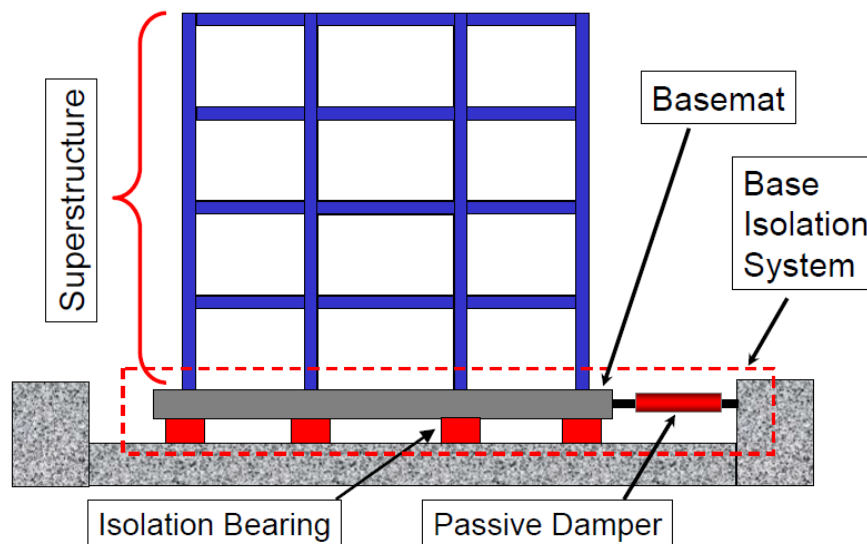


V. Praktické aspekty návrhu seizmicky odolných staveb

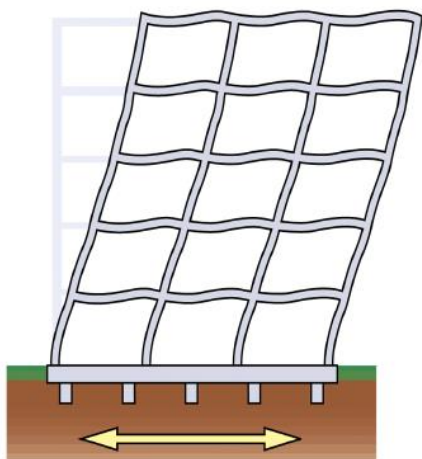
- 1. Seizmicky izolované konstrukce**
- 2. Practical aspects of earthquake-resistant design**

1. Seizmicky izolované konstrukce

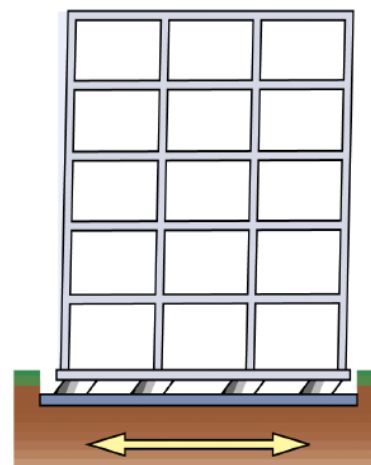
Konfigurace



Odezva



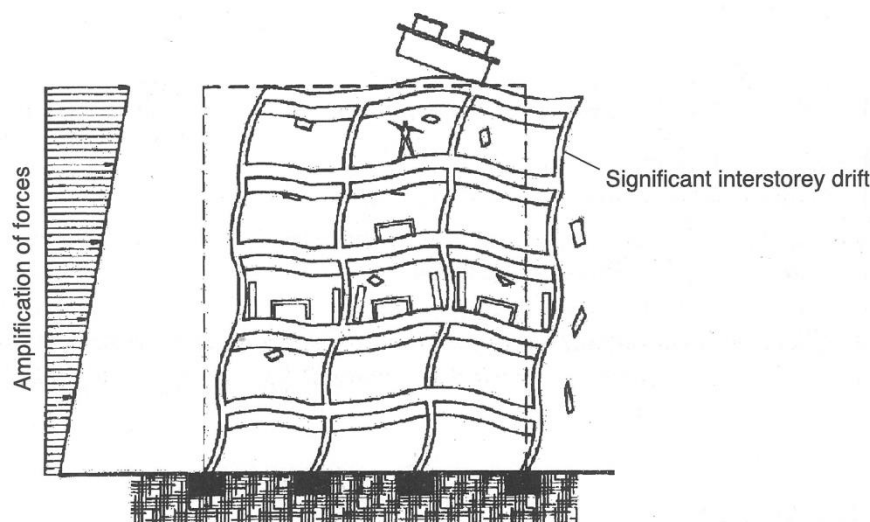
běžná stavba



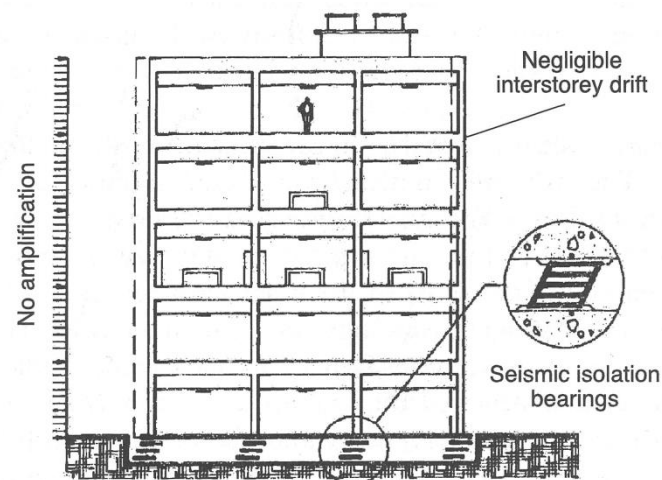
izolovaná stavba

1. Seizmicky izolované konstrukce

- izolační systém proti otřesům přenášeným z podloží je umístěn pod hlavní hmotou konstrukce (vrchní stavbou); jeho účelem je zmenšit seizmickou odezvu nosného systému odolávajícího příčným silám
- zmenšení seizmické odezvy lze dosáhnout zvýšením základní periody seizmicky izolované konstrukce, úpravou základního tvaru kmitání a zvětšením útlumu
- nepružné deformace se omezí na izolační systém, vrchní stavba se tak navrhuje na pružnou odezvu

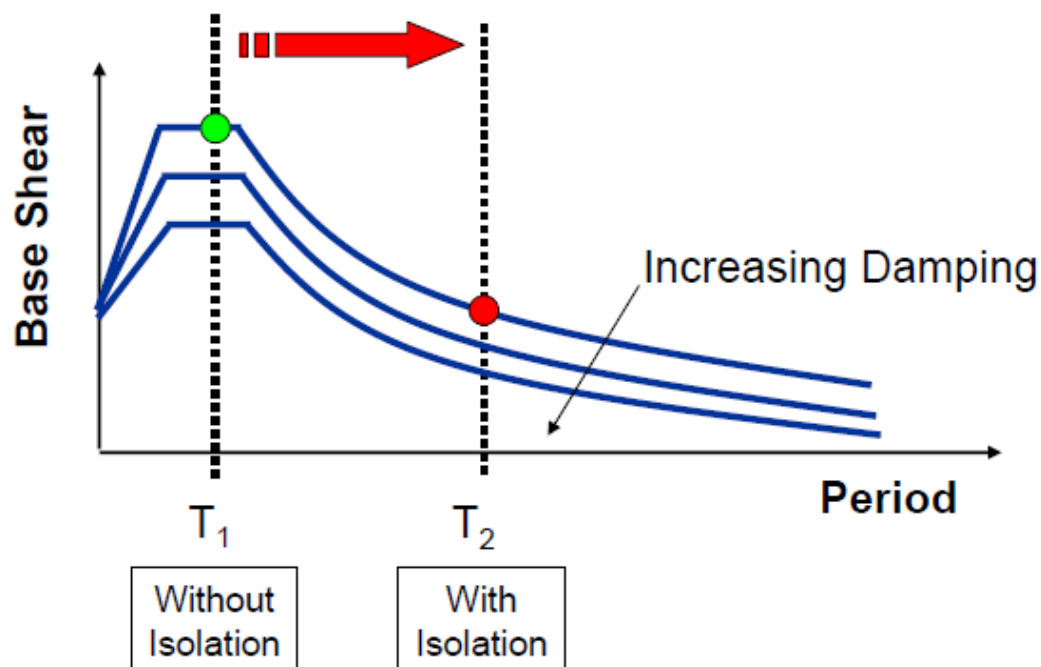


běžná stavba



izolovaná stavba

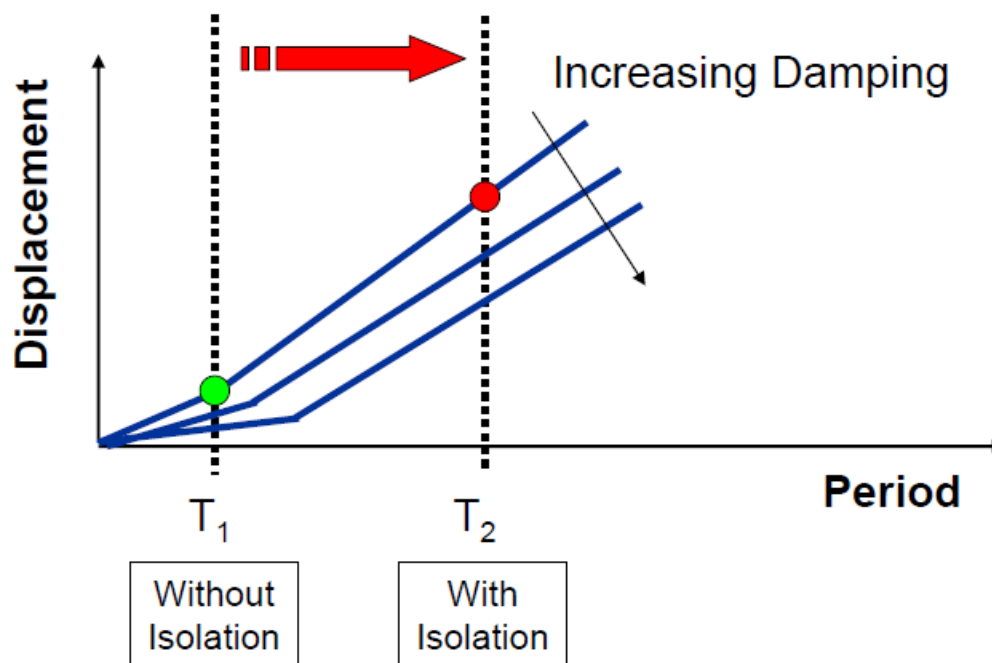
1. Seismicky izolované konstrukce



spektrum odezvy – zrychlení (smyková síla v základech)

Zvýšení základní periody seismicky izolované soustavy
- snížení zrychlení, seismických sil působících na vrchní stavbu a
smykové síly v základech

1. Seizmicky izolované konstrukce

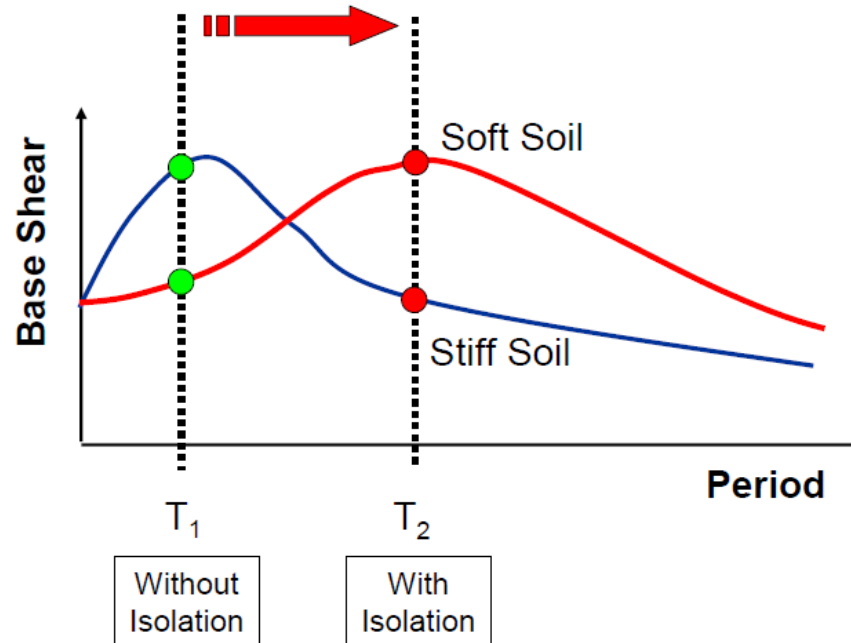


spektrum odezvy - posunutí

Zvýšení základní periody seizmicky izolované soustavy

- zvýšení celkového posunutí vrchní stavby, které je však výrazně redukováno zvýšením útlumu soustavy
- snížení mezipodlažních posunutí

1. Seizmicky izolované konstrukce



spektrum odezvy – zrychlení (smyková síla v základech)

Zvýšení základní periody seizmicky izolované soustavy

- tuhé podloží - snížení zrychlení, resp. smykové síly v základech
- poddajné podloží - zvýšení zrychlení, resp. smykové síly v základech
- soustavy s vyšší periodou – vždy snížení zrychlení

1. Seizmicky izolované konstrukce

Požadavky na seizmický izolační systém

- horizontální poddajnost - s cílem zvýšit vlastní periodu
- vertikální tuhost a únosnost
- útlum (viskózní nebo hysterézní disipace energie) k omezení relativních horizontálních posunutí
- dostatečná tuhost k zabránění poškození účinkem větru
- schopnost návratu do původní polohy, omezení reziduálních posunutí stavby po zemětřesení

další požadavky:

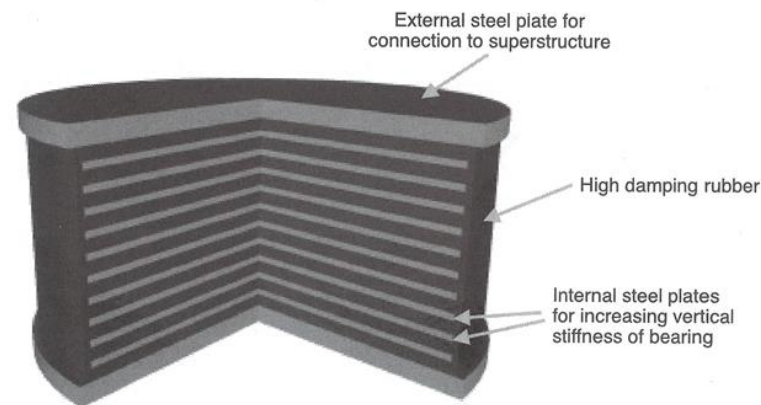
- trvanlivost
- jednoduchá instalace a kontrola
- omezená cena
- stálost mechanických vlastností

1. Seizmicky izolované konstrukce

Typy izolačních systémů

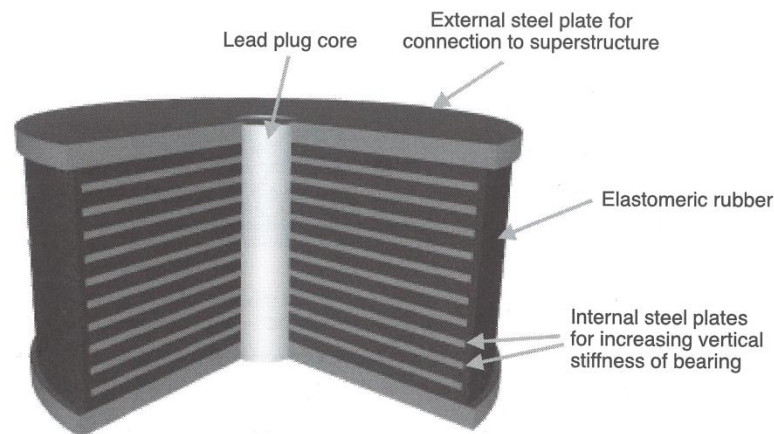
Vrstvená elastomerová ložiska

- kapacita horizontálního posunutí cca 2 x tloušťka ložiska
- viskózní útlum cca 20%



Elastomerová ložiska s olověnou vložkou

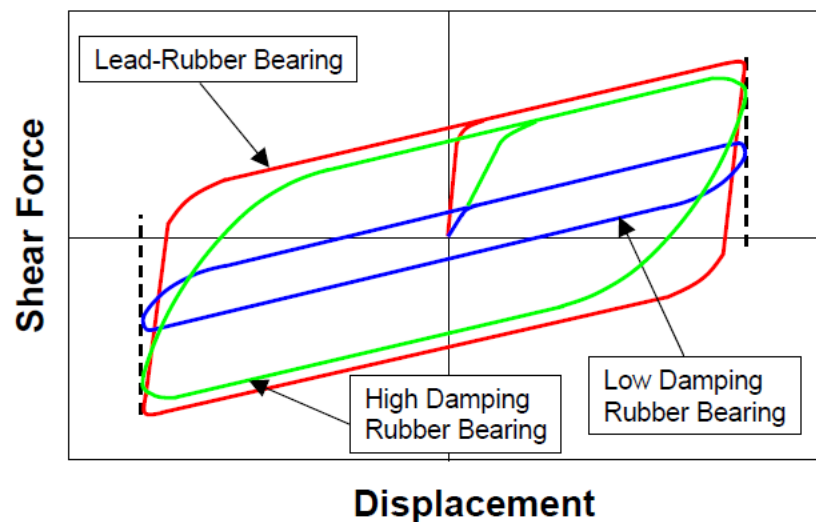
- kapacita horizontálního posunutí cca 1-1.5 x tloušťka ložiska
- viskózní útlum cca 30%



1. Seizmicky izolované konstrukce

Elastomerová ložiska

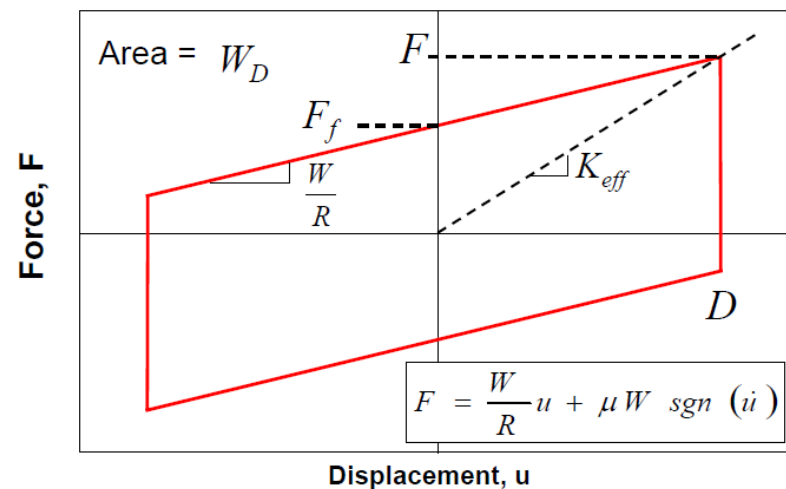
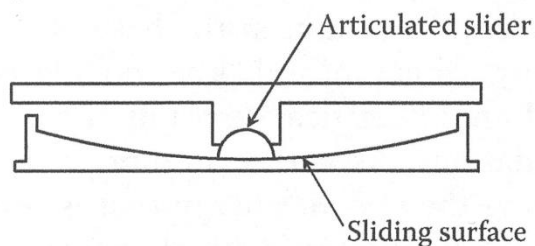
smyková síla vs. posunutí



Typy izolačních systémů

Třecí kloubová ložiska

- kapacita horizontálního posunutí závisí na rozměrech ložiska
- viskózní útlum cca 20%



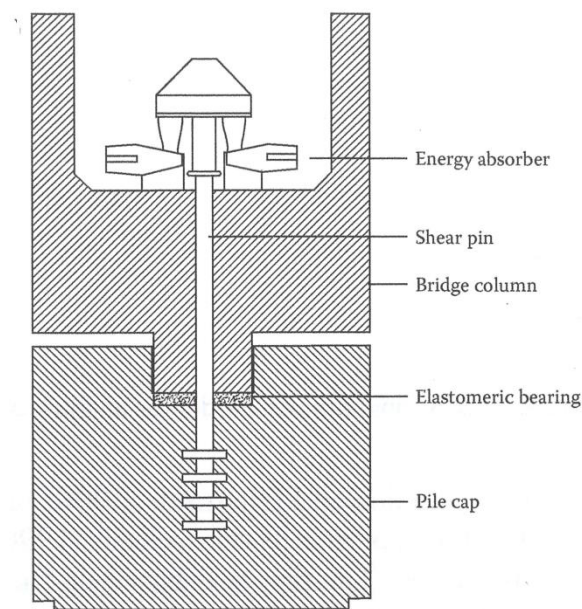
F (síla) vs. u (posunutí)

1. Seizmicky izolované konstrukce

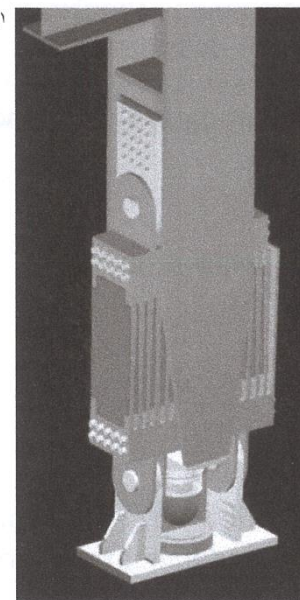
Typy izolačních systémů

Zařízení umožňující houpání

- pohyb sloupů budov nebo pilířů mostů ve svislém směru a pootáčení v základech
- zvýšení periody kmitání
- disipace energie mezi stavbou a podložím (včetně geometrického útlumu)



izolace pilířů mostu

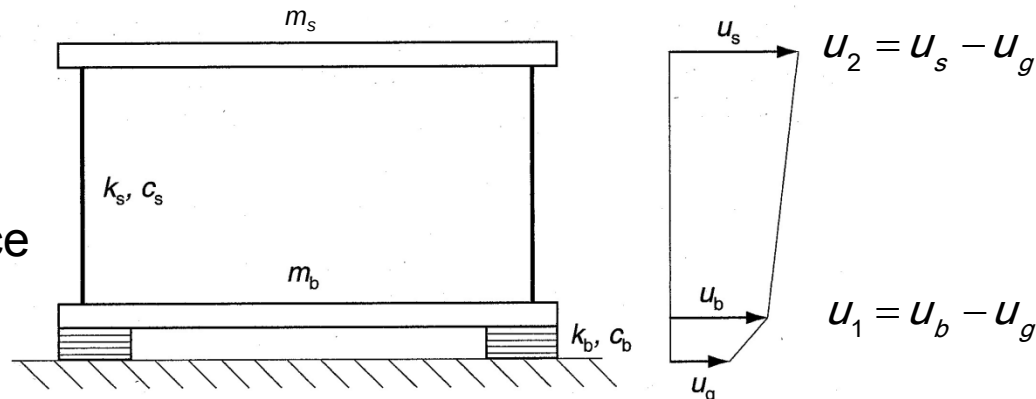


izolace sloupů budovy

1. Seizmicky izolované konstrukce

Numerický model

- diskrétní model se 2 SV
- hmotnost vrchní stavby m_s
- hmotnost základové konstrukce (nad izolací) m_b



$$\begin{bmatrix} k_b + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b + c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_b & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_b \\ m_s \end{Bmatrix} \ddot{u}_g$$

obvykle platí $k_b \ll k_s$, potom platí přibližné vztahy pro vlastní frekvence

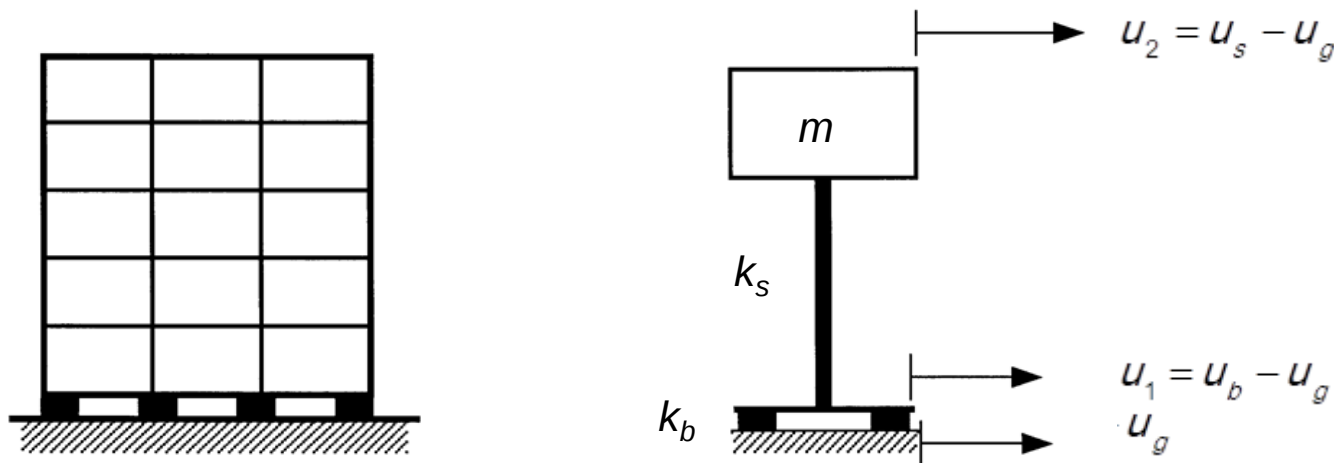
$$\omega_1 \approx \omega_b \quad \omega_2 \approx \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}}$$

$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_b + m_s}} \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad \gamma = \frac{m_s}{m_b + m_s}$$

1. Seizmicky izolované konstrukce

Numerický model budovy – soustava s 1 SV

- hmotnost vrchní stavby m_s je výrazně vyšší než hmotnost základové konstrukce m_b
- lze uvažovat jako soustavu s 1 SV s celkovou hmotností $m = m_s + m_b$
- útlum je zanedbán



$$\begin{bmatrix} k_b + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} 0 \\ m \end{Bmatrix} \ddot{u}_g$$

1. Seizmicky izolované konstrukce

Numerický model budovy – soustava s 1 SV

- po úpravě platí

$$\text{z rov. (1)} \quad (k_b + k_s)u_1 - k_s u_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad u_1 = \frac{k_s}{k_b + k_s} u_2 \quad \Rightarrow \quad \text{pro } k_s \gg k_b \quad u_1 \approx u_2$$

$$\text{z rov. (2)} \quad \frac{k_b k_s}{k_b + k_s} u_2 + m \ddot{u}_2 = -m \ddot{u}_g$$

$$u_{2,\max} = \frac{m}{k} S_e(T, \xi) \quad \text{kde} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad k = \frac{k_b k_s}{k_b + k_s}$$

$S_e(T, \xi)$ je příslušná hodnota zrychlení ze spektra pružné odezvy

1. Seizmicky izolované konstrukce

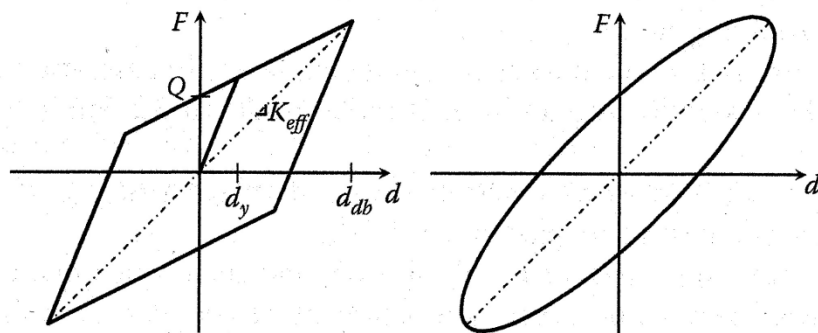
Návrh podle EC8

- předpokládá se, že vrchní stavba zůstává v pružném stavu, nosné prvky lze navrhovat jako nedisipativní, lze počítat s duktilitou třídy L, není třeba prokazovat splnění požadavků návrhu na kapacitu;
- podmínky odolnosti nosných prvků ve vrchní části stavby mohou být splněny s uvážením seizmického zatížení děleného součinitelem duktility 1,5 nebo menším;
- předpokládá se, že spodní stavba zůstává v pružné oblasti, součinitel duktility se uvažuje 1,0;
- izolátorové jednotky musí vykazovat zvětšenou spolehlivost, toho se dosáhne zvětšením seizmického posunu každé jednotky zvětšovacím součinitelem - pro budovy 1,2; pro mosty 1,5.

1. Seizmicky izolované konstrukce

Zjednodušený lineární výpočet podle EC8

- předpokládá se, že vrchní stavba je tuhé těleso posouvající se nad izolačním systémem;
- izolační systém se uvažuje jako lineární pružina s efektivní tuhostí K_{eff} a viskózním útlumem ξ_{eff}
- závisí-li efektivní tuhost a útlum na návrhovém posunutí, použije se iterativní řešení, opakované dokud rozdíl předpokládané a vypočítané hodnoty posunutí nebude menší než 5 % hodnoty předpokládané.



Bilineární hystereze a ekvivalentní lineární aproximace

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S}$$

$$E_S = \frac{1}{2} K_{eff} d_{db}^2$$

E_D disipační energie
(plocha hysterezní smyčky)

E_S deformační energie

1. Seizmicky izolované konstrukce

Zjednodušený lineární výpočet - postup

1. odhad návrhového posunutí d_{db} – pokud efektivní tuhost a tlumení izolátorové jednotky záleží na návrhovém posunu, použije se iterativní řešení (do 5 % rozdílu)

2. stanovení efektivní tuhosti K_{eff} a útlumu ξ_{eff} izolačního systému

3. výpočet efektivní periody systému $T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}}$

kde M je hmotnost vrchní stavby

4. výpočet posunutí vrchní stavby $d = \frac{M}{K_{eff}} S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$

kde $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ je příslušná hodnota zrychlení ze spektra pružné odezvy

5. výpočet seizmických sil v jednotlivých podlažích (hmotnost m_j)

$$f_j = m_j S_e(T_{eff}, \xi_{eff}) / q$$

součinitel duktility lze uvažovat max. 1,5



1. Seizmicky izolované konstrukce

Zjednodušený lineární výpočet - postup

6. základy se navrhují na smykovou sílu $F = M S_e (T_{eff}, \xi_{eff})$
7. odolnost izolačního systému se posuzuje s uvážením posunutí d (krok 4) vynásobeného zvětšovacím součinitelem (pro budovy 1,2)
8. výpočet se provádí pro 2 směry hlavních os symetrie

1. Seizmicky izolované konstrukce

Zjednodušený lineární výpočet – podmínky použití

- vzdálenost staveniště od nejbližšího potenciálně aktivního zlomu o magnitudu $M \geq 6,5$ je větší než 15 km;
- největší půdorysný rozměr vrchní stavby není větší než 50 m;
- spodní stavba (základy) je dostatečně tuhá, aby minimalizovala účinek rozdílných posunů podloží;
- všechny izolátorové jednotky jsou umístěny nad spodní stavbou;
- efektivní perioda K_{eff} splňuje podmínku: $3T_f \leq T_{eff} \leq 3s$
kde T_f je základní perioda vrchní stavby při pevném vetknutí;
- systém odolávající příčnému zatížení vrchní stavby je uspořádán pravidelně a symetricky podle hlavních os půdorysu konstrukce;
- naklánění v základu spodní stavby je zanedbatelné;
- poměr mezi svislou a vodorovnou tuhostí izolačního systému splňuje $\frac{K_v}{K_{eff}} \geq 150$ a základní perioda svislého kmitání $T_v = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_v}} \leq 0,1s$
- požadavky na excentricitu mezi středem tuhosti izolačního systému a svislým průmětem těžiště vrchní stavby



PRACTICAL ASPECTS OF EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN

Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities

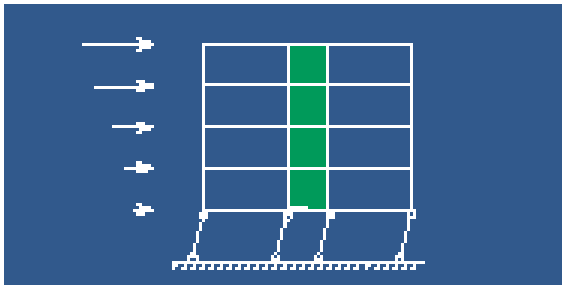
Hugo Bachmann (2003)

Swiss Federal Office for the Environment FOEN

This publication is downloadable on the internet as a pdf file at www.bafu.admin.ch

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid soft-storey ground floors



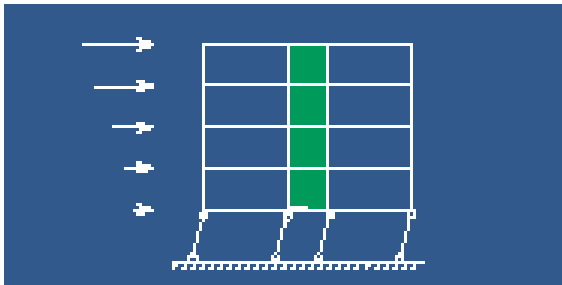
Sway mechanisms are often inevitable with **soft storey** ground floors (Izmit, Turkey 1999).



Here the front columns are inclined in their weaker direction, the rear columns have failed completely (Izmit, Turkey 1999).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid soft-storey ground floors



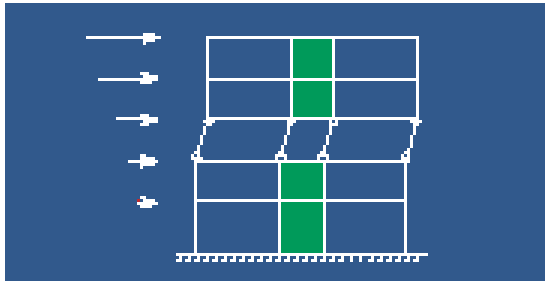
The well-braced upper part of the building collapsed onto the ground floor...



... and these are the remains of the left edge **ground floor column** (Kobe, Japan 1995).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid soft-storey upper floors



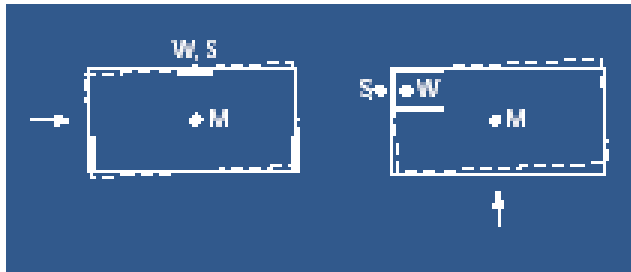
The third floor has disappeared and the floors above have collapsed onto it (Kobe, Japan 1995).



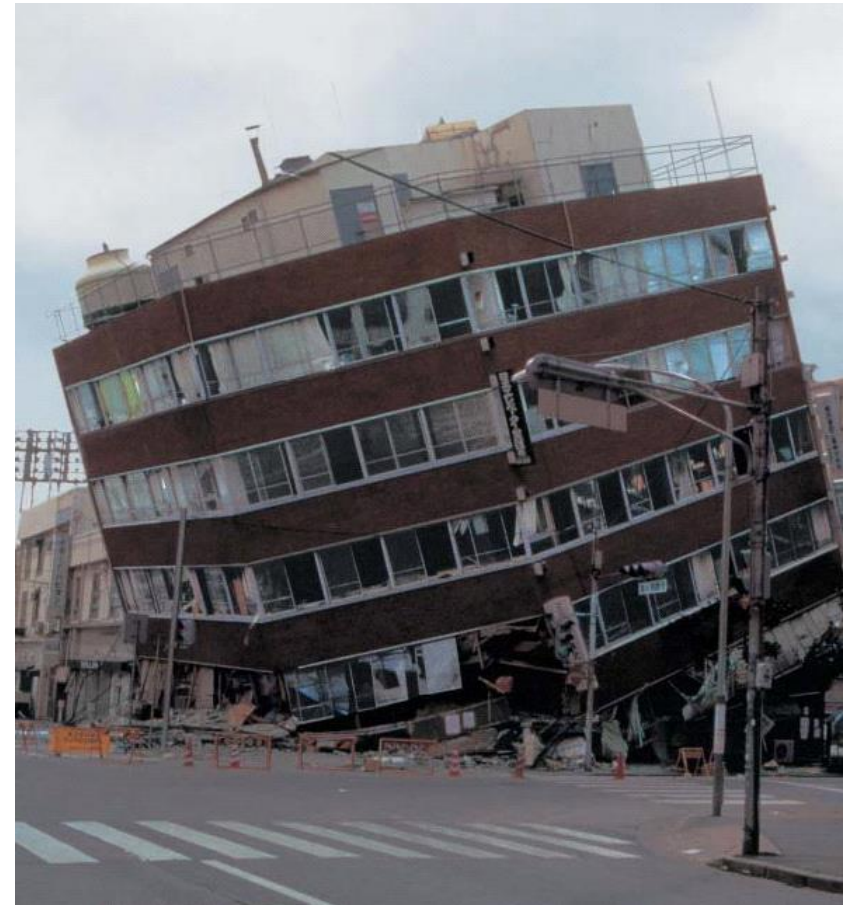
In this office building an upper storey failed. The top of the building has collapsed onto the floor below, the whole building rotated and leaned forwards.

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid asymmetric horizontal bracing

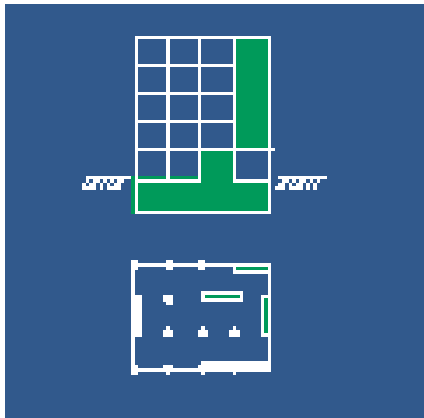


This office building had a continuous fire wall to the right rear as well as more eccentric bracing at the back. The building twisted significantly, and the front columns failed (Kobe, Japan 1995).



Practical aspects of earthquake-resistant design

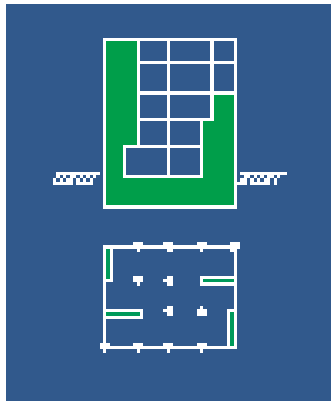
- Avoid bracing offsets



The **horizontal offset** of the reinforced concrete wall in the vertical plane causes **large additional stresses and deformations** in the structure during an earthquake. They include large local vertical forces (from the overturning moment), large additional shear forces in the slabs at offsets, redistribution of the foundation forces, etc. (Switzerland 2001).

Practical aspects of earthquake-resistant design

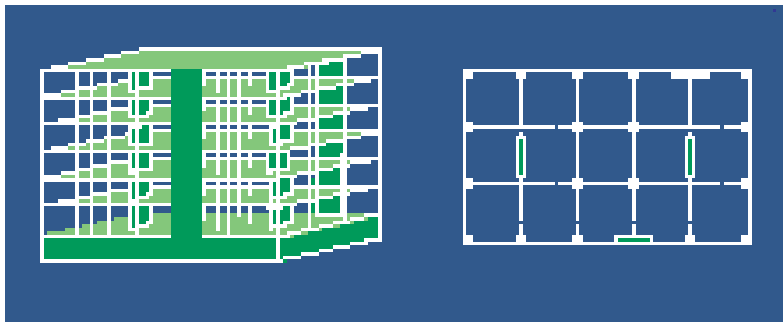
- (strong) Discontinuities in stiffness and resistance cause problems



The transition from a reinforced concrete structural wall to a frame structure causes large discontinuities in stiffness and resistance (Switzerland 2001).

Practical aspects of earthquake-resistant design

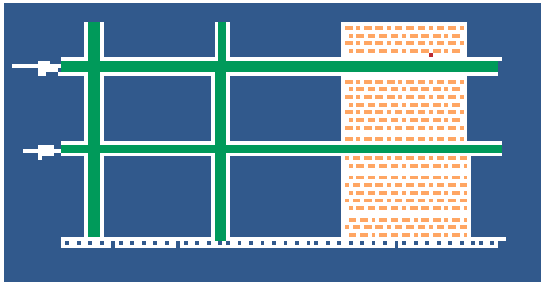
- Two slender reinforced concrete structural walls in each principal direction



Such reinforced concrete structural walls take up only little space in plan and elevation (Switzerland 1994).

Practical aspects of earthquake-resistant design

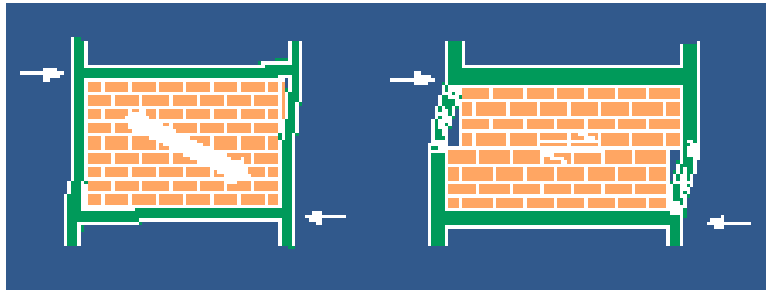
- Avoid mixed systems with columns and structural masonry walls



This structural stairway wall will be destroyed by a relatively weak earthquake. A total collapse of the building may result (Switzerland 2001).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid «bracing» of frames with masonry infills



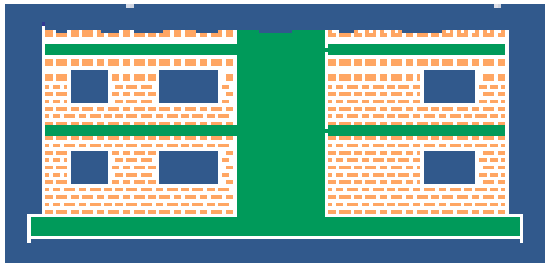
The masonry was also stronger in this case; it sheared the relatively large columns (Adana-Ceyhan, Turkey 1998).



Here the columns were clearly stronger and the masonry fell out while the frame remained standing (Erzincan, Turkey 1992).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Brace masonry buildings with reinforced concrete structural walls



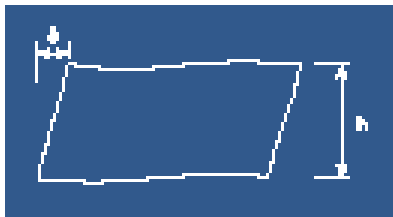
This masonry structure is braced by one reinforced concrete structural wall in each major direction. (Switzerland 2001).



This residential building with unreinforced masonry structural walls is braced longitudinally by a reinforced concrete structural wall in each facade, and transversely by an interior reinforced concrete structural wall (Switzerland 2001).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Match structural and non-structural elements



governing size:
inter-storey drift /
inter-storey height



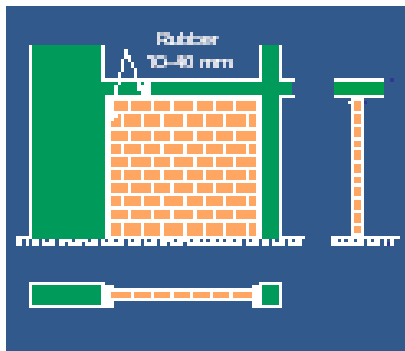
The non-structural
partition walls were
destroyed, although the
frame structure deformed
only little (Armenia 1988).



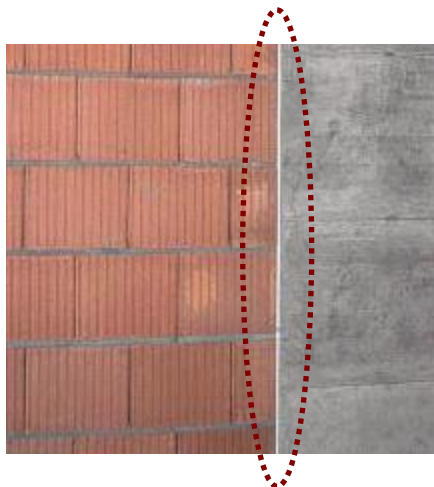
The glass facade of this new multistorey building survived a strong earthquake almost without loss, owing to **special flexible fastenings** for the facade elements (Kobe, Japan 1995).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- In skeleton structures, separate non-structural masonry walls by joints



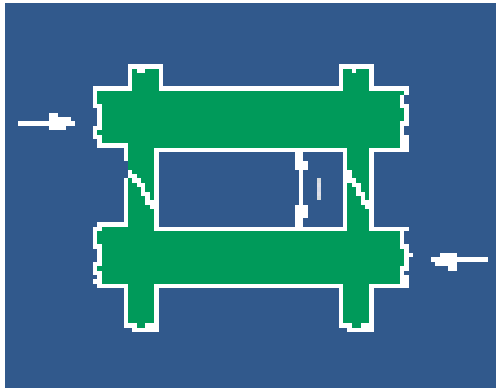
Here a vertical joint separates the masonry wall and the reinforced concrete column, but it is probably much too thin (Switzerland 1994).



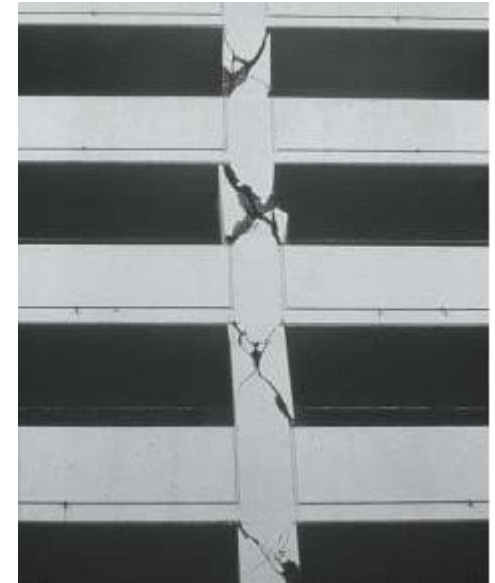
This joint between a masonry wall and a reinforced concrete structural wall was filled by expanded polystyrene boards. But Styrofoam is **too stiff for earthquake displacements**; soft rubber would be a more suitable material (Switzerland 1994).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid short columns



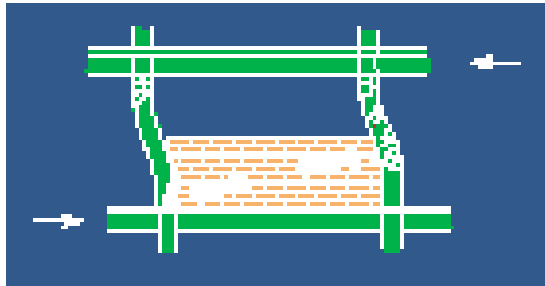
The **diagonal cracks** and **shear failures** in the short columns of a multi-storey car park almost caused collapse Northridge, California 1994).



The masonry columns in the ground floor of a restaurant behaved as short columns. They were highly damaged by diagonal cracks (Umbria, Italy 1997).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Avoid partially infilled frames



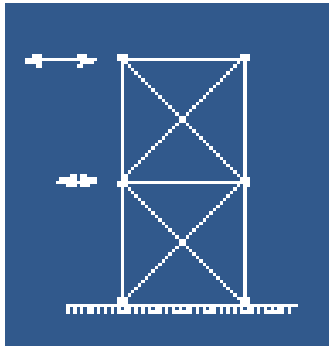
This column illustrates unsatisfactory detailing (hoops with 90° instead of 135° hooks). Without the unfavorable effect of the infill walls it would however have behaved much better (Izmit, Turkey 1999).



Inserting parapet walls into a frame led to a short column phenomenon. Owing to the good confinement of the transverse reinforcement, no actual shear failure occurred, but an equally dangerous sway mechanism developed (Friaul, Italy 1976).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Design diagonal steel bracing carefully



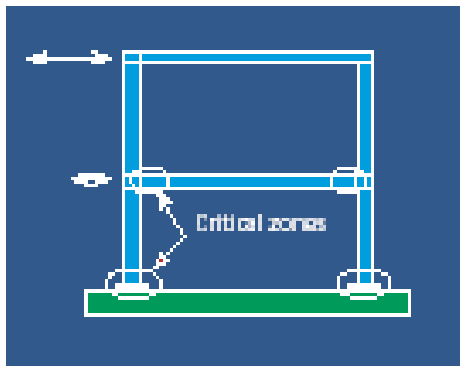
Diagonal elements with broad flange cross sections have buckled about their weak axis...



... and have broken
(Kobe, Japan 1995).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Design steel structures to be ductile



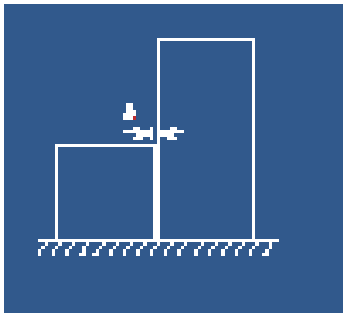
This steel frame suffered large permanent deformations. There was probably **no lateral bracing** and the connection detailing was inadequate for cyclic actions (Kobe, Japan 1995).



The **failure of a typical frame connection**. The welding between the column and the beam failed, resulting in a wide crack (Kobe, Japan 1995).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- **Separate adjacent buildings by joints** (seismic joints allow to have dynamically independent units)



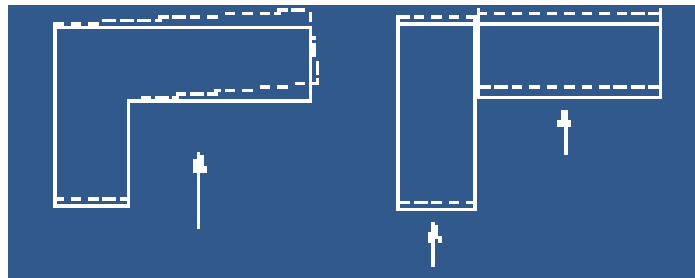
The pounding of two similar buildings with floors at the same levels caused damage to the façades as well as spalling to the structure (Mexico 1985).



The modern reinforced concrete building to the left collapsed after pounding against the older very stiff building to the right (Mexico 1985).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Compact plan configurations



unfavourable

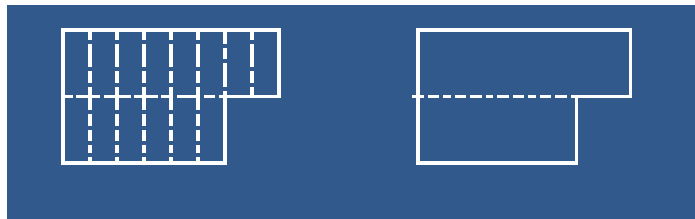
better



In order to allow building wings oriented orthogonally to each other to oscillate independently, they should be separated by a sufficiently wide and compressible joint.

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Use the slabs to “tie in” the elements and distribute the forces



unfavourable

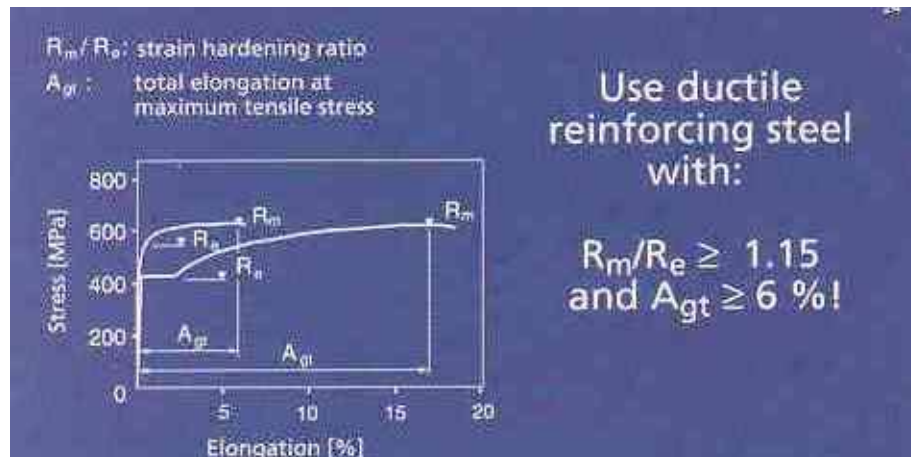
better



A corner area of this building collapsed. The slabs consisted only of **precast elements** without reinforced concrete cover and without reinforced connections to the vertical load bearing elements (Armenia 1988).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Use ductile reinforcing steel with $R_m/R_e \geq 1.15$ and $A_{gt} \geq 6\%$



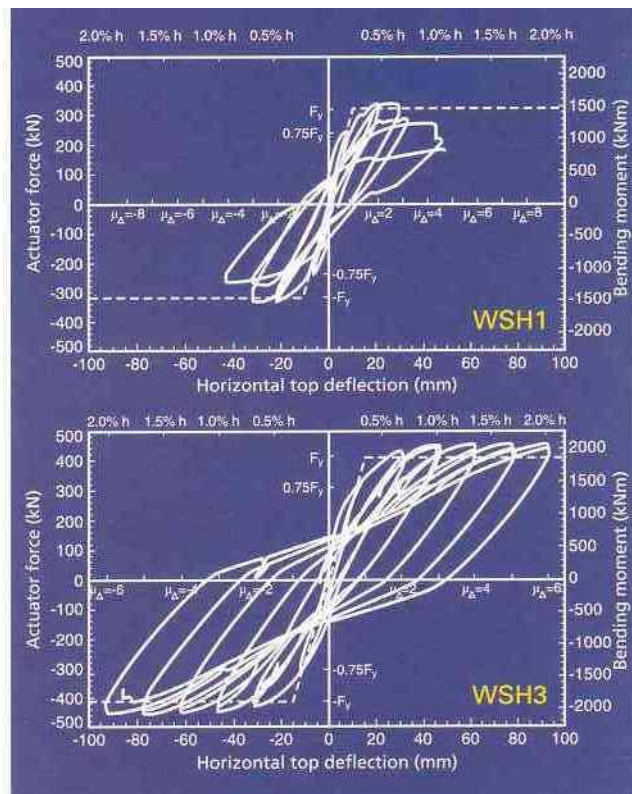
Ductile reinforced steel

In reinforced concrete structures the reinforcing steel must enable the development of sufficiently large and **deformable plastic zones**. Two parameters (ductility properties) are crucial to ensure this:

- strain hardening ratio R_m/R_e , i.e. the ratio between the maximum tensile stress R_m and the yield stress R_e
- total elongation at maximum tensile stress A_{gt}

Practical aspects of earthquake-resistant design

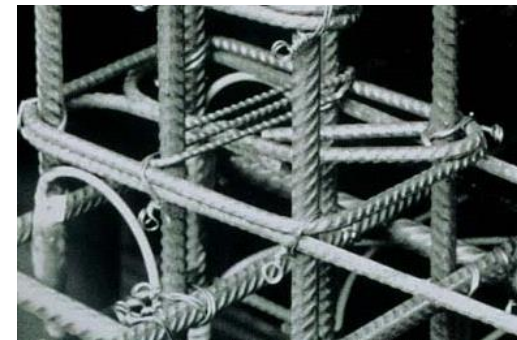
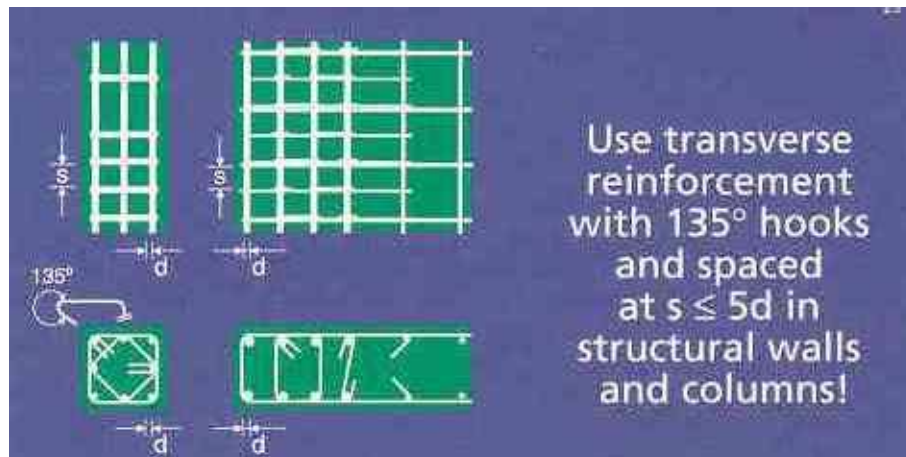
- Use ductile reinforcing steel with $R_m/R_e \geq 1.15$ and $A_{gt} \geq 6 \%$



These plastic hysteresis-curves of 2 different 6-storey reinforced concrete structural walls with (WSH3) and without (WSH1) ductile reinforcing steel clearly illustrate the difference in behaviour. The wall with low ductility barely achieved a displacement ductility of $\mu_{\Delta} \sim 2$, while the ductile wall achieved $\mu_{\Delta} \sim 6$. The ductile wall can therefore survive an earthquake approximately 4 times stronger!

Practical aspects of earthquake-resistant design

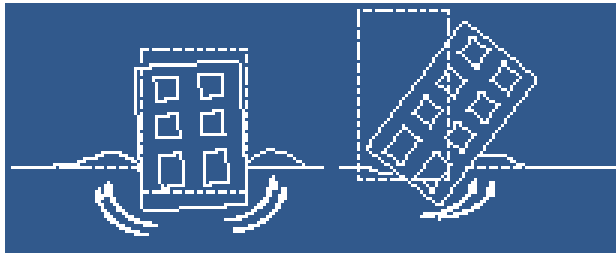
- Use transverse reinforcement with 135° hooks and spaced at $s \leq 5d$ in structural walls and columns



In this column of an industrial building made of precast reinforced concrete elements, the hoops were **too widely spaced** and **insufficiently anchored** with only 90° hooks. They consequently opened, allowing the vertical reinforcement to buckle (Adapazari, Turkey 1999).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Assess the potential for soil liquefaction



This solid building tilted as a rigid body and the raft foundation rises above ground. The building itself suffered only relatively minor damage (Adapazari, Turkey 1999).



This inclined building sank unevenly and leans against a neighbouring building (Turkey, Izmit 1999).

Practical aspects of earthquake-resistant design

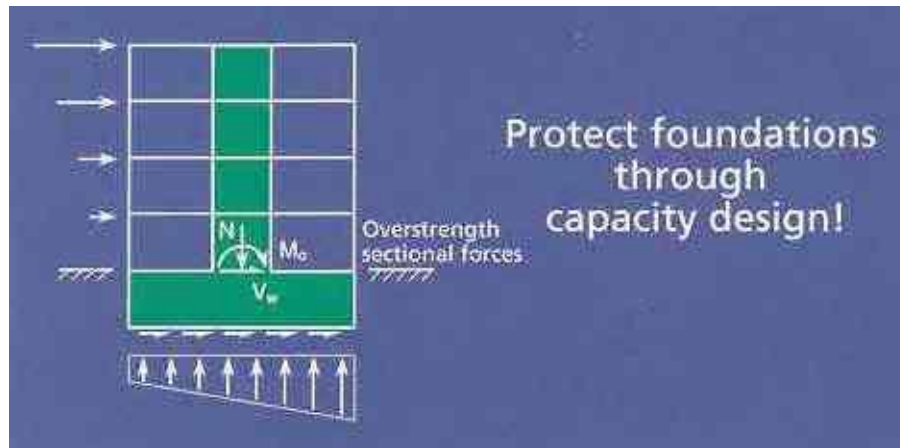
- Secure connections in prefabricated buildings



The dowels on the column corbels of this prefabricated factory building did not provide sufficient stability. The support area failed and the main beams overturned and the entire roof structure collapsed

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Protect foundations through capacity design



Here soil anchors were installed to **prevent the lift off** of the ductile reinforced concrete shear walls (Switzerland 1999).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Softening may be more beneficial than strengthening

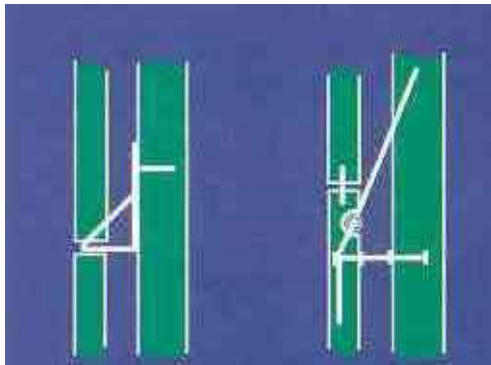
By installing special horizontal relatively soft seismic bearings above the foundation (**base isolation**), a frequency shift towards the lower area of the design response spectrum can be achieved. As a result, and because damping is usually also increased, a **significant reduction of the seismic forces** and thereby the damage potential is achieved. However, relative displacements increase notably, which requires sufficient clearance around the isolated buildings.



A softening strategy was implemented to seismically improve this 700 t liquid gas industrial tank carried by a reinforced concrete structure (Switzerland 1999).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Anchor facade elements against horizontal forces



unfavourable better



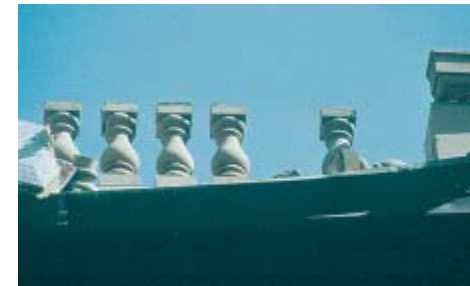
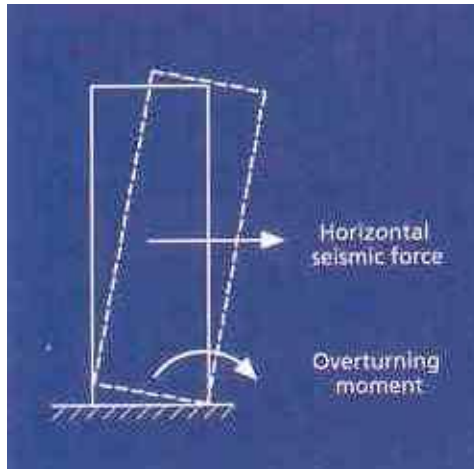
The structure of this building did not collapse, but heavy and insufficiently anchored facade panels fell to the ground (Kobe, Japan 1995).



This facade cladding was insufficiently anchored and could not follow the deformations of the reinforced concrete frame structure (Northridge, California 1994).

Practical aspects of earthquake-resistant design

- Anchor free standing parapets and walls



This neo-classic reinforced concrete building did not suffer large damage and even the window-panes remained intact. However, the **parapet** on the roof terrace turned over and the **cornice** and parapet damaged the overhanging roof panel when they fell (Loma Prieta, California 1989)