

Betonové konstrukce II/8

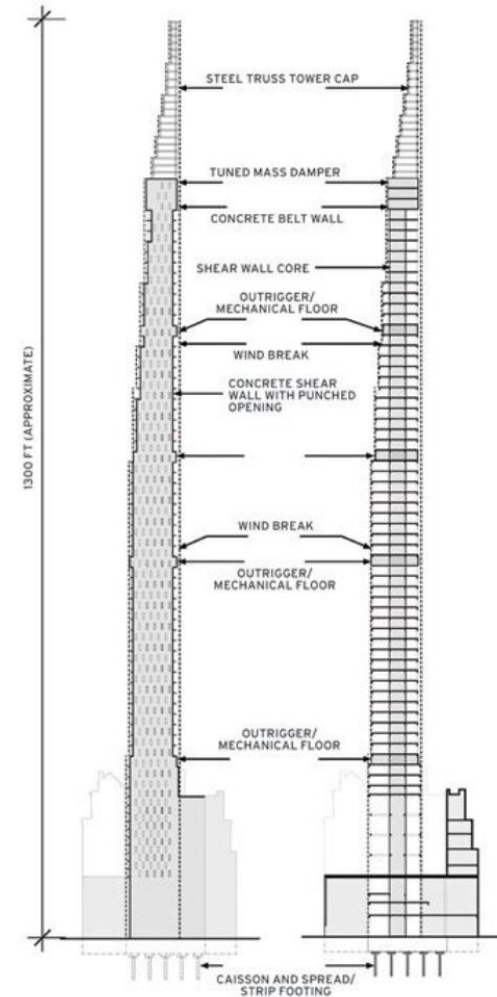
Vysoké železobetonové budovy

Council on Tall Buildings and Urban Habitat

www.ctbuh.org

- Megatall buildings výška nad 600 m
- Supertall buildings výška nad 300 m
- High-rise buildings výška nad 150 m
- Tall buildings výška nad 50 m
nebo nad 14 podlaží

- Poměr výšky k půdorysu (štíhlost výškové stavby)
 - Dříve běžně 5:1 až 10:1
 - 423 Park Avenue NY (2015) 15:1
 - 111 West 57th Street NY (2021) 24:1



STRUCTURAL DIAGRAM
111 West 57th Street

111 West 57th Street New York - nejštíhlejší budova

štíhlost 1:24, kombinovaná konstrukce (beton + ocel nástavba), 435 m, 2021
vlevo [Central Park Tower](#) – nejvyšší zcela železobetonová budova – 472,4 m, 2020



Historie vysokých budov

- První výškové stavby měly ocelovou nosnou konstrukci
- Chrysler Building New York 1930 77 podlaží 319 m
- Empire State Building New York 1931 102 podlaží 381 m



Empire State Building



Chrysler Building

Ocelová stavba – World Trade Center (WTC) NY – 417 m – 1972 - 2001
Železobetonová stavba – CITIC Plaza Guangzhou – 390 m – 1996

Nejstarší vysoké železobetonové stavby



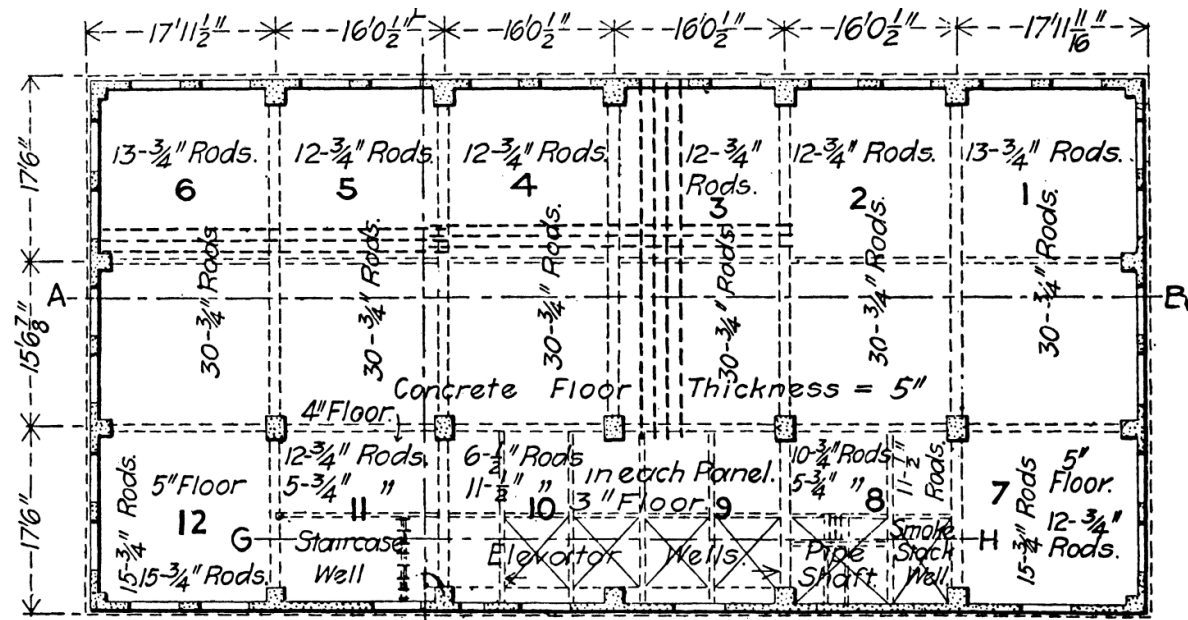
Ingalls Building - 64,62 m
E.L. Ransome, Cincinnati 1903
16 podlaží



Oak Tower – 115 m
Kansas City 1913

Ingalls Building - 1903

- Železobetonová rámová konstrukce
- Rozpony zhruba 4,8/9,6 m
- Sloupy zhruba 800/800 mm
- Tloušťka stěn 200 mm
- Tloušťka stropní desky 130 mm
- Výztuž ze zkroucené oceli (patent Ransome)



Plan of Third to Attic Floors inclusive.

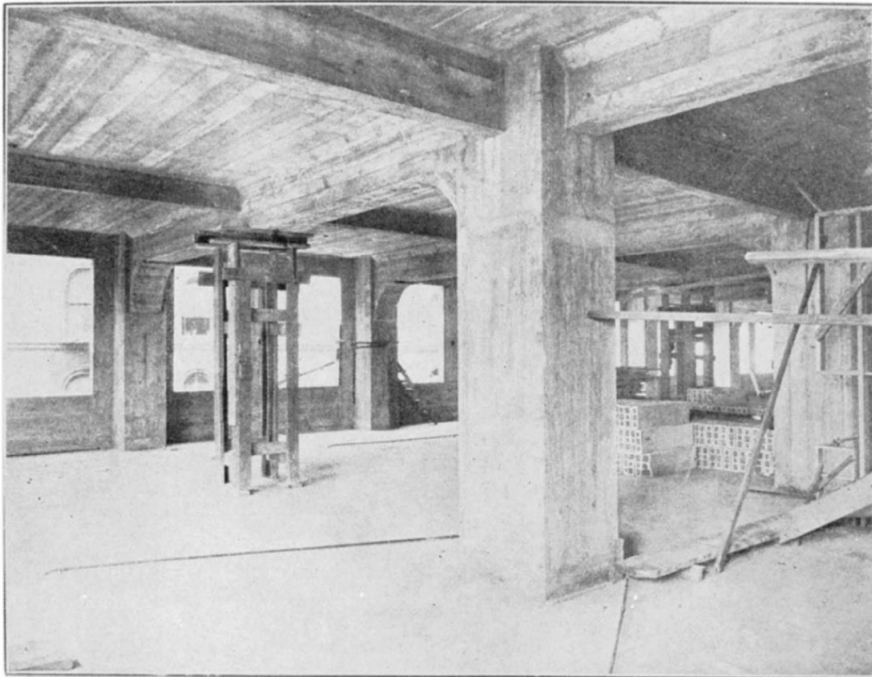
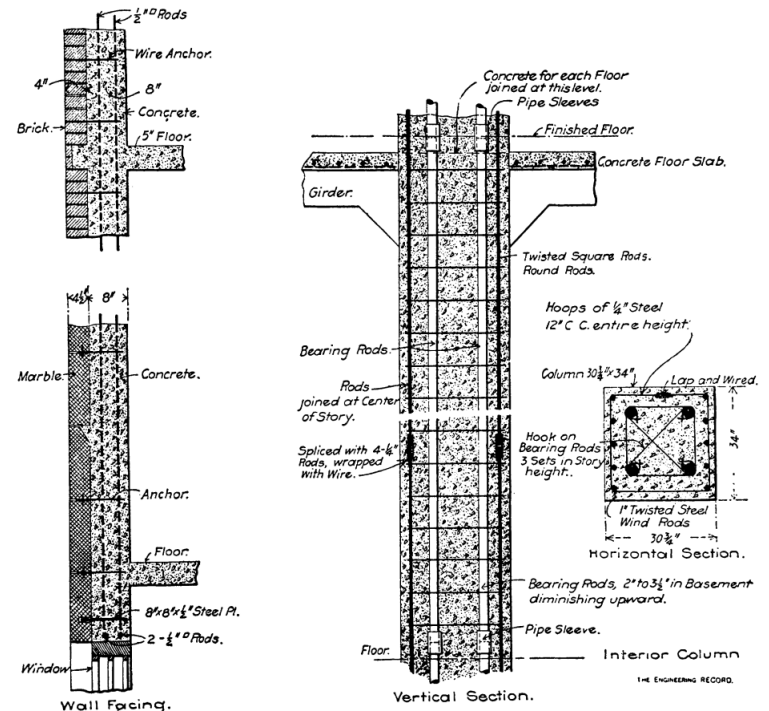
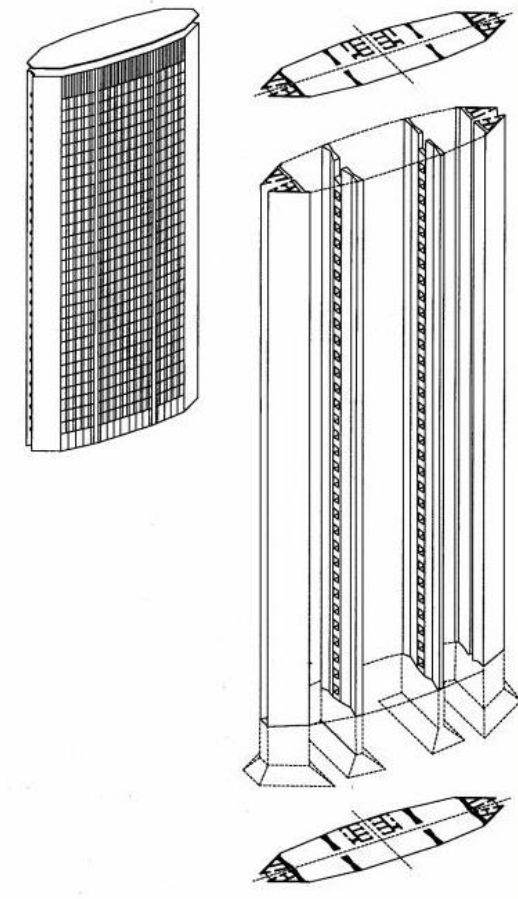


PLATE 2.—Ingalls Building. Construction view showing the framing system. (*Architectural Record*.)



Pirelli Tower Miláno

- Gio Ponti + Pier Luigi Nervi, 1958
- Výška 127 m – ve své době nejvyšší budova v Evropě
- Příčné nosné stěny
- 2002 – náraz malého letadla do 24. a 25. podlaží



Nejvyšší budovy světa v roce 1988 - ocel

Poř.	Budova	Město	Stát	Rok	Výška	Materiál	Využití
01	Sears Tower	Chicago	USA	1974	442	Ocel	Kanceláře
02	One World Trade Center	New York	USA	1972	417	Ocel	Kanceláře
03	Two World Trade Center	New York	USA	1973	415	Ocel	Kanceláře
04	Empire State Building	New York	USA	1931	381	Ocel	Kanceláře
05	Aon Center	Chicago	USA	1973	346	Ocel	Kanceláře
06	John Hancock Center	Chicago	USA	1970	344	Ocel	Smíšené
07	Chrysler Building	New York	USA	1930	319	Ocel	Kanceláře
08	JP Morgan Chase Tower	Houston	USA	1982	303	Smíšený	Kanceláře
09	Wells Fargo Plaza	Houston	USA	1983	302	Ocel	Kanceláře
10	First Canadian Place	Toronto	Kanada	1975	298	Ocel	Kanceláře

Ze 100 nejvyšších staveb světa v roce 2022

- Z nich bylo 87 dokončeno po roce 2000
- Z budov dokončených po roce 2000
 - 68 % z nich má kombin. nebo ocelobetonovou konstrukci
 - 31 % z nich má kompletně železobetonovou konstrukci
 - 1 % z nich má kompletně ocelovou konstrukci

Nejvyšší dokončené budovy světa 04/2023

RANK	NAME	CITY	STATUS ^①	COMPLETION ^①	HEIGHT ^①	FLOORS ^①	MATERIAL ^①	FUNCTION ^①
1	Burj Khalifa	Dubai	C	2010	828 m / 2,717 ft	163	Steel Over Concrete	Office / Residential / Hotel
2	Shanghai Tower	Shanghai	C	2015	632 m / 2,073 ft	128	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
3	Makkah Royal Clock Tower	Mecca	C	2012	601 m / 1,972 ft	120	Steel Over Concrete	Serviced Apartments / Hotel / Retail
4	Ping An Finance Center	Shenzhen	C	2017	599.1 m / 1,965 ft	115	Concrete-Steel Composite	Office
5	Lotte World Tower	Seoul	C	2017	554.5 m / 1,819 ft	123	Concrete-Steel Composite	Hotel / Residential / Office / Retail
6	One World Trade Center	New York City	C	2014	541.3 m / 1,776 ft	94	Concrete-Steel Composite	Office
7	Guangzhou CTF Finance Centre	Guangzhou	C	2016	530 m / 1,739 ft	111	Composite	Hotel / Residential / Office
7	Tianjin CTF Finance Centre	Tianjin	C	2019	530 m / 1,739 ft	97	Concrete-Steel Composite	Hotel / Serviced Apartments / Office
9	CITIC Tower	Beijing	C	2018	527.7 m / 1,731 ft	109	Concrete-Steel Composite	Office
10	TAIPEI 101	Taipei	C	2004	508 m / 1,667 ft	101	Composite	Office
11	Shanghai World Financial Center	Shanghai	C	2008	492 m / 1,614 ft	101	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
12	International Commerce Centre	Hong Kong	C	2010	484 m / 1,588 ft	108	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
13	Central Park Tower	New York City	C	2020	472.4 m / 1,550 ft	98	All-Concrete	Residential / Retail
14	Lakhta Center	St. Petersburg	C	2019	462 m / 1,516 ft	87	Concrete-Steel Composite	Office
15	Vincom Landmark 81	Ho Chi Minh City	C	2018	461.2 m / 1,513 ft	81	Concrete-Steel Composite	Hotel / Residential
16	The Exchange 106	Kuala Lumpur	C	2019	453.6 m / 1,488 ft	95	Concrete-Steel Composite	Office
17	Changsha IFS Tower T1	Changsha	C	2018	452.1 m / 1,483 ft	94	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
18	Petronas Twin Tower 1	Kuala Lumpur	C	1998	451.9 m / 1,483 ft	88	Concrete-Steel Composite	Office
18	Petronas Twin Tower 2	Kuala Lumpur	C	1998	451.9 m / 1,483 ft	88	Concrete-Steel Composite	Office
20	Suzhou IFS	Suzhou	C	2019	450 m / 1,476 ft	95	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office / Serviced Apartments

RANK	NAME	CITY	STATUS ^①	COMPLETION ^①	HEIGHT ^①	FLOORS ^①	MATERIAL ^①	FUNCTION ^①
20	Zifeng Tower	Nanjing	C	2010	450 m / 1,476 ft	66	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
22	Wuhan Center Tower	Wuhan	C	2019	443.1 m / 1,454 ft	88	Concrete-Steel Composite	Hotel / Residential / Office
23	Willis Tower	Chicago	C	1974	442.1 m / 1,451 ft	108	All-Steel	Office
24	KK100	Shenzhen	C	2011	441.8 m / 1,449 ft	98	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
25	Guangzhou International Finance Center	Guangzhou	C	2010	438.6 m / 1,439 ft	101	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
26	111 West 57th Street	New York City	C	2021	435.3 m / 1,428 ft	84	Steel Over Concrete	Residential
27	One Vanderbilt Avenue	New York City	C	2020	427 m / 1,401 ft	62	Concrete-Steel Composite	Office
28	432 Park Avenue	New York City	C	2015	425.7 m / 1,397 ft	85	All-Concrete	Residential
29	Marina 101	Dubai	C	2017	425 m / 1,394 ft	101	All-Concrete	Residential / Hotel
30	Trump International Hotel & Tower	Chicago	C	2009	423.2 m / 1,389 ft	98	All-Concrete	Residential / Hotel
31	Minying International Trade Center T2	Dongguan	C	2021	422.6 m / 1,386 ft	85	Concrete-Steel Composite	Office
32	Jin Mao Tower	Shanghai	C	1999	420.5 m / 1,380 ft	88	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
33	Princess Tower	Dubai	C	2012	413.4 m / 1,356 ft	101	Steel Over Concrete	Residential
34	Al Hamra Tower	Kuwait City	C	2011	412.6 m / 1,354 ft	80	All-Concrete	Office
35	Two International Finance Centre	Hong Kong	C	2003	412 m / 1,352 ft	88	Concrete-Steel Composite	Office
36	LCT The Sharp Landmark Tower	Busan	C	2019	411.6 m / 1,350 ft	101	All-Concrete	Hotel / Residential
37	Guangxi China Resources Tower	Nanning	C	2020	402.7 m / 1,321 ft	86	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
38	Guiyang International Financial Center T1	Guiyang	C	2020	401 m / 1,316 ft	79	Concrete-Steel Composite	Hotel / Office
39	China Resources Tower	Shenzhen	C	2018	392.5 m / 1,288 ft	68	Concrete-Steel Composite	Office
40	23 Marina	Dubai	C	2012	392.4 m / 1,287 ft	88	All-Concrete	Residential

Historický vývoj: ocel → vysokohodnotný beton → ocelobeton a kombinace betonu s ocelovou nástavbou

Výhody železobetonové konstrukce

- Vysoká požární odolnost
- Nižší cena betonové konstrukce
- Odolnost proti korozi
- Vyšší útlum při kmitání
- Větší robustnost konstrukce při mimořádných zatíženích

Havárie WTC 11.9.2001

Kolaps konstrukce
v důsledku požáru
způsobeného především
hořením
leteckého benzínu



Beton pro vysoké stavby

- HPC – High Performance Concrete – vysokohodnotný beton
 - Vysoká pevnost – 100 až 150 MPa
 - Vysoká odolnost proti požáru
 - Velmi dobrá zpracovatelnost, dobrá čerpatelnost
 - Samozhutnitelnost
 - Vysoká duktilita

Hlavní zásady výroby HPC

- Nízký vodní součinitel
- Mikrosilika
- Superplastifikátory
- Polypropylénová vlákna
- Ocelová vlákna

Vývoj vysokopevnostního betonu po roce 1960



Lake Point Tower, Chicago
1965, výška 197 m
beton 53 MPa

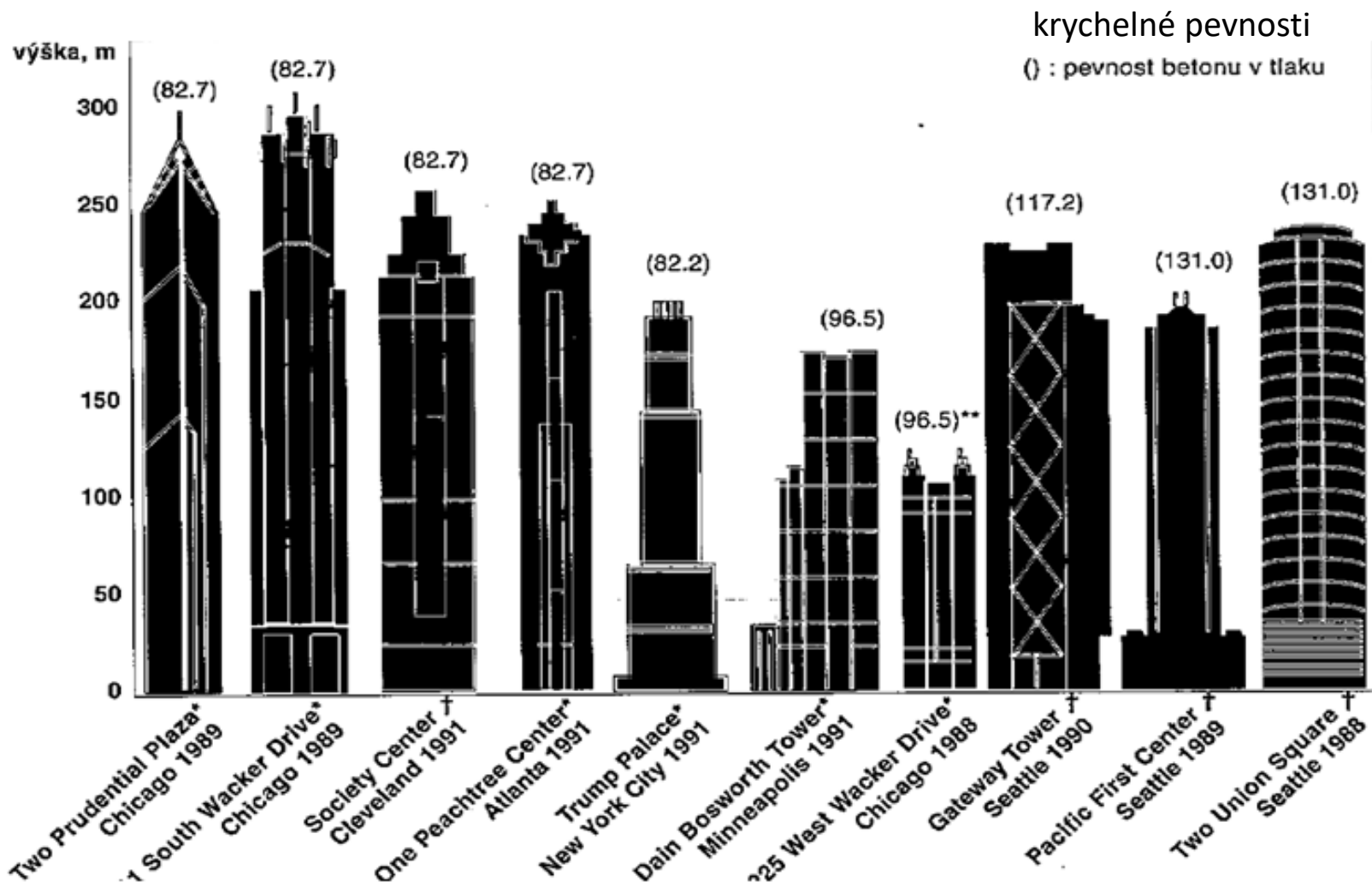


Water Tower Place, Chicago
1976, výška 262 m
beton 62 MPa



River Plaza, Chicago
1977, výška 160 m
beton 77 MPa

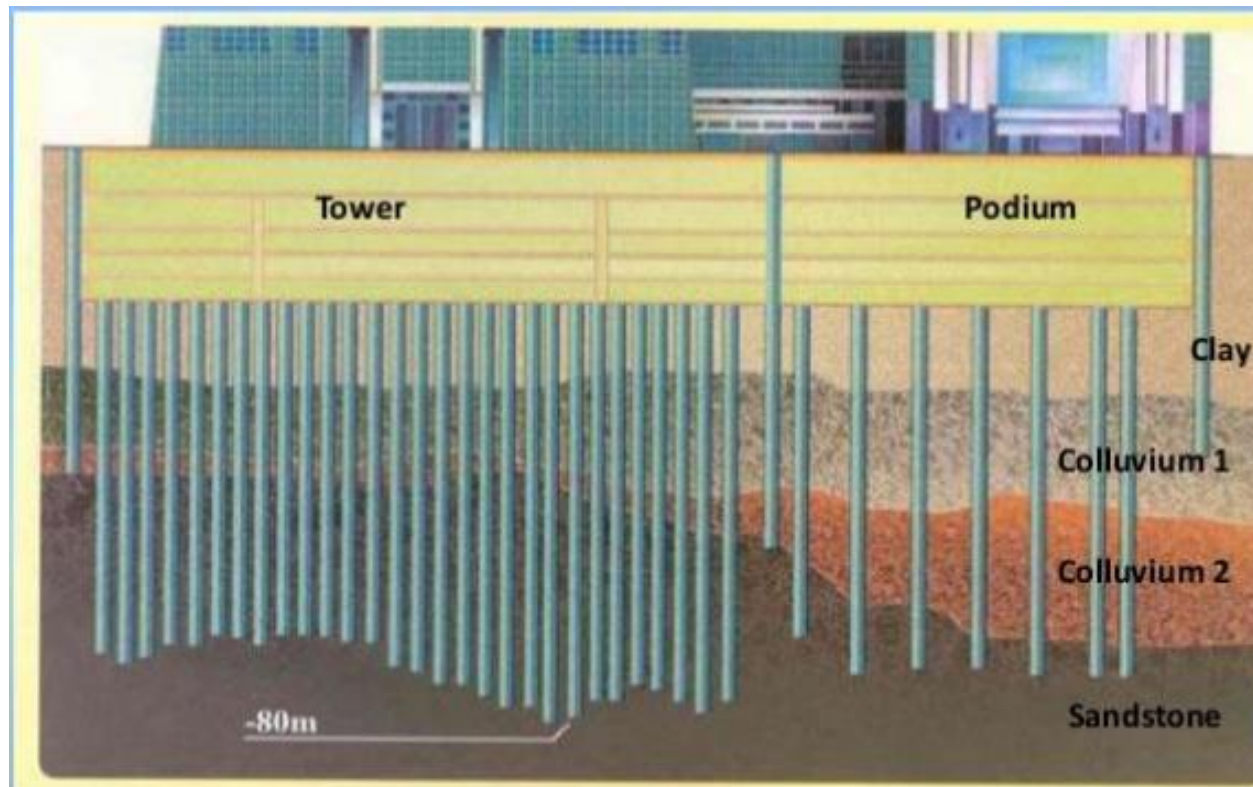
Používání vysokopevnostního betonu v 90. letech 20. století



Zakládání vysokých budov na tlusté desce podepřené pilotami

- Nutnost rozložit zatížení na celý půdorys budovy
- Základová deska tloušťky 2 až 4 m
- Piloty – běžný průměr 1500 mm

Příklad – Taipei 101 (Tchaj-wan, 2004, 509 m)



podnož (nízká přístavba
výškové stavby)

jíl

svahové sedimenty

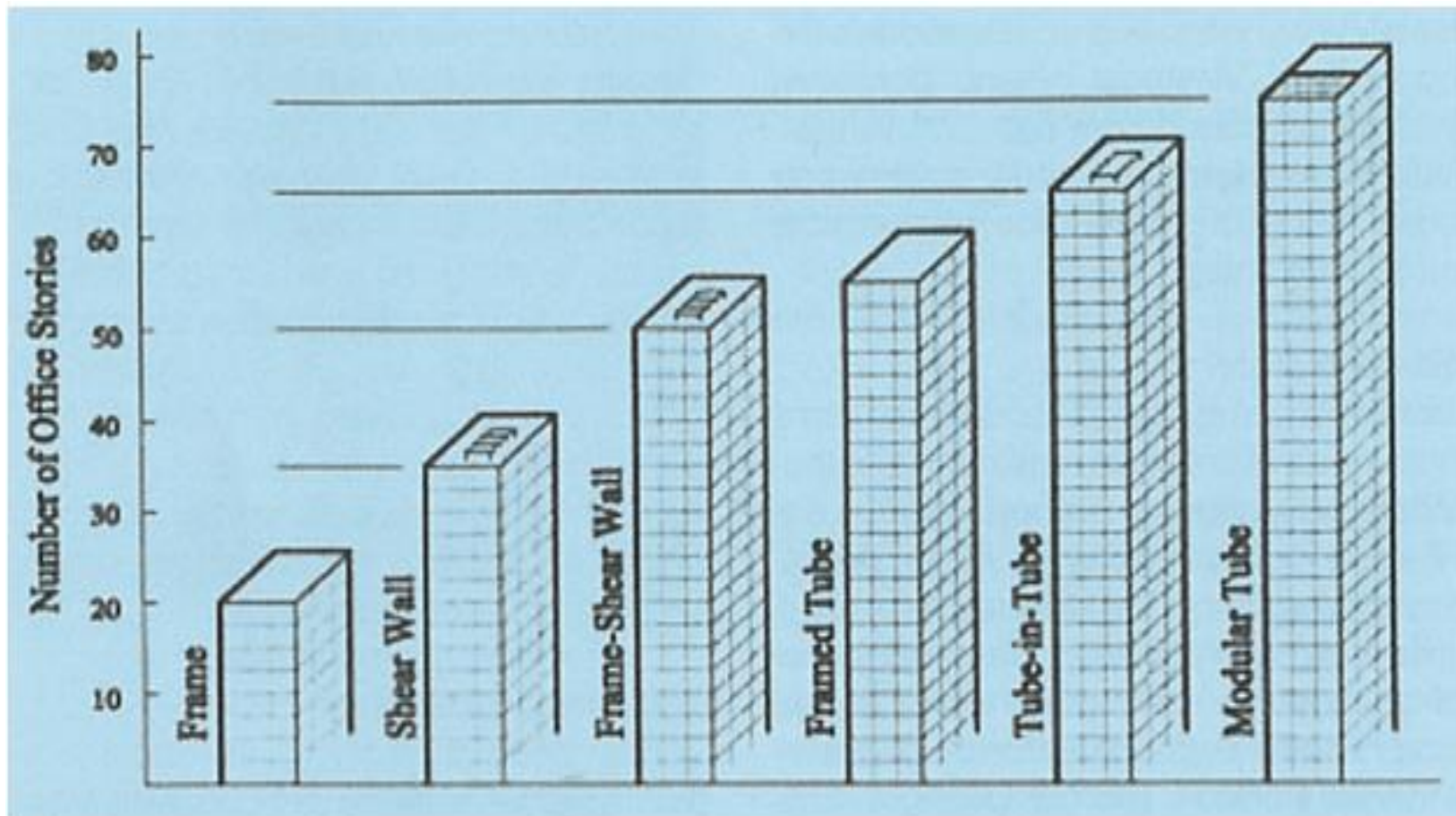
svahové sedimenty

pískovec

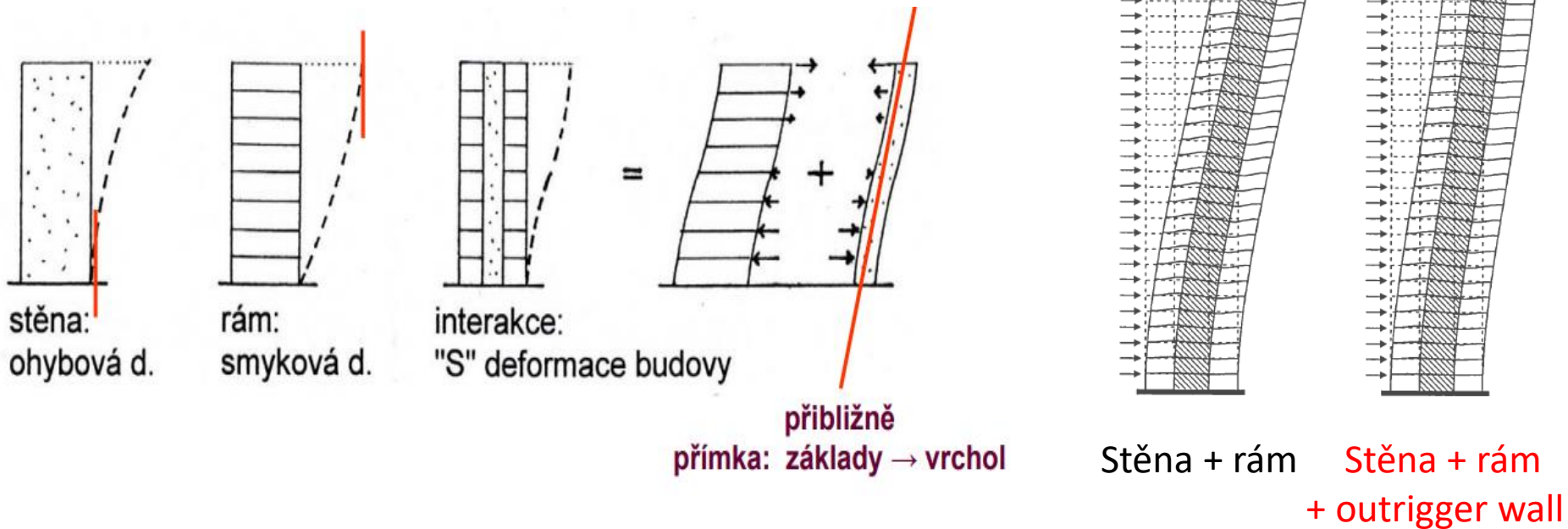
Konstrukce vysokých budov

Od rámu a smykových stěn po tubulární systémy

Fazlur Khan (1929 Dhaka – 1982 Jeddah)



Kombinace rámu a ztužující stěny



- Budova kombinující ztužující stěnu a rám má zhruba přímkovou deformaci
- Interakce stěny a rámu vyvolá redukci průhybu
- Přímková deformace umožňuje zjednodušený dynamický výpočet
- Další zvýšení tuhosti – ztužující stěny (outrigger walls) ve vrcholu

Příklady použitých konstrukčních systémů (Khan)



Brunswick Building
Chicago 1965, 145 m

rámový tubus + smykové stěny

jedny z prvních realizací železobetonových tubusů



De-Witt Chestnut Apartment
Chicago 1964, 120 m

rámový tubus



Onterie Center
Chicago 1986, 174 m

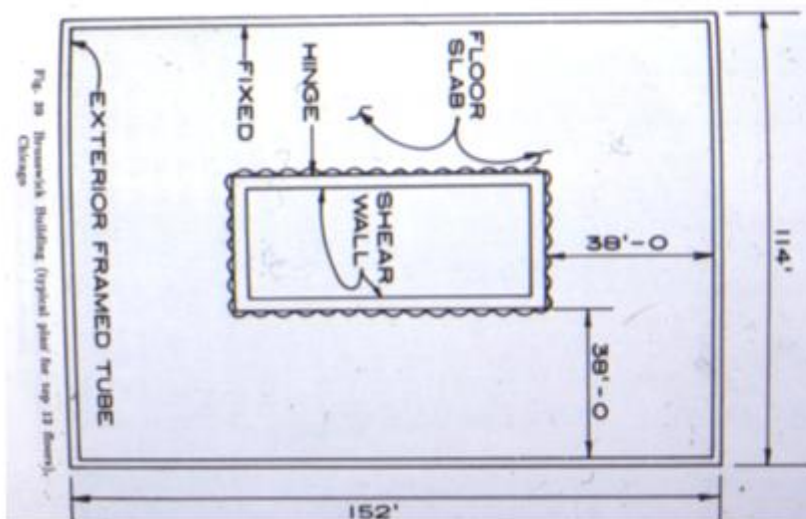
rámový tubus + diag. Ztužení

realizováno po smrti F. Khana,
první použití žel. bet. diag. ztužidel tubusu

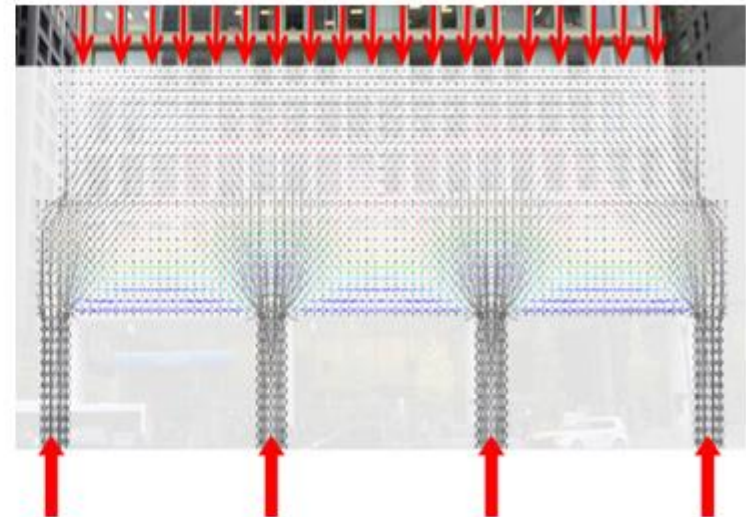
Brunswick Building

- Chicago 1965
- Výška 145 m
- Rámový tubus + smykové stěny

Půdorys



Přechodové patro



Příklady použitých konstrukčních systémů



One Shell Plaza
Houston 1971, 218 m
tubus v tubusu



One Magnificent Mile
Chicago 1983, 205 m
svazek tubusů

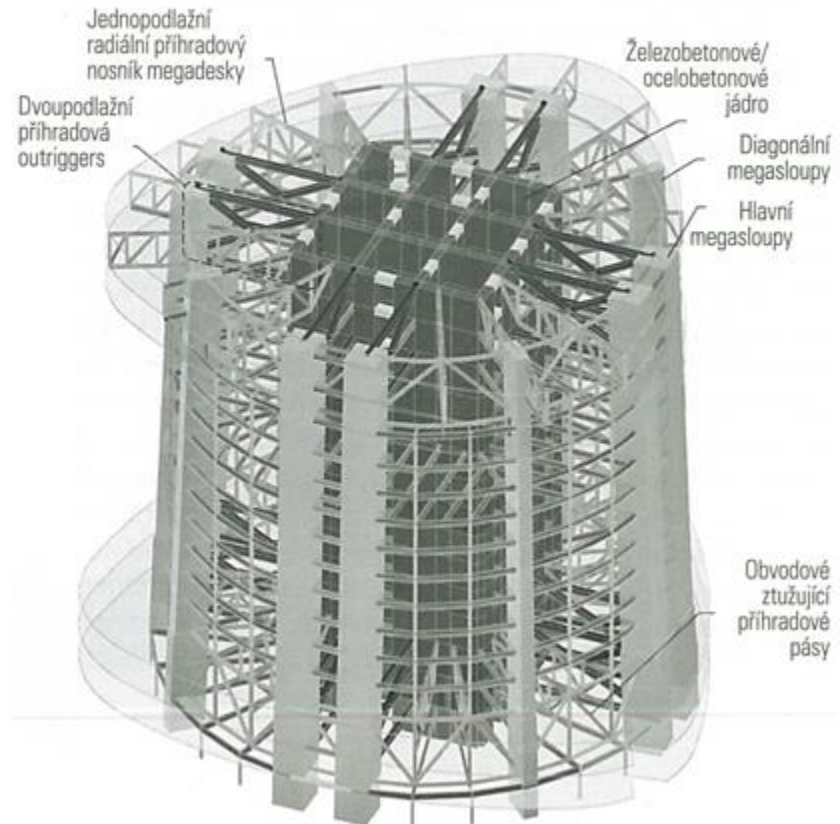


Jin Mao Tower
Šanghaj 1999, 421 m
Core-Outrigger Mega Frame
jedna z prvních realizací tohoto systému

Core-Outrigger Mega Frame

Budova Shanghai Tower (2015, 632 m, ocelobetonová konstrukce)

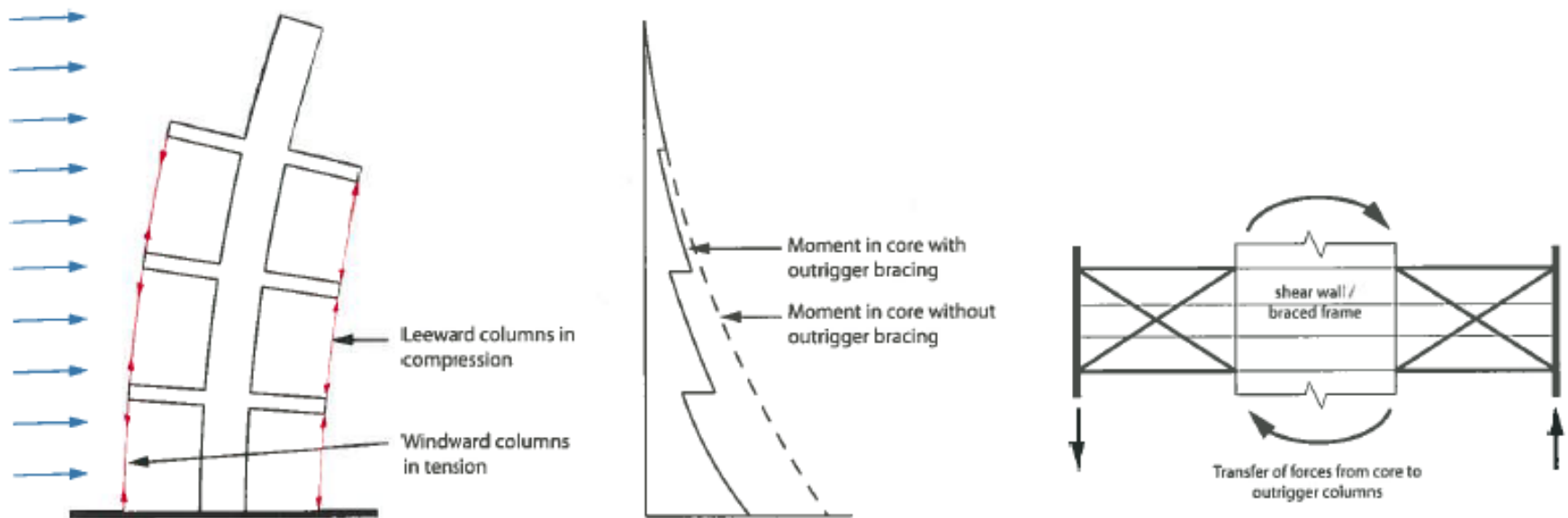
Ocelové obvodové patrové ztužující pásy



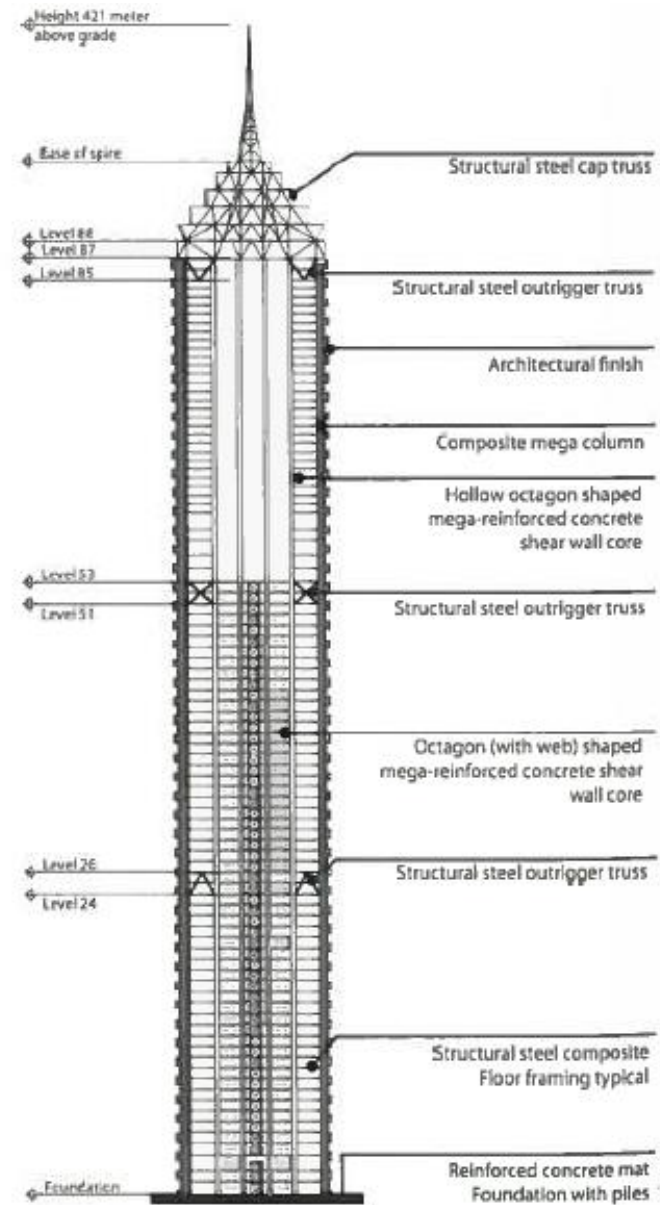
Samoan outrigger canoe



Statické působení obvodových megasloupů v kombinaci s patrovými ztužidly outriggers

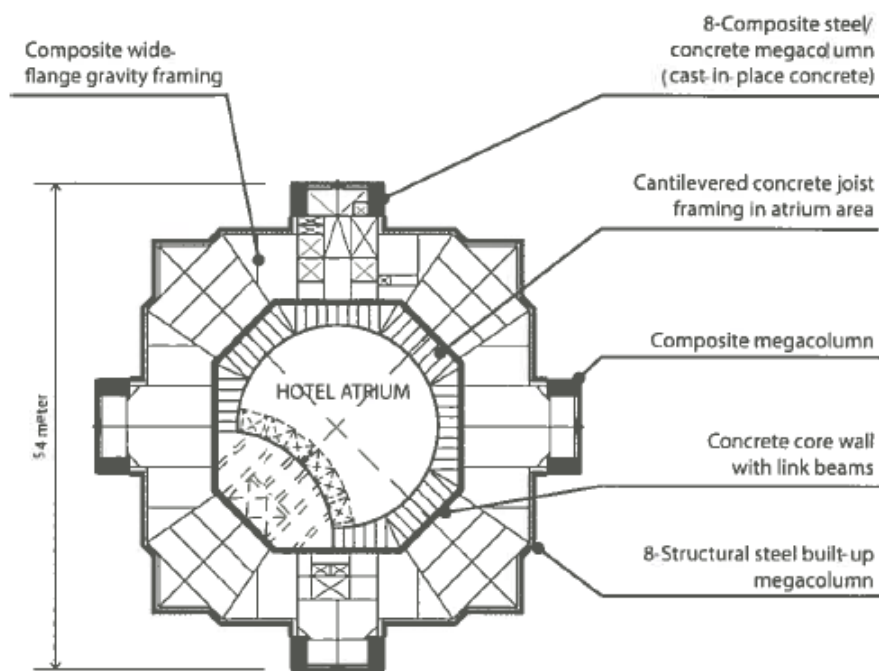


Jin Mao – Šanghaj – 1999 – 421 m

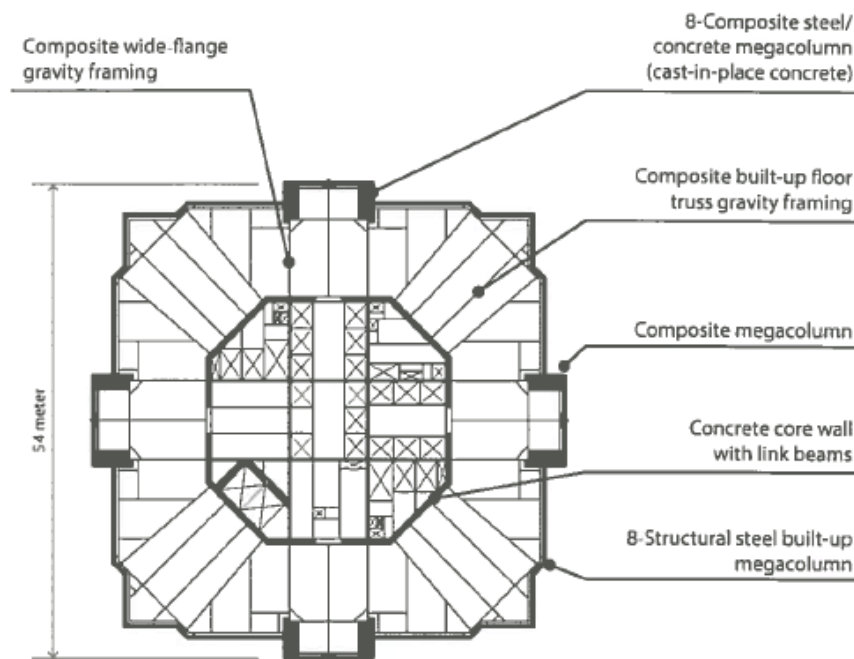


Jin Mao – typická podlaží

- Osm ocelobetonových megaloupů po obvodě budovy
- Tři výškové úrovně ocelových příhradových ztužidel outriggers

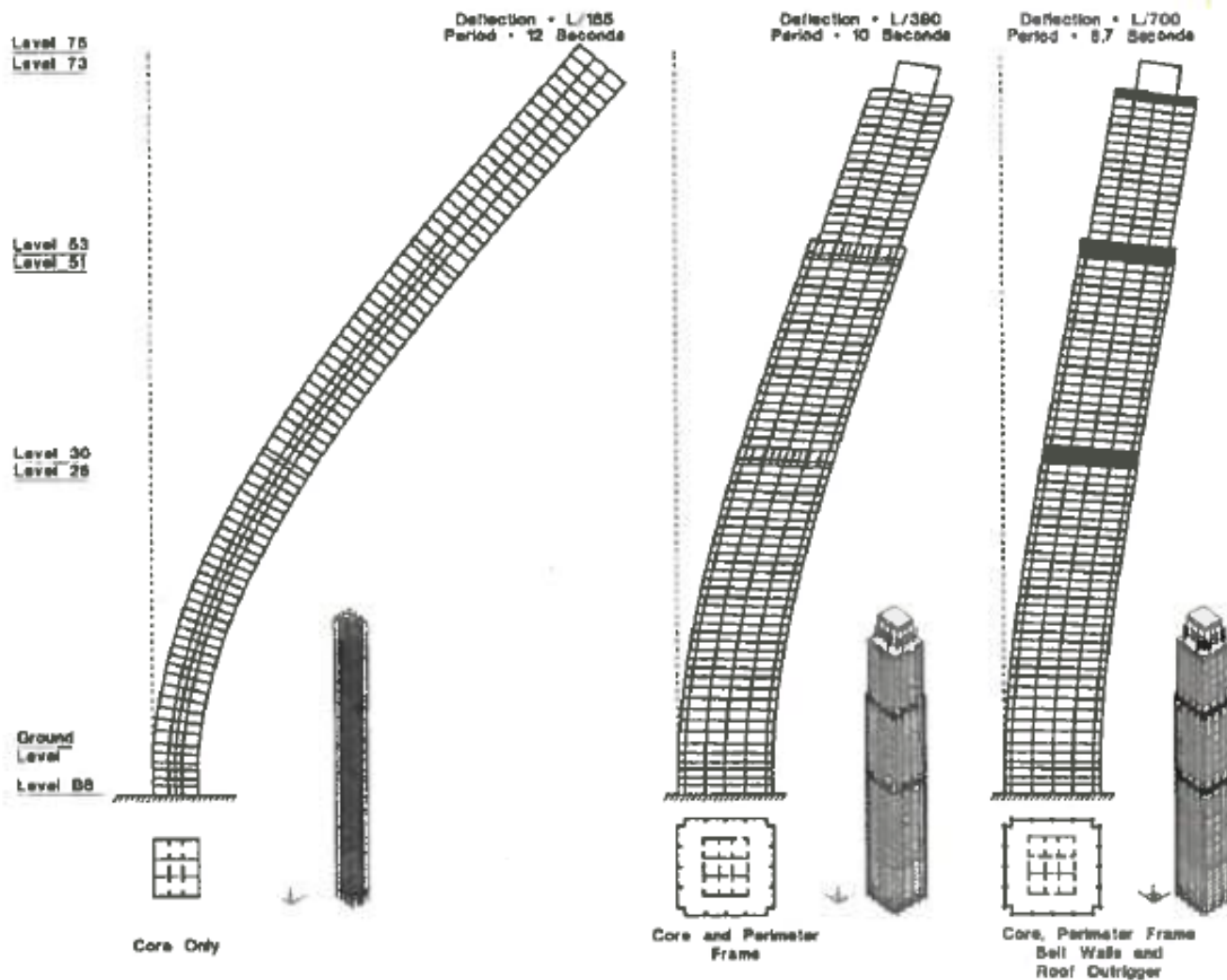


Typical Hotel Framing Plan



Typical Office Framing Plan

Studie průhybu budovy



Pouze jádro

Jádro + obvodový tubus

Jádro + obvodový tubus
+ patrová ztužidla outriggers

Nejvyšší budovy světa mají tvar nahoru se zužující věže

- Plocha vystavená větru se směrem nahoru zmenšuje
- Těžiště budovy musí být co nejnižší
- Nízko položené těžiště omezuje vliv seizmicity
- Půdorys se třemi křídly má velký moment setrvačnosti



Burj Khalifa (2010, 828 m)



Jeddah Tower (2018 pozastaveno, asi 1000 m)

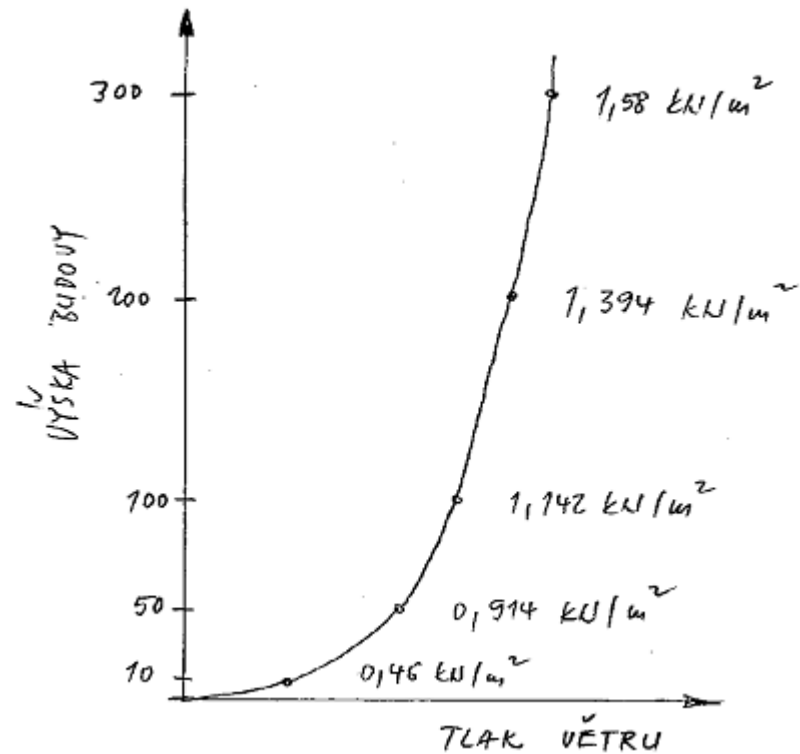


Zatížení vysokých staveb

- Svislé zatížení
- Vítr
- Seismicita
- Dynamické zatížení větrem – kmitání
- Mimořádné zatížení
 - Požár
 - Náraz letadla
 - Teroristický čin

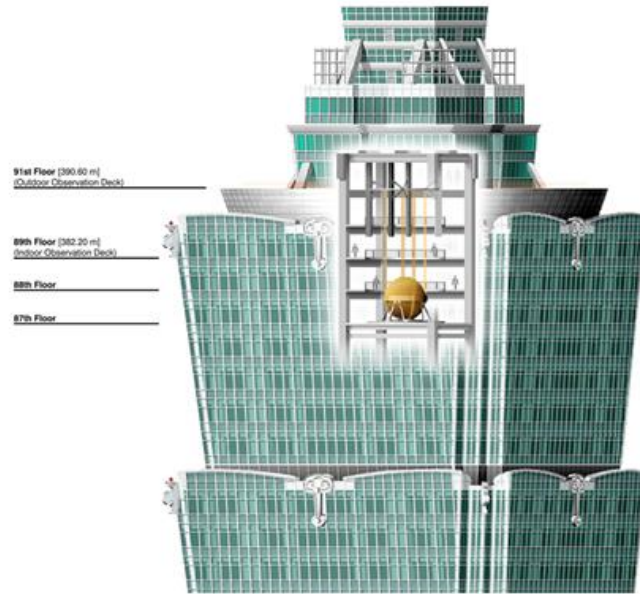
Zatížení větrem

Roste s výškou budovy
Statické a dynamické
Běžně 200 km/hod.



Tlumič kmitů v budově Taipei 101

Tchaj-wan, 2004, 509 m



Funguje na principu tlumeného kyvadla

Zavěšen mezi 92 a 88 podlaží, průměr 5,5 m, hmotnost 660 tun

Náraz letadla

Pirelli Tower Miláno, 2002
malé letadlo, 24-25 podlaží



Empire State Building, 1945
bombardér B25, 78 – 80 podlaží

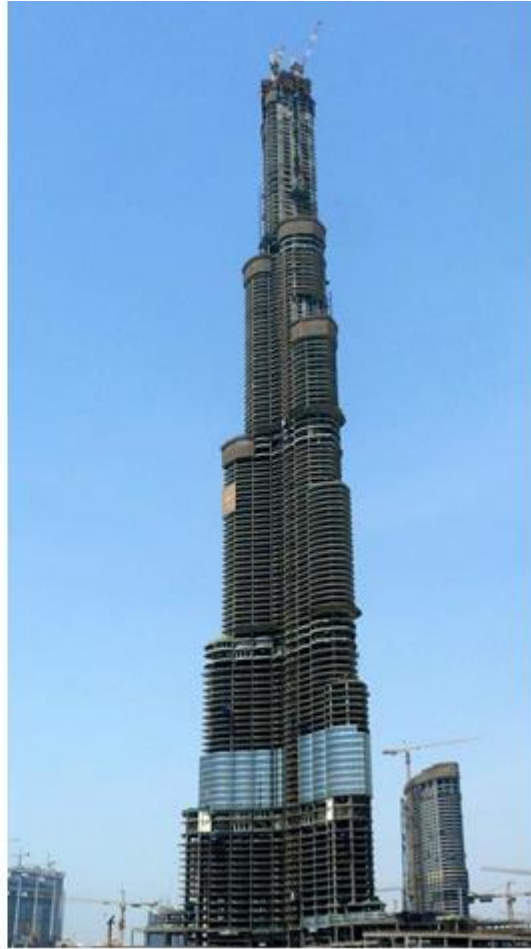


11.9.2001- World Trade Center

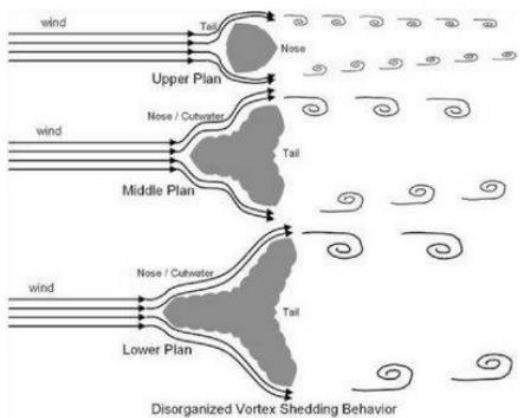
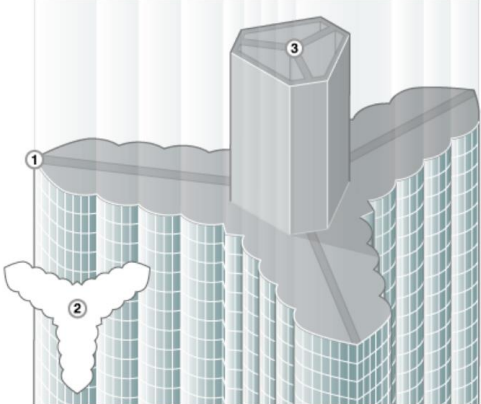
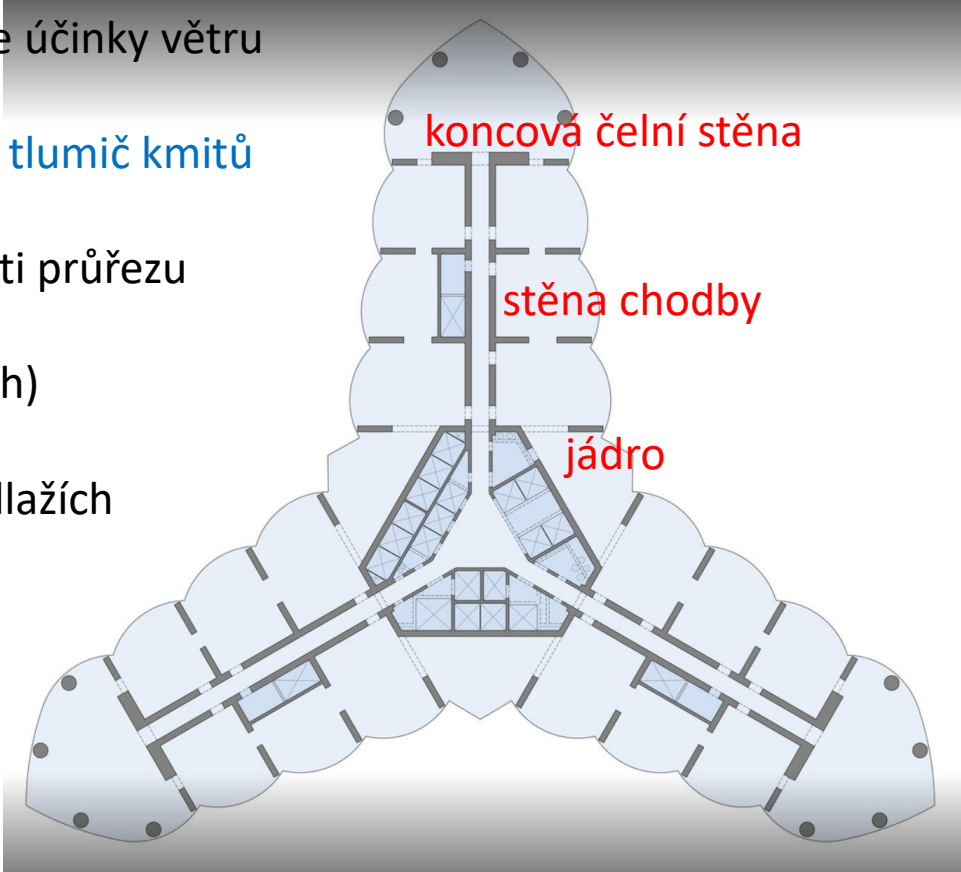


Burj Khalife, Dubaj, 2010, 828 m

- Celkem 163 podlaží - do výšky 586 m beton C65, dále ocel
- Konstrukce podřízena optimalizaci statického a dynamického chování
- Doby výstavby 6 let, cena 1,5 miliardy USD

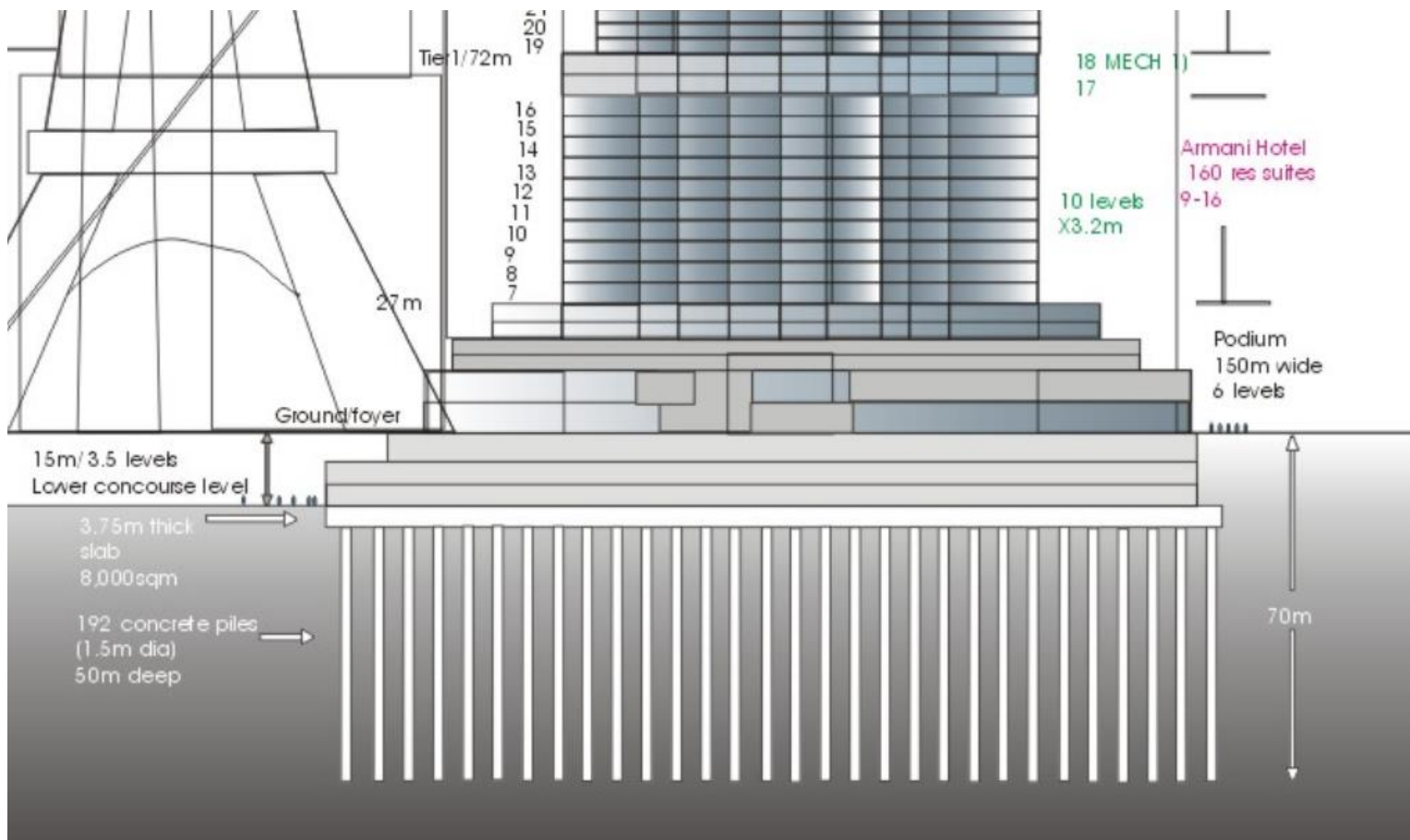


- Směrem nahoru se zužující věž minimalizuje účinky větru a setrvačných sil při zemětřesení
 dle měření ve větrném tunelu nepotřebuje tlumič kmitů
 max. průhyb ve vrcholu 1,50 m
- Půdorys zaručuje velký moment setrvačnosti průřezu (centrální svazek tubusů doplněný o trojici křídel s příčnými stěnami na koncích)
 šestiúhelníkové jádro je tuhé v kroucení
- Patrové pásy (outriggers) v technických podlažích



Založení na tlusté desce podepřené pilotami

- Nutnost rozložit zatížení na celý půdorys budovy
- Základová deska tloušťky 3,75m + 194 pilot profilu 1,5 m dl. 43 m
- Sednutí základu 75 mm



Trump International Hotel and Tower, Chicago, 2009, 423 m

- Kompletně železobetonové
- Core-Outrigger Mega Frame
- Patrové pásy - Outrigger walls vždy na výšku dvou podlaží, tl. 1,7 m

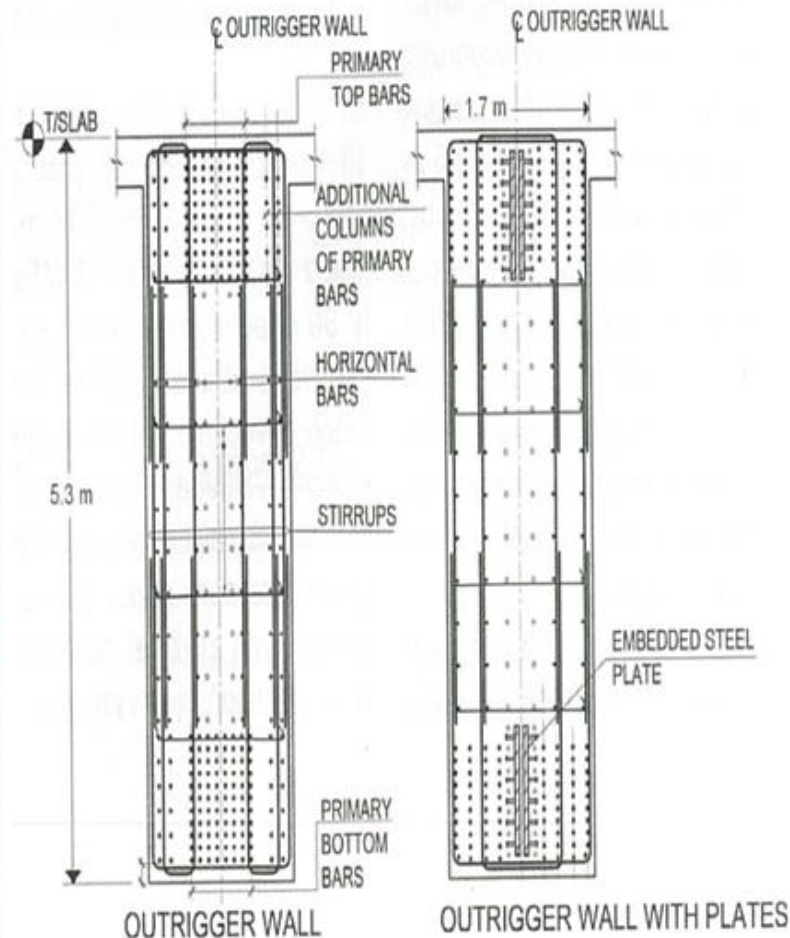


Schéma půdorysu běžného podlaží

- Stěny jádra tloušťky 460 mm
- Příruby stěn tloušťky 1200 mm
- Obvodové megasloupy + outrigger walls
- Beton C110

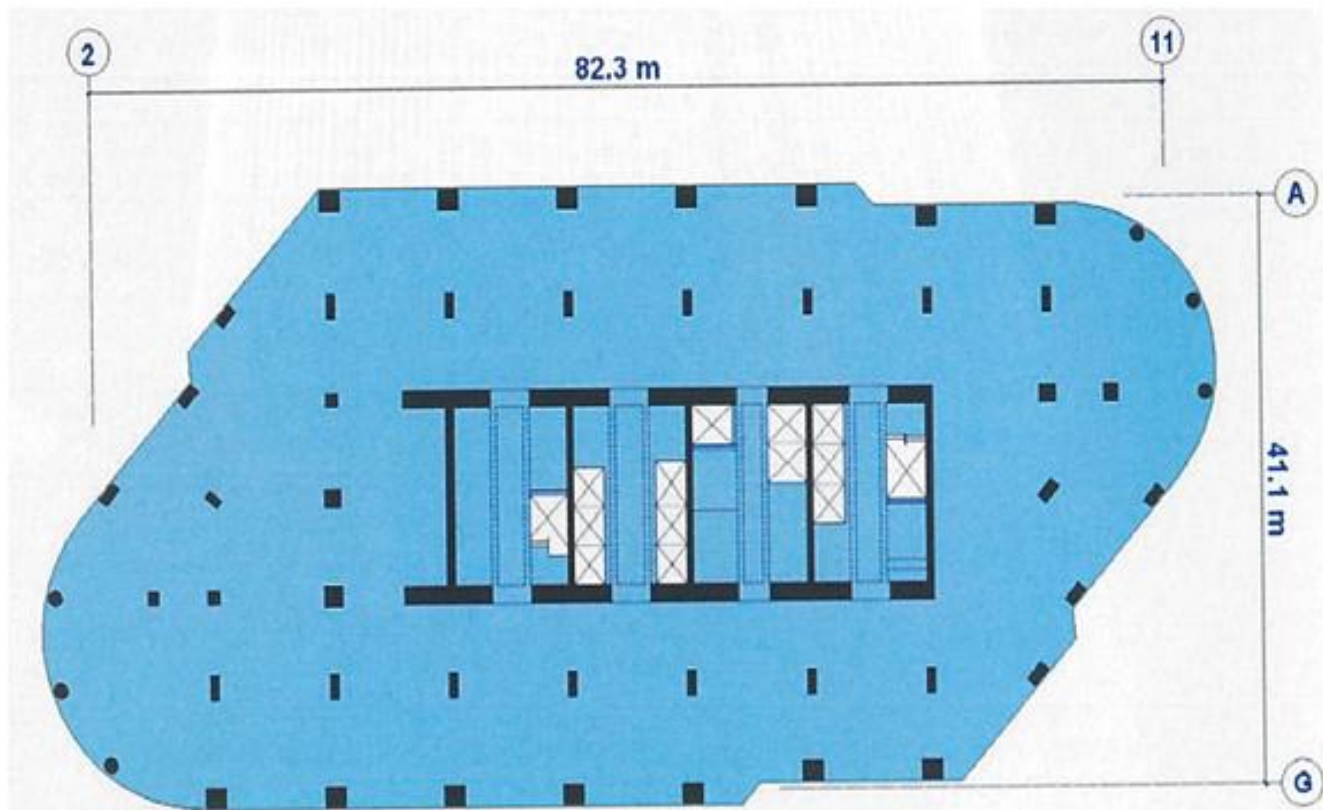
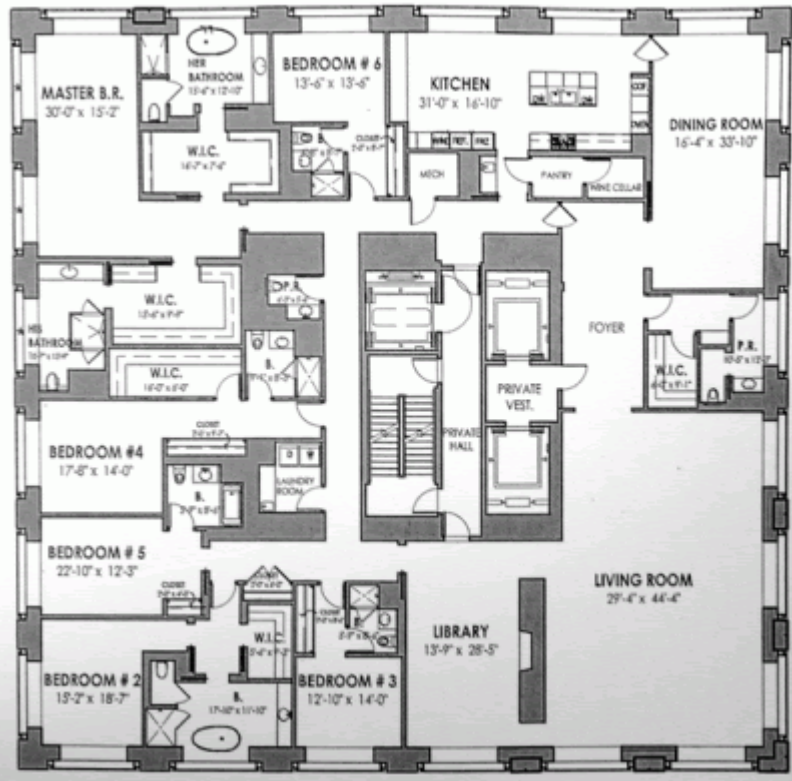


Schéma půdorysu 17. až 29. podlaží

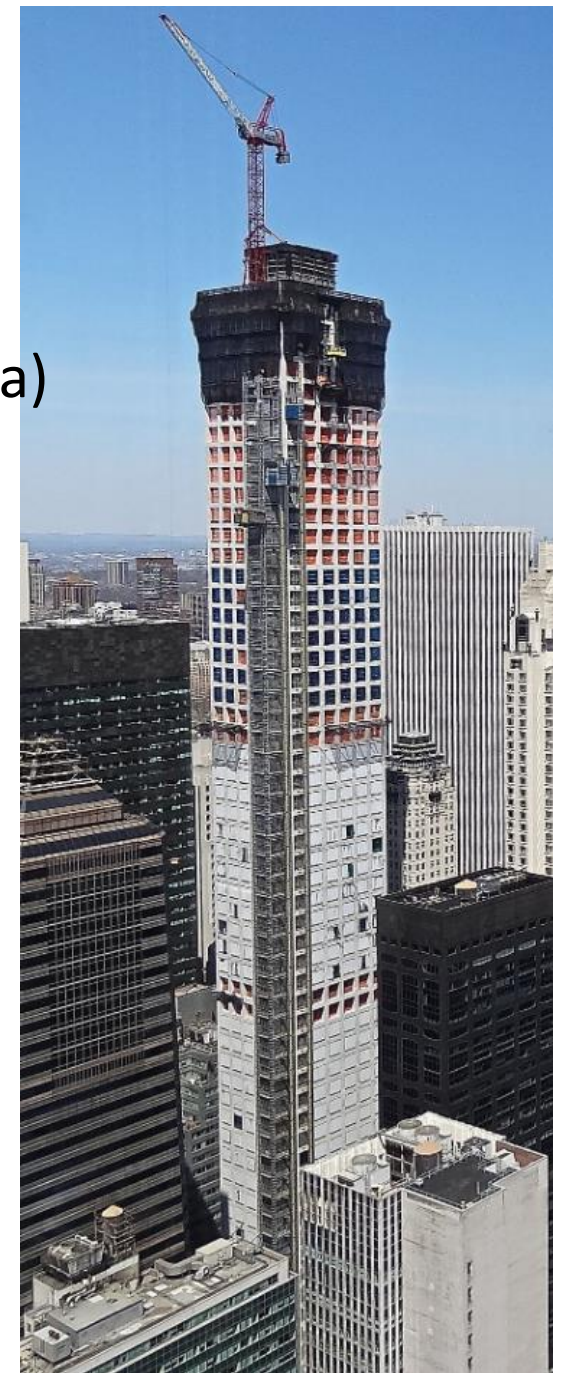
432 Park Avenue New York

- 2015
- 91 podlaží + 3 PP
- Výška 425,5 m
- Půdorys 28,5 x 28,5 m
- Železobetonový tubus
- Štíhlost 1:15



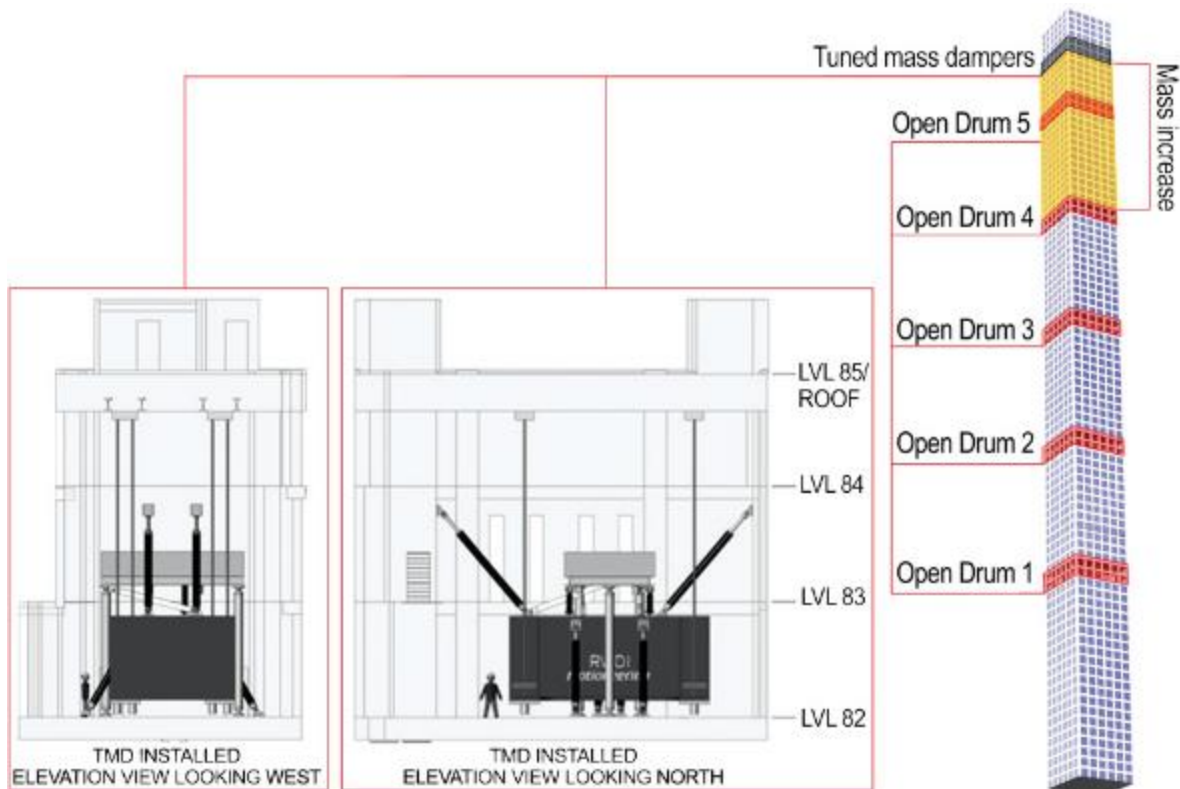
Konstrukce

- Obvodový rámový tubus
- Vnitřní jádro
- Pohledový bílý beton
- Válcová pevnost 96,5 MPa (dosaženo 141 MPa)
- Vodní součinitel $w/c = 0,25$



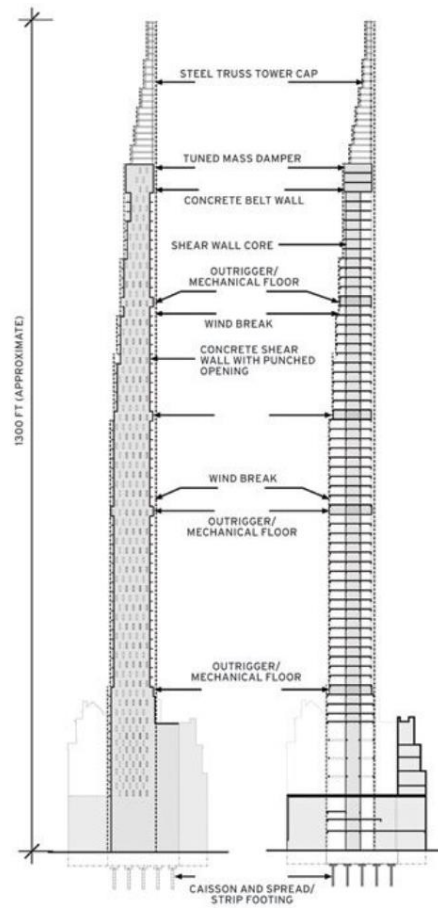
Omezení kmitání

- Bez obvodového pláště v technických podlažích (lepší dynamické chování)
- Tlumiče kmitání v 82 až 84 patře



111 West 57th Street New York – dokončeno 2021

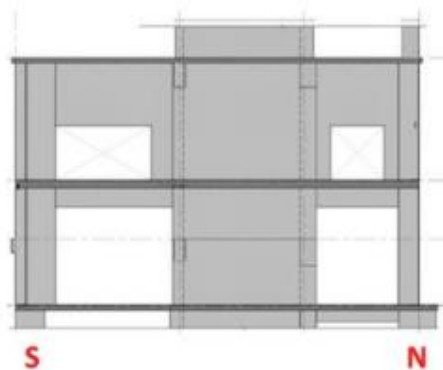
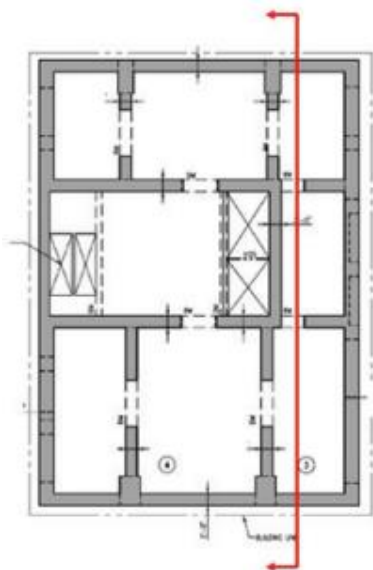
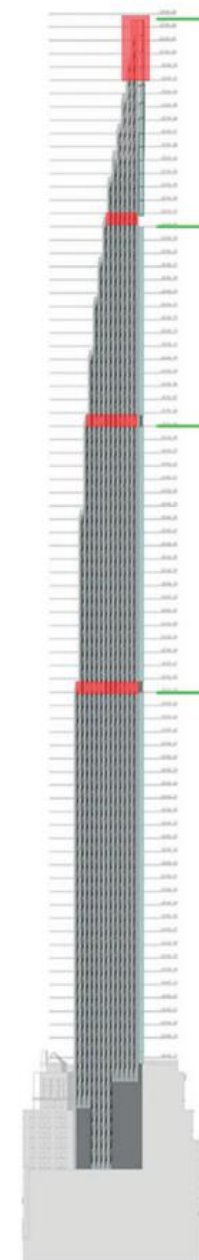
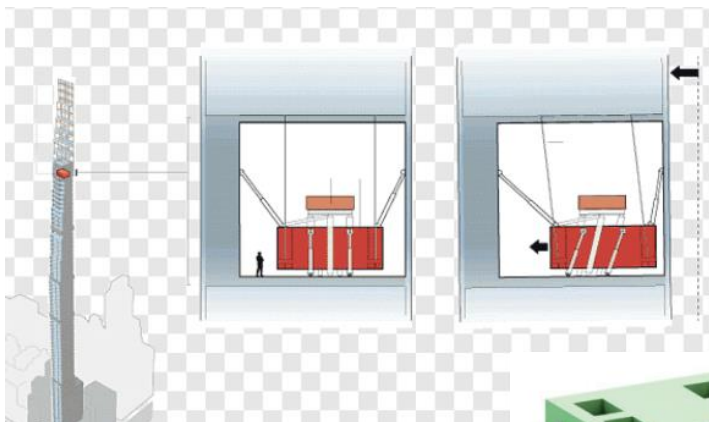
- Nejštíhlejší výšková budova světa
- Štíhlost 1:24
- 84 podlaží + 2 PP
- Výška 435,3 m
- Šířka pouze 17,5 m
- Železobetonová stěnová konstr.
+ outrigger mega frames
- Ocelová nástavba výšky 48 m
- Vysokohodnotný beton 96 MPa
- Volná podlaží + tlumič kmitů
- Testováno ve větrném tunelu



STRUCTURAL DIAGRAM
111 West 57th Street



Tlumič kmitů o celkové hmotnosti 800 tun ve vrcholu budovy



Typické podlaží se ztužidly outriggers

outriggers

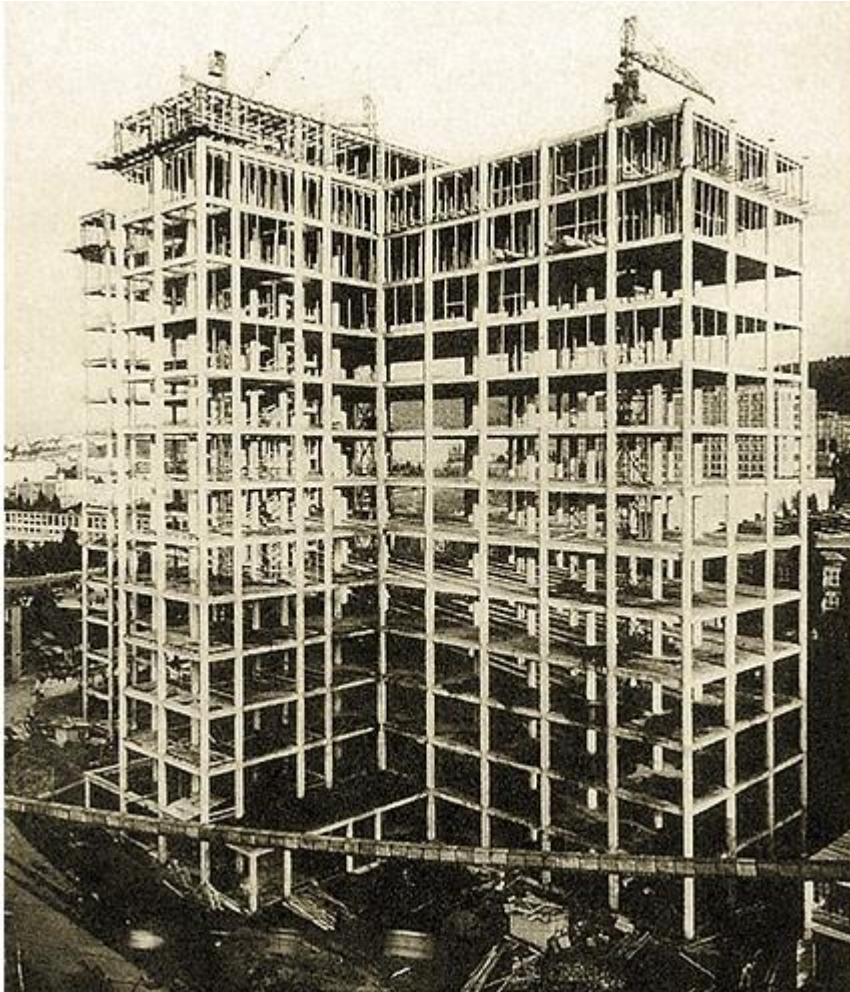
volná podlaží

Batův mrakodrap ve Zlíně, 1936

- 17 podlaží - 77,8 m
- Ve své době nejvyšší železobetonová stavby Evropy



- Neztužený železobetonový skelet s posuvnými styčníky
- Modul 6,15 x 6,15 m
- Půdorys 20 x 80 m bez dilatace,
- Dilatace pouze v posledních dvou podlažích



AZ Tower Brno – 111 m



- +81.2 30P
- +81.2 29P
- +81.2 28P
- +81.2 27P
- +81.2 26P
- +81.2 25P
- +77.5 24P
- +73.8 23P
- +70.1 22P
- +66.4 21P
- +62.7 20P
- +59.0 19P
- +55.3 18P
- +51.6 17P
- +47.9 16P
- +44.2 15P
- +40.5 14P
- +36.8 13P
- +33.1 12P
- +29.4 11P
- +25.7 10P
- +22.0 9P
- +18.3 8P
- +14.6 7P
- +10.9 6P
- +7.2 5P
- +3.5 4P
- 0.2 3P
- 3.5 2P
- 7.2 1P
- 10.9 0P
- 14.6 0P
- 18.3 0P



- Obvodový rámový tubus tl. 300 mm + ztužující jádro tl. 250 mm
- Vnitřní sloupy profilu od 900 do 400 mm
- Ploché stropní desky 240 – 260 mm
- Základová deska tloušťky 750 mm + piloty



Závěr

- Roste cena stavebních pozemků a vysokých staveb přibývá
- Pro stavby asi do 20 podlaží lze použít nosný rám (není to moc výhodné)
- Pro stavby asi do 60 podlaží lze použít smykové stěny, jádra, případně kombinace stěn a jader s rámem
- Pro stavby nad 60 podlaží se používají různé tubulární systémy s velkou tuhostí v ohybu i v kroucení
- **Moderní supertall a megatall stavby (300 až 600 m):**
 - Využívají Core-Outrigger Mega Frame System
 - Mají ocelobetonovou nosnou konstrukci, nebo železobetonovou konstrukci s ocelovou nástavbou
 - Používají tlumiče kmitů a vnější tvar uzpůsobený pro optimalizaci kmitání od větru (nepravidelné tvary, volná podlaží)
 - Zakládají se na tlustých základových deskách, podepřených pilotami
 - Jsou navrženy jako robustní stavby odolné při mimořádných zatíženích (tajfuny, zemětřesení, požáry, nárazy letadel, teroristické útoky)
- Nejvyšší stavby (nad 800 m) mají tvar nahoru se zužující trojboké věže a celou konstrukci podřizují statické a dynamické optimalizaci, zpravidla nepotřebují tlumič kmitání