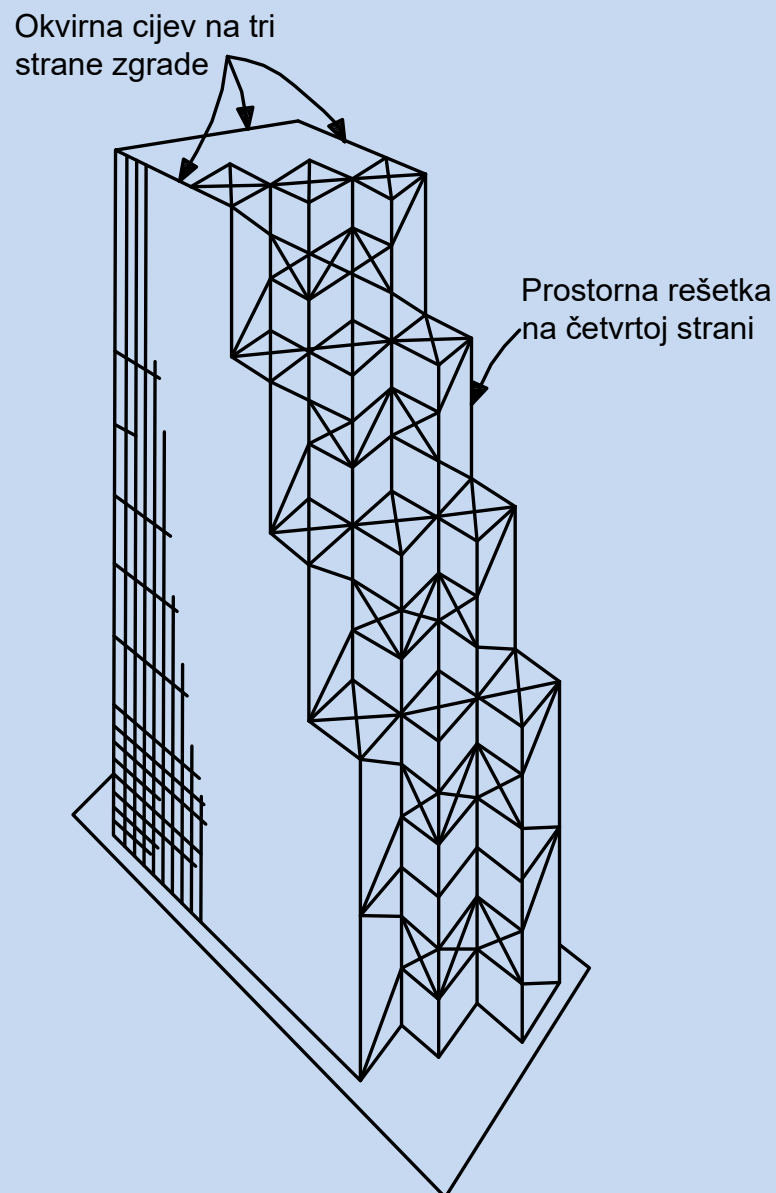
- sadašnji trend u arhitekturi, poglavito tzv. „postmodernizmu“ je kreiranje zgrada nepravilnih oblika
- konstruktor ih neće moći svrstati u pojedini konstrukcijski sustav
- kod proračuna se sukladno mora koristiti više kombinacija prije pojašnjenih konstrukcijskih sustava
- napredak u računalnom hardware-u i software-u dopušta konstruktorima složene prostorne analize za takve građevine

Primjer kombinacije konstrukcijskog sustava cijevi i outrigger-a:



HIBRIDNE KONSTRUKCIJE

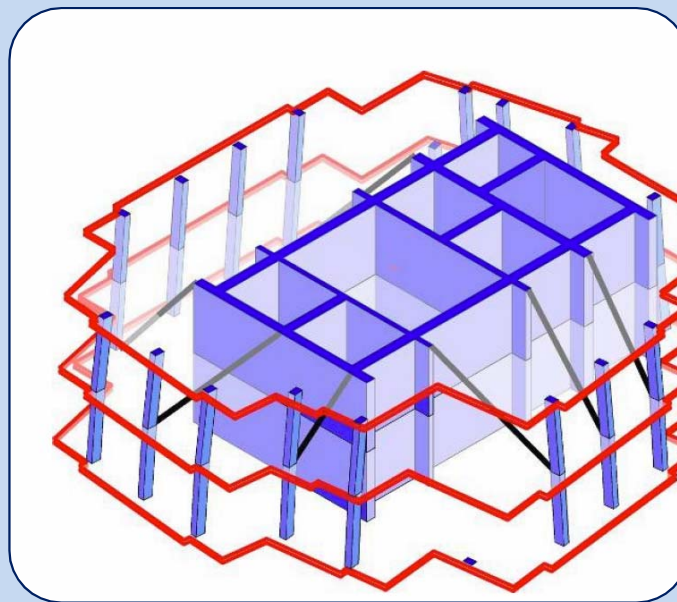
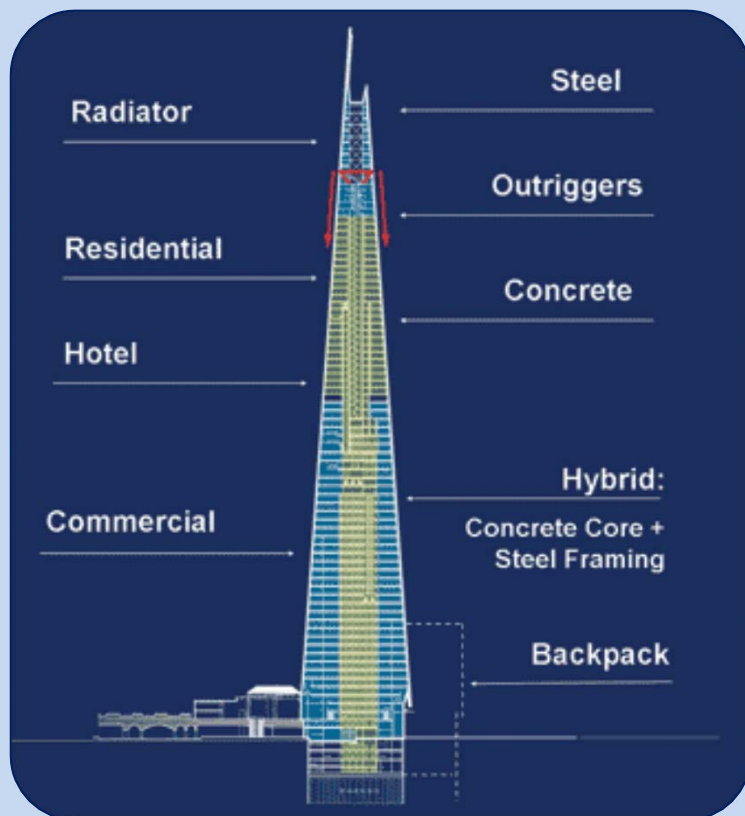
- cijevni sustav na tri fasade kombiniran je s prostornom rešetkom na četvrtoj fasadi:



HIBRIDNE KONSTRUKCIJE

The Shard, 2012, London

- 87 katova, 310 m
- donji i gornji dio izvedeni iz čelika, središnji iz betona
- Konstrukcijski sustav mješavina betonske jezgre i vanjske cijevi-krutog okvira (donji dio); jezgre i posmičnih zidova (središnji betonski dio); i jezgre i outrigger sistema (gornji dio)



HIBRIDNE KONSTRUKCIJE

The Shard, 2012, London

