

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE



Predavanja: Ana Mandić Ivanković

Vježbe: Mladen Srbić, Dominik Skokandić

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE

1.	Pregled kolegija Visoke građevine – konstruktivni sustavi, sustavi za horizontalna djelovanja, ukrutni sustavi
2.	Tornjevi, dimnjaci, jarboli, vjetroelektrane – općenito, tipovi, funkcija, primjeri
3.	Betonski tornjevi – temeljenje, dimenzioniranje
4.	Ljuske – teorija ljusaka, tipovi, proračun, primjeri
5.	Vlačne strukture – form finding, materijali, djelovanja, primjeri izvedenih građevina
6.	Vodotornjevi – funkcija, oblici, gradnja, seizmički proračun spremnika tekućina
7.	<i>1.Kolokvij (CJELINE 1-5) 21.03. 2017.</i>
8&9.	Čelični tornjevi, jarboli, dimnjaci - projektiranje
10.	Telekomunikacijske strukture – proračun jarbola sa zategama, rušenje jarbola sa zategama i tornjeva, temeljenje
11.	Pokretni mostovi – tipovi, primjeri projekata, izvedbe, održavanja
12.	Plutajući mostovi – tipovi, primjeri projekata, izvedbe, održavanja
13.	Podvodni tuneli
14.	<i>2.Kolokvij (CJELINE 6-12) 13.04.2017.</i>
15.	<i>Popravni kolokvij (CJELINE 1-13) 18.04.2017.</i>

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE

1. PREDAVANJE



Visoke građevine

VISOKE GRAĐEVINE – SADRŽAJ PREDAVANJA

(1.dio)

<http://www.burjkhalifa.ae/>, (828 m)

□ Uvodno

- Povijest i kronologija visokih građevina
- Nosivi elementi za osnovna opterećenja
- Mjere konstrukcijske učinkovitosti

□ Konstrukcijski sustavi visokih zgrada

- Tipovi konstrukcije ovisno o broju katova
- Četiri osnovna nosiva sustava
- Kruti okviri
- Okviri sa spregovima
- Okviri s ispunom
- Posmični zidovi
- Konstrukcije od zidova i okvira
- Povezani zidovi
- Okvirne cijevne konstrukcije
- Cijevi povezane u snopove
- Cijevi sa spregovima
- Jezgra ojačana spregovima
- Ovještene konstrukcije
- Sustav cijevi u cijevi
- Prostorne konstrukcije
- Hibridne konstrukcije



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- ▣ prve visoke i monumentalne građevine izgrađene su već u starome vijeku
- ▣ **Piramide:**
 - *Imphotep*, stepenasta piramida, 2780 BC
 - *Cheops*, 2680 BC, visina 146 m.
- ▣ **Sfinga**
 - kod Gizeha, 2500 BC, dužine 73,5 m, visine 20 m.



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

□ *Rodski kolos:*

- kip od pozlaćene bronce, 304 BC visina 32m, srušen u potresu

□ *Pharos:*

- svjetionik kraj Aleksandrije, 280 BC, H=120m
- graditelj: Sostratos iz Knidos
- srušio se u 13. stoljeću uslijed potresa, kameni toranj, kamenovi spojeni zalivenim olovom



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- ***Kosi toranj u Pisi, (1173-1350)***
 - H=56m - stupasti toranj
- ***Washington Monument (1885)***
 - stupasti toranj H=169m
- ***Gotičke katedrale, (5st.)***
 - izražena nastojanja za izgradnjom što viših građevina
- ***Katedrala u Ulmu, (1376-1890)***
 - H=161,5m najviša katedrala na svijetu



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

□ *Eiffelov toranj (1889)*

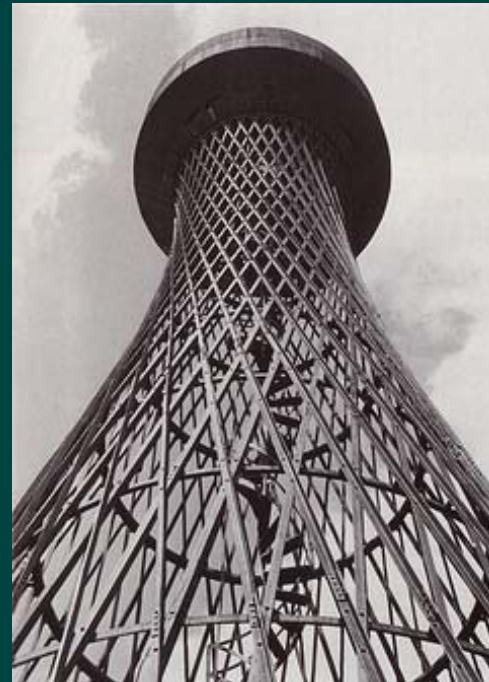
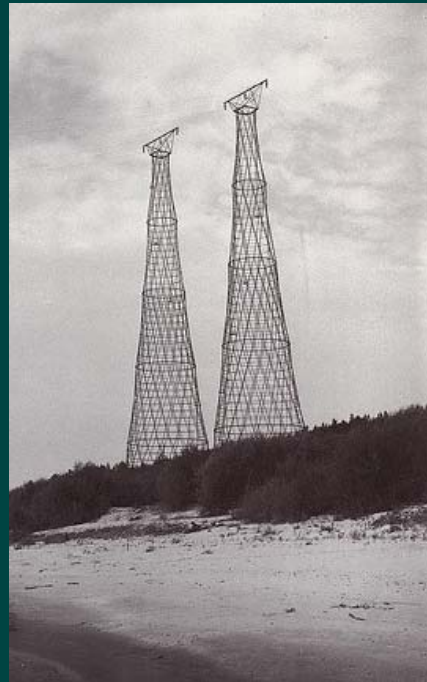
- $H=301\text{m}$
- Champ-de-Mars, Paris
- najviša građevina do 1930.
- temeljenje na kesonima
- čelična konstrukcija teška 7.300 t
- potpuna razlika u odnosu na tadašnje građevine
- zrcalo ljudske kreativnosti



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- ▣ ***Hiperboloidni tornjevi*** inženjera Vladimira Šuchova
 - Prvi toranj u blizini Nizhny Novgoroda (1896)
 - Tornjevi blizanci kraj rijeke Oka (1988), $h=128$ m
 - radiotoranj Šabalovka pored Moskve, $H=150$ m
 - ▣ filigranska konstrukcija U-čelični profili sa horizontalnim prstenovima koji označavaju prijelaz između 6 hiperboloidnih segmenata



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- *Skylon Tower* (1951), London
 - visina $H=76$ m, 15 metara iznad tla
 - “lebdeća cigara”
 - stabiliziran je zategama preko 3 pilona



UVOD

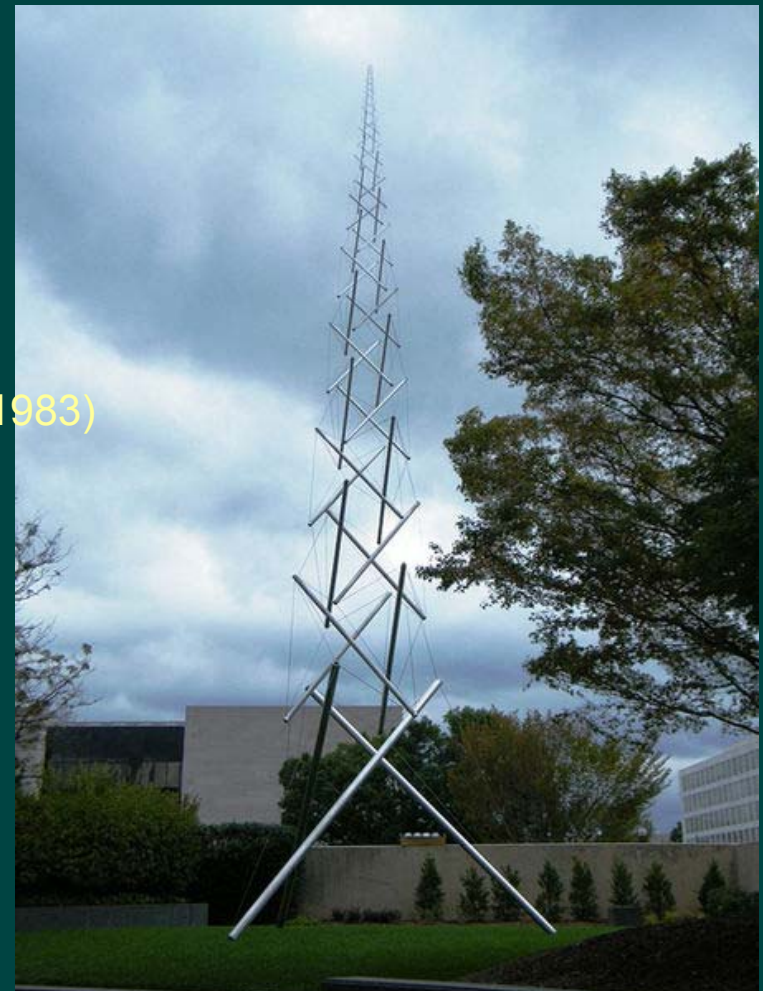
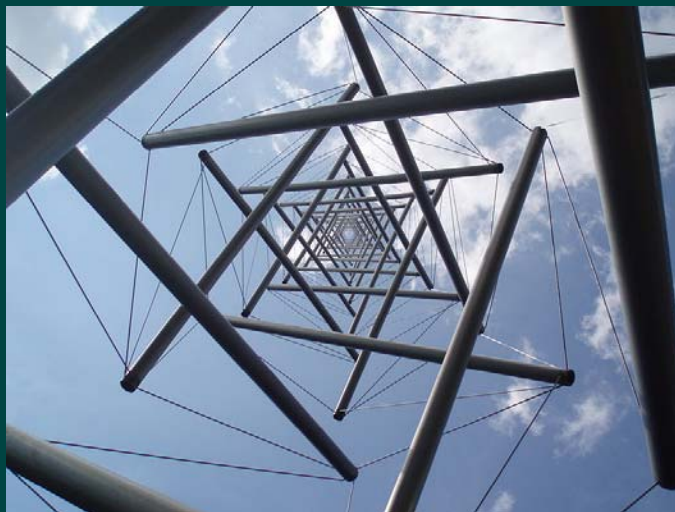
POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

■ Needle Tower II (1969)

- tensegrity konstrukcija, arhitekt: Kenneth Snelson
- gradivo: aluminij + visokovrijedni čelik
- dimenzije 30 x 6 x 6 m

■ Tensegrity konstrukcije:

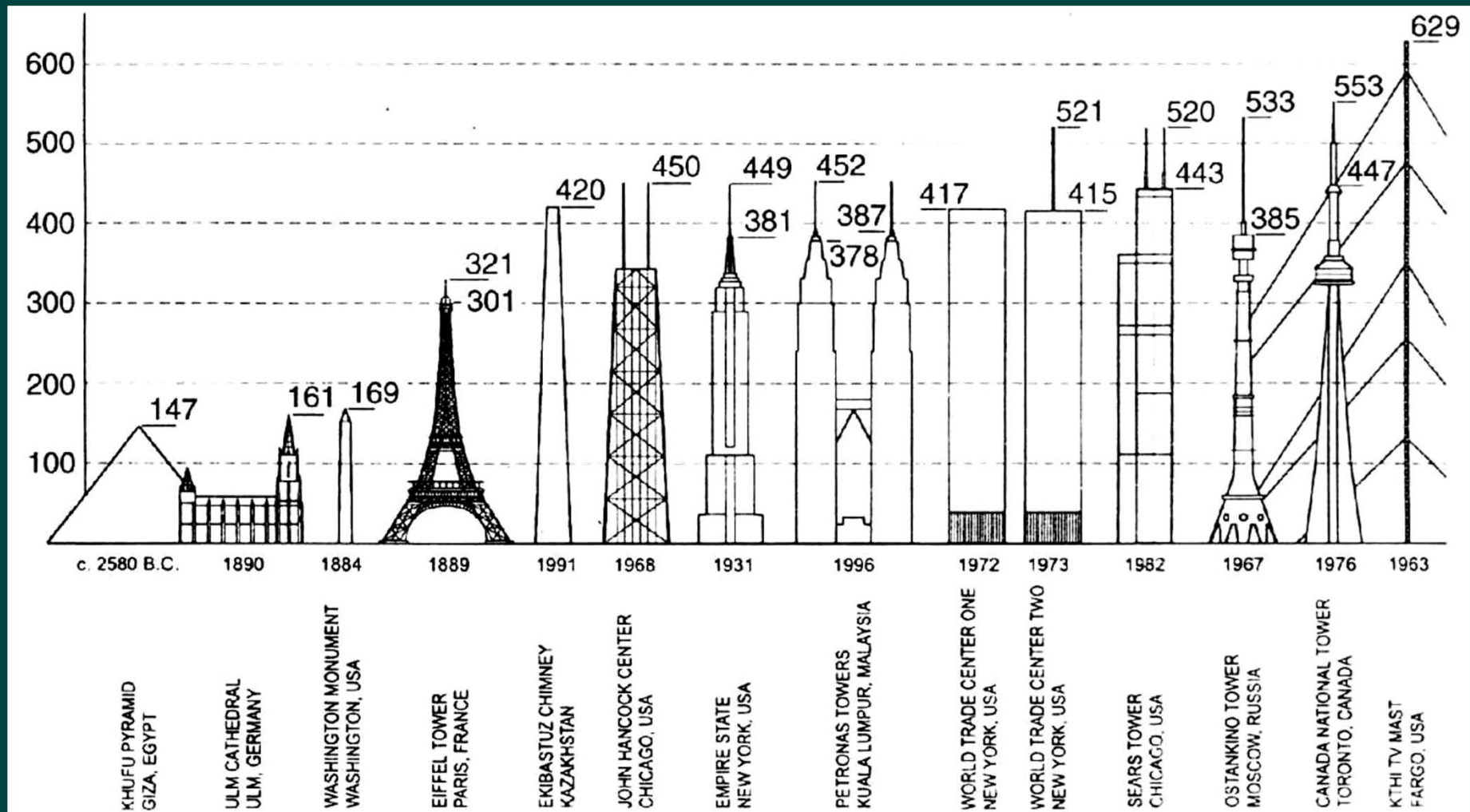
- prostorna stabilnost i princip minimalne konstrukcije
- “prave” tensegrity konstrukcije dosežu visine i do 30 m
- začetnik arhitekt - Buckminster-Fuller (1895-1983)



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

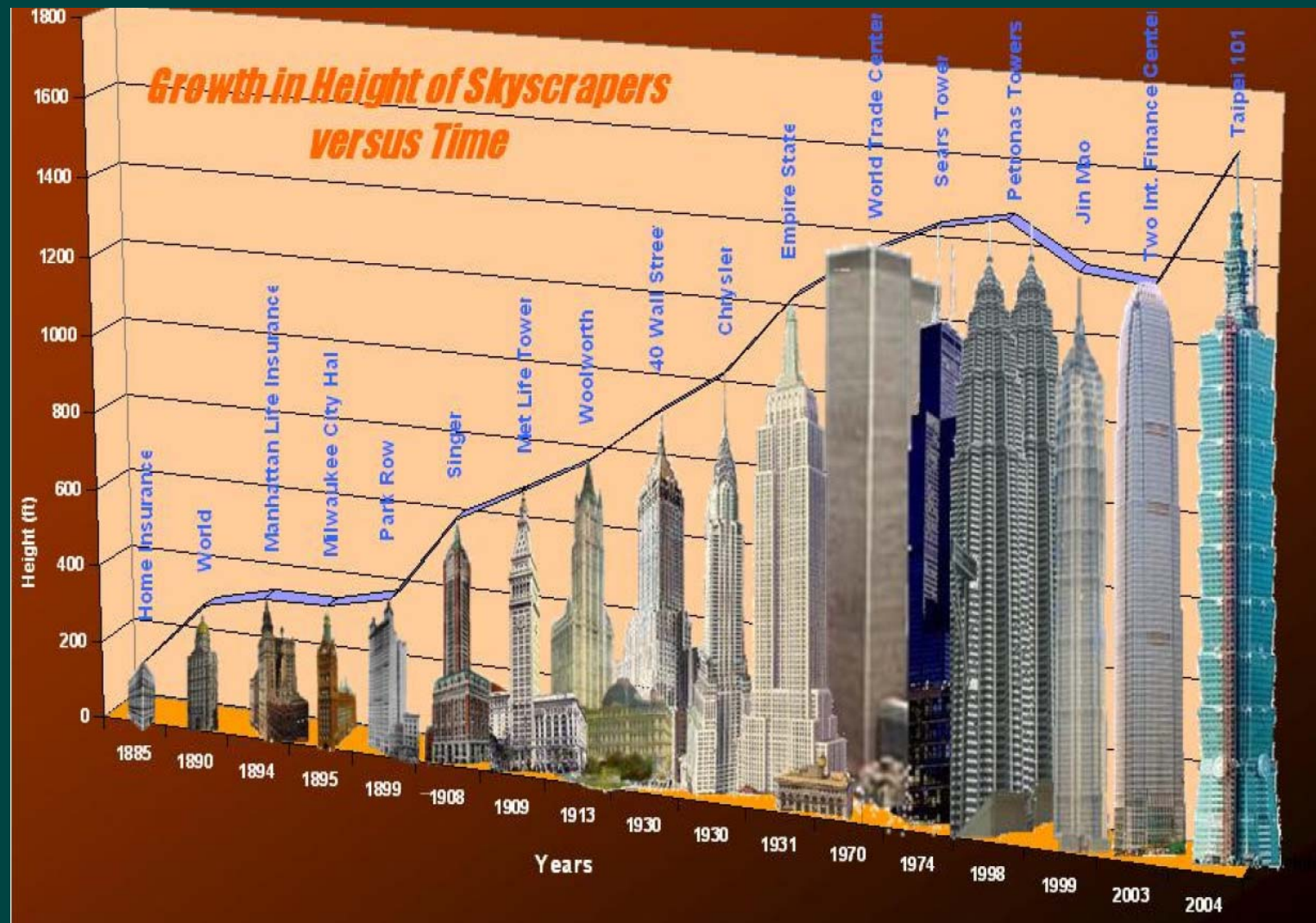
- natjecanje u izgradnji velikih i visokih građevina staro je kao i civilizacija



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

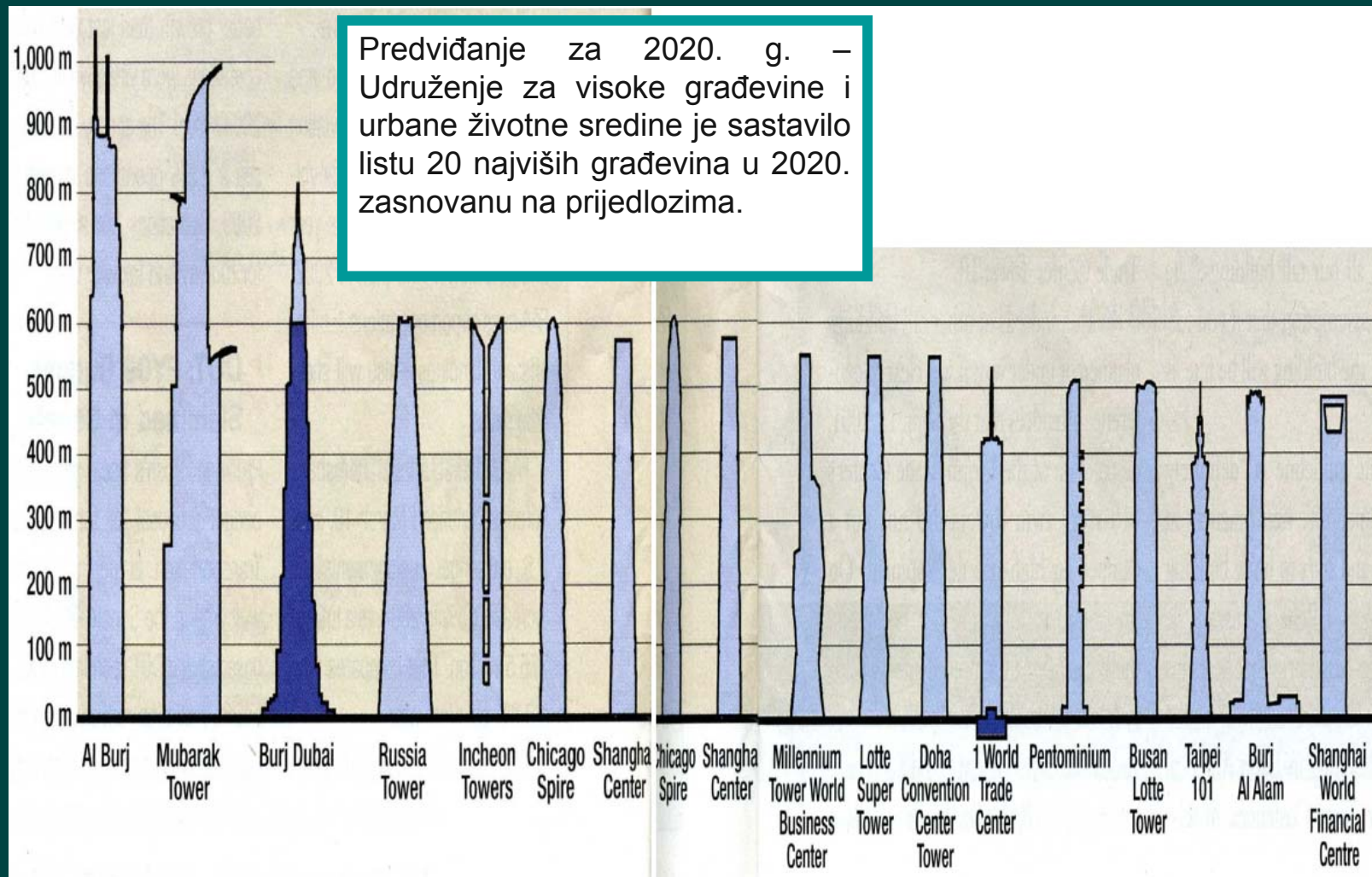
- Rast visokih zgrada od 1885 do današnjih dana



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- Prikaz planiranih visokih građevina i onih u fazi projektiranja nasuprot najvišim postojećim građevinama.



UVOD

POVIJEST I KRONOLOGIJA VISOKIH GRAĐEVINA

- Što je visoka građevina danas? Za građevinske inženjere visoka građevina je ona građevina, kod koje su dominantna djelovanja bočne sile od vjetrova i potresa.
- Pri definiranju rekordnih visina valja odabrati određeni kriterij, npr. antena na neboderima nije uključena.
- Najviše građevine danas mjereno do najviše točke na građevini:

- | | | |
|-----|--|--------|
| 1. | <i>Burj Khalifa, (2010), Dubai, UAE,</i> | H=828m |
| 2. | <i>Tokyo Sky tree (2012), Japan</i> | H=634m |
| 3. | <i>Shangai Tower (2015), Kina</i> | H=632m |
| 4. | <i>KVLY-TV mast (1963) Blanchard, North Dakota, USA,</i> | H=629m |
| 5. | <i>KXJB-TV mast (1998) Galesburg, North Dakota, USA,</i> | H=629m |
| 6. | <i>KXTV/KOVR mast (2000) Walnut Grove, California, USA,</i> | H=625m |
| 7. | <i>Guangzhou TV & Sightseeing Tower (2009), Guangzhou, Kina,</i> | H=610m |
| 8. | <i>Petronius Platform (2000), Meksički zaljev,</i> | H=610m |
| 9. | <i>Baldete Platform (1998), Meksički zaljev,</i> | H=580m |
| 10. | <i>CN Tower (1976) Toronto, Kanada,</i> | H=553m |
| 11. | <i>Ostankino Tower (1967) Moskva, Rusija,</i> | H=540m |
| 12. | <i>Bullwinkle Platform (1989), Meksički zaljev,</i> | H=529m |

UVOD

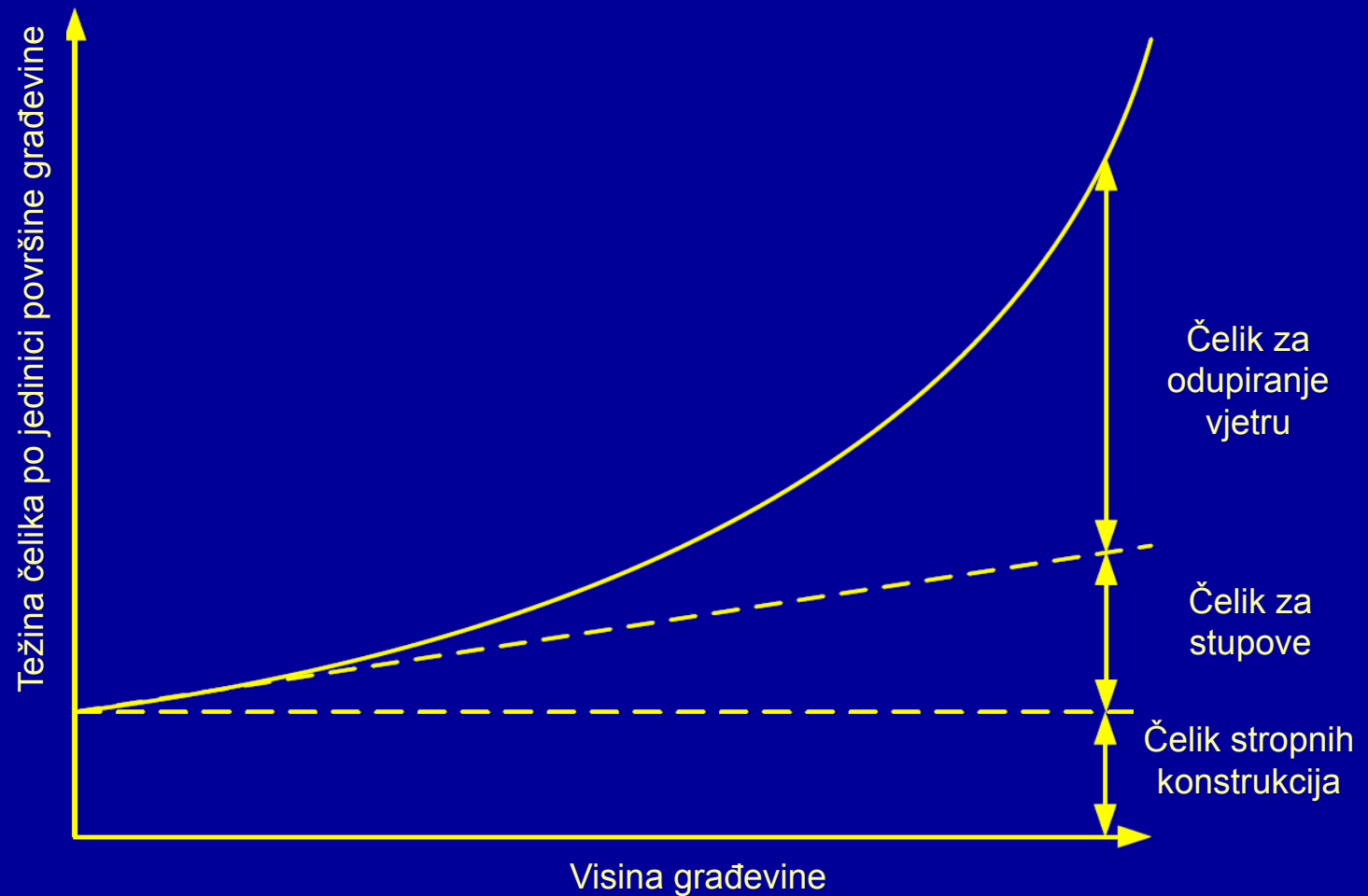
NOSIVI ELEMENTI ZA OSNOVNA OPTEREĆENJA

- Dva osnovna nosiva elementa za vertikalna opterećenja kod visokih građevina su stupovi i zidovi.
- Zidovi mogu djelovati
 - zasebno kao posmični zidovi, ili
 - kao scijeljene posmične jezgre oko stubišta ili okna dizala.
- Stupovi će biti postavljeni
 - pod nepoduprte dijelove građevine za prijenos opterećenja od vlastite težine,
 - a kod nekih tipova konstrukcija se koriste i za prijenos poprečnih opterećenja (vjetra i potresa).
- Budući da je opterećenje od vlastite težine na pojedinim katovima približno slično,
 težina stropne konstrukcije pojedine etaže po jedinici površine je konstantna, bez obzira na visinu građevine.
- Budući da se opterećenje na stup povećava sa brojem katova iznad njega,
 težina stupova po jedinici površine se linearno povećava sa povećanjem visine građevine, od vrha prema nižim katovima.
- **Momenti savijanja uzrokovani poprečnim opterećenjima su**
 produkt opterećenja sa kvadratom visine građevine, i postaju sve značajniji s povećanjem visine.

UVOD

NOSIVI ELEMENTI ZA OSNOVNA OPTEREĆENJA

Tipičan utrošak čelika u odnosu na visinu građevine



UVOD

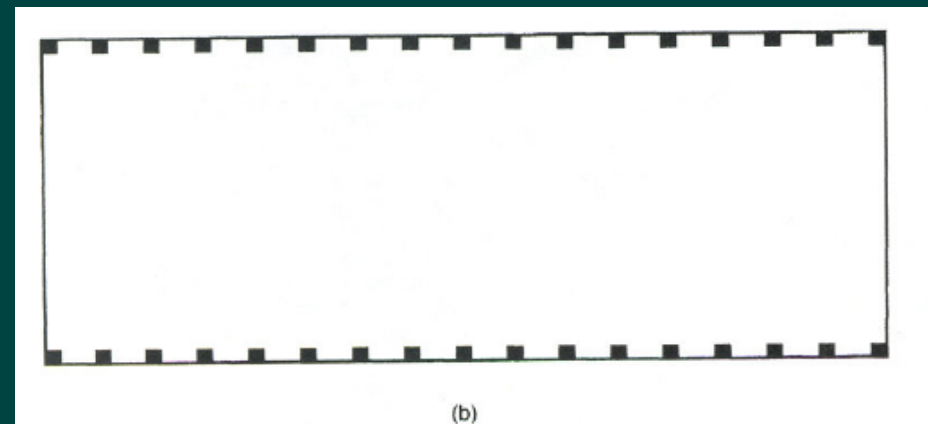
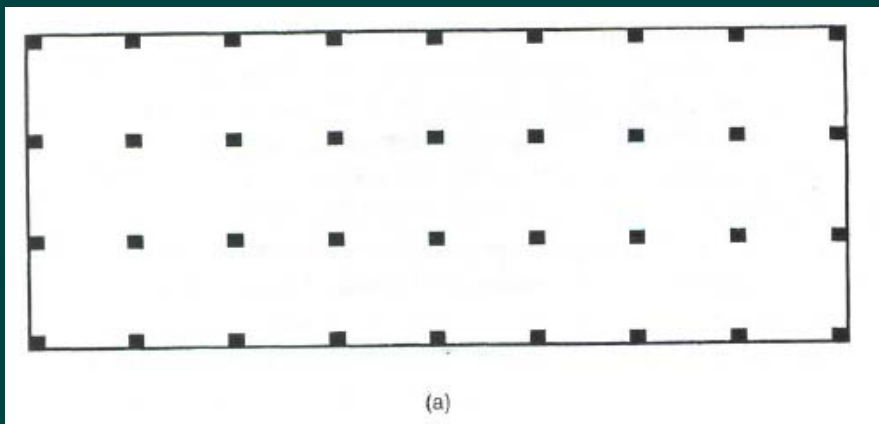
MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

- idealno bi bilo kada bi konstruktor sam mogao odabrati najučinkovitiji sustav za preuzimanje vertikalnih i horizontalnih sila (u pravilu: vjetar i potres)
- međutim, idealna konstrukcijska rješenja rijetko se primjenjuju u praksi jer konstrukter mora udovoljiti slijedećim ograničenjima na “idealnu konstrukciju”
 - planiranje prostora unutar konstrukcije od strane arhitekta
 - odabrani materijali
 - metode građenja uobičajene za određeno područje
 - odabir vanjske obloge i dekoracije od strane arhitekta
 - ograničenja lokacije
 - položaj instalacijskih sustava
 - veličina horizontalnih opterećenja
 - proporcije i visina konstrukcije definirani od investitora ili arhitekta

UVOD

MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

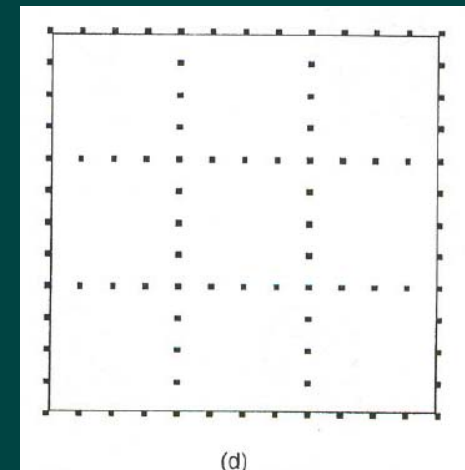
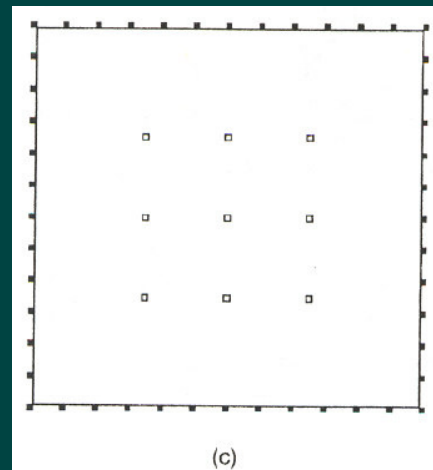
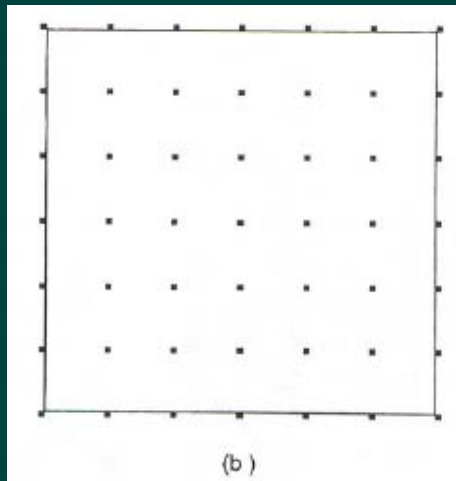
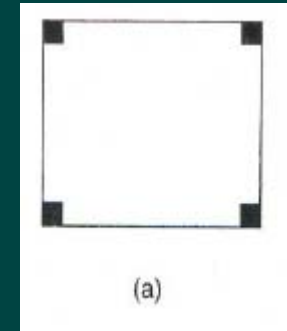
- Pojednostavnjeno, visoka građevina djeluje kao konzola sa temeljima upetim u tlo.
- Prema tom modelu očito je da
 - tipični presjek visoke građevine prikazan na slici (a) sa stupovima smještenim po rubovima i unutar tlocrtnih kontura,
 - nije jednako krut kao i građevina kod koje su svi stupovi smješteni 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)**
 - BRI predstavlja ukupni moment inercije svih stupova u odnosu na središnju os



UVOD

MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

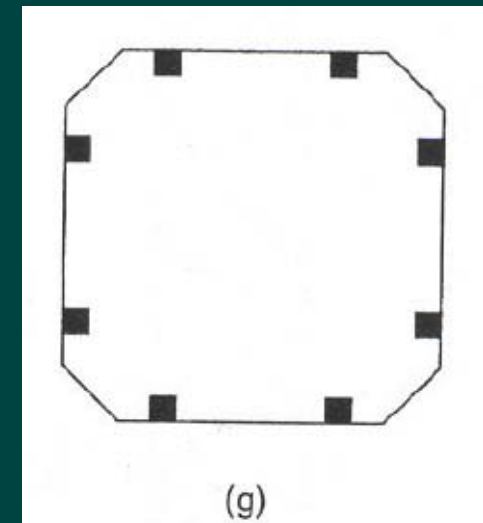
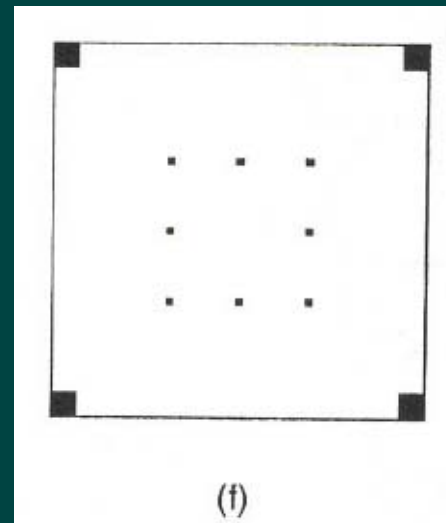
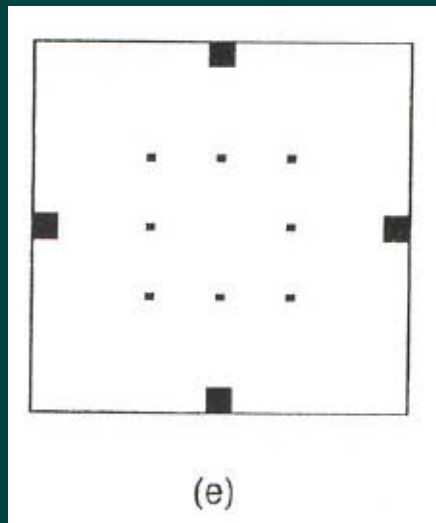
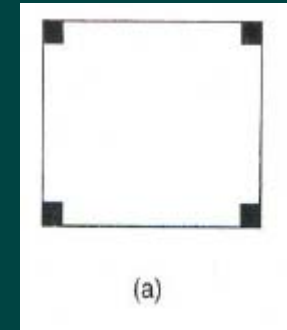
- kako bi se mogla uspoređivati učinkovitost na savijanje za različite tlocrtne rasporede, najveći index $BRI = 100$ dodjeljen je za raspored prikazan na slici (a) – kvadratni oblik sa stupovima samo u kutevima kvadrata
- Empire State Building se odupire horizontalnom opterećenju pomoću svih stupova – rubnih i unutrašnjih, čiji je raspored prikazan na slici
 - (b) BRI iznosi 33, što znači da je učinkovitost konstrukcije 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 (c)
 - Sears u Chicagu, sastavljen od 9 cijevi (d)



UVOD

MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

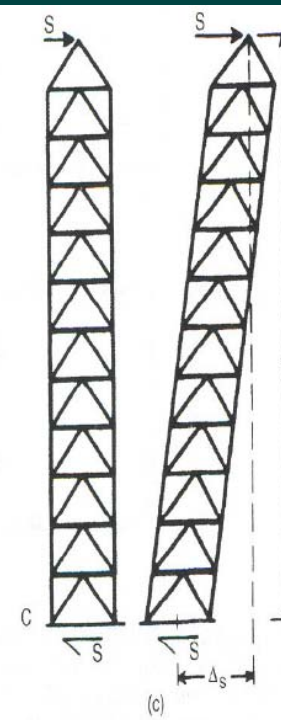
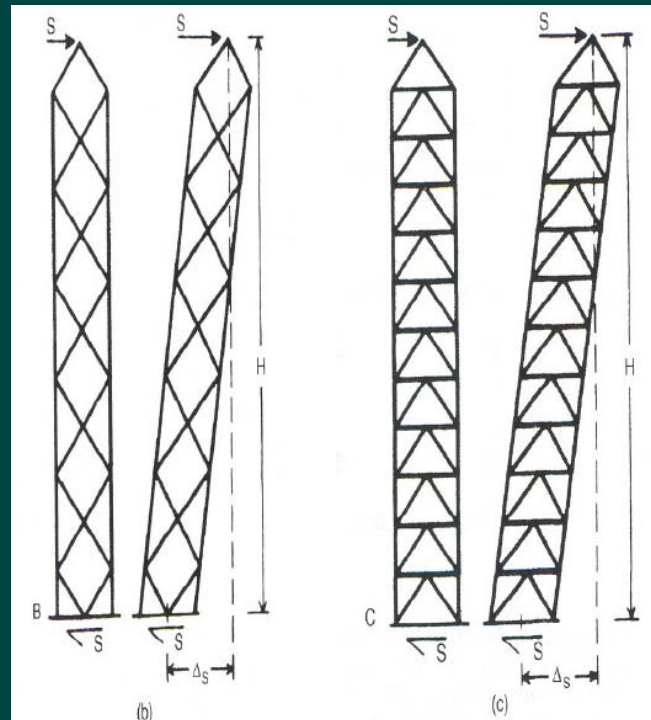
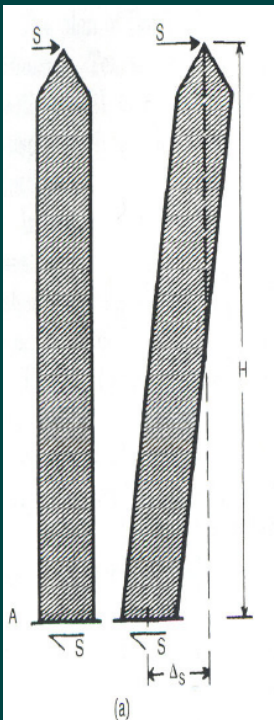
- kako bi se mogla uspoređivati učinkovitost na savijanje za različite tlocrtne rasporede, najveći index BRI = 100 dodjeljen je za raspored prikazan na slici (a) – kvadratni oblik sa stupovima samo u kutevima kvadrata
 - Citicorp tower prikazan na slici (e) nema stupove smještene u kuteve, tako da mu je BRI pao na 31%,
 - da su stupovi smješteni u kuteve (f) BRI bi bio 56%
 - Bank of South West Tower u Houstonu prikazan na slici (g) ima BRI = 63%



UVOD

MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

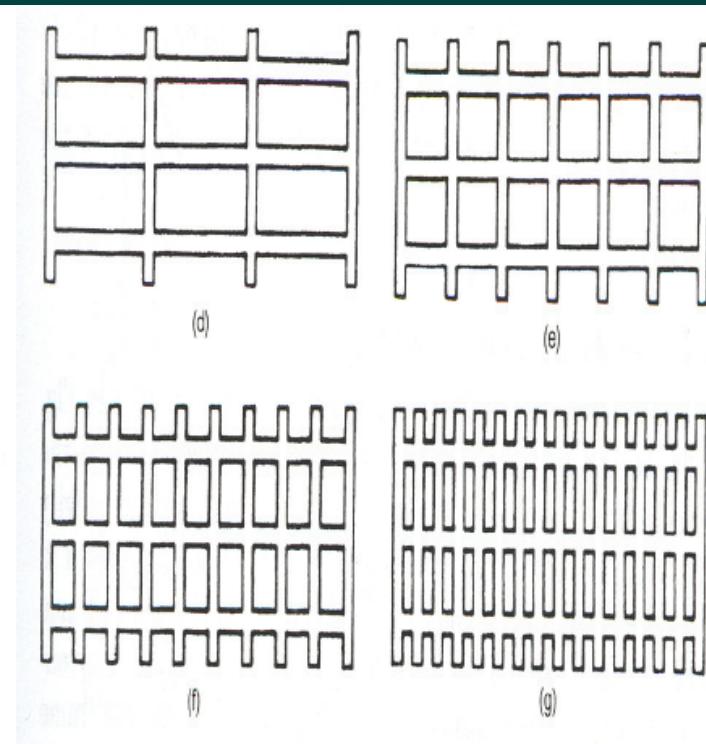
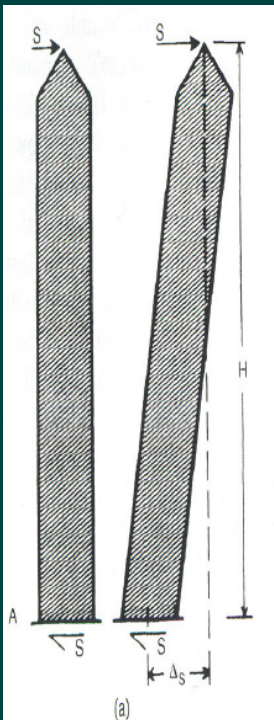
- stupovi visoke građevine moraju se ponašati kao dijelovi cjelokupnog sustava formirajući djelotvoran posmično kruti sustav, koji je predstavljen preko
 - Indeksa posmične krutosti (Shear Rigidity Index – SRI)
 - idealni SRI = 100 prikazan je na slici (a), a sastoji se samo od zidova, bez otvora
 - sustav prikazan na slici (b) sa dijagonalama pod kutem od 45° ima SRI = 62,5
 - spreg koji se uobičajeno koristi u praksi prikazan na slici (c), koji se sastoji od horizontalnih prečki i dijagonala ima SRI = 31.3



UVOD

MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

- stupovi visoke građevine moraju se ponašati kao dijelovi cjelokupnog sustava formirajući djelotvoran posmično kruti sustav, koji je predstavljen preko
 - **Indeksa posmične krutosti (Shear Rigidity Index – SRI)**
 - moderni posmični sustavi koji su sačinjeni od krutih okvira prikazani na slikama (d) do (g) 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

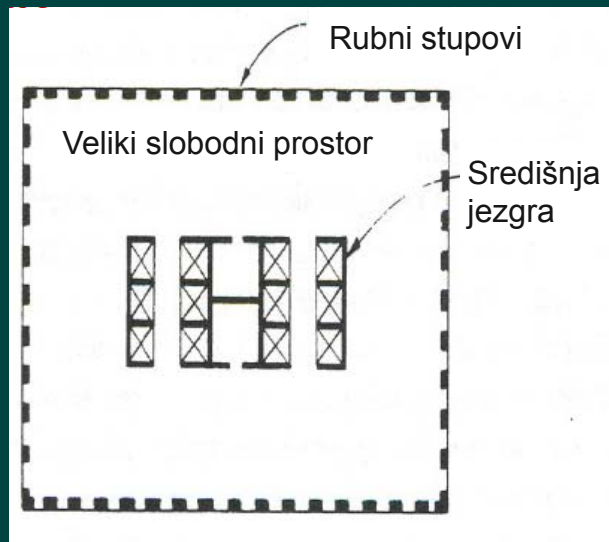


MJERE KONSTRUKCIJSKE UČINKOVITOSTI

FUNKCIJA PROSTORA NASPRAM KONSTRUKCIJSKOM SUSTAVU

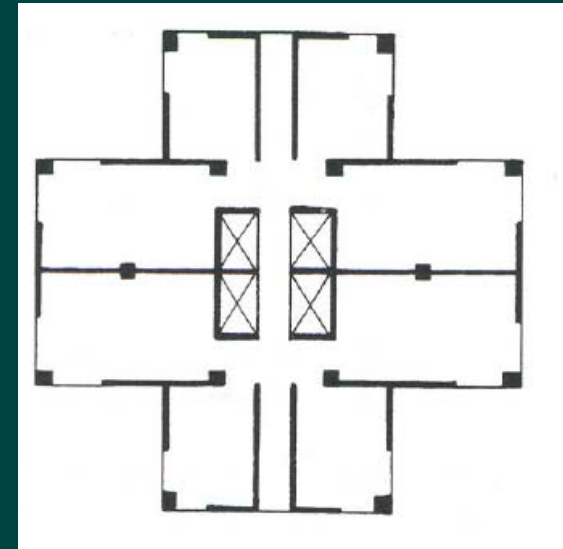
Uredski prostori

- 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
- tako da tipična visina kata za poslovne zgrade iznosi 3,5 m ili više
- visina 40-ero katne poslovne zgrade iznosi oko 140 m

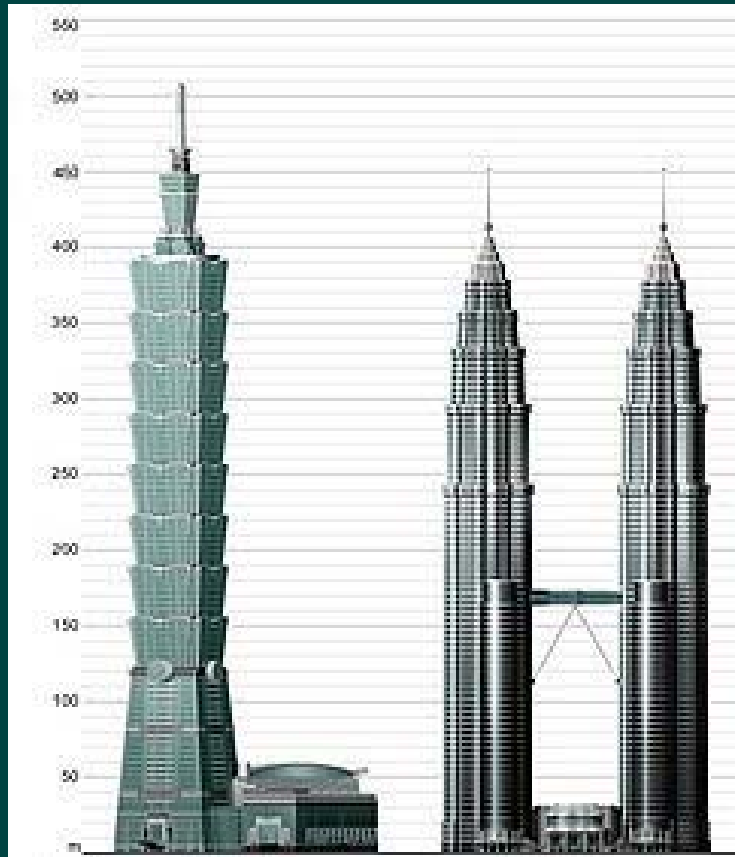


Stambeni prostori

- stambeni i hotelski prostori imaju jednaku 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA



Taipei 101,
Taiwan, 2004.,
101 kat, H= 509 m

Petronas Twin Towers,
Kuala Lumpur, 1998.,
88 katova, H= 452m

Bočna opterećenja od vjetrova i potresa
proizvode bočna ubrzanja.



Ljudi pri uporabi zgrade osjećaju
odgovarajuće vibracije.



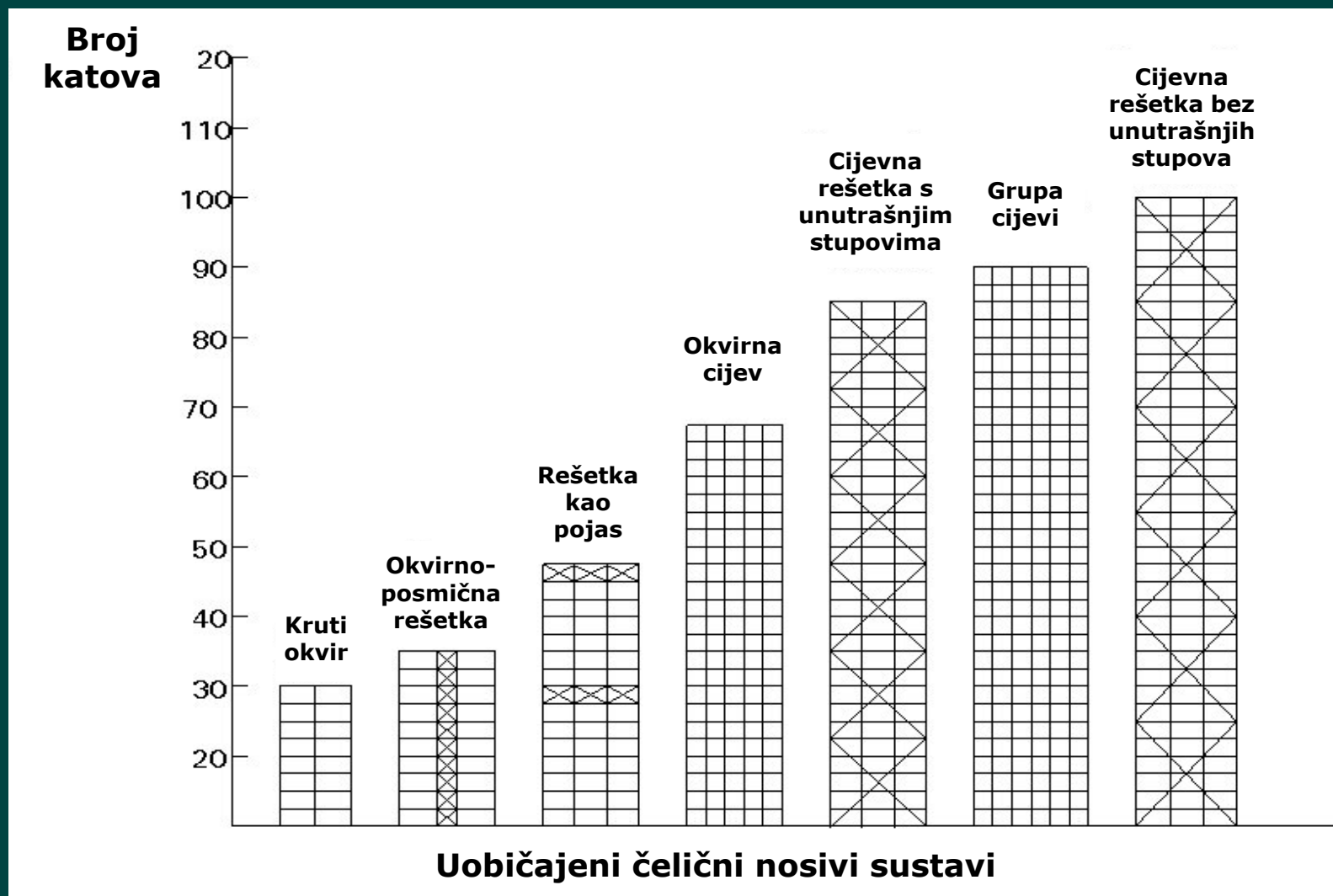
Krutost postaje dominantan faktor u
odnosu na čvrstoću u projektiranju
visokih zgrada.



GSU može postati mjerodavno u odnosu
na GSN.

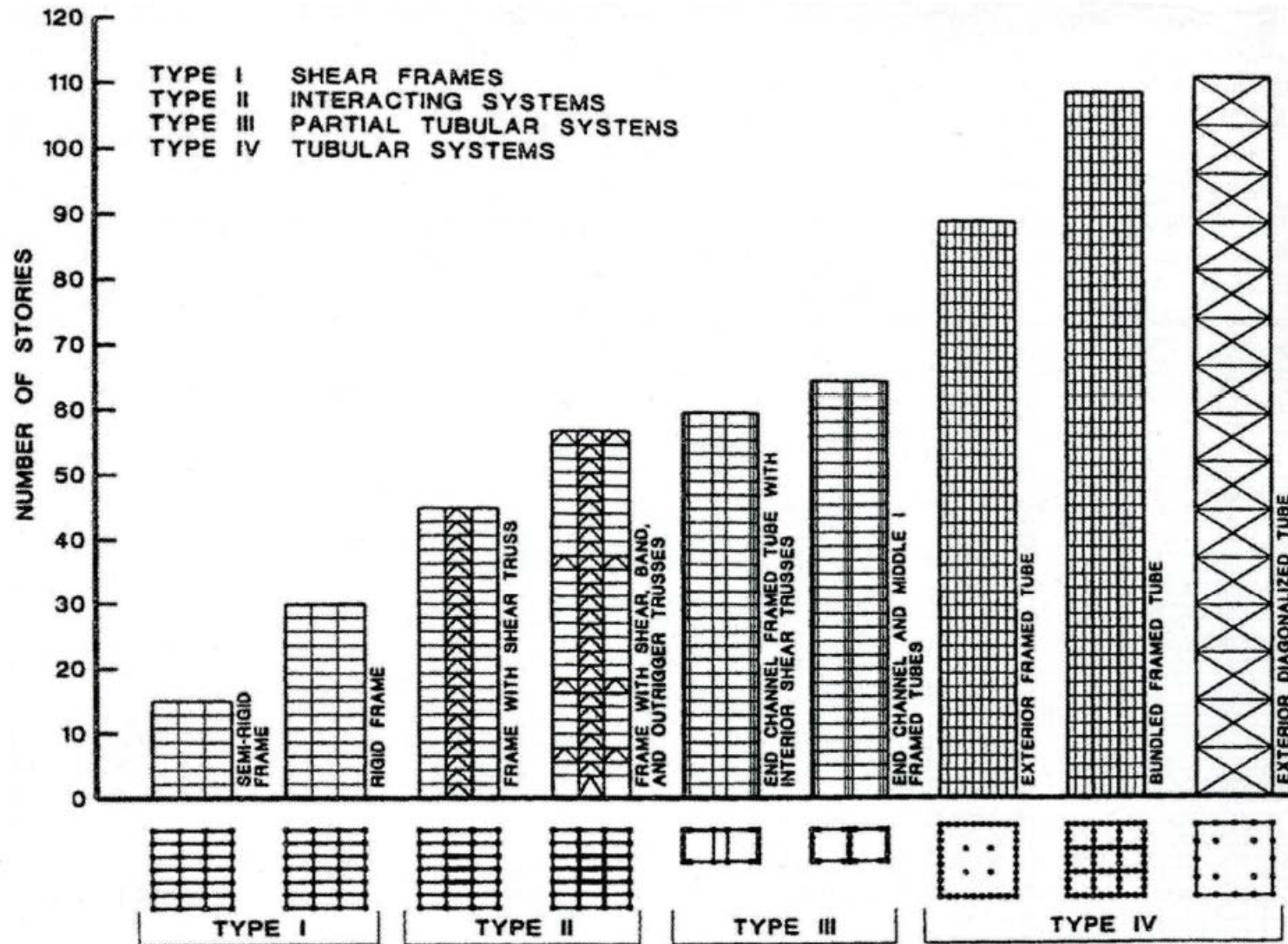
KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

TIPOVI KONSTRUKCIJE OVISNO O BROJU KATOVA



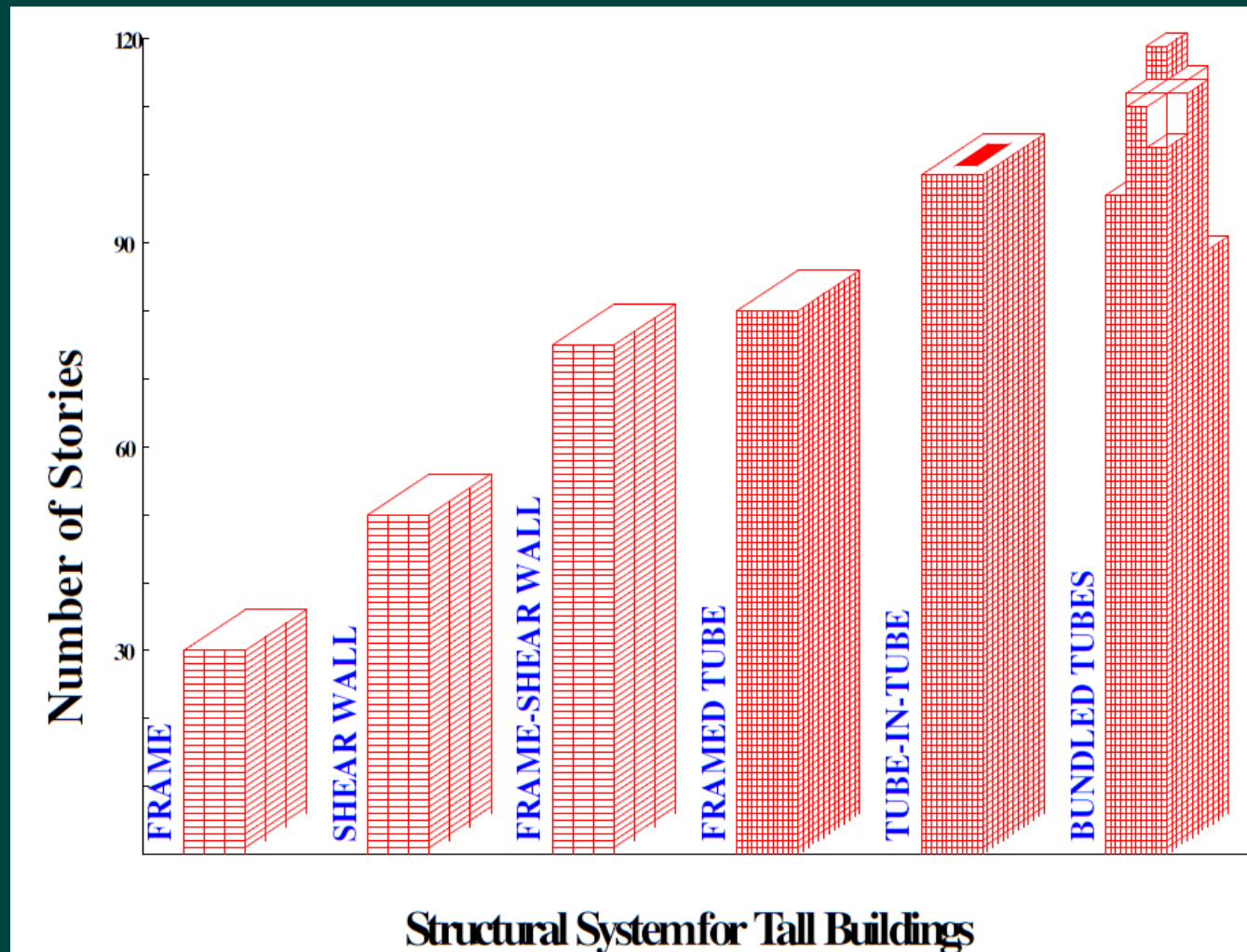
KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

TIPOVI KONSTRUKCIJE OVISNO O BROJU KATOVA



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

TIPOVI KONSTRUKCIJE OVISNO O BROJU KATOVA



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

4 OSNOVNA NOSIVA SUSTAVA

- ▣ Četiri osnovna nosiva sustava s različitim svojstvima otpornosti na bočna opterećenja i ovisno o tome djelotvornošću za različite visine:

1. NOSIVI ZIDOVI

- uslijed vlastite težine (obično betona) postaju neprikladni za zgrade visine preko 30 katova

2. NOSIVA JEZGRA

- obično je od betona pa je vlastita težina i ovdje ograničavajuća

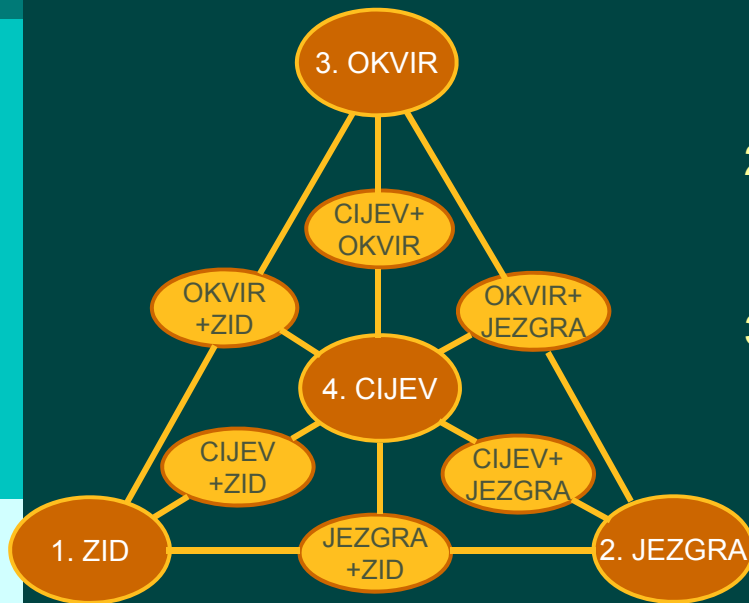
3. OKVIRNI SUSTAV

- djelotvornost ovisi o krutosti spojeva i količini spregova.
- Krutost može biti povećana uporabom jezgre, posmičnih zidova ili dijagonalnih spregova
- Više spregova uključenih u prostorni sustav značit će i povećanje ostvarive visine (do 60 katova)

4. CIJEVNI SUSTAV

- to je prostorni okvir s vertikalnim elementima na vanjskom opsegu.
- Ostvariva visina ovisi o vrsti i količini spregova u cijevi.
- Najdjelotvorniji sustav za visine preko 60 katova.

- ▣ Kombiniranjem 4 osnovna sustava dobiva se 6 dodatnih

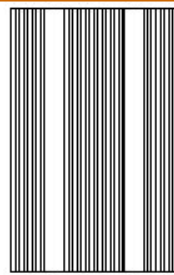
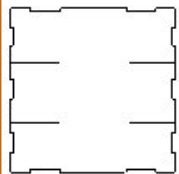


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

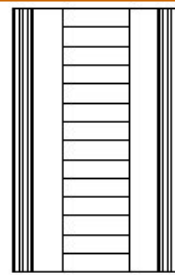
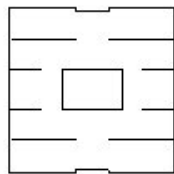
4 OSNOVNA NOSIVA SUSTAVA



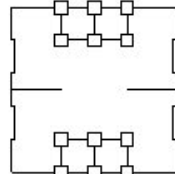
Nosivi zid



Nosivi zid s
jezgrom



Nosivi zid s
krutim okvirom

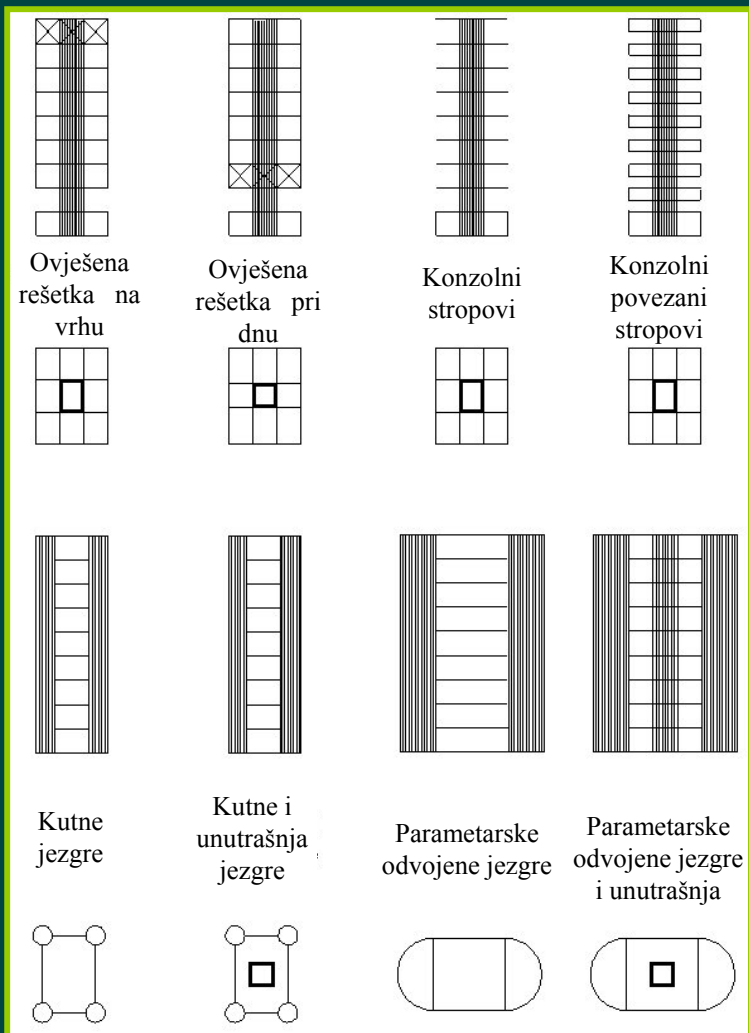


□ NOSIVI ZIDOVI

- Ravninski vertikalni elementi koji čine sve ili dio vanjskih zidova, a u mnogim slučajevima i unutrašnje zidove.
- Odupiru se vertikalnim i horizontalnim djelovanjima i uglavnom su od betona

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

4 OSNOVNA NOSIVA SUSTAVA

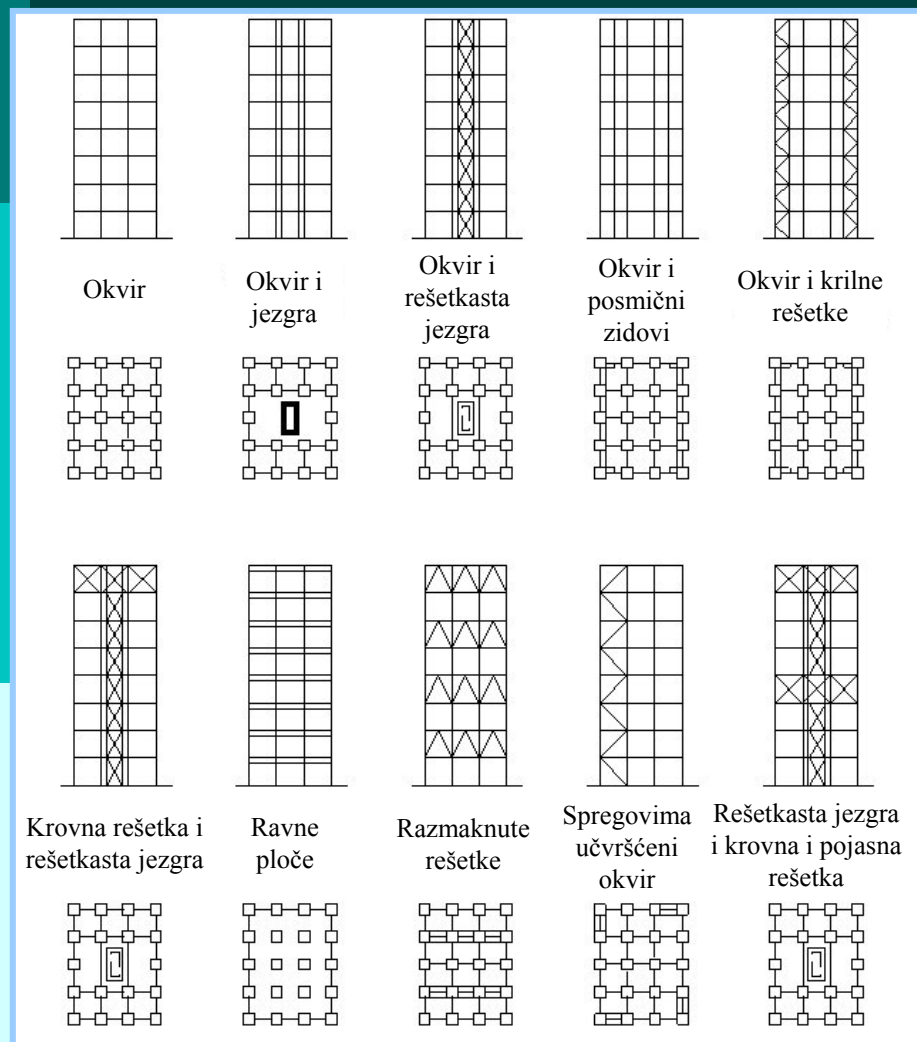


□ NOSIVA JEZGRA

- Ravninski vertikalni elementi postavljeni u zatvorenu formu
- U njoj se koncentriraju sustavi za vertikalni transport.
- Fleksibilnost u uporabi prostora izvan jezgre
- Jezgra može biti otporna i na vertikalna i na horizontalna djelovanja, najčešće od betona
- Središnja jezgra s konzolnim ili ovješnim stropovima ili razdvojene jezgre povezane stropovima

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

4 OSNOVNA NOSIVA SUSTAVA

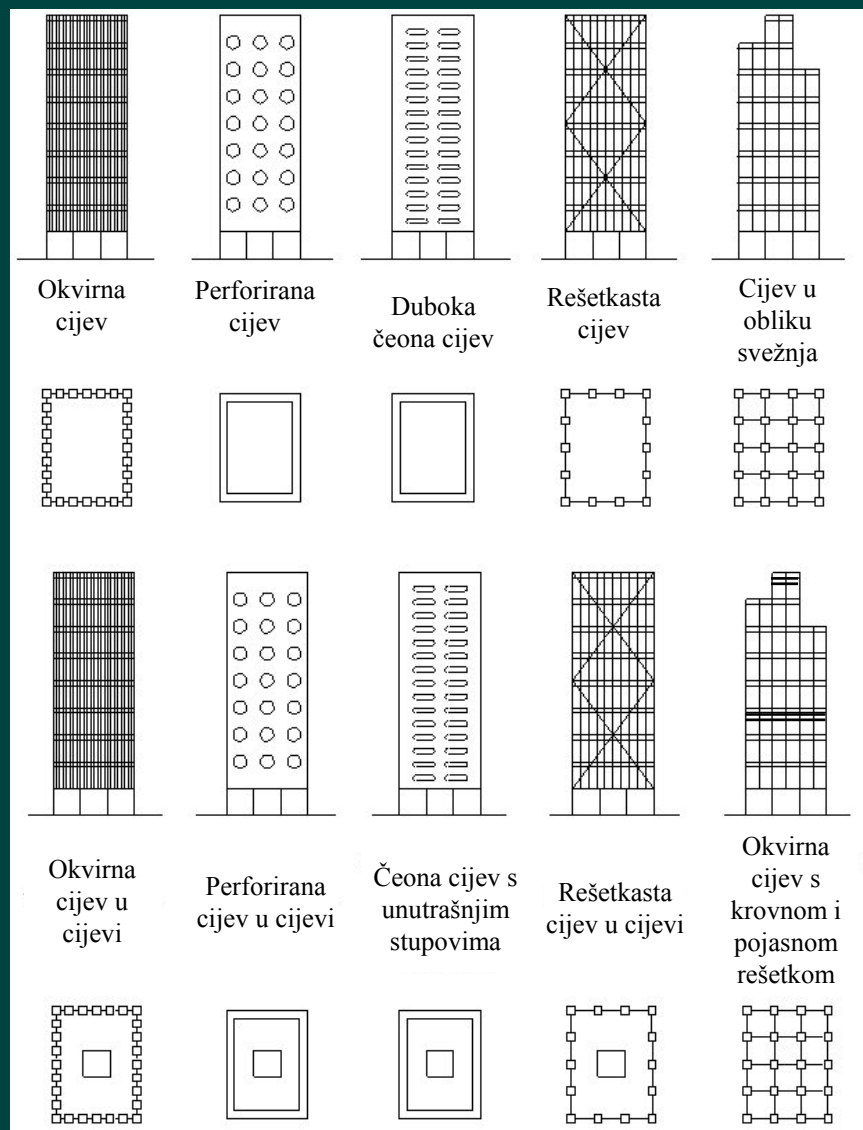


□ OKVIRNI SUSTAV

- Stupovi, grede i stropne ploče postavljene tako da pružaju otpornost i horizontalnim i vertikalnim djelovanjima
- Okvir je oblik koji je najprikladniji za prilagodbe u pogledu materijala i oblika kako bi pružio odgovarajuću otpornost djelovanju
- Čelični okviri kombiniraju se sa betonskim zidovima i jezgrama, ili sa čeličnim spregovima i horizontalnim rešetkama.

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

4 OSNOVNA NOSIVA SUSTAVA



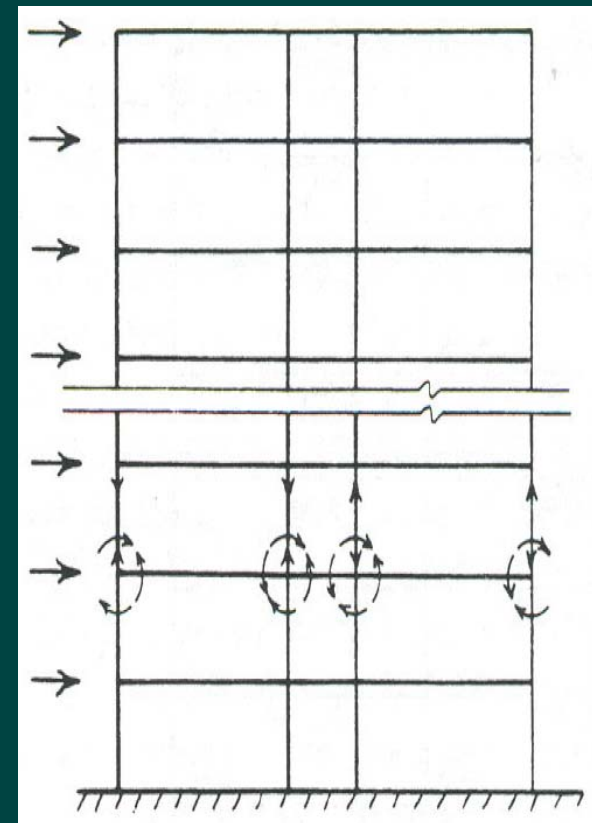
❑ CIJEVNI SUSTAV

- Blisko postavljeni vanjski elementi, projektirani tako da se bočnim djelovanjima odupiru kao cjelina, a ne kao posebni elementi.
- Moguća je upotreba i rešetkastih cijevi ili okvirnih cijevi.
- Cijev u cijevi dopušta više fleksibilnosti u uporabi unutrašnjeg prostora zbog toga što nema unutrašnjih stupova.

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

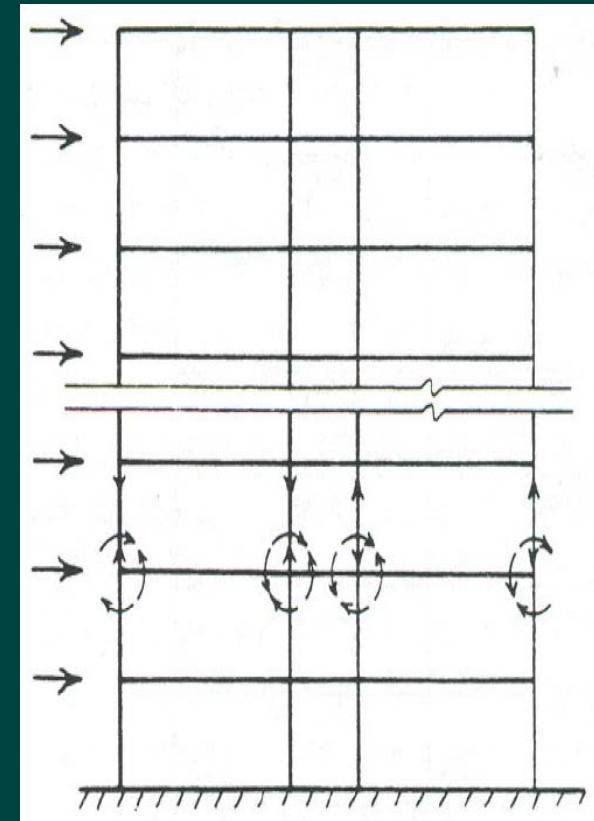
- ❑ kruti okviri su sustavi sačinjeni od greda i stupova povezanih krutim vezama
- ❑ horizontalna krutost ovisi o krutosti stupova, greda i njihovih međusobnih veza
- ❑ bitna prednost krutih okvira su veliki otvori koji ostavljaju mogućnost slobodnog planiranja prozora i vrata
- ❑ kruti okviri se uobičajeno 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

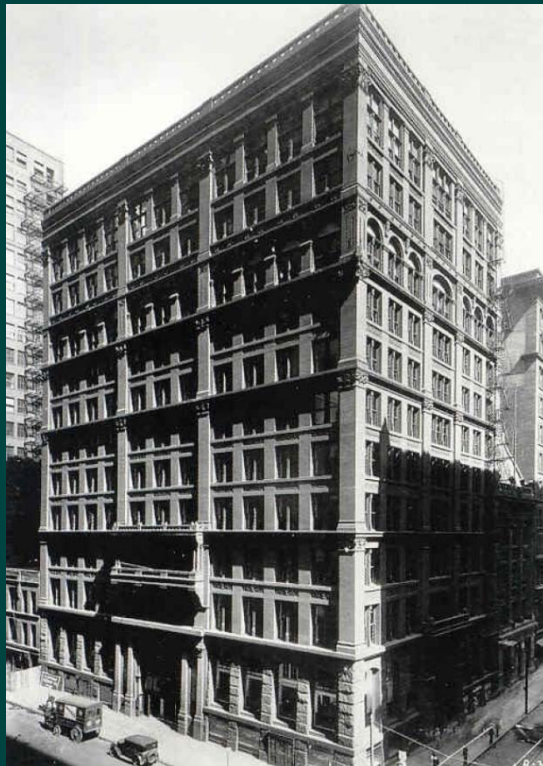
- ❑ kruti okviri idealni su za AB konstrukcije zbog inherentne (svojstvene) krutosti spojeva
- ❑ kod čeličnih okvira kruti spojevi (otporni na savijanje) povećavaju cijenu
- ❑ izmjere stupova i greda na bilo kojoj razini direktno ovise o veličini posmičnog (horizontalnog) opterećenja - tako da se povećavaju 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



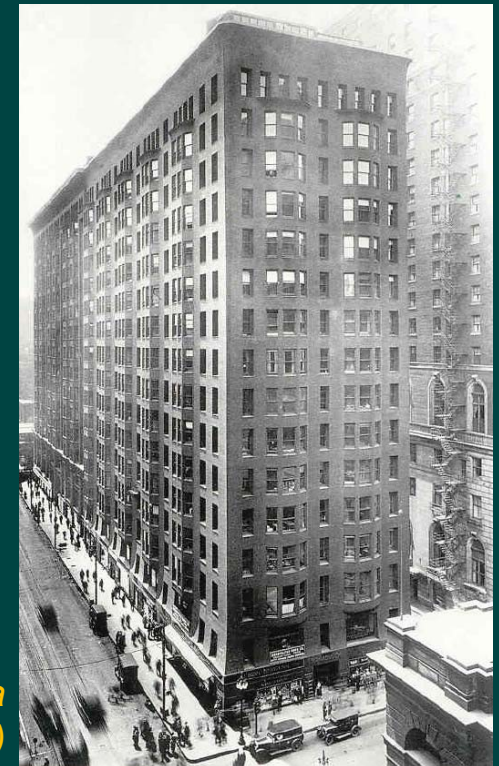
KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

- Home Insurance Building, Chicago (1885)
 - prva zgrada na svijetu sa *sustavom krutih čeličnih okvira*
 - 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



*Home Insurance Building
(1885)*



*“prava” masivna zgrada
Manadock Building (1891)*

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

- Woolworth Building, New York, (1913)
 - 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 vjetra

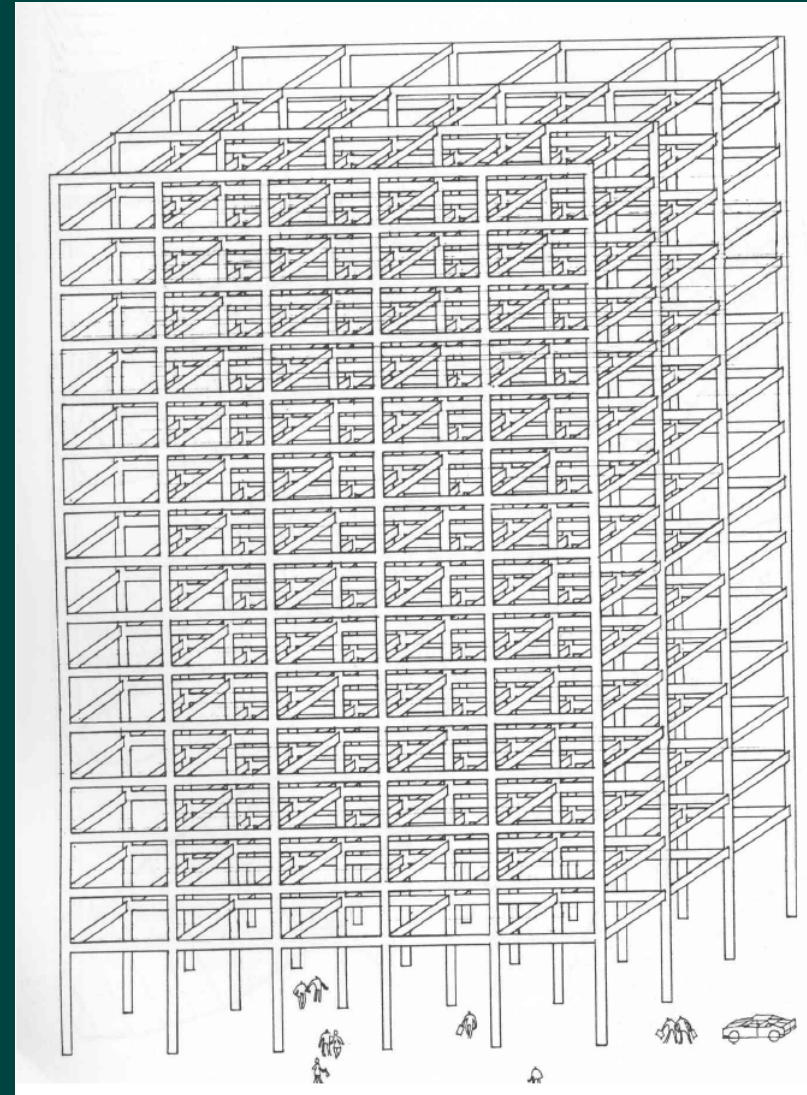


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

□ Tradicionalni kruti okviri

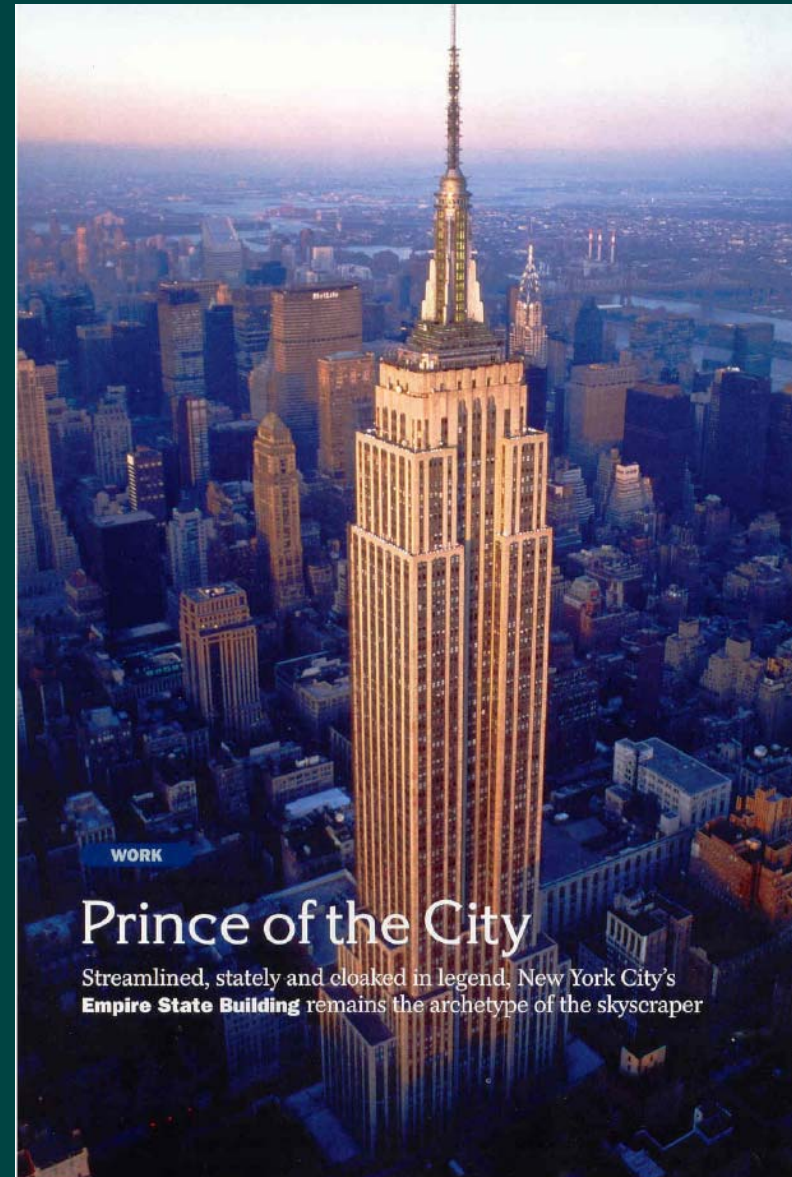
- kruti okvir bio je izvanredan napredak u konstrukterskom promišljanju, rođen 1885. uporabom čelika
- problem koji se javlja, kod tih sad već tradicionalnih konstrukcijskih sustava, je “gužva” koja se stvara posebno u području jezgre, gdje dizala, stubišta i instalacije onemogućuju ekonomično i estetsko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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KRUTI OKVIRI

- *Empire State Building, New York, (1931)*
 - također kruti okvir
 - sagrađena je 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
 - bila je predmetom nadmetanja između Waltera Chyslera (sagradio je Chrysler Building, 319 m) i Johna Jakoba u izgradnji najviše zgrade na svijetu
 - Betonski i čelični temelji se nalaze na dubini 17 m ispod razine tla, na stijeni ispod Manhattan-a
 - horizontalni pomak zgrade (drift) od djelovanja vjetra iznosi 50 cm
 - nakon uništenja WTC-a (411m) Empire State Building (381m) je ponovno postala najviša zgrada u New Yorku, sa vidikovcima na 86. i 102. katu
 - 2013 One World Trade Center ponovno obara rekord (417 m krov, s antenom 541 m)



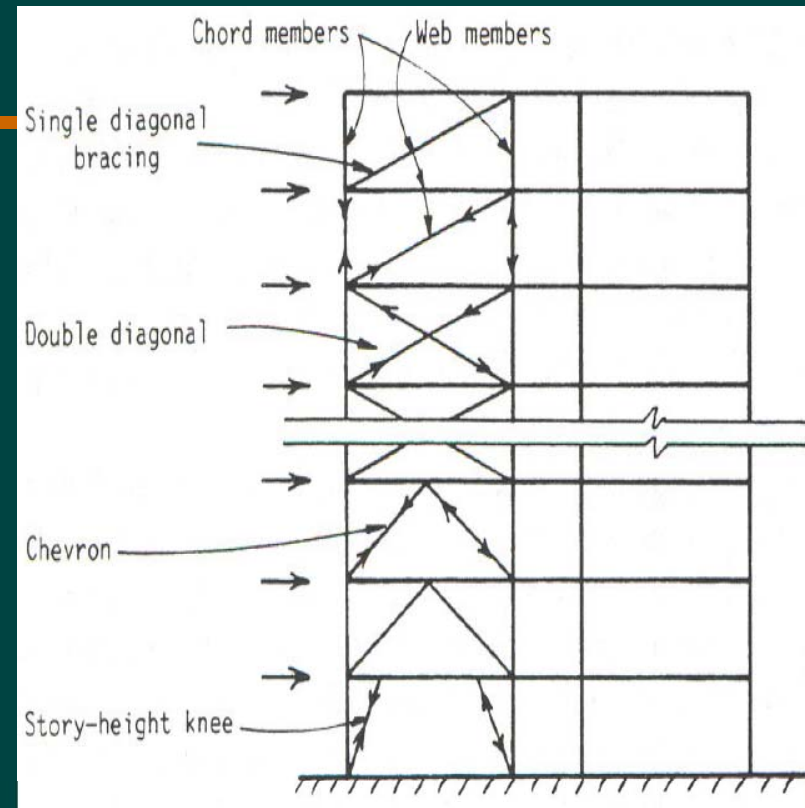
Prince of the City

Streamlined, stately and cloaked in legend, New York City's **Empire State Building** remains the archetype of the skyscraper

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI SA SPREGOVIMA

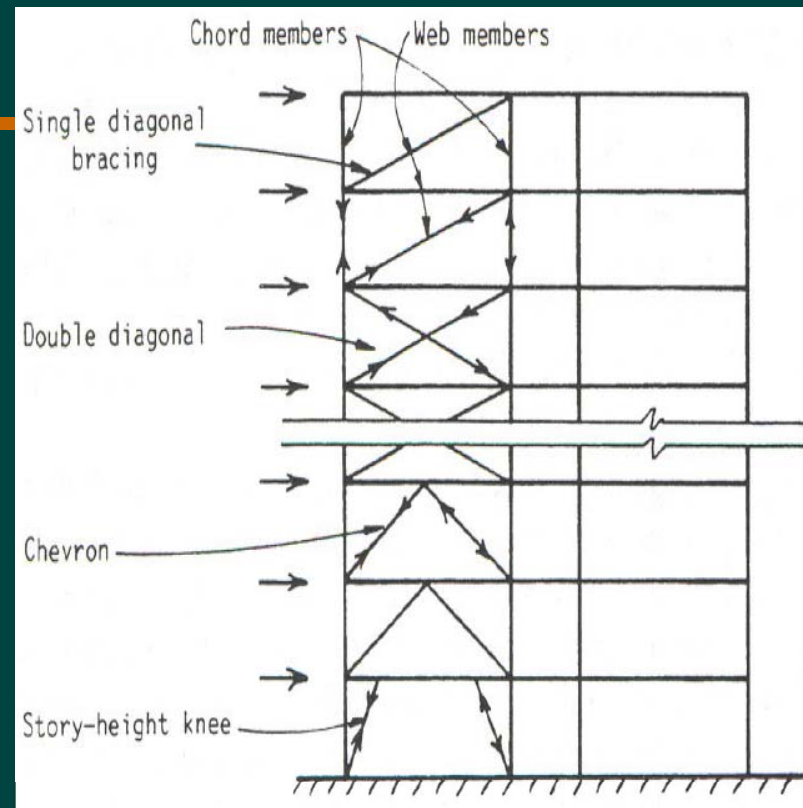
- otpornost na horizontalna djelovanja ostvarena je preko “hrptova” koje čine dijagonale spojene na grede
- tako se formiraju vertikalne rešetke, gdje stupovi djeluju kao pojasevi
- horizontalnom posmiku odupiru se horizontalne komponente elemenata sprega
- ovaj sustav je izuzetno ekonomičan i učinkovit za preuzimanje horizontalnih sila neovisno o visini zgrade, pa je prikladan i za najviše zgrade



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI SA SPREGOVIMA

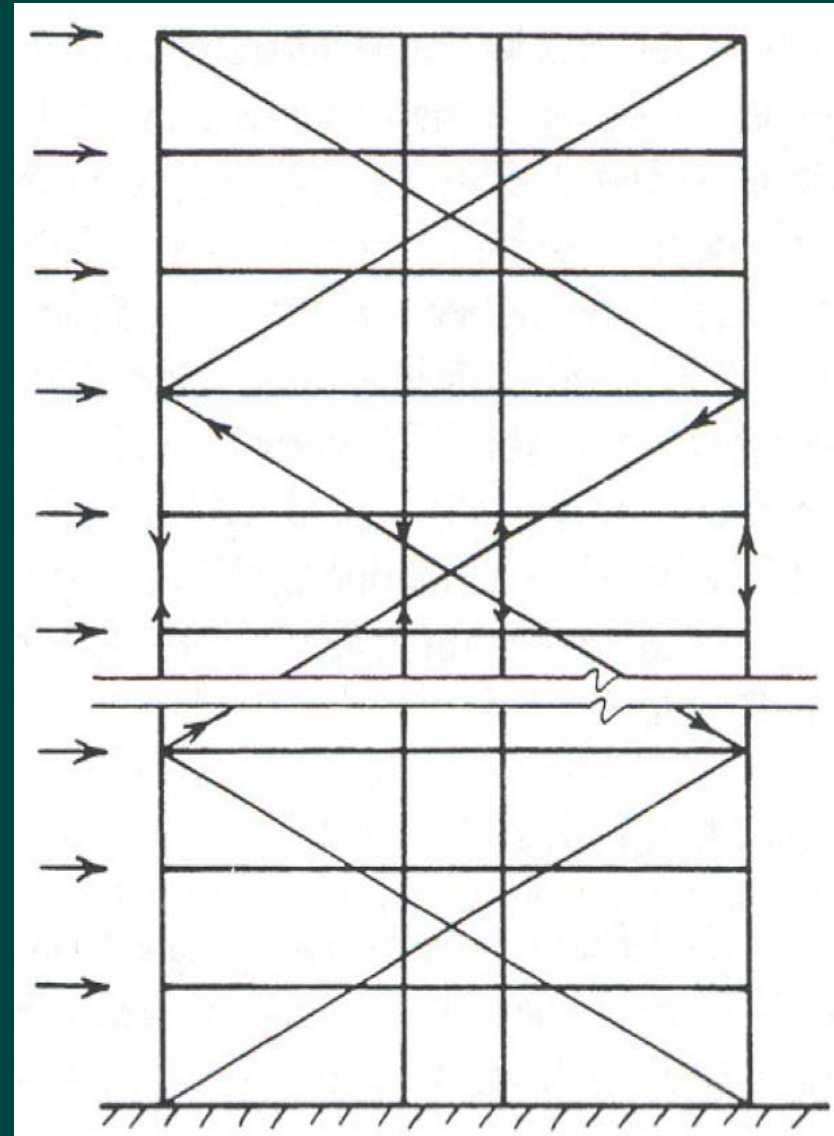
- još jedna prednost ovakvih trokutastih spregova je da grede sudjeluju vrlo malo u preuzimanju horizontalnog opterećenja, tako da stropna konstrukcija nije ovisna o visini zgrade
- dijagonalni spregovi ometaju unutarnje planiranje prostora (vrata, prozori)
- zato su uobičajeno smješteni oko dizala, stubišta i servisnih okana



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI SA SPREGOVIMA

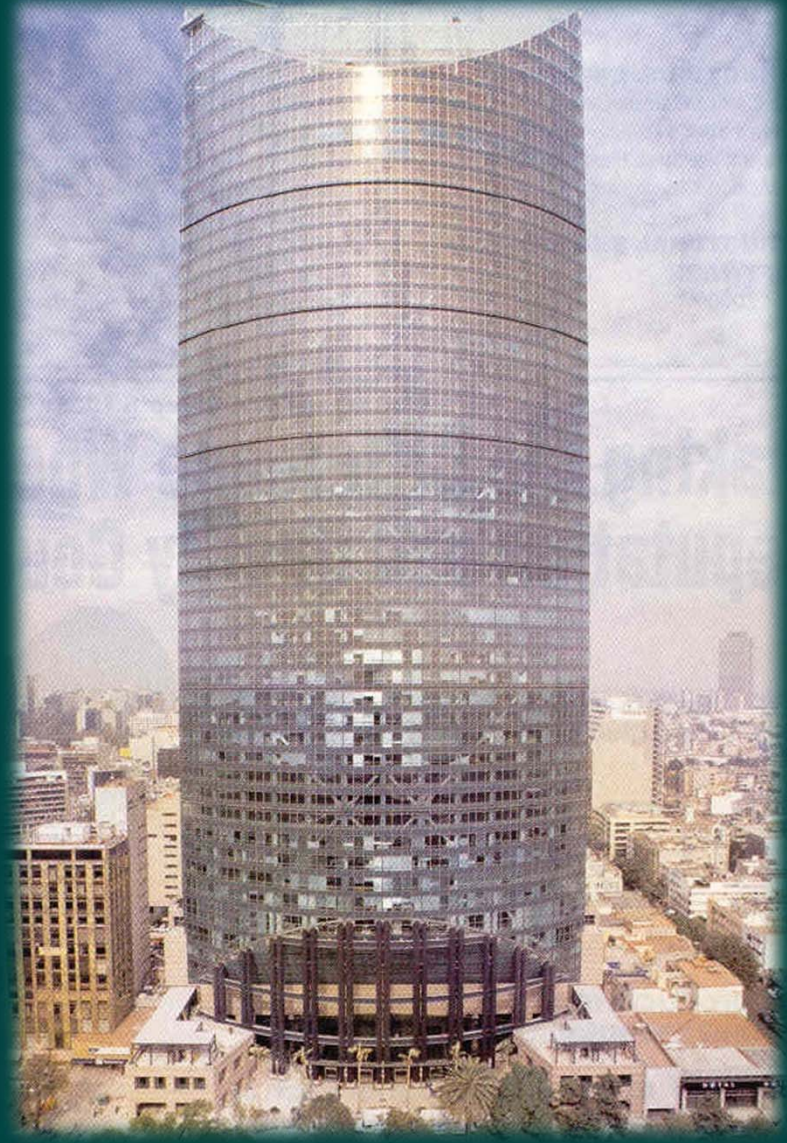
- U prošlosti su dijagonale bile raspoređene po katovima
- danas su sve češći sustavi sa dijagonalama koje se protežu preko više katova i više raspona



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI SA SPREGOVIMA

- Torre Mayor, Mexico City, (2004)
 - zgrada sa 57 katova visine 225 m
 - najviša zgrada u Južnoj Americi
 - spregovi su na tri mjesta, gdje skup dijagonala dijamantnog oblika povezuje super-X sustave

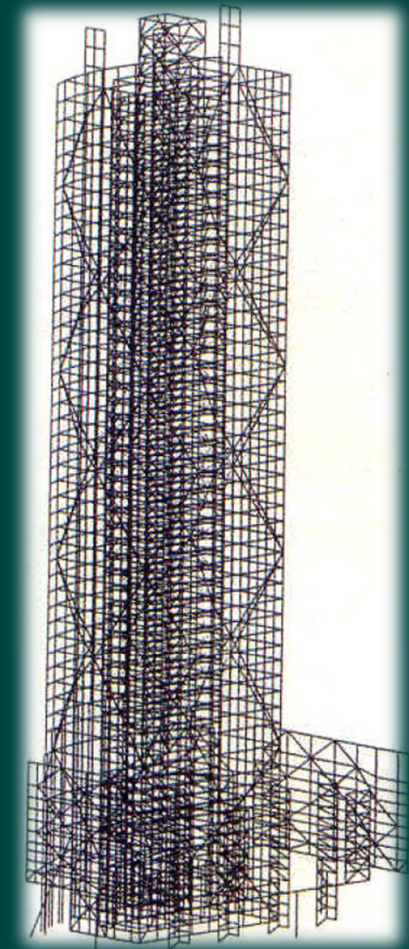


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI SA SPREGOVIMA

□ Torre Mayor, Mexico City, (2004)

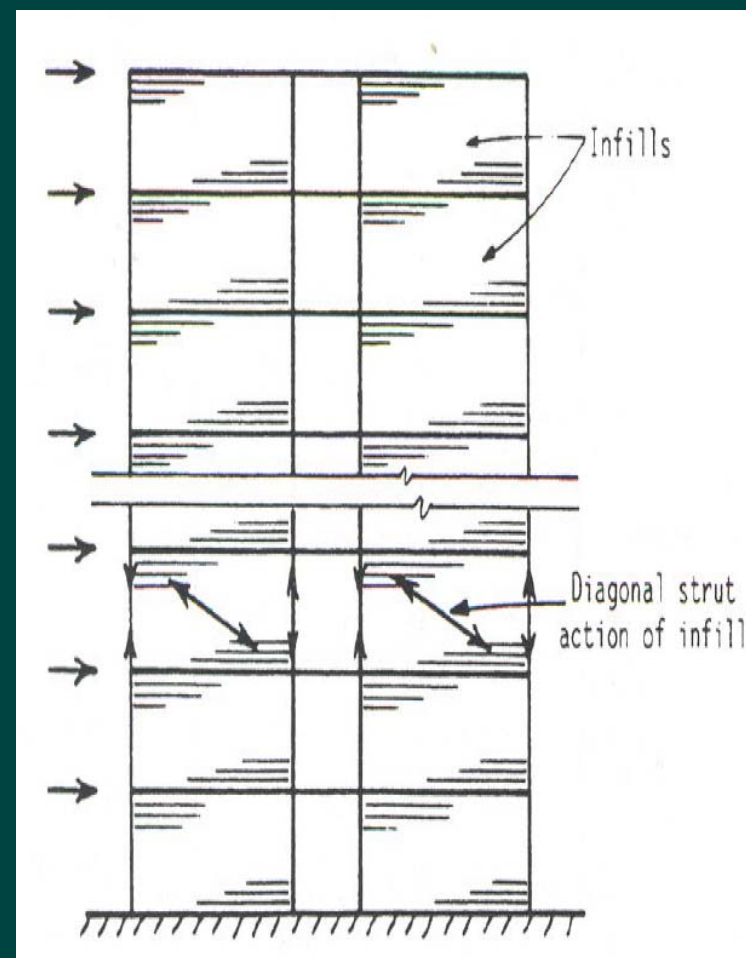
- prigušivači su postavljeni na južnoj i sjevernoj fasadi na mjestima tih dijamantnih spregova
- tako se povećava prigušenje konstrukcijskog sustava stvarajući "prigušene veze" (damped link) između super-X sustava
- dodatni prigušivači smanjuju međukatni pomak (sway interstory drift)
- zgrada je proračunata je na trodimenzionalnom numeričkom modelu koristeći programski paket SAP 2000



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRI S ISPUNOM

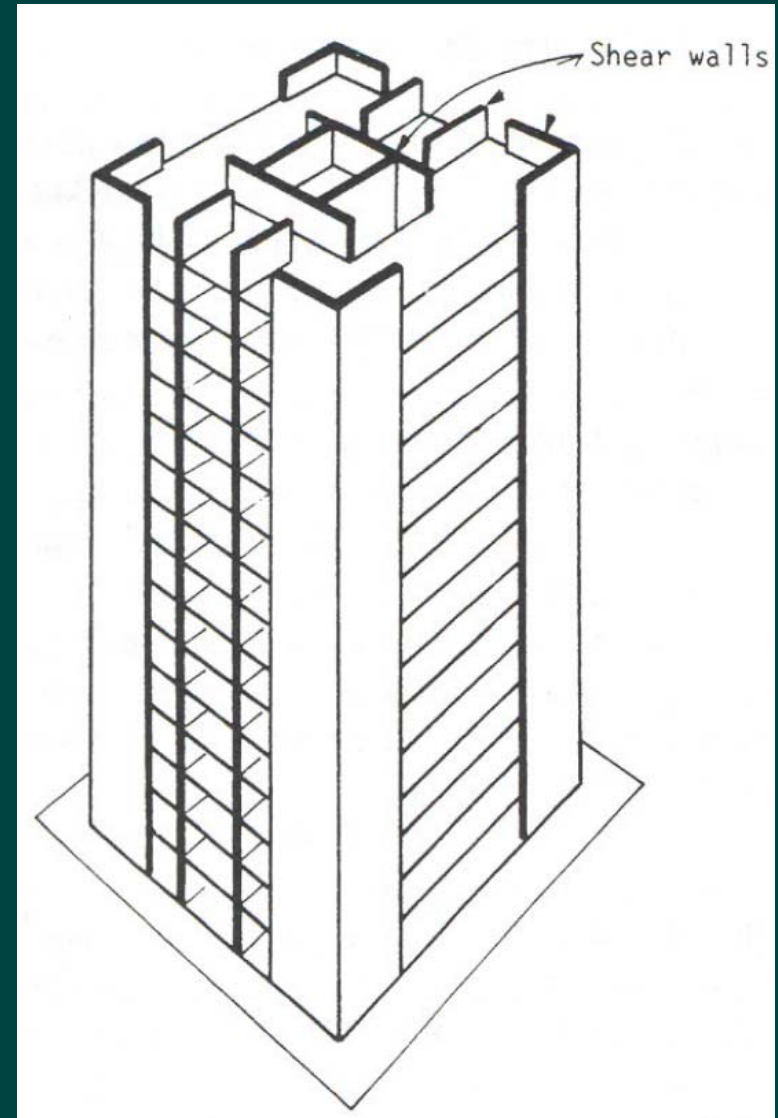
- statički sustav *okvira s ispunom* često se koristi u Europi za zgrade visoke do 30 katova
- osnovni armirano-betonski okvir, koji čine stupovi i grede, ispunjava se zidovima (panelima) od opeke ili betona izvedenog na licu mjesta
- za horizontalne napadne sile ispuna djeluje kao tlačna dijagonala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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

POSMIČNI ZIDOVI

- *posmični zidovi* od armiranog betona mogu poslužiti kao arhitektonske i konstrukcijske pregrade, koje preuzimaju vertikalna i bočna djelovanja
- njihova vrlo velika membranska 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) i
 - kao sklopovi van ravnine, obično oko liftova, stepenica i servisnih okana
- krući su od krutih okvira i ekonomični do visine od oko 55 katova
- ograničenja u planiranju posmičnih zidova čine ih pogodnim samo za hotele i zgrade za stanovanje



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

POSMIČNI ZIDOVI

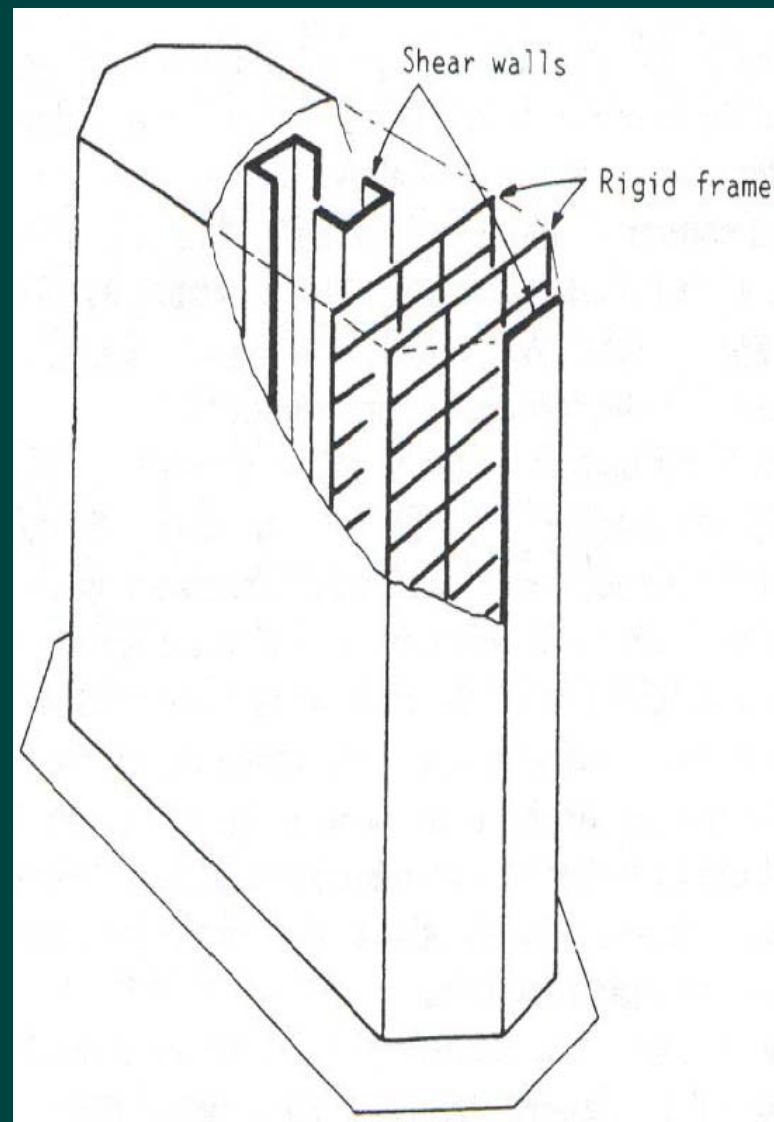
- ❑ stropne konstrukcije se ponavljaju, a kontinuirani vertikalni zidovi služe istovremeno za zvučnu izolaciju i zaštitu od požara između pojedinih prostora
- ❑ kad se posmični zidovi primjenjuju u kombinaciji s okvirima, oni praktično preuzimaju sva horizontalna djelovanja, tako da se okviri dimenzioniraju samo 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
- ❑ Tipična velika stambena zgrada u Miami-u, koju čine
 - jaki stupovi po obodu i
 - unutrašnji posmični zidovi,
 - horizontalno međusobno povezani prednapetim nosivim pločama



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

KONSTRUKCIJE OD ZIDOVA I OKVIRA

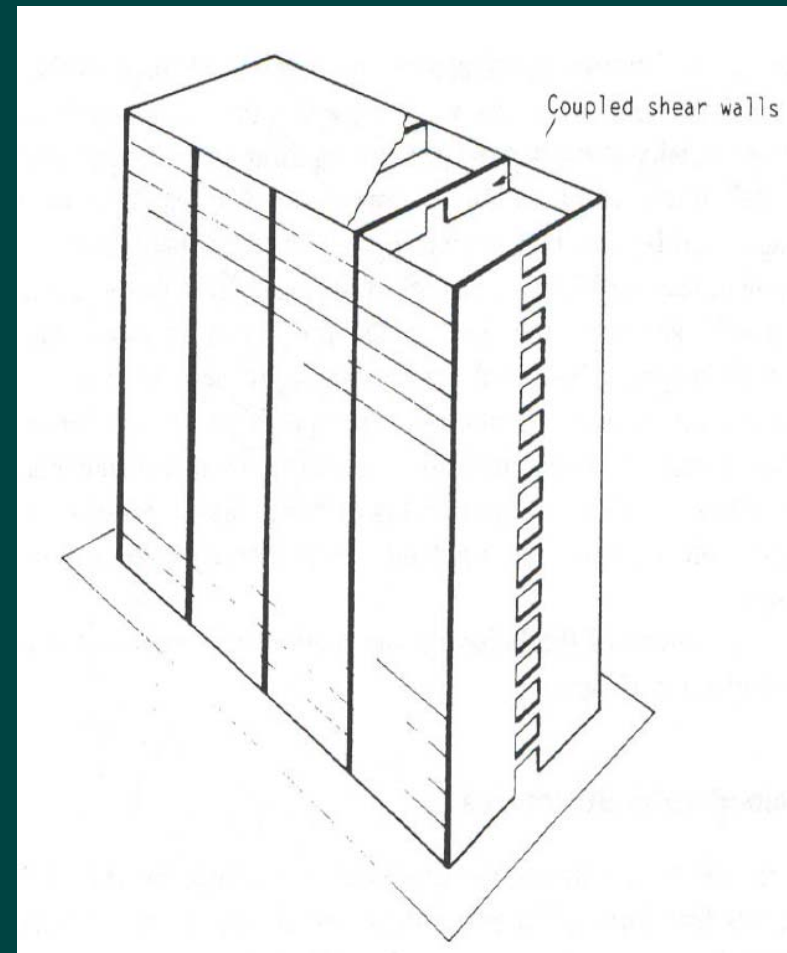
- ako se otpornost konstrukcije postiže zajedničkim djelovanjem posmičnih zidova i okvira, takva konstrukcija se tako i zove (*wall-frame structure*)
- konstrukcija zauzima zajednički deformirani oblik za oba konstrukcijska sustava, što se postiže horizontalnom krutosti greda i katnih ploča
- zidovi i okvir horizontalno međusobno djeluju, poglavito na vrhu zgrade, čime se dobiva krući i jači konstrukcijski sklop
- tim dvojnim sustavom ekonomičnost se diže do razine od 65 katova, daleko više nego za pojedinačno djelovanje bilo krutih okvira bilo posmičnih zidova nosivim pločama
- 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

POVEZANI ZIDOVI

- ❑ **COUPLED WALLS**
- ❑ konstrukcijski sklopovi s *povezanim zidovima* su uobičajeni statički sustavi od posmičnih zidova, sa dva ili više zidova u istoj ravni 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

POVEZANI ZIDOVI

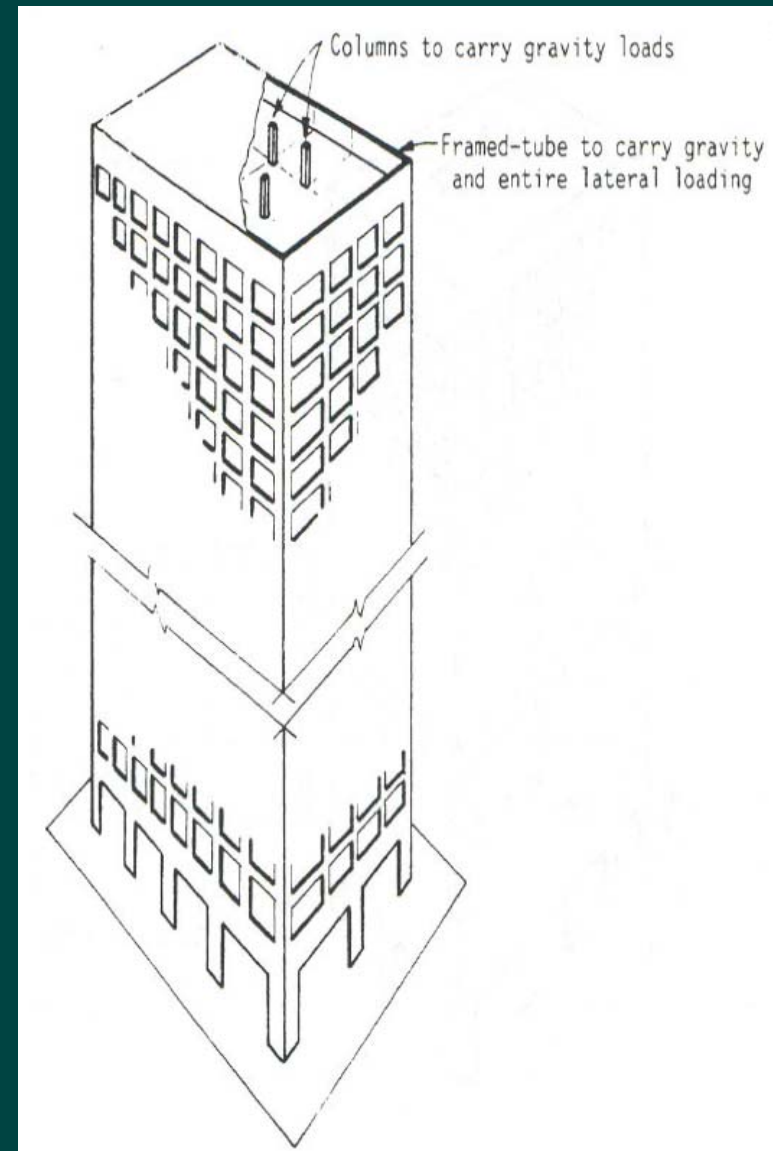
- *Espiritu Sancto neboder*, Miami, (2003)
 - projekt: Kohn Pederson Fox Associates.
 - dramatična prednja fasada je geometrijski rezultat presjeka valjkaste plohe i nagnutog pravca
 - zgrada (toranj) sadrži hotel na donjim etažama, urede na srednjim etažama i stanove na vrhu



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRNE CIJEVNE KONSTRUKCIJE

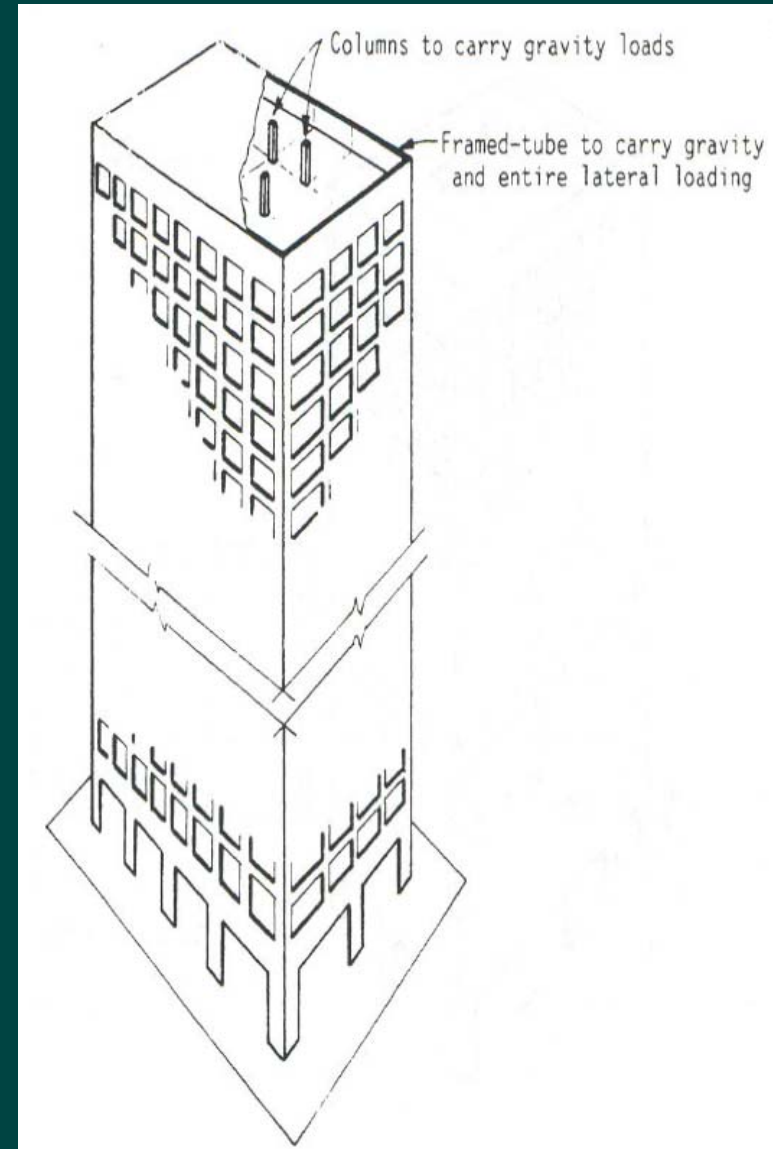
- ❑ **FRAMED TUBE**
- ❑ tvore ih četiri vrlo kruta okvira, otporna na savijanje, koji oblikuju „cijev“ („tube“) oko oboda zgrade
- ❑ okviri se sastoje od stupova na malom razmaku (tipično 2-4m), međusobno povezanih visokim horizontalnim gredama
- ❑ na razini ulice mali razmaci stupova moraju se prekinuti, 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRNE CIJEVNE KONSTRUKCIJE

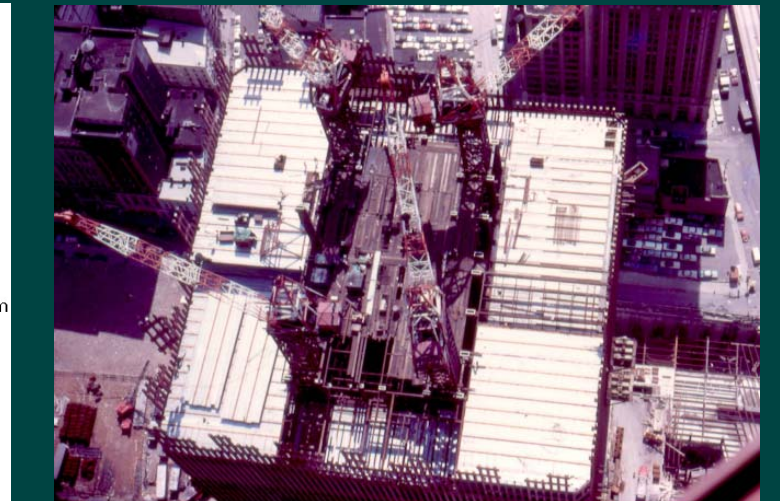
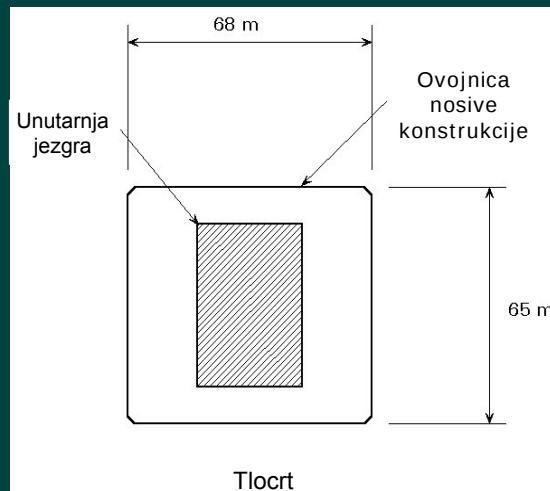
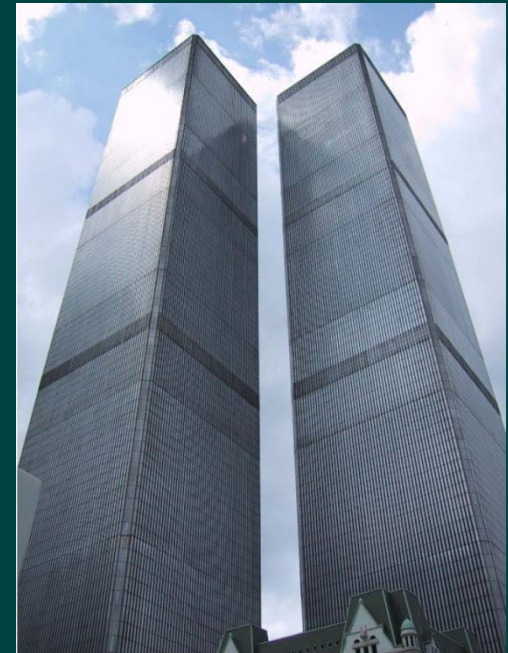
- najučinkovitija je cijev u tlocrtu kvadratnog oblika (WTC i Sears) ili kružnog oblika (Petronas)
- ova konstrukcijska forma prikladna je i za čelik i za armirani beton za visine od 45 do 110 katova
- vrlo ponavljajuća struktura omogućuje ekonomičnu prefabrikaciju
- ova konstrukcijska forma predstavlja najznačajniji moderni iskorak kod visokih zgrada
- poboljšanja su potrebna, jer pojasevi trpe od posmičnih deformacija (*shear lag*)
- te posmične deformacije nastaju od manjeg opterećenja srednjih od kutnih pojasnih stupova
- stoga srednji stupovi ne doprinose u potpunosti krutosti pojaseva



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRNE CIJEVNE KONSTRUKCIJE

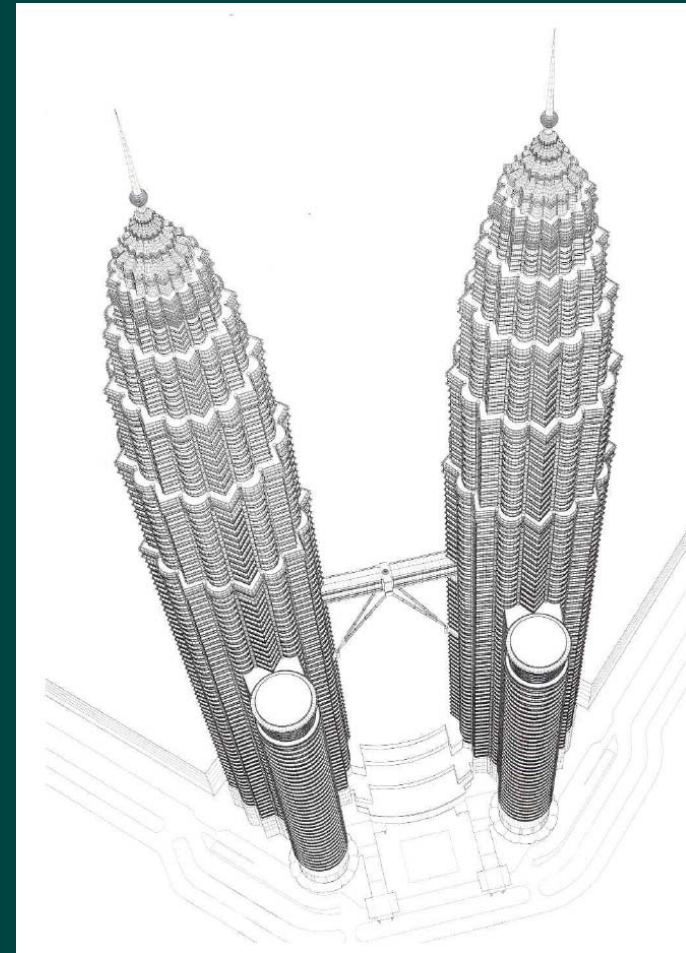
- The World Trade Center, New York, južni toranj (1970), sjeverni (1972)
 - to su bile *prve okvirne cijevi*, koje su dostigle visinu od 110 katova, $H=411$ m
 - cijev u cijevi = vanjski omotač od čeličnih stupova vrlo blisko postavljenih (okvirna cijev) + unutrašnja jezgra u kojoj su koncentrirane sve vertikale (stepenice, dizala)
 - vanjska cijev je sačinjena od vertikalnih čeličnih stupova 356×356 mm, na osnom razmaku od 56 cm
 - vertikalni stupovi povezani su horizontalnim gredama na razini svakog kata



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRNE CIJEVNE KONSTRUKCIJE

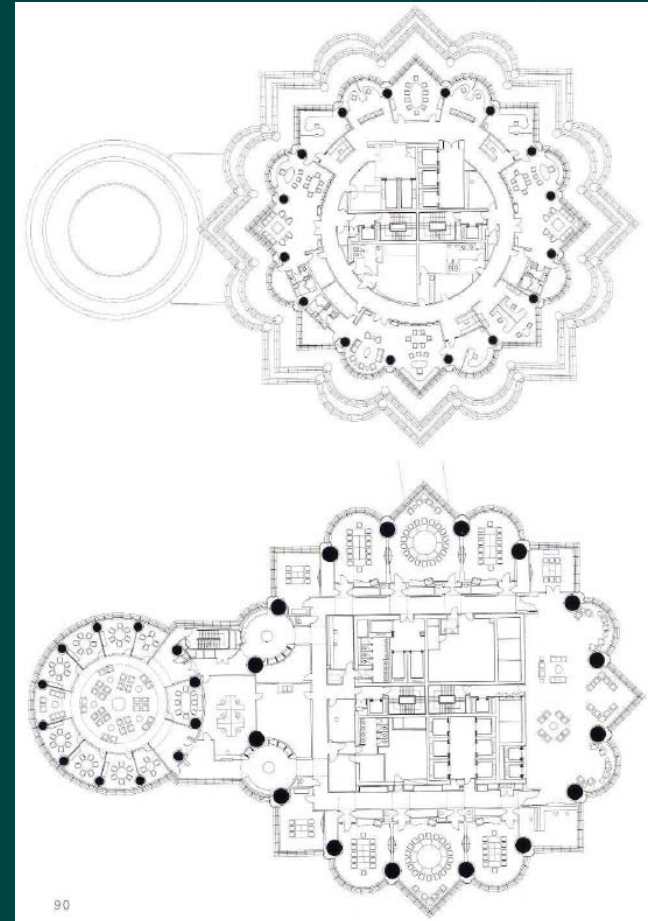
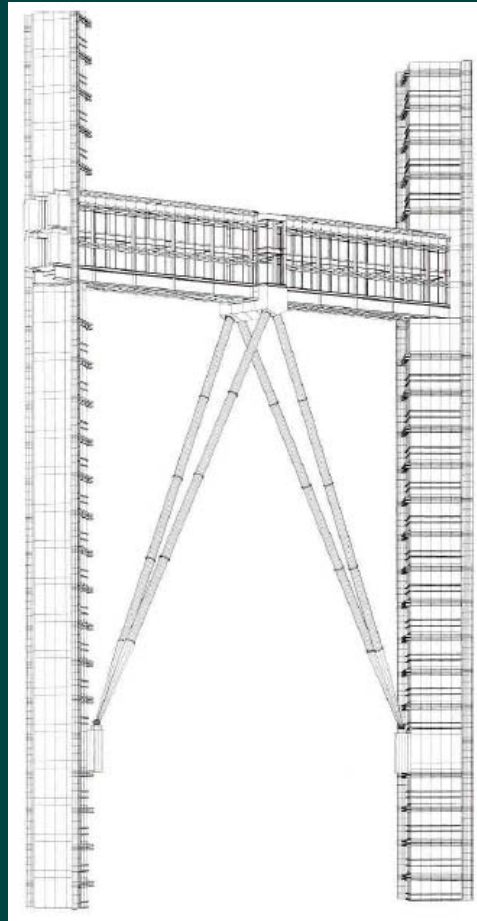
- *Petronas Towers*, Kuala Lumpur, Malezija, (1998)
 - Petronas tornjevi visine 452 m (10m viši od Sears Tower-a u Chicagu)
 - tornjevi imaju 88 numeriranih razina, ali ustvari imaju 95 katova (broj „8“ je sretni broj za Kineze)



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OKVIRNE CIJEVNE KONSTRUKCIJE

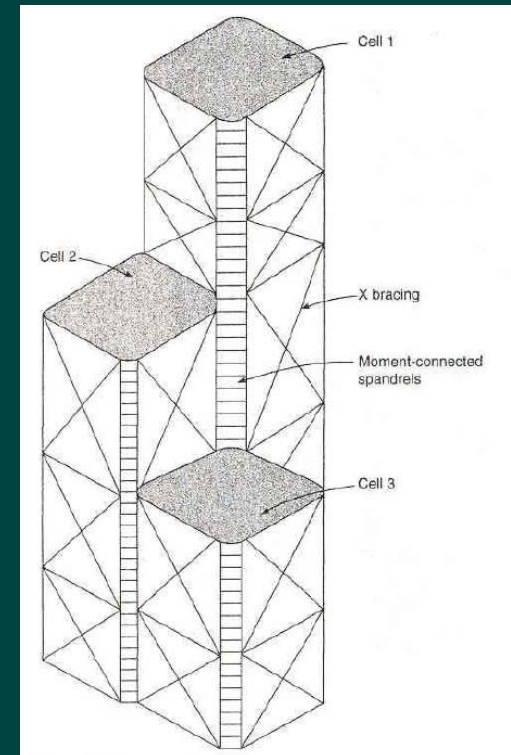
- **Petronas Towers**, Kuala Lumpur, Malezija, (1998)
 - korišten je armirani beton za središnju jezgru i obodne stupove sa prstenastim gredama od betona tlačne čvrstoće 80 MPa
 - svaki toranj je valjkastog oblika promjenjivog promjera sa 16 stupova



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

CIJEVI POVEZANE U SNOPOVE

- ❑ **BUNDLED-TUBE**
- ❑ prirodna evolucija forme WTC-ovih okvirnih cijevi bila je primjena više međusobno povezanih cijevi, „kao vezani kolci“
- ❑ povezani skup cijevi ostvaruje veću mnogo veću bočnu (horizontalnu) krutost, nažalost na račun ograničavajućeg unutrašnjeg planiranja
- ❑ ovaj konstrukcijski sustav prvi put je primijenio svjetski poznati arhitekt Fazlur Khan za
- ❑ **Sears Tower u Chicagu (1974)**
 - 110 katova, $H = 442$ m

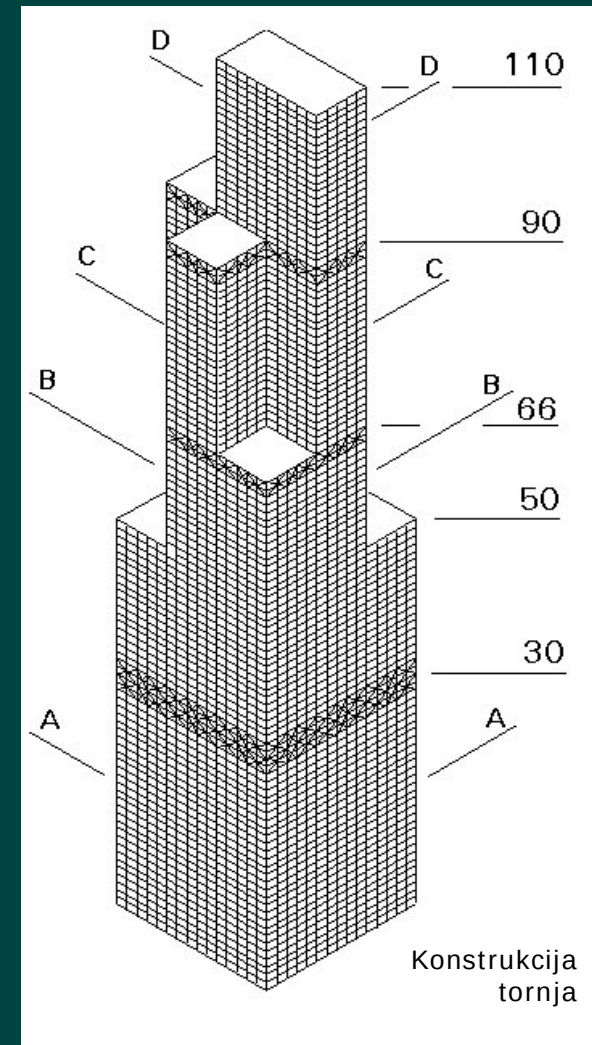
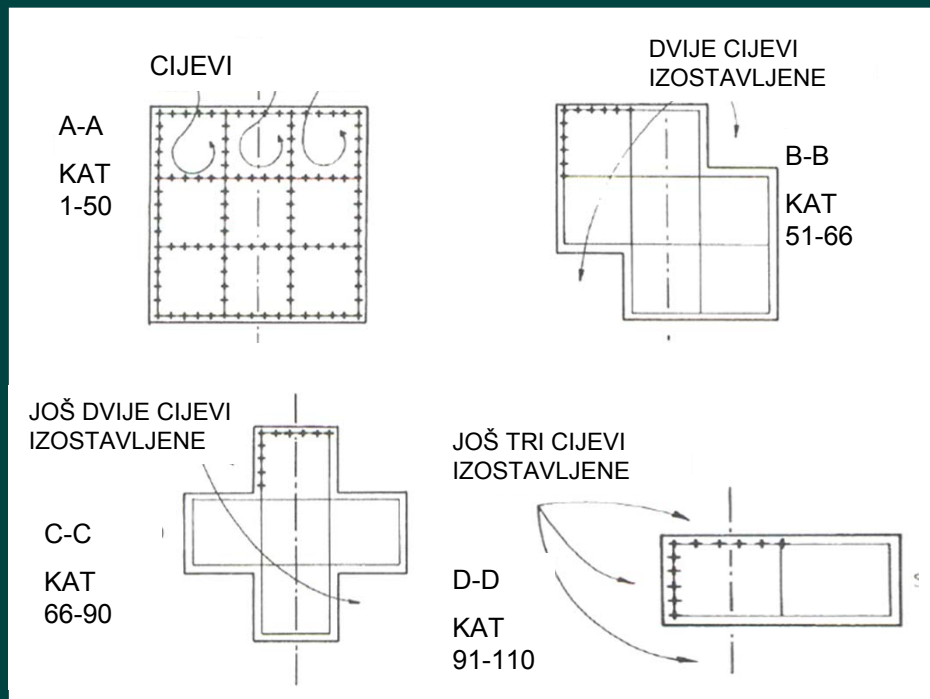


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

CIJEVI POVEZANE U SNOPOVE

□ Sears Tower u Chicagu (1974)

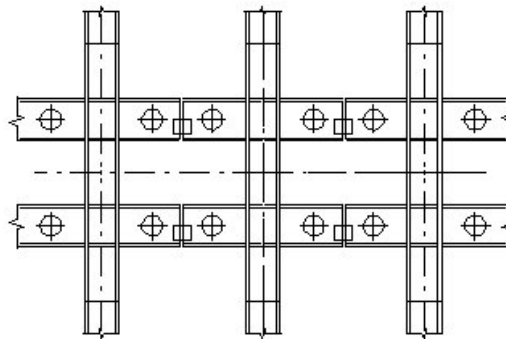
- Vanjska cijev sastavljena od okvira + tri horizontalne rešetke – prstenasto ovijanje.
- Smanjenje tlocrtna površine s visinom – velika konzola s promjenljivim poprečnim presjekom.
- novi unutrašnji hrptovi bitno smanjuju utjecaj posmične fleksibilnosti (*shear lag*) u pojasevima



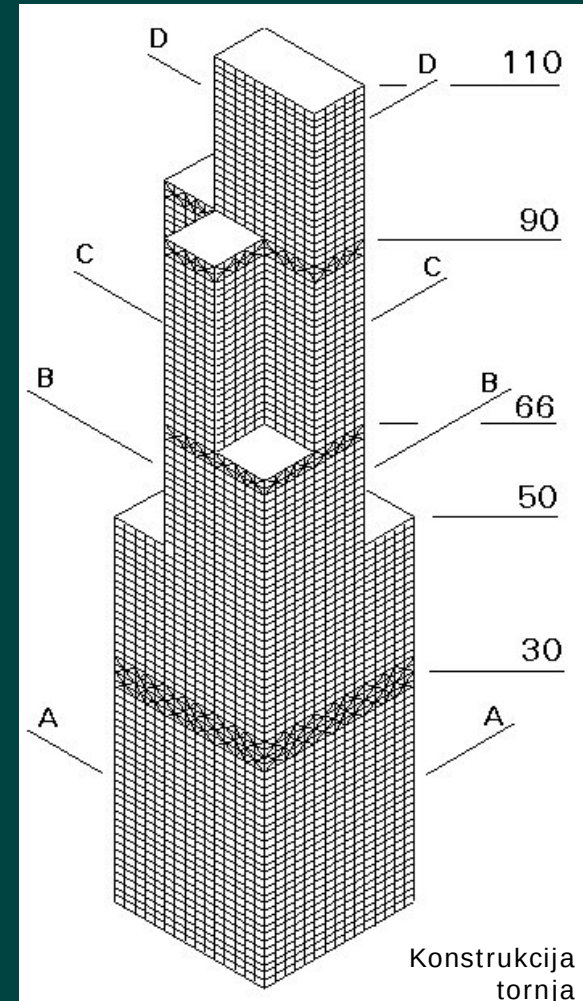
KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

CIJEVI POVEZANE U SNOPOVE

- Sears Tower u Chicagu (1974)
 - naprezanja u stupovima su sukladno raspoređena ravnomjerno nego kod konstrukcijskog sustava s jednom cijevi
 - parametarska konstrukcija sastoji se od predgotovljenih elemenata s tri raspona i visine dva kata čime je određena i fasada.



Predgotovljeni elementi kao osnovni parametar nosive konstrukcije



Konstrukcija tornja

KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

CIJEVI SA SPREGOVIMA

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

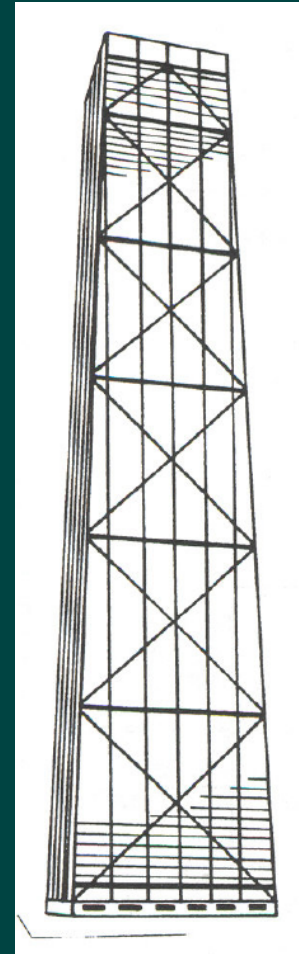


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

CIJEVI SA SPREGOVIMA

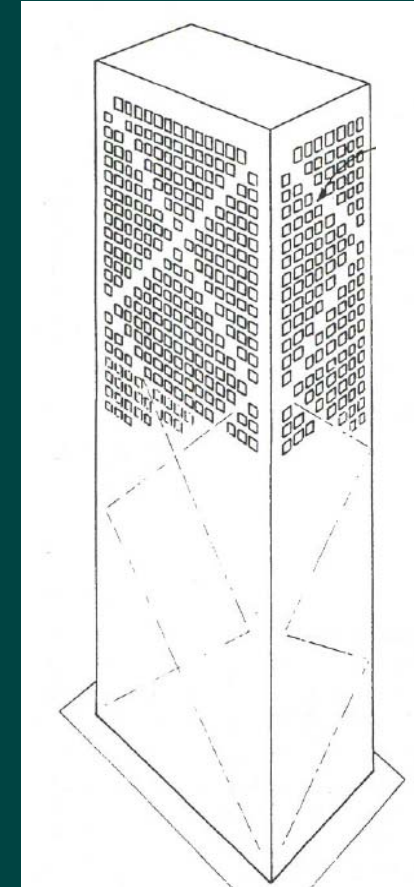
□ zgrada John Hancock, Chicago, (1969)

- 97 katova,
- prva čelična cijev sa spregovima



□ 780 Third Avenue Building, New Yorku, (1985)

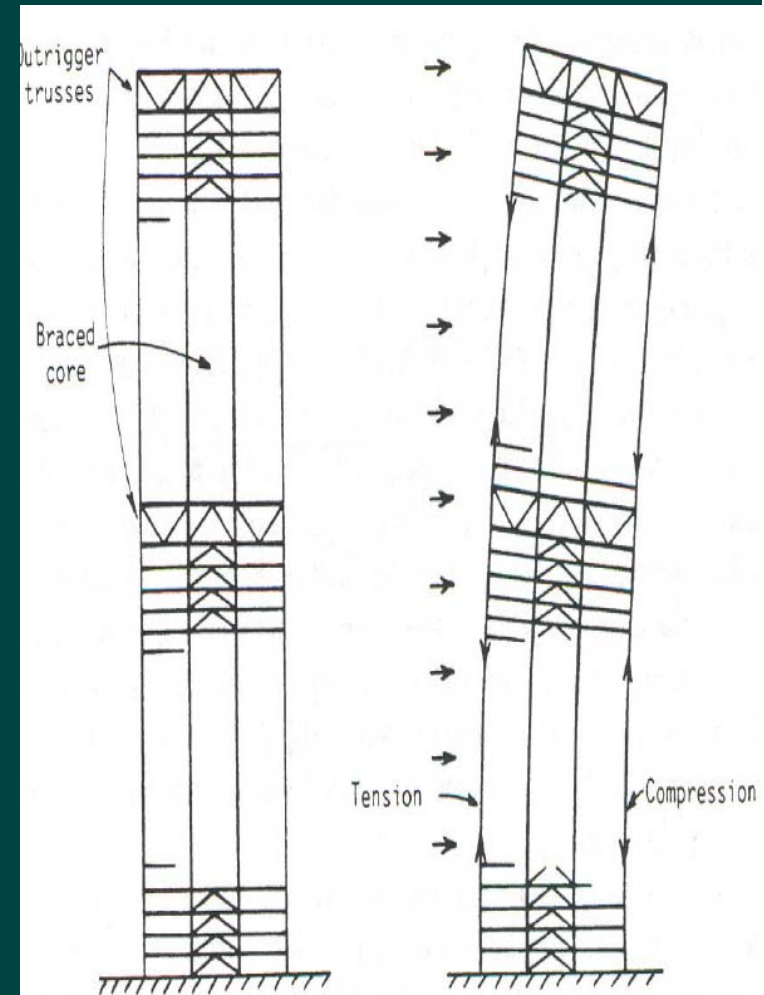
- zgrada od armiranog betona
- kod armiranog betona spregovi su oblikovani kao dijagonalni sustav betonskih ploča (panela), veličine prozora, betoniranih zajedno s okvirom
- Izostavljanje otvora za prozore kako bi se dobila dijagonala sprega



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

JEZGRA OJAČANA SPREGOVIMA

- OUTRIGGER BRACED CORE
- taj konstrukcijski sustav čine *središnja jezgra sa spregovima*, koja je ili
 - okvir sa spregovima ili posmični zidovi i
 - horizontalne *konzolne rešetke* ili nosači,
 - koji povezuju jezgru s vanjskim stupovima
- za horizontalna djelovanja rotaciju jezgre u vertikalnoj ravni 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

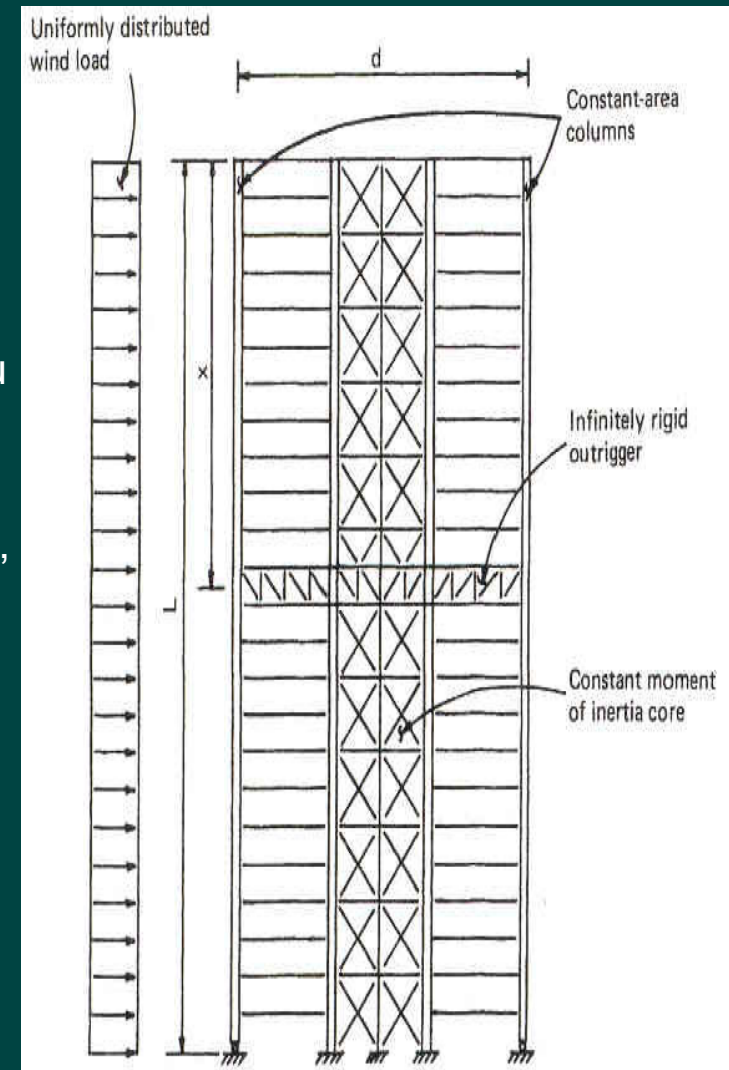


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

JEZGRA OJAČANA SPREGOVIMA

❑ OUTRIGGER BRACED CORE

- ❑ obodni stupovi mogu se uključiti u prijenos sila, ako se povežu horizontalnom rešetkom ili nosačem po obodu zgrade na razini konzola
- ❑ učinkovitost ovog konstrukcijskog sustava bitno ovisi o vezi obodnih stupova i jezgre pomoću konzola
- ❑ razina konzola je uobičajeno visine dva kata i ti katovi su obično servisni katovi za smještaj svih instalacija i tehnoloških uređaja za funkcioniranje zgrade
- ❑ 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
- ❑ ovaj konstrukcijski sustav primjenjen je do visine od 70 katova
- ❑ ako su tlocrtne dimenzije zgrade velike, ovaj konstrukcijski sustav omogućuje i mnogo veće visine



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

JEZGRA OJAČANA SPREGOVIMA

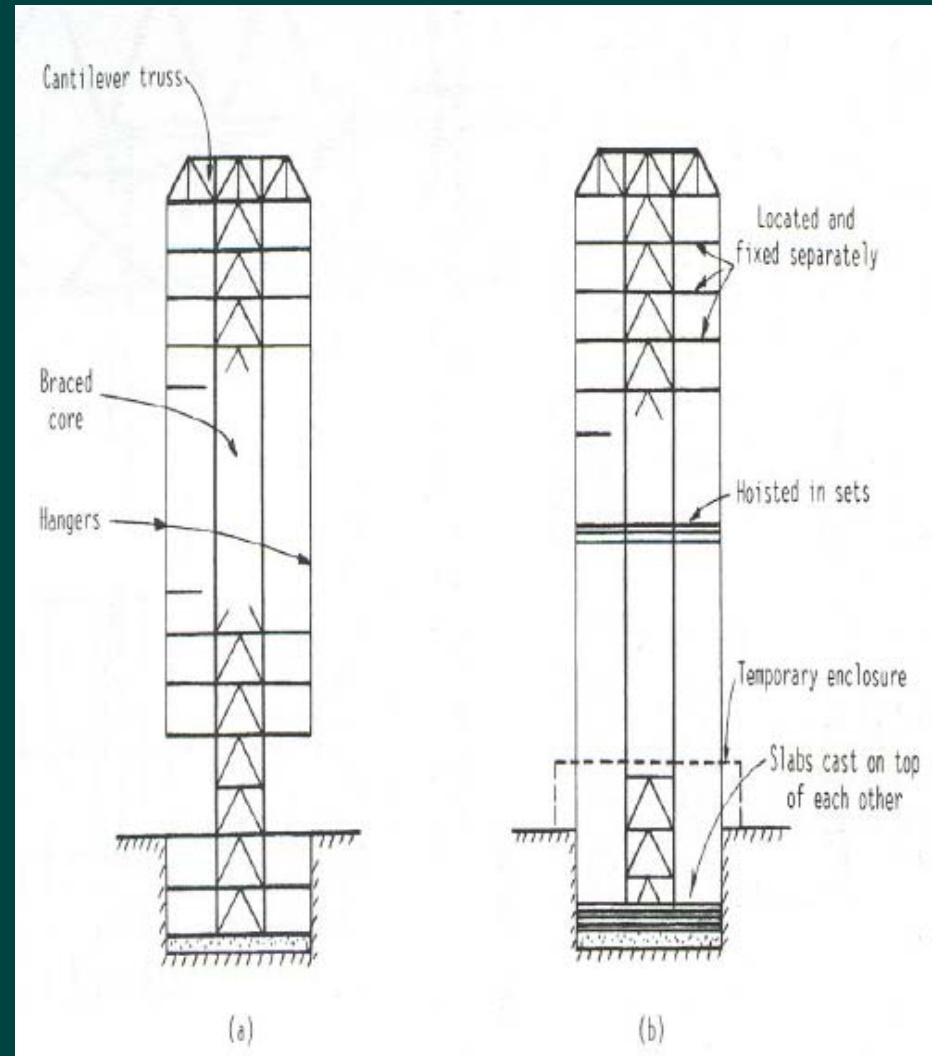
- ❑ AT&T Building (New York)
- ❑ arhitekt: Philip Johnson
- ❑ konstrukcijski projekt: Leslie Robertson and Associates
- ❑ osnovni konstrukcijski sustav čini *cijev od krutih čeličnih okvira* po obodu zgrade
- ❑ dodatna krutost po širini zgrade ostvarena je ugradbom četiri vertikalne čelične rešetke
- ❑ na svakom se osmom katu dva zida od čeličnih ploča I-oblika 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OVJEŠENE KONSTRUKCIJE

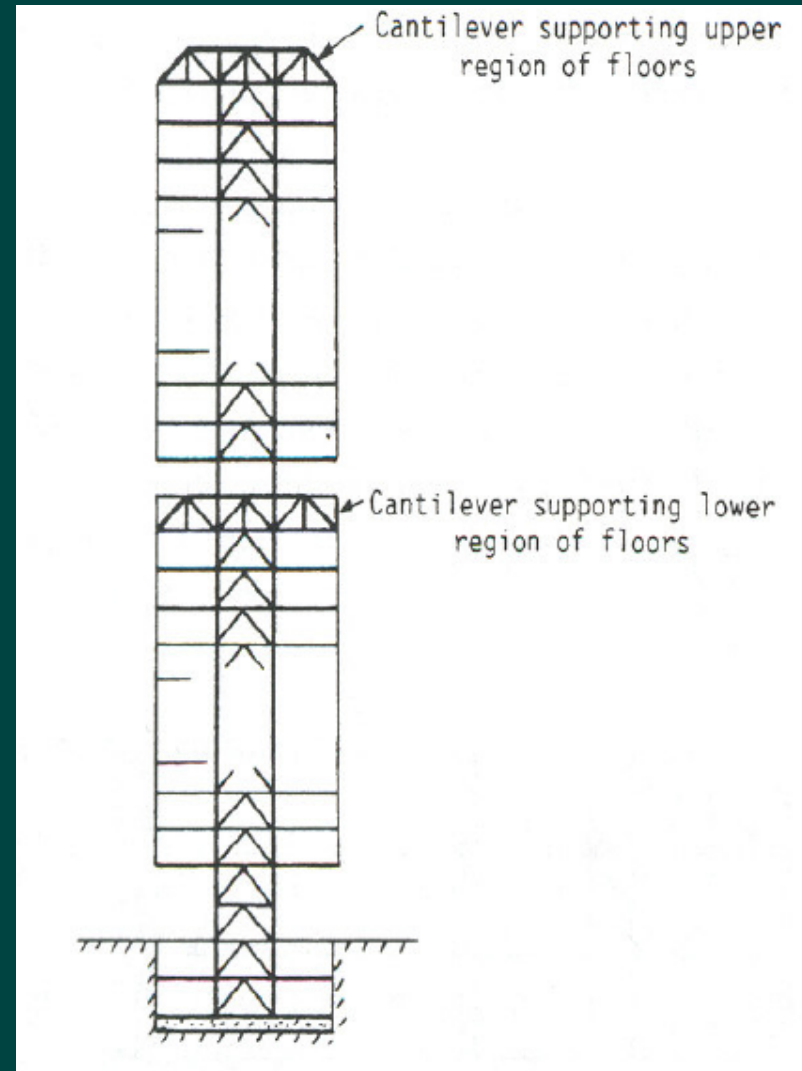
- ovješeni konstrukcijski sklop čini *središnja jezgra sa horizontalnim konzolnim rešetkama na razini krova*, s koje su obješene vertikalne vješaljke od čeličnih užadi
- stropne ploče vezane su na te kabele
- to omogućuje da na najdonjem katu na razini tla nema obodnih stupova i prostor je potpuno otvoren
- 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



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

OVJEŠENE KONSTRUKCIJE

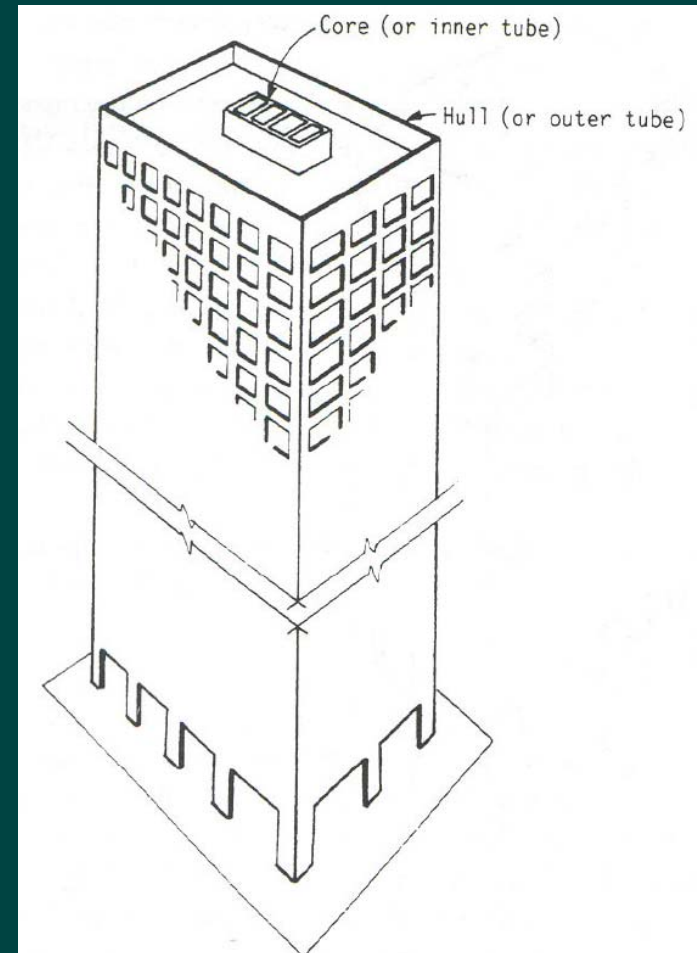
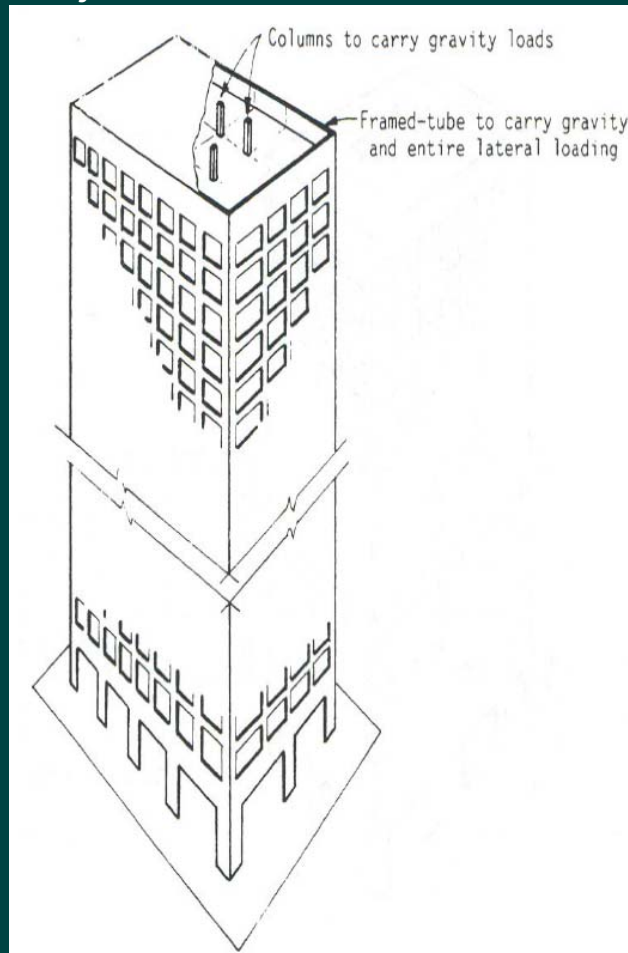
- ovaj konstrukcijski sustav dopušta relativno male visine zgrade do oko 10-15 katova, zbog konstrukcijskih mana, kao npr.
 - ograničene izmjere jezgre i
 - varijacije veza između stropova za promjenjiva djelovanja



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

SUSTAV CIJEVI U CIJEVI

- TUBE-IN-TUBE
- varijanta oblika okvirne cijevi može se ostvariti zamjenom unutrašnjih stupova ili stupova i zidova jezgre s drugom cijevi

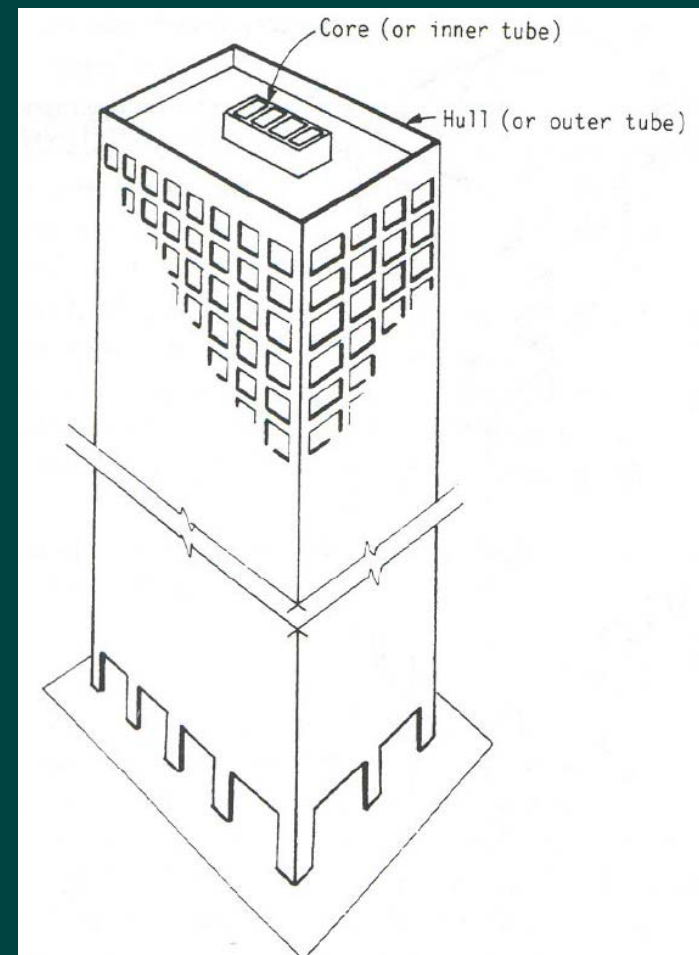


KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

SUSTAV CIJEVI U CIJEVI

□ TUBE-IN-TUBE

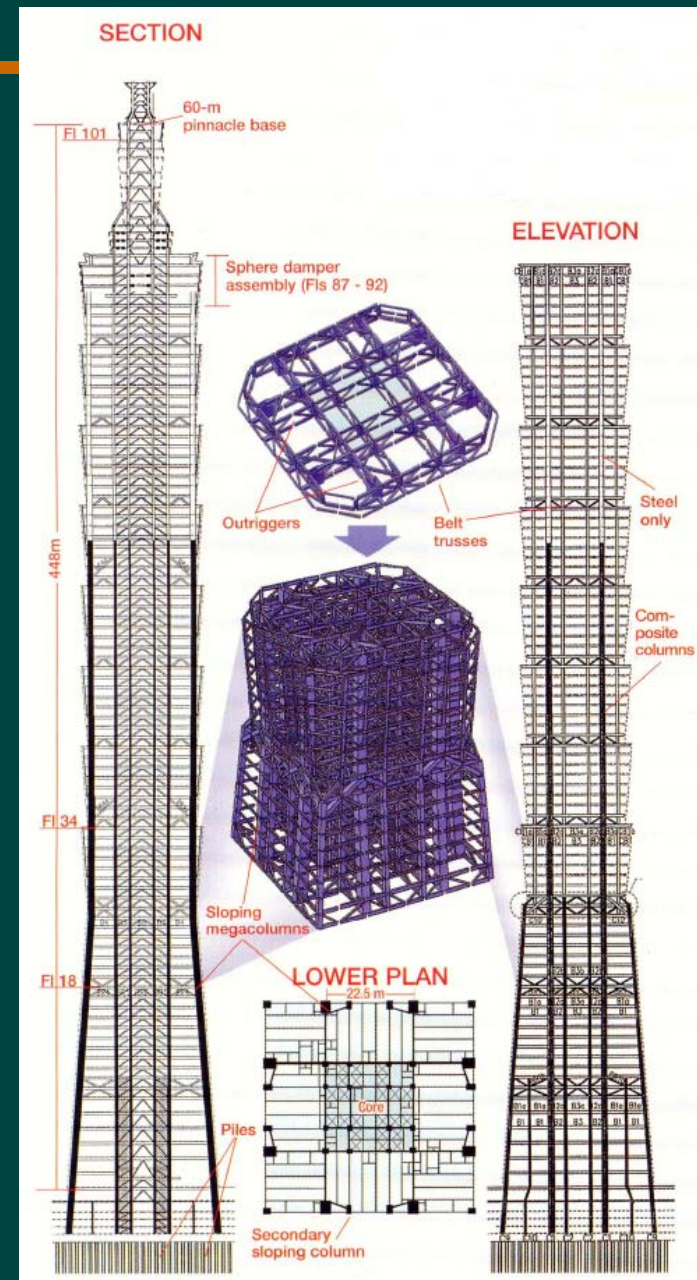
- tako trup (ili vanjska cijev) i nova cijev jezgre zajedno preuzimaju i vertikalna i horizontalna djelovanja
- ta unaprijeđena forma zove se *cijev u cijevi (tube-in-tube)* ili *trup-jezgra (hull-core)* konstrukcija
- kod čeličnih zgrada unutrašnja cijev jezgre može se formirati od okvira sa spregovima
- 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
- predpostavlja se da se ovim konstrukcijskim sustavom ekonomično mogu izvesti građevine do 120 katova



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

SUSTAV CIJEVI U CIJEVI

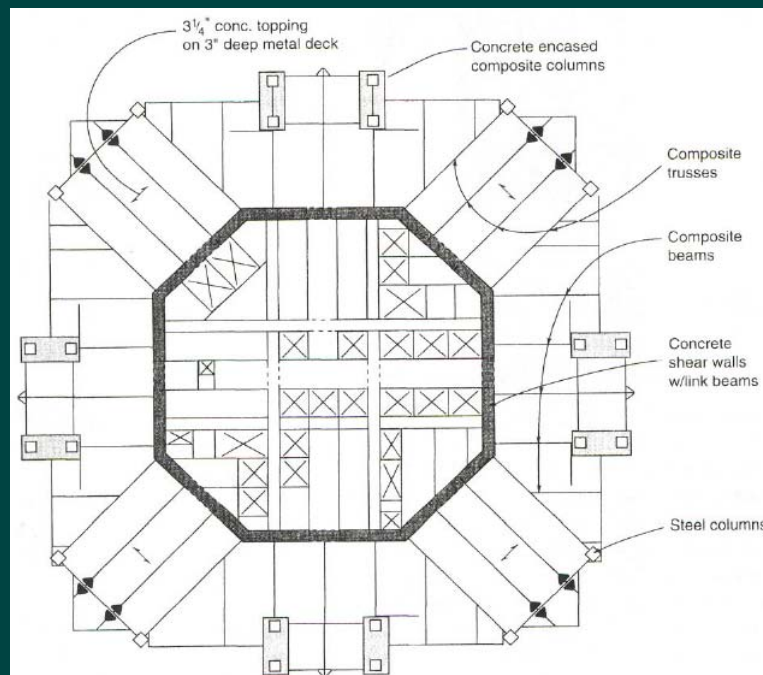
- ❑ Taipei 101 Building, Taipei – Taiwan, (2003)
- ❑ postala je najvišom građevinom na svijetu, nadmašivši Petronas Towers u Kuala Lumpuru
- ❑ konstrukcijski sustav je cijev u cijevi
- ❑ unutrašnja cijev (jezgra) izvedena je od rešetki, a vanjska cijev (trup) je okvir s spregovima



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

SUSTAV CIJEVI U CIJEVI

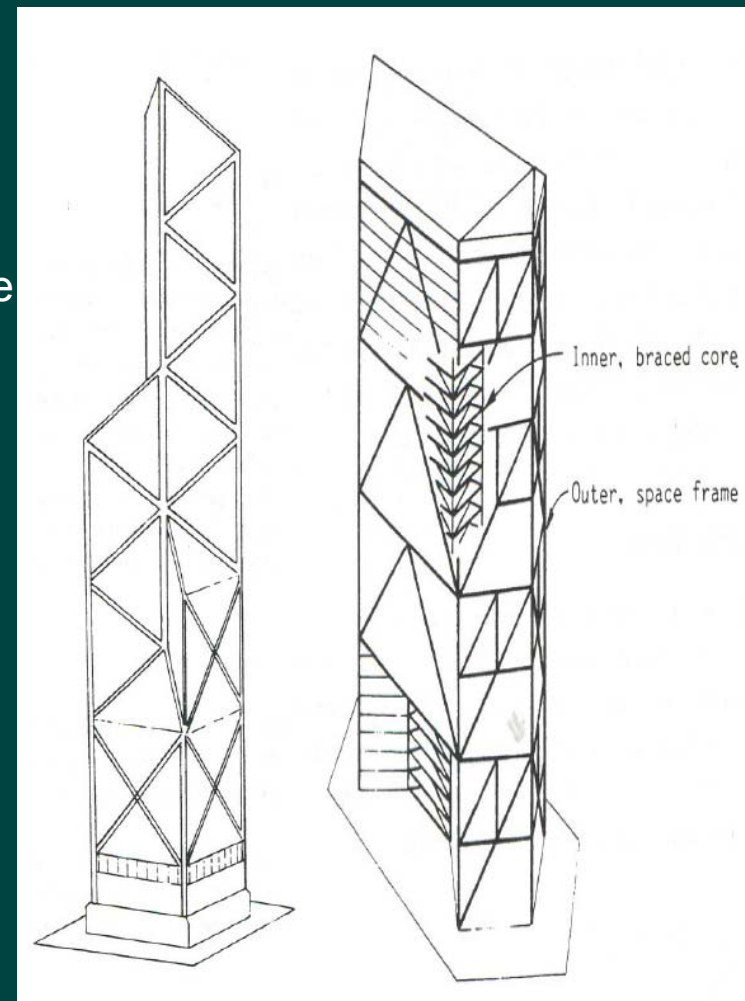
- ❑ Jin Mao Tower, Shanghai
- ❑ još jedan toranj sa 88 katova ili 421 m
- ❑ konstrukcijski sustav čini središnja osmerokutna armirano-betonska jezgra (posmični zidovi), povezana s vanjskim mega stupovima pomoću konzolnih spregnutih rešetki
- ❑ debljine pojaseva posmičnih zidova su promjenjive od 84 cm na spoju s temeljom do 46 cm na razini 87
- ❑ tlačna čvrstoća betona iznosi od 35 MPa do 52 MPa



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

PROSTORNE KONSTRUKCIJE

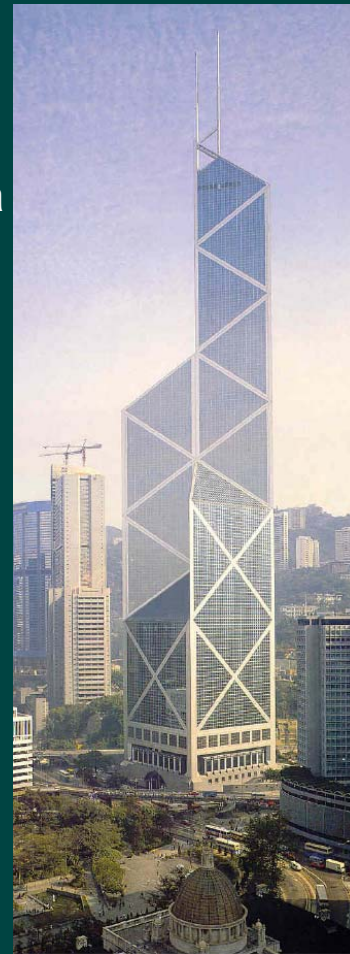
- *prostorni okviri: trodimenzionalne trokutaste konstrukcije*, bitno se razlikuju od prethodno opisanih ravninskih okvira
- Preuzimaju i vertikalna i horizontalna djelovanja
 - jedan od najučinkovitijih konstrukcijskih oblika
- mala težina i velika učinkovitost omogućuju postizanje najvećih visina građevina
- 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
- jedno rješenje sadrži unutrašnju jezgru sa spregovima, koja služi za prikupljanje bočnih (horizontalnih) opterećenja i preuzimanje unutrašnjih vertikalnih opterećenja od katnih ploča iznad niza višekatnih prostora
- u podnožju svakog od tih prostora horizontalna i vertikalna opterećenja predaju se van na glavne čvorove prostornog okvira



KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

PROSTORNE KONSTRUKCIJE

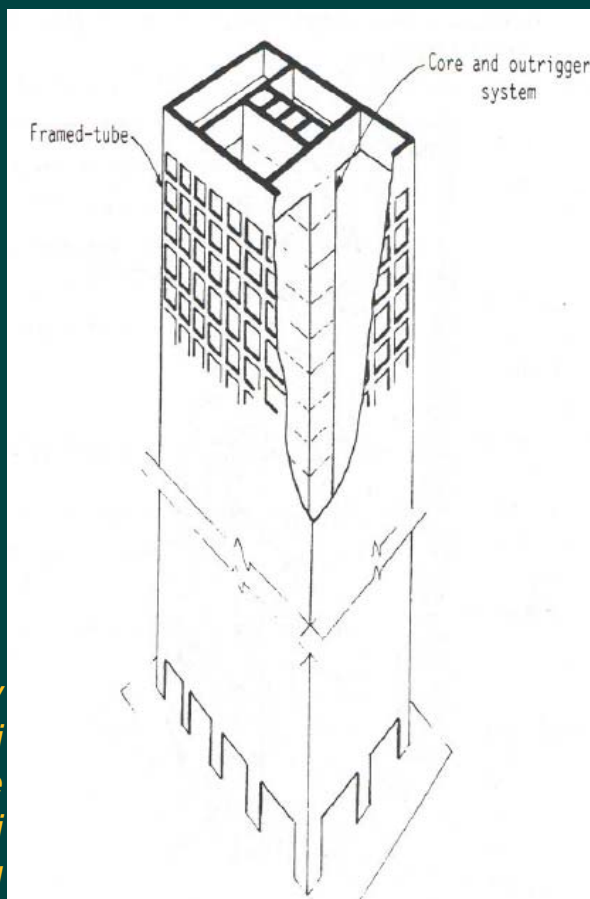
- ❑ Bank of China, Hongkong, (1989)
- ❑ 76 katova, 369 m, *prostorna rešetka sa poprečnim spregovima (cross-braced space truss)*
- ❑ prostorna rešetka preuzima gotovo ukupnu težinu građevine i istovremeno horizontalna djelovanja od tajfunskih vjetrova
- ❑ i horizontalna i gravitacijska opterećenja prenose se na četiri spregnuta stupa, smještena u kutovima zgrade, čime je ostvaren slobodni raspon od 52 m 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
- ❑ izvedbom okvira od ubetoniranih čeličnih elemenata izbjegnuta je potreba za skupim 3-D spojevima (priključcima) u kutovima zgrade



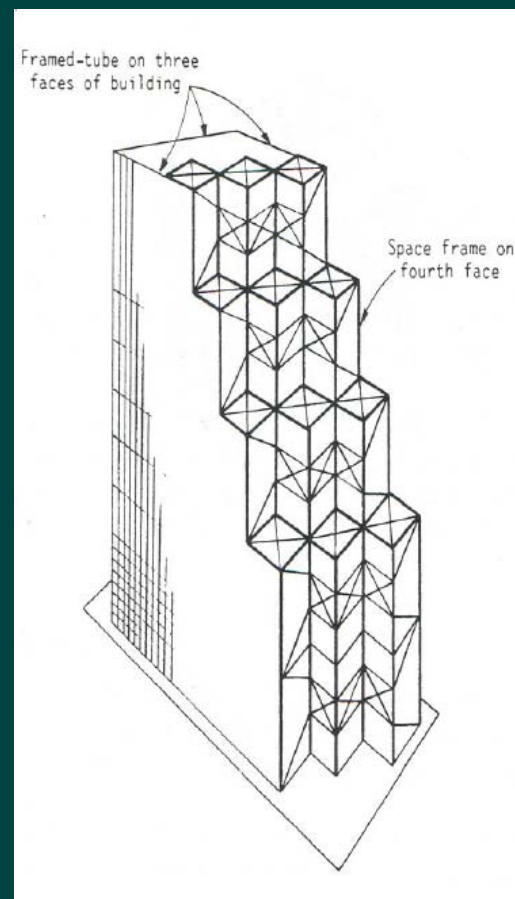
KONSTRUKCIJSKI SUSTAVI VISOKIH ZGRADA

HIBRIDNE KONSTRUKCIJE

- sadašnji trend u arhitekturi je kreiranje zgrada nepravilnih oblika koje konstruktor 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 približna prihvatljiva rješenja za te složene građevine



Konstrukcijski sustav cijevi i konstrukcijski sustav konzolne rešetke postavljeni jedan preko drugog



cijevni sustav na tri fasade kombiniran je s prostornim okvirom na četvrtoj fasadi

VISOKE GRAĐEVINE – SADRŽAJ PREDAVANJA (2.dio)

□ Sustavi za preuzimanje horizontalnih djelovanja

- Uvod
- Geometrijska imperfekcija
- Statički sustavi za vertikalne konstrukcije
- Ukrutni sustavi
- Načela za dispoziciju vertikalnih uknutih sustava
- Raspodjela sila na uknutni sustav
- Raspodjela sila na statički neodređen *simetrični* uknutni sustav
- Raspodjela sila na statički neodređen *nesimetrični* uknutni sustavi

□ Interakcija uknutih sustava za horizontalna i vertikalna djelovanja

□ Ponašanje konstrukcija od zidova

- Diskontinuitet u podnožju konstrukcije
- Napomene za proračun na računalu

<http://www.burjkhalifa.ae/>



SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

UVOD

- Za preuzimanje horizontalnih djelovanja

- vjetar prema EN 1991-4
- potres prema EN 1998-1

i njihovo sigurno predavanja na temeljno tlo koriste se konstrukcijski elementi velike krutosti tzv. **ukrutni konstrukcijski dijelovi** koji mogu biti:

- vertikalni - jezgre, zidovi, okviri, itd.
- horizontalni - katni diskovi (membrane)

- Učinak ukrutnih sustava ovisi o njihovom zajedničkom sudjelovanju i o primjenjenoj kombinaciji različitih konstrukcijskih dijelova.
- Proračuni se rade uz uzimanje u obzir geometrijske imperfekcije

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

GEOMETRIJSKA IMPERFEKCIJA

- ❑ Odstupanja od vertikale odnosno imperfekcije prema EN 1992-1-1 toč.5.2 se mogu uzeti u obzir nagibom, θ_i :

$$\Theta_i = \Theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

gdje su:

- θ_0 osnovna vrijednost
- α_h redukcijski faktor za duljinu ili visinu:

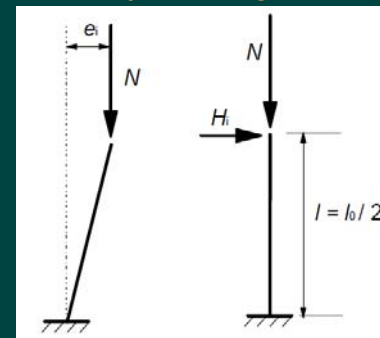
$$\alpha_h = 2 / \sqrt{l}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1$$

- α_m redukcijski faktor za broj elemenata:

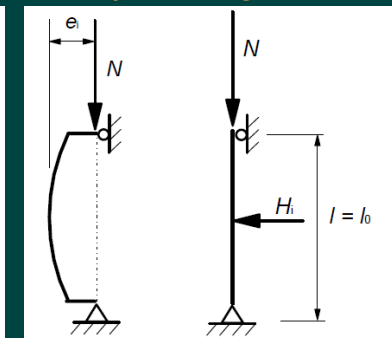
$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot (1 + 1/m)}$$

- l duljina ili visina
- m broj vertikalnih elemenata koji doprinose ukupnom utjecaju

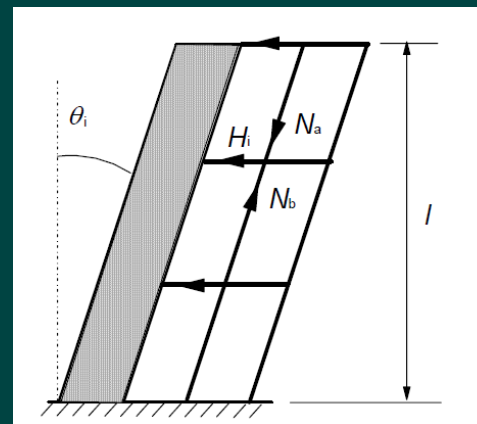
Bez horizontalnog pridržanja



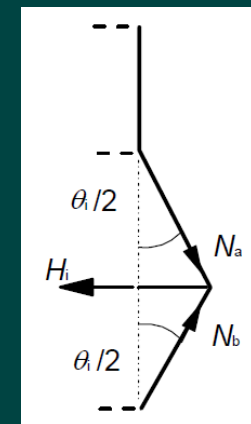
S horizontalnim pridržanjem



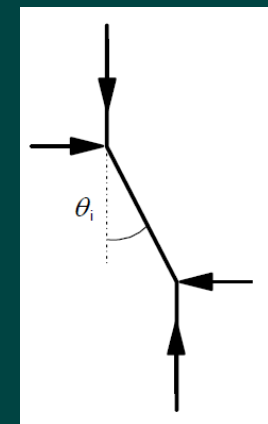
Izdvojeni elementi s ekscentričnom uzdužnom ili poprečnom silom



Okvir



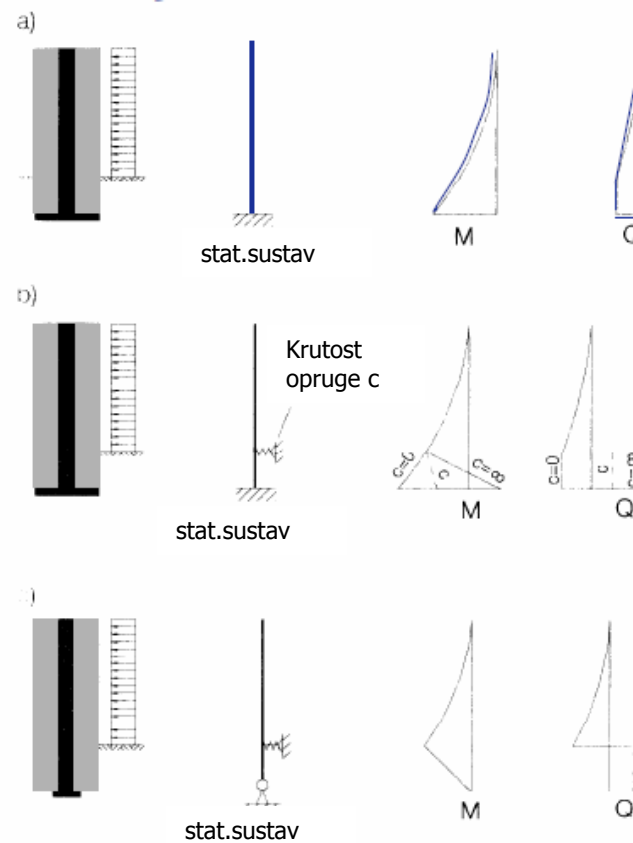
Stropna konstrukcija



Krovnna konstrukcija

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

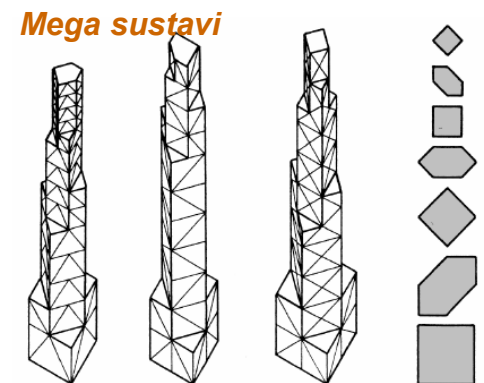
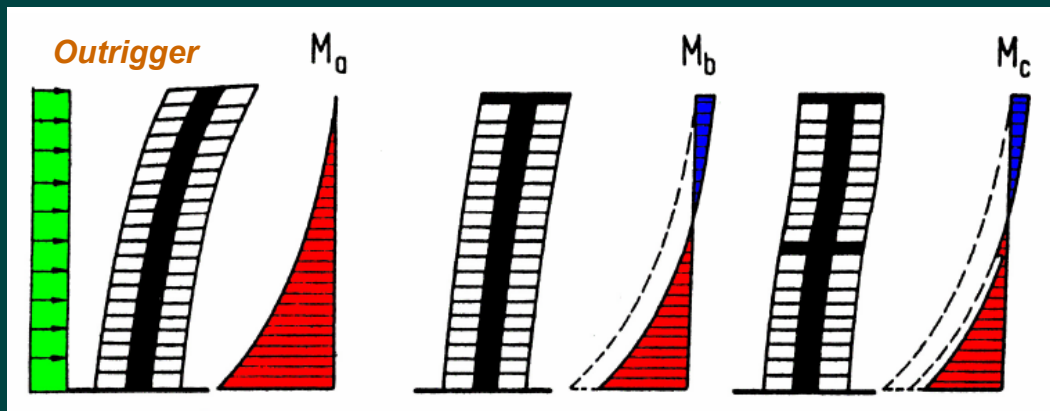
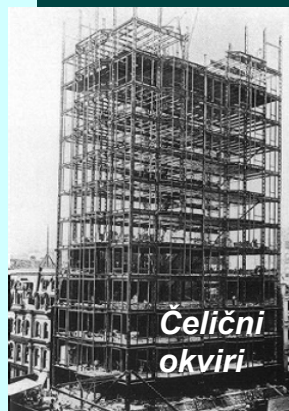
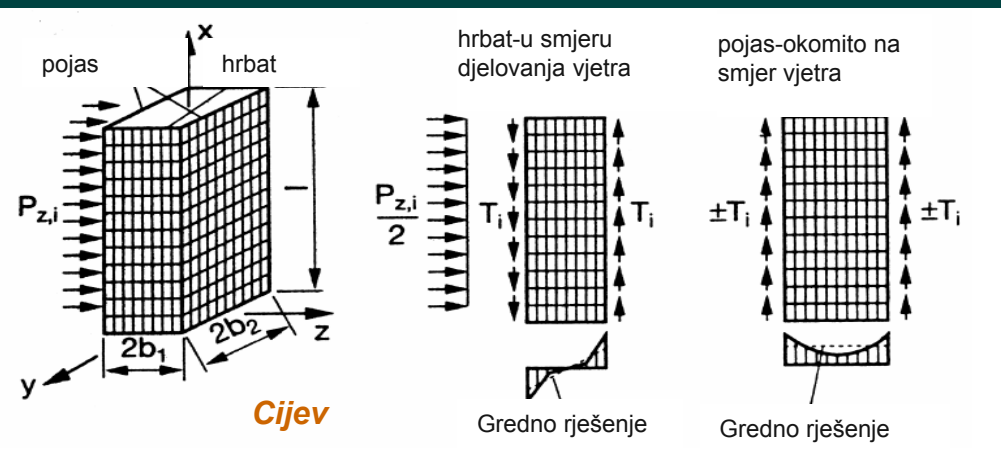
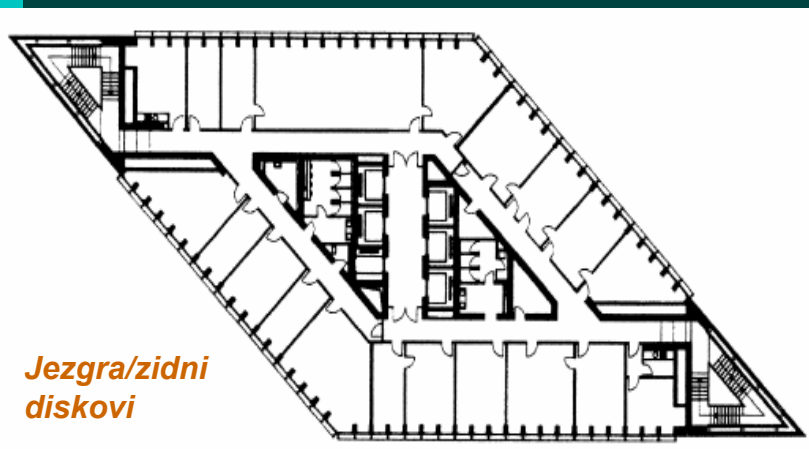
STATIČKI SUSTAVI ZA VERTIKALNE KONSTRUKCIJE



SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

UKRUTNI SUSTAVI

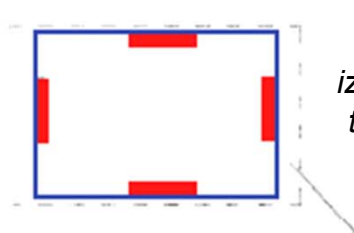
- okviri
- diskovi
- jezgre
- sandučasti presjeci sastavljeni od okvira (*tube*)
- jezgra-Outrigger sustavi
- mega sustavi



SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

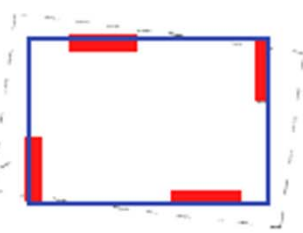
NAČELA ZA DISPOZICIJU VERTIKALNIH UKRUTNIH SUSTAVA

1. Potrebna su najmanje tri elementa, čiji se pravci učinka (djelovanja) ne sijeku u jednoj točki
2. AB konstrukcijski dijelovi trebaju imati što veća vertikalna opterećenja da ostanu u tlaku
3. Konstrukcijski elementi imaju se kontinuirano protezati od temelja do krova bez oslabljenja, jer svaka promjena krutosti dovodi do preraspodjele sila i time do dodatnih naprezanja u stropovima



Dobro

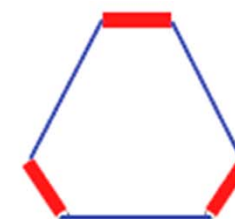
izduženje kod temperature



Moguća varijanta



Statički dovoljno



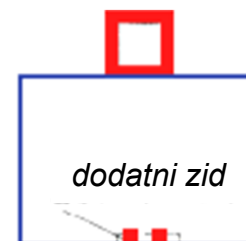
Dobro



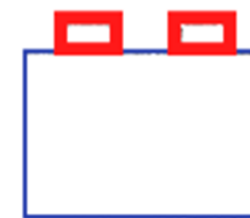
Dobro, ako je jezgra dovoljno velika i torzijski kruta



Loše bez dodatnog zida zbog ekscentriciteta



Loše bez dodatnog zida zbog ekscentriciteta

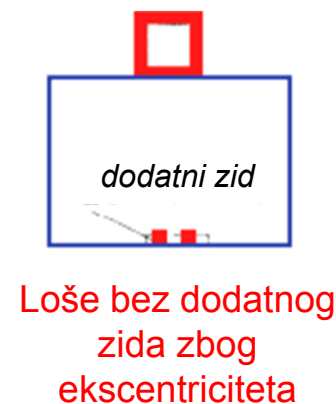
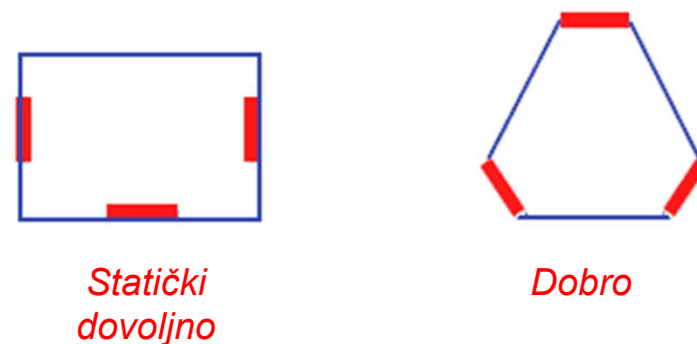


Moguće, ali veliki ekscentricitet

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

NAČELA ZA DISPOZICIJU VERTIKALNIH UKRUTNIH SUSTAVA

4. Težište i centar posmika u tlocrtu moraju biti što bliži jedan drugom, da ne nastane veliko torzijsko naprezanje uslijed horizontalnih opterećenja
5. Raspored po mogućnosti simetričan i sa što većim krakom
6. Raspored bez prisila ili s malom prisilom, inače neophodne dilatacije



SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA UKRUTNI SUSTAV

■ STATIČKI ODREĐEN SUSTAV:

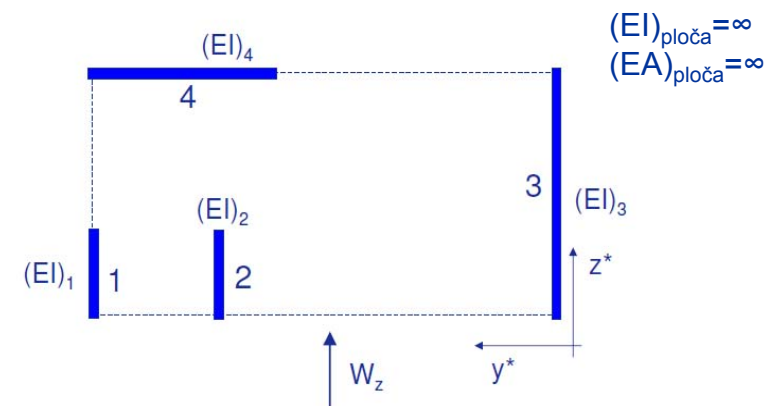
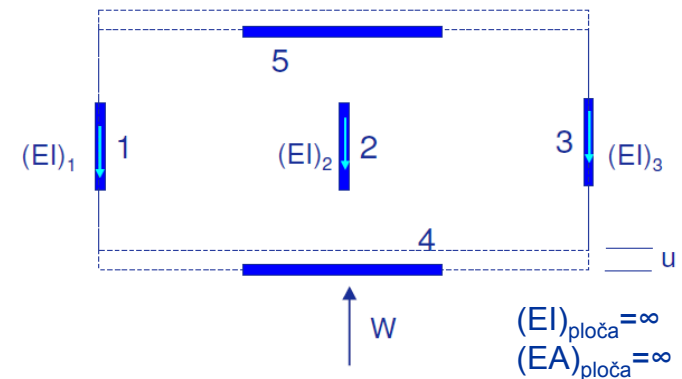
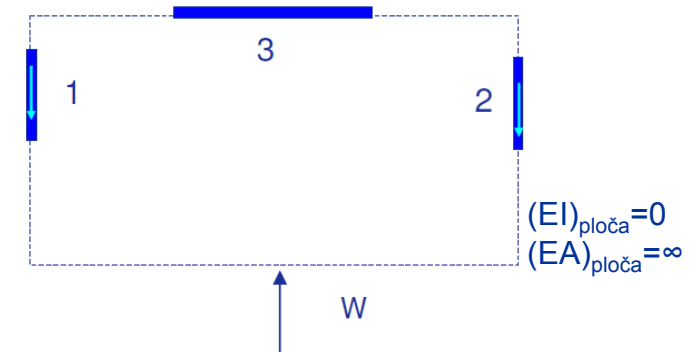
- raspodjela sila prema zakonu poluge uz zanemarenje krutosti pojedinih konstrukcijskih dijelova

■ STATIČKI NEODREĐEN SIMETRIČNI SUSTAV:

- raspodjela sila od translacije

■ STATIČKI NEODREĐEN NESIMETRIČNI SUSTAV:

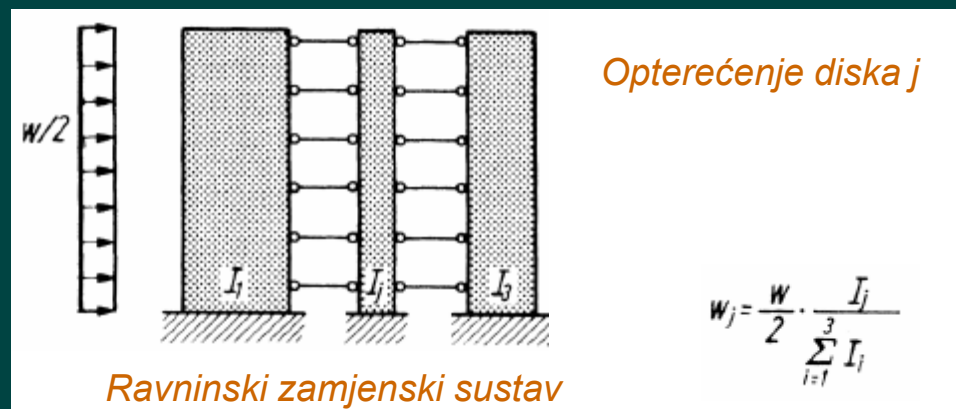
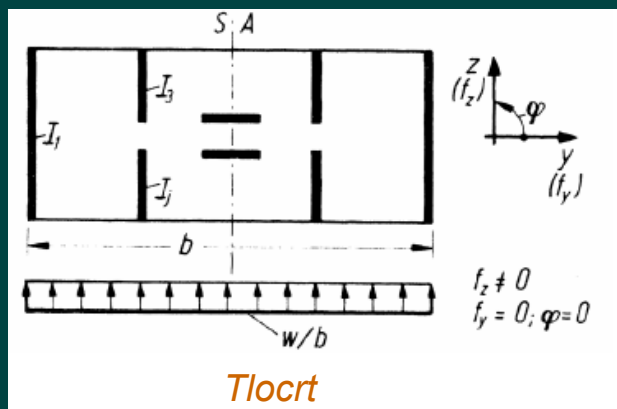
- raspodjela sila od translacije i rotacije



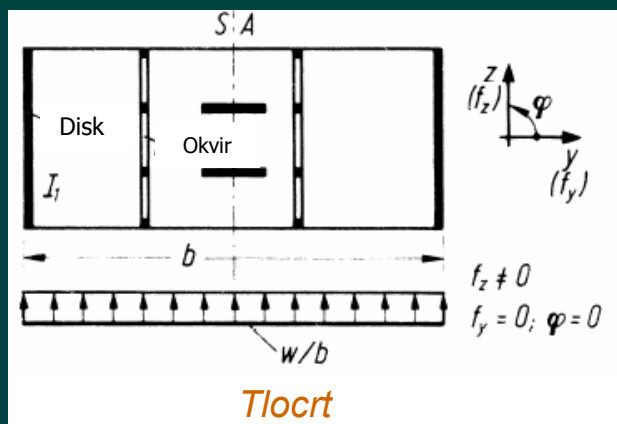
SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. **SIMETRIČNI** UKRUTNI SUSTAV

- svi ukrutni elementi imaju afinu deformacijsku sposobnost:
 - moгуća je primjena zamjenskog ravninskog sustava



- ukrutni elementi imaju različitu deformacijsku sposobnost:
 - ravninski proračun je moguć samo uvjetno, jer se raspodjela sila ne može provesti samo temeljem krutosti



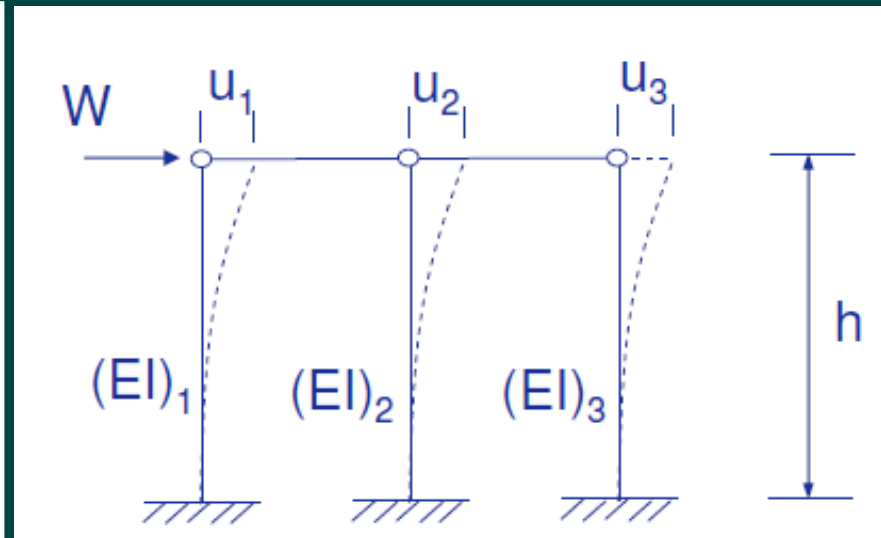
SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. SIMETRIČNI UKRUTNI SUSTAV

■ RASPODJELA SILA OD TRANSLACIJE:

- *kada se raspodjela sila može provesti samo temeljem krutosti*
- Pojedini pomaci:

$$u_1 = \frac{S_1 \cdot h^3}{3 \cdot (EI)_1}$$
$$u_2 = \frac{S_2 \cdot h^3}{3 \cdot (EI)_2}$$
$$u_3 = \frac{S_3 \cdot h^3}{3 \cdot (EI)_3}$$



- Ravnoteža sila:
- uz silu koja otpada na pojedini element:
- i kompatibilnost pomaka na vrhu:

$$W = \sum S_i$$

$$S_i = \frac{3 \cdot u_i \cdot (EI)_i}{h^3}$$

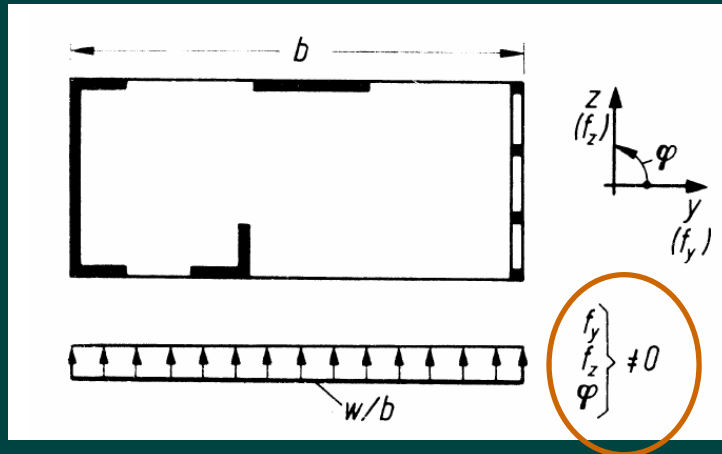
$$u = u_1 = u_2 = u_3$$

$$S_i = W \frac{(EI)_i}{\sum (EI)}$$

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. NESIMETRIČNI UKRUTNI SUSTAV

- primjena ravninskog zamjenskog sustava više nije moguća



Raspodjela sila od translacije i rotacije

Kod statički neodređenih ukrutnih sustava nastaju kod:

- nesimetričnog rasporeda
 - djelovanja sila vjetra ekscentrično obzirom na središte posmika
- i sile od pomaka (translacije) i od zakretanja (rotacije).

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. NESIMETRIČNI UKRUTNI SUSTAV

■ RASPODJELA SILA OD ROTACIJE

■ Središte posmika

- Horizontalna sila vjetra u z-smjeru:

$$S_i = W_z \frac{(EI)_i}{\sum(EI)}$$

- Moment oko težišta:

$$W_z \cdot y_0^* = \sum S_{z,i} \cdot y_i^* = \sum \left[W_z \frac{(EI)_{y,i} \cdot y_i^*}{\sum(EI)_{y,i}} \right]$$

- Iz gornjeg slijedi položaj središta posmika

$$y_0^* = \frac{\sum [(EI)_{y,i} \cdot y_i^*]}{\sum(EI)_{y,i}}$$

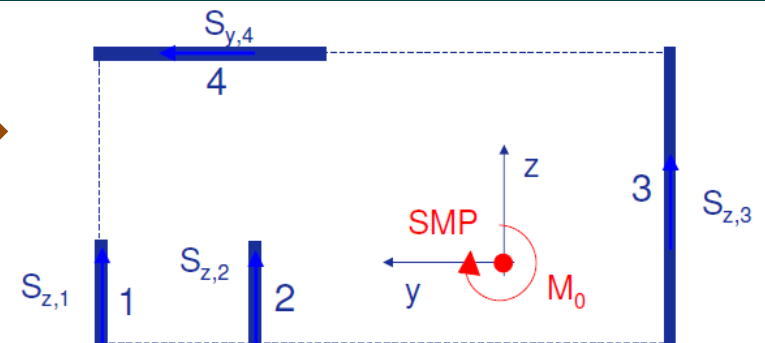
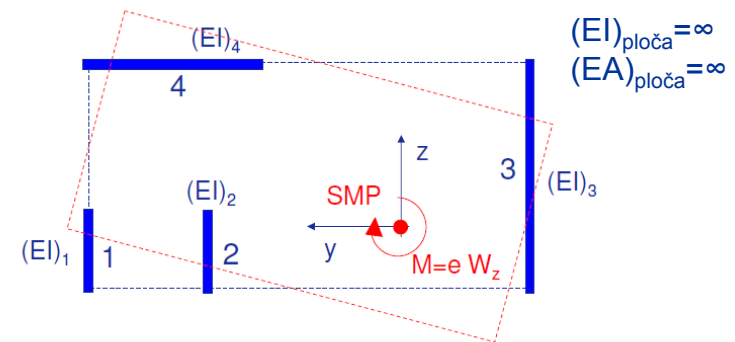
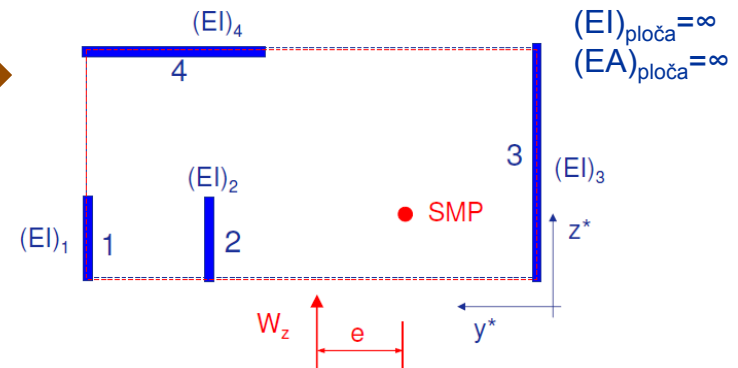
$$z_0^* = \frac{\sum [(EI)_{z,i} \cdot z_i^*]}{\sum(EI)_{z,i}}$$

■ Torzijski moment oko središta posmika

■ Sile usljed rotacije

- Ravnoteža sila

$$M_0 = \sum (S_{z,i} \cdot y_i + S_{y,i} \cdot z_i)$$



SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

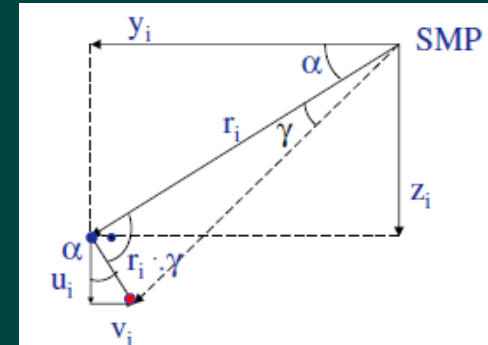
RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. NESIMETRIČNI UKRUTNI SUSTAV

■ RASPODJELA SILA OD ROTACIJE

- Pomaci vrha u z-smjeru uslijed sile $S_{z,i}$:
- Pomaci vrha u y-smjeru uslijed sile $S_{y,i}$:
- Iz jednadžbe ravnoteže dobiva se odnos između pomaka i momenta:

$$u_i = \frac{S_{z,i} \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{y,i}}$$

$$v_i = \frac{S_{y,i} \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{z,i}}$$



$$M_0 = \sum (S_{z,i} \cdot y_i + S_{y,i} \cdot z_i) \Leftrightarrow$$

$$M_0 = \sum \left(\frac{3 \cdot u_i \cdot E \cdot I_{y,i}}{h^3} \cdot y_i + \frac{3 \cdot v_i \cdot E \cdot I_{z,i}}{h^3} \cdot z_i \right)$$

- Pomak proizvoljne točke:
- Umetanje izraza za pomake u momentnu jednadžbu:

$$u_i = r_i \cdot \gamma \cdot \cos \alpha = \gamma \cdot y_i$$

$$v_i = -r_i \cdot \gamma \cdot \sin \alpha = -\gamma \cdot z_i$$

$$M_0 = \frac{3}{h^3} \cdot \gamma \cdot \sum (E \cdot I_{y,i} \cdot y_i^2 + E \cdot I_{z,i} \cdot z_i^2)$$

- Krutost torzije krivljenja:
- Zakretanje kao funkcija krutosti torzije krivljenja i torzijskog momenta:

$$E \cdot I_{\omega} = \sum (E \cdot I_{y,i} \cdot y_i^2 + E \cdot I_{z,i} \cdot z_i^2) \equiv C_M$$

$$\gamma = \frac{M_0 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{1}{\sum (E \cdot I_{y,i} \cdot y_i^2 + E \cdot I_{z,i} \cdot z_i^2)} = \frac{M_0 \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{\omega}}$$

SUSTAVI ZA PREUZIMANJE HORIZONTALNIH DJELOVANJA

RASPODJELA SILA NA ST.NEODREĐ. NESIMETRIČNI UKRUTNI SUSTAV

■ RASPODJELA SILA OD ROTACIJE

- Pomak vrha od sile odnosno zakretanja:

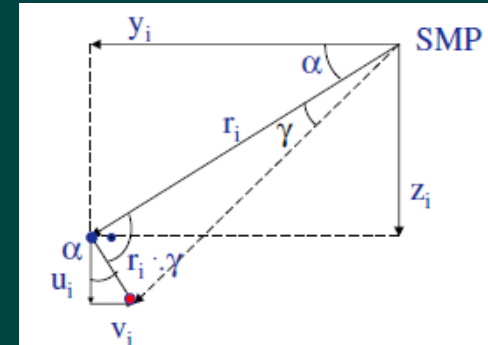
$$u_i = \gamma \cdot y_i = \frac{S_{z,i} \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{y,i}}$$



$$S_{z,i} = \frac{3}{h^3} \cdot \gamma \cdot y_i \cdot E \cdot I_{y,i}$$



$$S_{z,i} = \frac{3}{h^3} \cdot \frac{M_0 \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_\omega} \cdot y_i \cdot E \cdot I_{y,i}$$



- Opća jednačba za izračun sila od torzije:

$$S_{z,i} = M_0 \cdot \frac{E \cdot I_{y,i} \cdot y_i}{E \cdot I_\omega}$$

$$S_{y,i} = -M_0 \cdot \frac{E \cdot I_{z,i} \cdot z_i}{E \cdot I_\omega}$$

■ SUPERPOZICIJA SILA OD TRANSLACIJE I ROTACIJE

- u y-smjeru:

$$S_{y,i} = S_{y,i}^{\text{trans}} + S_{y,i}^{\text{rot}}$$

- u z-smjeru:

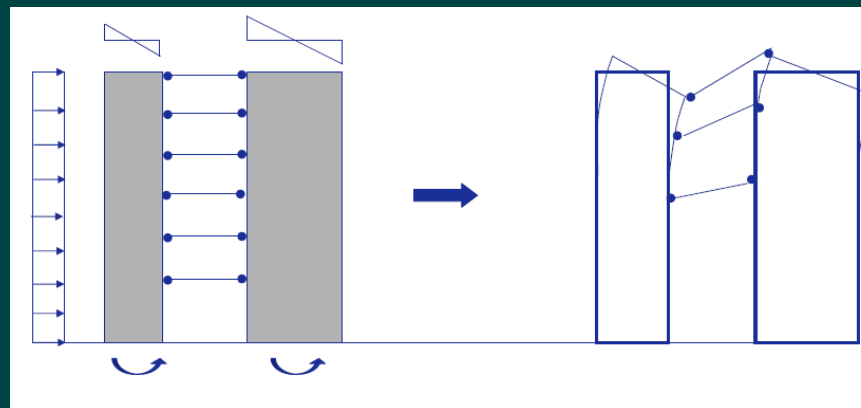
$$S_{z,i} = S_{z,i}^{\text{trans}} + S_{z,i}^{\text{rot}}$$

INTERAKCIJA URKUTNIH SUSTAVA ZA HORIZONTALNA I VERTIKALNA DJELOVANJA

□ Interakcija za horizontalna djelovanja

- vezni štapovi preuzimaju samo normalne sile
- svi elementi imaju jednake horizontalne deformacije, ali različite vertikalne deformacije
- prijenos vertikalnih i horizontalnih opterećenja potpuno neovisan

➡ *Moguće je razmatranje po katovima*

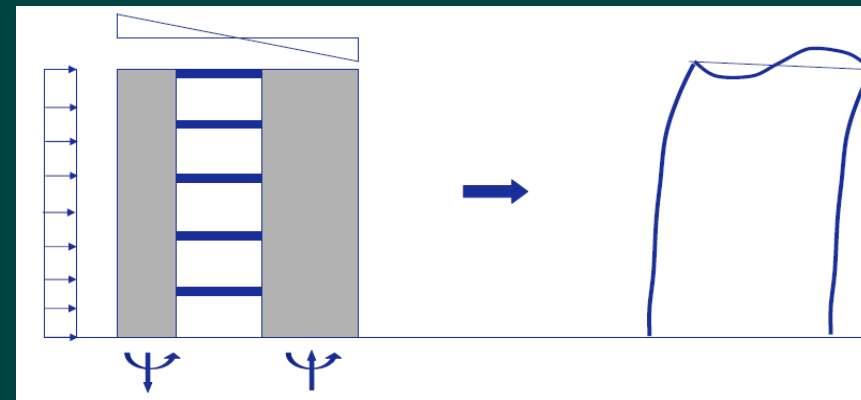


□ Interakcija za i vertikalna djelovanja

- vezni štapovi mogu prenijeti i normalne i poprečne sile
- vertikalne i horizontalne deformacije su jednake
- vertikalni i horizontalni prijenosi sila su međusobno povezani (interakcija)

➡ *Preraspodjela horizontalnih i vertikalnih sila je moguća.*

➡ *Neophodno je modeliranje cijele zgrade kao prostornog sustav.*

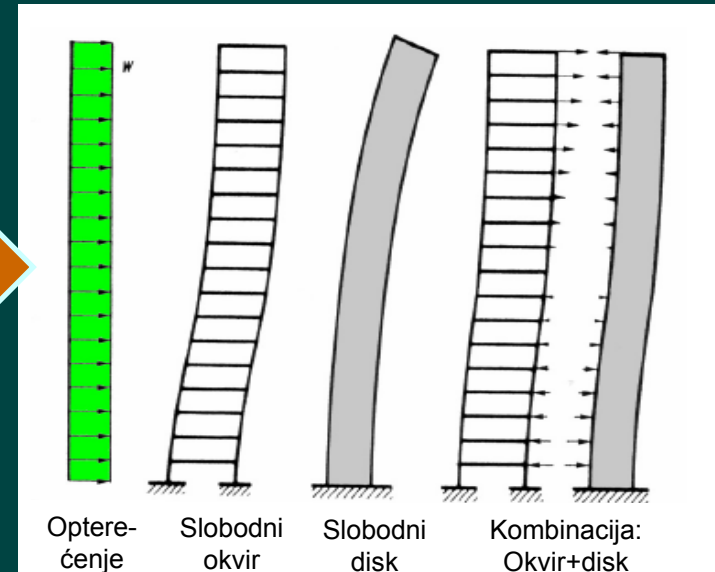


INTERAKCIJA UKRUTNIH SUSTAVA ZA HORIZONTALNA I VERTIKALNA DJELOVANJA

□ Interakcija za horizontalna djelovanja

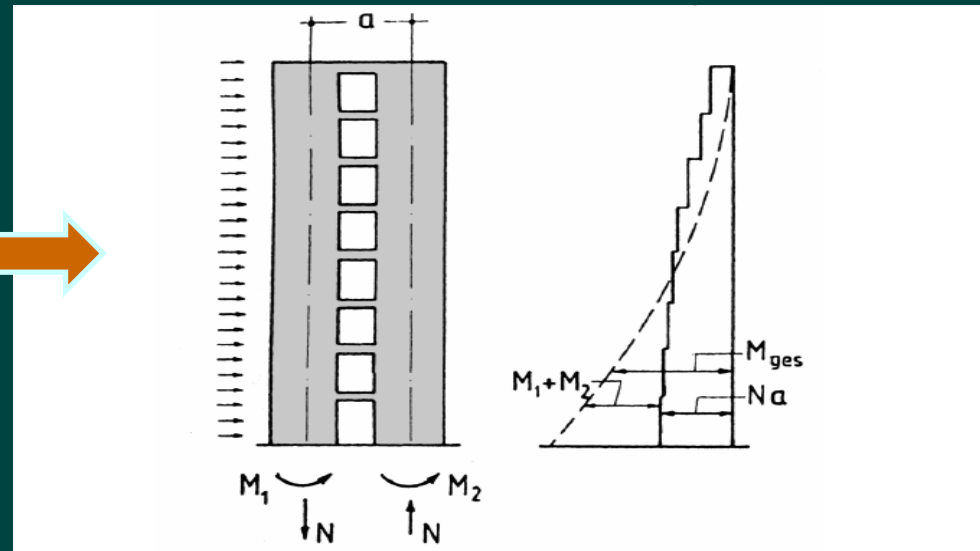
- U praksi se ovaj slučaj rijetko javlja zbog različitih deformacijskih značajki pojedinih konstrukcijskih elemenata

- kombinacija diskova (zidova) i okvira



□ Interakcija za i vertikalna djelovanja

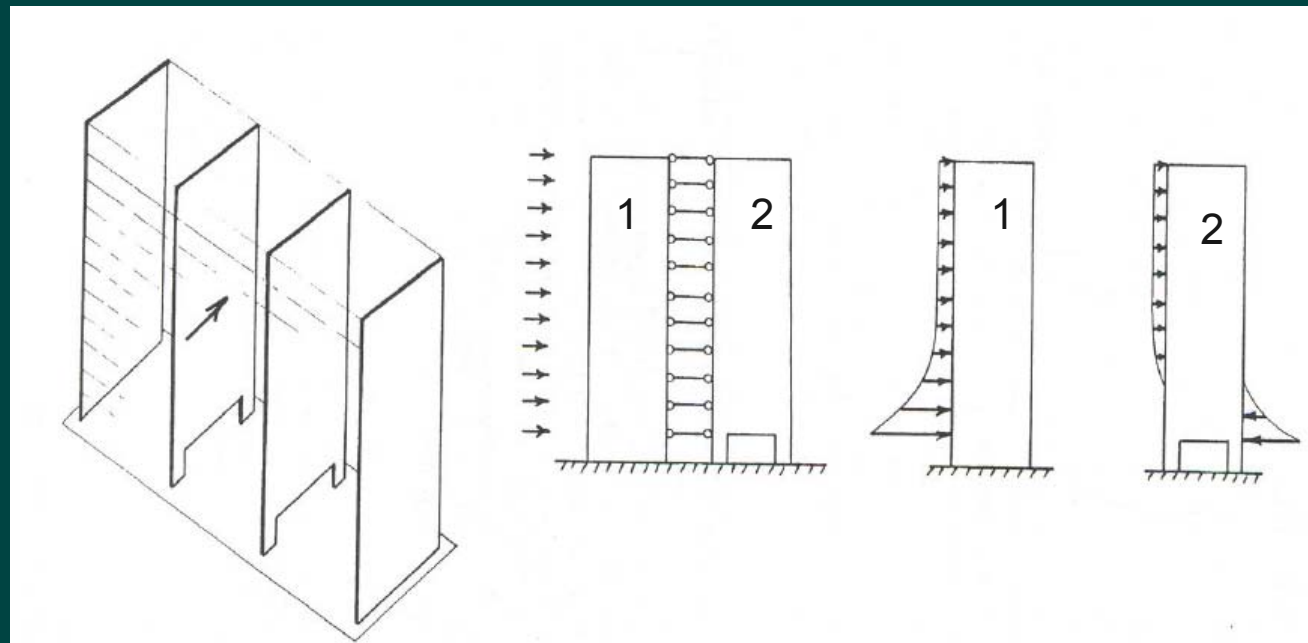
- primjena ukrutnog sustava raščlanjenog diska



PONAŠANJE KONSTRUKCIJA OD ZIDOVA

DISKONTINUITET U PODNOŽJU KONSTRUKCIJE

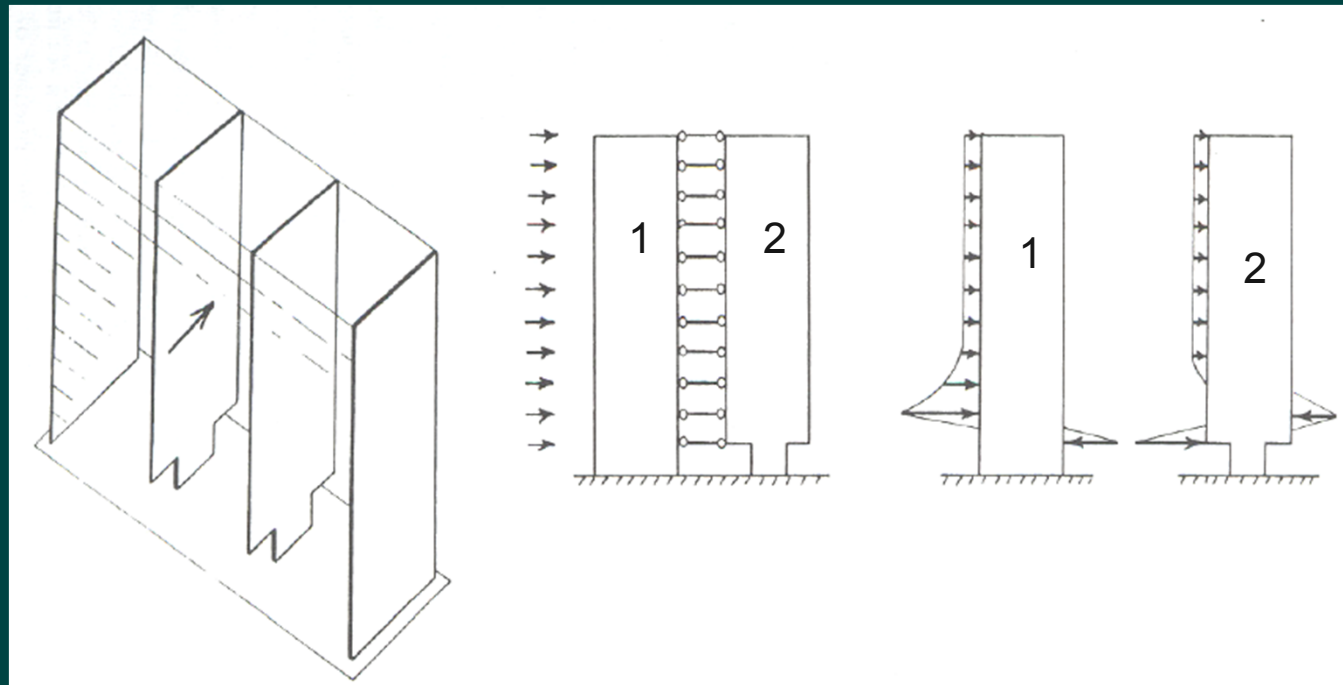
- U hotelima i zgradama za stanovanje u prizemlju su uobičajeni veliki lobiji i konferencijske sale.
 - Stoga se neki zidovi u prizemlju prekidaju.
- Kod dva unutrašnja zida preostala su samo dva rubna stupa.
- Zamjenski ekvivalentni ravninski model pola konstrukcije ima samo dva zida,
 - Zid 1 puni vanjski zid i
 - Zid 2 djelomično prekinuti unutrašnji zid.
- Za horizontalne akcije fleksibilnost stupova zida 2 čini zgradu bočno manje krutom u tom dijelu:
 - posljedica je velika preraspodjela posmičnih sila od zida 2 na zid 1 i
 - nešto manja preraspodjela momenata savijanja.



PONAŠANJE KONSTRUKCIJA OD ZIDOVA

DISKONTINUITET U PODNOŽJU KONSTRUKCIJE

- Još složenija situacija - zbog još više smanjene krutosti unutrašnjih zidova (dva rubna stupa su puno kruća od kratkog središnjeg zida) dolazi do
 - velike preraspodjele momenata savijanja sa unutrašnjeg zida 2 na vanjski zid 1 u presjeku iznad prizemlja i velikih posmičnih sila u oba smjera
 - posmične sile u vanjskim zidovima 1 mogu se povećati dva ili više puta.



PONAŠANJE KONSTRUKCIJA OD ZIDOV PRORAČUN NA RAČUNALU

- ❑ Dosada smo govorili o osnovnim postupcima za izračun
 - opterećenja,
 - posmičnih sila i
 - momenata savijanjau zidovima visoke zgrade.
- ❑ U sljedećem koraku treba odrediti raspodjelu naprezanja unutar zida za
 - izračun potrebne armature i
 - određivanje optimalnog razreda čvrstoće betona.
- ❑ Jednostavni pravokutni zidovi s odnosom visina/širina > 5 mogu se proračunati klasičnom teorijom savijanja.
- ❑ Složeniji zidovi zahtijevaju proračun konačnim elementima (FEM).
 - Idealni konačni element za zid je membranski element, pravokutni ili četverokutni ravninski element (*plane stress element*).
 - Za područja koncentracije po potrebi treba progustiti mrežu elemenata, što ponekad može izazvati numeričke probleme, divergenciju zbog koje model zakazuje.
- ❑ Alternativno se umjesto FEM proračuna može rabiti zamjenski analogni okvirni proračun, koji opet može biti nešto složeniji od većine ručnih proračunskih postupaka.



zid L-oblika: jaka armatura u prizemlju gotovo maksimalna dopuštena (8% poprečnog presjeka zida), što nije lako ugraditi.

SPECIJALNE INŽENJERSKE GRAĐEVINE SLJEDEĆE PREDAVANJE

**Tornjevi, dimnjaci, jarboli,
vjetroelektrane**