

MAGASHÁZAK

(A jelen, v0-ás verzió csak szöveges verzió. A kapcsolódó ábrák az előadásokon szerepelnek.)

A nagy támaszközű tartókhoz hasonlóan a „magasház” kategóriába sorolás is szubjektív. Különböző helyein a világnak más és más léptéket értékelnek magasházként. Magyarországon a 10-15 szintnél magasabb épületeket gyakran magasházaknak nevezünk, máshol 200 m-es magasság fölé kell építeni ahhoz, hogy ebbe a kategóriába tartozzon egy épület. Tartószerkezeti szempontból magasházról akkor beszélünk általában, amikor a szokásos építési eljárásokon túlmutató megoldások alkalmazására van szükség egy épület létrehozásához.

A magasházak tervezése és építése során a következő kérdésekre kell különös figyelmet fordítani:

- Nagy gravitációs terhek.
- Nagy vízszintes terhek.
- Nagy terhek az alapozáson.
- Különleges építészeti igények.
- Dinamikai problémák.
- Különleges hatások.

A magasházak építése során felmerülő kérdések különlegessége rendre a hatások nagyságából adódik. Kicsit hasonló ez a hidépítéshez: viszonylag egyszerű statikai modellel rendelkező szerkezeteket kell tervezni, de a szerkezet léptéke miatt az egyes hatások nagysága, azok kölcsönhatása új problémákat generál, máshol elhanyagolható hatások mértékadóvá válnak. A gazdaságos tervezés nem csak pénzügyi hanem építészeti kérdés (pl. ha túl nagy egy pillér, akkor nem marad hely a funkciónak), és

gyakran a megépíthetőséget is befolyásolja (pl. a kötőelemeknek el kell férnie a kapcsolatokban). Ezért pontosabb modellekre, a hatások pontosabb ismeretére van szükség.

A magasházak tervezése és építése során a dinamikai problémák megoldása jelenti a legnagyobb kihívást. A földrengésnél természetesen adódik a teher dinamikus jellege. De míg kisebb épületeknél a szélteher statikus vagy kvázi statikus hatásáról szoktunk beszélni, 200 m-es magasság felett a szélteher dinamikus jellege válik meghatározóvá.

Gravitációs terhek

Egy magasház függőleges teherhordó szerkezete sok szint terhét gyűjti össze az alsó szintekre érve. Nagy erőkre számíthatunk ezekben a szerkezeti elemekben. A függőleges terheket falakkal és pillérekkel vesszük fel, amelyek általában függőlegesek. Előfordulnak ferde pillérek is, ekkor különös figyelmet kell fordítani a vízszintes komponensek felvételére!

A gravitációs terhek nagysága függ a hasznos terhektől és a szerkezet önsúlyától. Előbbit a funkciók határozzák meg, a statikus tervezőnek nincs rá hatása. A szerkezetek önsúlyának csökkentésével lehet csökkenteni a függőleges szerkezetekre jutó terheket. Azonban ezzel óvatosnak kell lenni! A könnyű födémek hanggátlása gyenge, érzékenyek az emberi mozgásból adódó lengésekre és rendszerint a tűzterheléssel szembeni ellenállásuk is gyenge. Könnyű födémeket elsősorban acélból, esetleg fából lehet építeni, mely anyagok tűzvédelmi szempontból is kritikusak lehetnek.

födémek

A fentiek alapján olyan födémeket érdemes építeni, amik nem túl

nehéz, de azért nem is túl könnyűek, emellett jól ellenállnak a tűzterhelésnek. További tapasztalat, hogy kedvezőbb építészeti kialakítás érhető el akkor, ha kisebb számú de nagy pillérünk van, mintha sok kicsi, tehát a szokásosnál nagyobb támaszközpontokat érdemes kialakítani.

Hosszú ideig acél gerenda vagy acél rácsostartóval gyámolított födémeket használtak a magasházakhoz, ahol a szelemenezés is acélból készült és ezekre a szelemenekre támaszkodott kis támaszközpontú nehezebb szerkezet, vasbeton lemez. Így könnyen ki lehetett alakítani akár 15-20 m-es pillérközöket kis önsúly mellett. A megoldás hátránya, hogy nagyon érzékeny a tűzterhelésre. Ezt rendszerint kiegészítő rendszerekkel, tűzvédelmi burkolatokkal oldották meg. Sajnos a World Trade Center tragédiájából tudjuk, hogy ez a fajta védelem csak rövid ideig áll ellen az extrém hatásoknak és progresszív módon omlik össze az épület. 2001-ben az acél rácsostartókkal kialakított födémek kb. fél óra után leszakadtak, és dominóként sodorták magukkal a lentebbi szintek födémjeit.

A mai magasház építésben az acél-beton kombináció még mindig elterjedt, de a betonlemez nem rátett teherként, hanem együtt dolgozó szerkezeti elemként kerülnek beépítésre. Ezt acél-beton kompozit szerkezetnek nevezzük. Ha a beton körbefutja az acélgerendákat, akkor a tűzterhelésnek is jól ellenálló szerkezetet kapunk.

Az acél-beton kompozit megoldás építéstechnikai szempontból is kedvező. Az acélszerkezetek rendszerint alkalmasak a beton súlyának viselésére, ezért külön állványzatra nincs szükség. Belső maradó trapézlemez zsálas alkalmazása esetén pedig zsálasítás sem kell.

A kompozit megoldás mellett az utófelezített vasbeton lemezek alkalmazása a legelterjedtebb. Ennek az előnyeiről részletesen a Nagy támaszközpontú tartók c. fejezetben lehet olvasni. A magasház építésben a viszonylag kis szerkezeti vastagság és az ebből származó kis önsúly miatt

szokták választani ezt a megoldást. Emellett a tűzteherrel szembeni jó ellenállása is kedvező.

Az acél gerendás és a kompozit rendszerek statikai modellje általában határozott tartó: kéttámaszú, vagy kéttámaszú konzolos tartó. Az egyszerű statikai modell az épületek elrendezéséből következik: a merevítő magon kívül legtöbbször egy homlokzati vagy visszahúzott pillérsor készül, de statikailag is kedvező. Határozatlan tartók esetén a támaszsüllyedés megváltoztatja az igénybevételeket: helyenként csökkennek, máshol nőnek a nyomatékok. Márpedig 5-10 szintnél magasabb épületeknél a támaszmozgások különbsége jelentős. A pillérek összenyomódása nagyobb a falakénál és az alapozás süllyedése is nagyobb a koncentrált hatások alatt. Szintenként 1-2 mm-es különbségre számíthatunk a rugalmas alakváltozásokból, ami már 10 szintenként nézve is jelentős különbség! 50-100 szintes épületeknél pedig akár végzetes is lehet! A rugalmas alakváltozások nagyrésze létrejön már építés közben, mivel a tartószerkezet önsúlya domináns a gravitációs terhek között, és az építészeti rétegrendek is felkerülnek 5-6 szint lemaradással a tartószerkezetek után a feszített ütemű kivitelezés során. Ez az eltérés még korrigálható folyamatosan. De a viszkózus alakváltozások a vasbeton pillérek esetén csak évek alatt zajlanak le!

Monolit vasbeton födémeknél a megoldás természetéből adódóan kétirányú teherhordásra kell számítani, ami a homlokzattal párhuzamosan szinte mindig soktámaszú tartót eredményez, ami már érzékeny a támaszmozdulások különbségére. Ha a külső pillérsor terhelése egyenletes, akkor könnyebben elkerülhető a süllyedéskülönbség és a nyomatéknövekmények kialakulása.

Az acél-beton kompozit és az utófeszített vasbeton födém költségei magasabbak egy hagyományos vasbeton födémnél általában, azonban az alapköltségek (anyag, segéd szerkezetek, munkadíj) melletti járulékos

kölmégmentakarítások miatt rendszerint kifejezetten költséghatékonyak tudnak lenni ezek a megoldások. Ilyenek lehetnek a kis önsúlyhoz tartozó kisebb alátámasztó keresztmetszetek, a kevesebb építési segédszerkezet vagy a rövidíthető építési idő. És megfelelő rutin mellett a kedvezőbb anyagfelhasználás a hagyományos technológiáknál olcsóbbá tudja tenni az utófeszítést is.

pillérek

A kezdeti magasház építés meghatározó szerkezeti anyaga az acél volt. Az angolszász világra nagyon jellemző favázás építést váltotta fel a XIX. század iparosítása által könnyen elérhetővé váló nagy teherbírású acél. Akkor az acél tűzzel szembeni ellenállása fontos érv volt az acél mellett a fával szemben. Mára tudjuk, hogy bizonyos szempontból az acél a fánál is érzékenyebb a tűzzel szemben, mert hiába nem éghető, hogyha magas hőmérsékleten (300-400 °C felett) radikálisan veszíteni kezd a szilárdságából.

Az acél anyag nagy szilárdsága lehetővé teszi, hogy nagy terheket vehessünk fel viszonylag kis keresztmetszetek mellett. Ezért hosszú időn át az acél dominált a pillérek kialakításánál. A XIX. század végén induló magasházépítés kezdetétől egészen az 1970-es évekig acél vázzal és acél pillérekkel épültek a magasházak.

A XIX. század végén és a XX. század első felében összetett szelvényű acél oszlopokat használtak: melegen hengerelt L, U esetleg I szelvények és laposvasak kombinációjából alakítottak ki keresztmetszeteket. A kapcsolatok szegecseléssel készültek. A szegecselést folyamatosan felváltotta a csavarozás majd a hegesztés. A hengerlési technológia és a hegesztési technológia fejlődésével az I keresztmetszetek és a hegesztett keresztmetszetek vették át a szerepet a XX. század második felétől.

Az acél pillérek kedvező teherviselési tulajdonságaival szemben a tűzhatással szembeni érzékenységük nagy hátrányt jelent. A kezdeti időszakban nehéz kőburkolatokkal látták el a pilléreket az építészeti igényekhez igazodva. Ezek a burkolatok jó védelmet nyújtottak az acélelemeknek. A könnyű burkolatok és a függönyfalak elterjedésével ez a „természetes” védelem elmaradt, és helyette célirányos, így jobban „kihegyezett” és ez által érzékenyebb védelmet kezdtek el alkalmazni: tűzvédelmi burkolatok és festések készültek az újabb acélvázás toronyházakban.

Az első komolyabb vasbeton toronyház a chicagói Marina Tower volt, mely a hatvanas évek közepén épült. Ennek az épületnek több különlegessége is volt: az első toronyház, mely lakóépület, az első ikertorony és az első vasbeton vázas toronyház. Az igaz, hogy csak 179 m magas a két torony, de a fentiek miatt mégis nagy a jelentősége.

Az acél pillérek tűzvédelmi problémái miatt folyamatosan előtérbe került a vasbeton alkalmazása, és az 1990-es évekre már ez a technika vált meghatározóvá. Ehhez persze az is kellett, hogy a betontechnológia felnőjön a feladathoz. A 90-es évek végén épített malajziai Petronas ikertornyok már tisztán vasbeton vázzal készültek C80-as beton alkalmazásával a kritikus szerkezeti elemekben. Ez az épületegyüttes egy ideig magassági rekorder is volt, habár ezt az amerikaiak vitatják.

A vasbeton pillérek alkalmazása az acélpillérek helyett a pillérméretnek növekedésével jár, ami nem mindig elfogadható építészetileg. A két anyag kedvező tulajdonságait az acél-beton kompozit szerkezetekben lehet ötvözni. A vasbeton a betonacél és a beton ötvözet, kompozitja. Talán az angol elnevezés adja pontosabban vissza, hogy itt a beton a domináns anyag: *reinforced concrete*, azaz erősített beton. A beton tulajdonságait feljavítjuk a vasalással, de a beton viselkedése, teherbírása

a meghatározó. Az acél-beton öszvérszerkezetek esetén a helyzet fordított: az acélt egészítjük ki vasbetonnal. Az Eurocode szerinti méretezés ezt jól tükrözi: az acél szabvány szerinti számításokat egészítették ki az együttdolgozó betonelemekkel. Ezzel szemben a régi magyar szabvány merevacélbetétes vasbeton szerkezetéről beszélt, ahol még a beton volt a domináns.

Az acél-beton kompozit megoldás jól ötvözi az acél nagy teherbírását a vasbeton robusztusságával. A kompozit megoldás jól ellenáll a tűzterhelésnek és más különleges terheléseknek is.

Napjainkra a vasbeton háttérbe szorította az acélt a tűzel szembeni gyengesége és az acélszámítás magas ára miatt. De fontos megemlítenünk, a magasházak pillérjei nagy keresztmetszetekkel készülnek, hiszen nagy terhelést kell viselniük. A „standard” 30×30 cm-es vasbeton pillérméret ugyan jól illeszkedik a hagyományos falazatokba, de rendszerint alkalmatlan 3-4-nél több szint terhelésére (természetesen ez függ a terhelőmező nagyságától). 20-30 szintes épületeknél már méteres pillérméretre adódnának hagyományos vasbeton szerkezet alkalmazása esetén. Az alacsonyabb felhőkarcoló pillérjei is megkövetelik a különleges betonminőség alkalmazását vagy a merevacél betétek beépítését.

A vasbetonhoz felhasznált beton szilárdsága hosszú ideig nem tette lehetővé, hogy toronyházak pillérjeihez használják. 10-15 N/mm²-es szilárdságban gondolkodva már 10-20 szint esetén is 70-100 cm-es pillérméretre kellene számolni, 50-100 szint esetén reálisan nem használható ilyen szilárdságú anyag. Azonban a mai betontechnika mellett 60-80 N/mm², de akár 100 N/mm² feletti betonszilárdság is elérhető helyszíni szerkezeteknél is. Természetesen itt már különleges adalékok alkalmazásáról van szó, ami magas költségekkel jár, de így is megéri ezeket használni az acéllal szemben.

Régi-új technológiaként a favázás magasház építés is teret kezd hódítani. A kanadai Vancouverben 2015-ban kezdtek egy 18 szintes kollégium építésébe, mely vasbeton merevítőmagokkal készül, de azon túl tisztán faváz.

A pillérek elsősorban a függőleges terhek felvételére szolgálnak, de gyakran részt vesznek a merevítésben is. Alacsonyabb épületek (20-40 szintig) épülhetnek keretvázként. Ekkor acél vázszerkezetben kell gondolkodni, mert karcsú vasbeton pillérváznál a saroknyomatékok felvétele szinte lehetetlen, a vasalás átvezetésére nincs elég hely. A falaknál már említettük, hogy a homlokzati falak is inkább sűrű osztású keretvázak, ezek készülhetnek acélból és betonból is. Mindkét esetben nagy keresztmetszeteket használnak a fal síkjában ahhoz, hogy a keretváz nyomatékait kis deformációkkal fel tudják venni a szerkezetek. A mai magasház építésben a kapcsolt keretek a jellemzőek, ahol a belső merevítőmághoz nagy merevségű konzoltartóval kapcsolják be a homlokzati pilléret. Ekkor a pillérek megmaradnak nyomott elemnek (a nyomás marad a domináns), a merevítés inerciáját a steiner tagjukkal növelik. Mindezekről a merevítőrendszereknél lesz részletesebben szó.

falak

A magasházak külső részein inkább pilléret használnak, hogy a homlokzatalakítás és a kitekintés az épületből szabadabb lehessen. A belső közlekedő magokat viszont gyakran falak veszik körbe, melyek részt vesznek az épület merevítésében és a függőleges terhek viselésében is.

A mai magasház építésben, a teherhordó és a merevítő falak szerkezeteihez szinte kizárólag vasbetont használnak.

Szemben a pillérekkel a vasbeton falaknál akár 20-30 szintet is építhetünk a jól bevált 20 cm körüli szerkezeti vastagsággal. Ugyanis a falakhoz tartozó nagyobb keresztmetszeti terület és a fal egyes szakaszaira jutó kisebb terhek miatt a falak méretét nem a tartószerkezeti, hanem egyéb szempontok határozzák meg. Ilyen az akusztika, a hőtechnika, a tűzvédelem és az építhetőség. Talán ez utóbbi a legfontosabb. A zsaluban el kell helyezni a kétoldali vasalást, mindegyik két réteg (egy függőleges és egy vízszintes, tipikusan 12+8 mm oldalanként), mely rétegeket betonfedés kell takarja (újabb 25-40 mm oldalanként a fűzvédelmi követelményeknek megfelelően). A kétoldali vasalás között el kell férjen még a tűvibrátor is, amihez 40-50 mm-es távolságra van szükség. Ez minimum 150-160 mm-es falvastagságot jelent, de az építési tapasztalatok alapján inkább 180-200 mm-es falakban lehet csak gondolkodni.

A vasbeton pillérek mellett acél vázzal is készülnek falak magasházakhoz. A pillérváz és a falváz közötti különbség nem nagy ilyenkor. A falváz esetén sűrű pillér osztás készül, ahol a pillérek a fal síkjában nagy keresztmetszetűek és hasonló keresztmetszetű gerendák kapcsolják őket össze. Így együtt nagy merevségű keretvázat alkotnak a fal síkjában, miközben a fal síkjára merőlegesen kicsi a rendszer merevsége. Ilyen módon elsősorban homlokzati síkra helyezett merevítéseket építettek (pl. Sears-Tower és World Trade Center).

Vízszintes terhek

Az épületeink tartószerkezeteinek kialakítását rendszerint a gravitációs terhek határozzák meg. A szerkezeteink önsúlya jelentős és a gravitáció mindig mindenhol jelen van a földi körülmények között. A vízszintes terhek szinte kivétel nélkül esetlegesek, csak rövid ideig hatnak a

szerkezeteinkre. Csak egészen kicsi és kompakt épületeknél nincsenek befolyással a szerkezeti kialakításra. Minél magasabb egy épület, annál meghatározóbb elemévé válik a konstrukciónak a vízszintes terhekkel szembeni megtámasztás.

A két legfontosabb vízszintes terhünk a szélteher és a földrengés teher. Ezek mellett a technológiai terhek, az ütközés és a robbanás hatása, a megtámasztott földtömeg vagy vízoszlop hathat vízszintesen az épületeinkre. Továbbá a gravitációs terhek felvétele is gyakran vízszintes hatásokat eredményez (ferde támaszok, ívek és tetők terpesztő ereje, stb.).

A felsorolt vízszintes hatások esetlegesen és rövid ideig hatnak a szerkezeteinkre, és hatásuk gyakran dinamikus. Ez utóbbi körülmény miatt a terhek felvételének módja más szemléletet és más méretezési módszereket igényel, mint a gravitációs hatásokkal szembeni védekezés. Bonyolultabb épületek esetén a statikus hatásokra való méretezés is bonyolult feladat, a dinamikus hatások pedig mindig legalább egy nagyságrenddel bonyolultabbak.

A szélteher a levegő, mint áramló közeg által kifejtett nyomás az épületek felületén. A szélteher nagysága függ a szél sebességétől és az épület alakjától. A szél sebessége a föld felszínének közelében lassabb, magasan, ahol kevésbé fékezi a légáramlást a felülettel való súrlódás, a szélesebbé magasabb. A domborzat és a beépítettség is befolyásolja a szélesebbé: városias beépítés mellett lassabb a légáramlás, nyitott vízfelület felett pedig gyors. Az épület alakja, a felületek nagysága és a széllel bezárt szöge, az élek helyzete, az áttörtség mind befolyásolják a szélteher nagyságát. Az éleknek kiemelt szerepük van: az itt kialakuló örvényleválások periodikusan szakadnak le a felületről, ezért dinamikus hatást eredményeznek.

A szélterhet statikus vagy kvázi statikus (a dinamikus hatást növelő

tényezővel felszorozva) hatásként helyezzük a szerkezeteinkre általában, pedig a szél hatása mindig dinamikus. Zömök, nehéz épületek esetén a dinamikus hatás elhanyagolható. Karcsú szerkezetek esetén (pl. árbocok, antennatornyok, kábelek) a dinamikus hatás már nem elhanyagolható, mert a szerkezet mozgásba jön, és a hatás felerősödhet. A magasházak szinte kivétel nélkül ilyen karcsú szerkezetek. Továbbá a magasházak gyakran 200 m feletti magassággal épülnek, ahol a szélesség már akkora, hogy az örvényleválások dinamikus hatása jelentős.

A terhek dinamikus hatásának két következménye van: kedvezőtlen merevségi viszonyok mellett felerősödik a teher hatása a tartószerkezetekre és az épület mozgása zavarhatja a használhatóságot. Először a használhatóságra gyakorolt hatást vizsgáljuk meg!

Magas épületek esetén (ez különösen a 200 m-es magasság felett értendő) a mindennapokban kialakuló szélteher is jelentős dinamikus hatással van a szerkezetekre. A járatos építési rendszerekkel kialakítható merevség viszonyok azt eredményezik, hogy az örvényleválások frekvenciája a merevítőrendszer sajátfrekvenciájának közelében van. Emiatt a szél dinamikus hatása gerjesztett rezgőmozgást eredményez a szerkezeten. A rendszer csillapításai miatt (pl. képlékeny alakváltozások) ez nem vezet tönkremenetelhez, de a szerkezet nagyobb alkaváltozásokat szenved, és hintaként inog, hajóként ring. 30-40 cm-es amplitúdóra is lehet számítani. A nagyobb elmozdulások leginkább a csatlakozó szerkezeteket, burkolatokat veszélyeztetik, élettani szempontból a maximális gyorsulás számít. Lakóépületnél 15-18 mg (milli gravitáció), irodaépületnél 20-25 mg az elfogadható gyorsulás. A tapasztalatok szerint 1/8-os karcsúság felett (a merevítő rendszer alaprajzi kiterjedésének aránya az épület magasságához képest) ezeket az értékeket már nem lehet biztosítani a merevítő rendszer erősítésével. A rendszer hatékony csillapításával lehet csak eredményt elérni. Erről később részletesebben lesz szó.

A szélteher hatása függ az épület földrajzi elhelyezkedésétől és a beépítési viszonyoktól. Az Eurocode 200 m-es magasságig ad meg értékeket a szélteherre, magasabb épületek esetén eseti vizsgálatra van szükség. Azokban a városokban, ahol meghatározó a magasház építés, helyi szabályozások rendelkeznek a szélteherről. Az így megadott értékeket szélcsatorna vizsgálattal szokták felülvizsgálni, hogy a konkrét épületforma és szomszédsági viszonyok milyen szélterhet eredményeznek. Egy ilyen részletes egyedi vizsgálat 20-30%-al is csökkentheti a figyelembe veendő terhelést, ami dollár milliókat jelenthet a beruházási költségben!

A földrengés hatása még erősebben függ a földrajzi elhelyezkedéstől. Egyes helyeken a szélteher mellett elhanyagolhatjuk a földrengés hatását, máshol mértékadó lehet a földrengés. Általánosságban azt lehet mondani, hogy magasházak esetén közepesen veszélyes területeken (mint például New York, Chicago, vagy akár Budapest) a földrengés hatása mértékadó a merevítőrendszer teherbírása szempontjából, de a merevítő rendszer kialakítását, a merevségi viszonyokat, a csillapítás kialakítását a szélteher dinamikus hatása határozza meg. A földrengés szempontjából veszélyes területeken (Kalifornia, Japán, Újzéländ...) a földrengésre való méretezés ír felül mindent. Kis veszélyességű területeken (pl. London) a szélteher a meghatározó használhatósági és teherbírési szempontból is.

A földrengés és a szélterhet összevetve az is fontos körülmény, hogy a maximális szélteher gyakori szintje nem sokkal kisebb a maximális értékénél (50%), úgyhogy ezt a hatást el kell szenvednie a merevítőrendszernek a hétköznapokban. A földrengések előfordulási valószínűsége még a veszélyeztetett területeken is alacsony. Ha például Japánban néhány évente megremeg egy ház, akkor nem igény, hogy az épület „ringása” a komfortzónában maradjon. Ha nagyrítván nagy földrengés éri az épületet, akkor mindenki elégedett azzal is, hogyha nem omlott össze a ház. Ezzel szemben a mindennapos szélterhek esetén

szigorúan tartani kell a használhatóság követelményeit, különben kiköltöznek a bérlők! A lengéscsillapító rendszereket ezért a szélteherhez méretezik elsősorban.

A szélteher és a földrengés teher másfajta védekezési stratégiát igényel. Szélteher esetén korlátoznunk kell az épület lengésének amplitúdóját, és a vízszintes gyorsulásokat a fentiek szerint, ami egybecseng azzal, hogyha a szél mozgásba tudja hozni az épületet, akkor az felnagyítja a szél hatását (gerjesztett rezgőmozgás, lásd zászlók belebegése). Tehát minél merevebb épületre van szükségünk. Ezzel szemben földrengés esetén minél lágyabb az épületünk, annál inkább „elhajlik” a földrengés teher elől.

A két ellentmondó követelmény akkor ütközik egymással, amikor nagy földrengés teherre kell méretezni az épületet. A szélteher miatt mereven kell tartanunk a házat, de a földrengés terhet ez felerősíti. Erre a problémára fejlesztették ki a kapacitásra méretezést. Megfelelő csomóponti kialakítás, alapozás, csillapítórendszerek mellett elérhető az, hogy nagy földrengés esetén az épület merevítőrendszere felpuhuljon csökkentve az épület merevségét, így a földrengés hatását is. Ehhez nagy képlékeny alakváltozásra képes csomópontokra, képlékeny vagy viszkózus kapcsolatokra van szükség az alapozásnál. Az egyébként merev szerkezeti elemeket képlékenyedő lengéscsillapítókkal összekapcsoló rendszerekre lehet még szükség. Ilyen módon a földrengés terhelést ötödére, hatodára lehet csökkenteni! Kockázatosnak tűnhet a megoldás, hiszen sok a bizonytalanság a teherfelvétel és az anyagállandók területén is, de a tapasztalat azt mutatja, hogy az így tervezett épületek megbízhatóan ellenállnak nagy földrengés terheknek is. Japánban és Chilében 6-9-es magnitúdójú földrengéseket éltek túl kapacitásra méretezett épületek még elfogadható károsodás mellett.

A vízszintes gyorsulás mellett a vízszintes elmozdulásokat szokás még

korlátozni. Nem az abszolút elmozdulást korlátozzuk, hanem az egymás feletti szintek közötti elmozdulás különbséget. Ezt szintközi elmozdulásnak (interstorey drift) nevezzük. A korlátozás célja nem a vizuálisan zavaró hatások elkerülése, vagy a zavaró lengés korlátozása, ez utóbbit a maximális vízszintes gyorsulás korlátozza. A cél az, hogy a csatlakozó szerkezetek ne sérüljenek. Szélteher esetén 1/400-1/500 a szokásos korlátozás, földrengés esetén pedig 1/50-1/100, ahol az egység a szintmagasság. Ezekhez a korlátokhoz kell alakítani a burkolati rendszereket, a vízszintes és a függőleges illesztési hézagokat, tömítéseket. A szintmagas burkolati panelek, üvegtáblák között a szokásos illesztési hézag mérete így 20 mm-re alakul.

merevítő rendszerek

A vízszintes terhekkel szembeni megtámasztást kétféle rendszerrel szokás megoldani: falas merevítéssel vagy keretvázal. A falas merevítés rácsos szerkezetként is elképzelhető, a két alapvető rendszer közötti különbség abban áll, hogy a merevítés nyomatéki deformációval vagy nyírási deformációval veszi-e fel a terheit.

Falas rendszer esetén a merevítőrendszer az alapozásba fogott konzolként működik. A merevítő rendszer alakváltozásai gerenda jellegűek, többé-kevésbé figyelembe vehető a Bernoulli-Navier hipotézis (a többé-kevésbé úgy értendő, hogy a befogás közelében a nyírási deformációk is felerősödnek ugyan, de a tartó hossza mentén a merevítőrendszer keresztmetszetének elfordulása a domináns az alakváltozások szempontjából). Ez azt eredményezi, hogy az épület alján minimális a szintek közötti eltolódás, a felső szinteken pedig nagy elfordulásokra számíthatunk, azaz a felső szintek padlójának nagyobb mértékben lejthet nagy terhelés esetén.

A keretvázak esetén az egyes szintek kereteinek vízszintes eltolódása

határozza meg az alakváltozásokat, ami az egész merevítőrendszerre vetítve nyírási deformációt jelent. Emellett a keretváz oszlopainak összenyomódása és megnyúlása nyomatéki alakváltozást is eredményez, de a nyírási alakváltozás a domináns. Ennek eredménye az, hogy az alsó szinteken nagy a szintek közötti eltolódás, viszont a felső szinteken kicsi a szögelfordulás, a födéme csaknem vízszintesek maradnak.

A két rendszer kombinálható egymással, ekkor kihasználhatjuk mindkét rendszer előnyeit: a faltartók kis szintközi eltolódása mellett a felső szintek csak kis mértékben fognak elfordulni. Azonban óvatossá kell lenni ezzel: a nagy hajlító merevségű merevítőmaghoz kapcsolódó gerendák egy-két nagyságrenddel lágyabbak. Statikus terhek esetén ez nem jelent problémát, a kapcsolat méretezhető a kiszámított hatásra. Dinamikus terhelés esetén azonban ez a kapcsolat szinte biztosan eltörik, és a gerenda leszakad. Ezért földrengésveszélyes területen nem ajánlott ilyen rendszert építeni. A szélteher dinamikus hatása azért nem veszélyes ebből a szempontból, mert a szél által gerjesztett lengés frekvenciája kisebb a földrengésnél, inkább csak a használhatóságot befolyásolja. Másrészt ez a vegyes rendszer csak 30-40 szintig hatékony, ami 100-150 m magas épületet jelent. Ebben a magasságban a szélteher és annak dinamikus hatása kevésbé veszélyes.

A fentiek alapján a tipikus merevítőrendszereken megyünk végig a következőkben. A merevítőrendszereket egyszerű, 4×4-es raszteren mutatom be, ami az alapsémája a toronyházaknak: a középső közlekedő magot egy raszternyi hasznos terület vesz körbe. Természetesen sok más elrendezés is létezik, gyakran terveznek két közlekedő magot például. Azt azért el kell mondani, hogy a toronyházak mindig szigorú rendszerben épülnek. Már 10-20 szint közlekedésének és gépészetének összerendezése is nagy fegyelmet igényel, de 50-100 szinten megszervezni ezt szinte lehetetlen akkor, hogyha nincsenek meg ezek a végig menő magok. Persze mindenre van ellenpélda, de azok a kivételes esetek extrém

költségvonzattal járnak!

A közlekedő/gépészeti magok különösen alkalmasak arra, hogy körülöttük merevítő szerkezet alakuljon ki, ezeken kívül pedig már szabadon elrendezhetőek a „hasznos” funkciók. Irodaházak, szállodák esetén ez egyértelműen adódik. Lakóépületek esetén azonban az egyes lakóegységek igényei szétszórják a gépészetet az alaprajz mentén, ami megnehezíti a tartószerkezeti tervezést is. A lakásválasztó falak sem feltétlenül akarják követni az ideális tartószerkezeti helyzeteket. Építésként itt a következőket kell mérlegelni: az aszimmetrikus rendszerekben csavarás ébred, aminek felvétele egy nagyságrenddel nagyobb, erősebb szerkezetet kíván, mint a csak hajlított rendszer; a falakban lévő törések, szakadások feszültségcsúcsokhoz vezetnek, melyek felvétele komoly megerősítést kíván. Míg 5-10 szintes épületeknél ezek a többlétszerkezetek nem jelentenek ugrásszerű költségnövekedést, magasházak esetén pénzügyileg ellehetetleníthetnek egy-egy beruházást.

Merevítőmag: az épület középső részén elhelyezkedő merevítőmag hajlított szerkezetként veszi fel a vízszintes hatásokat a fent részletesebben bemutatott módon. Ez a rendszer 20-40 szint magas szerkezetekhez használható jól.

Keretváz: a teljes épületváz sarokmerev keretként épül. Az így kialakított merevítés a merevítőmagnál lágyabb szerkezetet eredményez. Megfelelő duktilis csomópont kialakítás esetén dinamikus hatásra, kifejezetten földrengés teherre kedvező ez a rendszer. A rendszer hatékonysága hasonló a merevítőfalas rendszerekhez, 20-40 szint magas épületeket lehet így építeni. Fontos kiemelni, hogy az épület pillérjei itt részt vesznek a merevítésben, nem csak függőleges terhet hordanak. Ez nagy nyomatókokat és így nagy keresztmetszeteket eredményez. Magyarországon a középmagas épületeknél ugyan hatékony volna ez a megoldás, de szinte egyáltalán nem használjuk. Ennek oka lehet, hogy

rendszerint igény a minél karcsúbb pillér használata, és hogy természetesen adódik mindig annyi merevítő fal, ami már alkalmas a merevítésre 5-10 szint merevítésére.

Kombinált merevítés: a merevítőmag és a keret együtt biztosítja a merevítést. Tekintettel arra, hogy két nagyon különböző rendszert kapcsolunk össze, az eredmény nem az lesz, hogy duplázódik a rendszer terhelhetősége. Ahol az egyik rendszer hatékony, ott a másik gyenge, ahogy ezt fent már bemutattam. Az összekapcsolás előnye, hogy egymás gyengeségeit kiegészítik. Viszont az egész rendszer érzékeny a dinamikus hatásokra. A maximális szintszám 30-50 szint ebben az esetben.

Cső merevítés: a merevítőmag merevségét és teherbírását korlátozza, hogy az épület belsejében, kis területen kell megoldani a terhek felvételét. Ha kitesszük a merevítést a homlokzat síkjára, a merevítő rendszer inerciája nagyságrenddel nagyobb lesz. A felvett 4×4-es raszterben gondolkodva a szélső szálak távolsága a háromszorosára nő. Az inercia a harmadik a keresztmetszeti modulus a második hatványon arányos ezzel, tehát $3^3=27$ a merevség növekmény és $3^2=9$ a teherbírás növekmény. Ez persze csak akkor lenne igaz, hogyha az épületünket egy nagyból tömör csőben alakítanánk ki. A belső merevítő magon csak nagyon kevés nyílás van, míg a homlokzaton sok és nagyméretű nyílásokra van szükség. A 27-szeres és 9-szeres növekmény így már nem jön létre. Az elérhető szintmagasság körülbelül 60-80 szint.

A csőszerű merevítés kialakításra két módszer lehetséges: készíthetünk rácsos merevítést, vagy a homlokzat síkjában kialakított nagy merevségű keretszerkezetet. A rácsos merevítés meghatározó homlokzati motívum lesz: András-kereszt, V vagy N rácsosozást szoktak alkalmazni, de tulajdonképpen bármilyen elrendezés lehetséges, ahol teljesülnek a rácsostartó szerkesztés szabályai. A keretváz alkalmazása sűrű, a homlokzat síkjában nagy keresztmetszettel rendelkező oszlop-gerenda

rendszer eredményez. Ezt a keretrendszert összevetve a keretvázaz merevítéssel azt kell látni, hogy míg az épület keretváza 6-8 vagy akár 15-20 m-es tengelytávval készül, addig egy homlokzati keretváz mezői 3-4 m-es tengelytávval készülhetnek.

Cső a csőben rendszer: a homlokzati merevítéshez hozzáadhatjuk a merevítőmagot is. A merevítőmag kialakítása általában természetes helyet kap a közlekedő/gépészeti mag körül, ezért érdemes kihasználni ezt a lehetőséget. Az így elérhető merevség növekmény nem annyira jelentős, inkább arra ad lehetőséget, hogy az épület homlokzatának áttörtségét növelni lehet. Az elérhető szintszám 60-80 szint.

Csőnyaláb rendszer: ha a homlokzati merevítést és a merevítőmagot összekötjük egy belső falrendszerrel, akkor tovább növelhetjük a szerkezet merevségét. ugrászszerű változást ez nem eredményez, de az elérhető szintszámot 80-100 szintig tolhatjuk.

Kapcsolt merevítés: a csöves rendszer hátránya, hogy a homlokzat kialakításában erős kötöttséget eredményez, vagy visszafelé nézve a dolgot, a nyílások méretei korlátozzák a merevítés hatékonyságát. Építészetiileg a merevítés ideális helye a belső mag, a homlokzaton pilléreket lehet jól elhelyezni. A pilléreket keretvázként alkalmazva nem tudunk hatékonyan merevíteni 40-50 szint felett, ahogy arról fentebb már szó volt. Hagyományos keretek esetén a pillérkeresztmetszetek inerciája nem épül be szervesen a merevítőmag inerciájába, mert a gerendák viszonylag kicsi hajlítási merevsége nem tud akkora csúsztató-nyíróerőt átvezetni a merevítőmagról a pillérekre, hogy ez hatékonyan végbe menjen. Olyan ez, mintha egy fagerendát úgy erősítenénk meg egy másikkal, hogy csak néhány szöggel fogjuk őket össze. Ezek a szögek elhajlanak a nyomaték hatására. Ha a két faelemet sűrűn szegezzük vagy összeragasztjuk, akkor sokkal nagyobb teherbírást érünk el, mert a keresztmetszetek nem tudnak elcsúszni egymáshoz képest. Ha a pilléreket

is így vonjuk be a merevítőmag erőjátékába, akkor nagymértékben megnő a szerkezet merevsége, inerciája. Ragasztani persze itt nem tudunk, és a csőnyalábhoz hasonló elrendezést is szeretnénk elkerülni, hogy szabadabb maradjon az alaprajz. Jó megoldás lehet, hogyha az épület magassága mentén 4-5 helyen olyan konzolokat alakítunk ki a merevítő magba befogva, amelyeknek a merevsége hasonló a merevítőmag egy-egy falának merevségéhez. Ezeknek a konzoloknak a külső vége pedig rátámaszt a homlokzati pillérekre. Az ilyen konzolok 1-2 szint magas falszerű tartók. Ha így kapcsoljuk hozzá a pilléret a merevítőmaghoz, akkor azok már szerves részét képezik a merevítőrendszernek, hiszen a csúsztató nyíróerő hatékony átvezetése megoldódott. Összehasonlítás képen, ha csak lerakjuk a pillért a merevítőmag mellé, akkor az inerciákat egyszerűen összegezzük. A fenti módon összekapcsolt rendszerben a csúsztató-nyíró deformációkat meggátoljuk, ezért a Steiner-tagot is használhatjuk az összegzésben, ez pedig több nagyságrenddel nagyobb inerciát eredményez. 80-100 szint magas épületeket lehet hatékonyan építeni ezzel a rendszerrel. Előnye a csőnyalábhoz lépest, hogy szabadabb alaprajzi elrendezést tesz lehetővé, viszont a magasság mentén 4-5 helyen elveszítjük a hasznos területet. Ezek a szintek viszont jól használhatóak gépészeti célokra vagy romszintnek. A mai gépészeti rendszerek mellett ez különösen hasznos!

Csontváz rendszer: a 80-100 szintes magasság felett a hagyományos rendszerek már nem hatékonyak. A magra és a homlokzatra szerkesztett rendszerek korlátot jelentenek építészeti vagy tartószerkezetileg. Ezek a rendszerek ráadásul azt is feltételezik, hogy az épület a magassága mentén nem sokat változik, hasáb szerű. Konzoltartók nyomtatéki ábráját megfigyelve látható, hogy a befogás felé négyzetesen nőnek a nyomtatékok. A szélidiagrammokat megnézve pedig az látható, hogy hasonlóan nő a szélteher az épület magassága mentén. logikusnak tűnik, hogy a szélteher csökkentése érdekében felfelé szűküljön a házunk, miközben az alsó szintek nagyobb alapterületén nagyobb merevséget

tudunk kialakítani. Az első igazán magas építmény, az Eiffel-torony is így készült. A ma legmagasabb épület, a Burj-Kalifa is ezt az alakot veszi fel, és benne a merevítőrendszer is követi ezt az elrendezést. A merevítő rendszer csontvázként követi az épület formáját, de az épület belső zónájában marad. A merevítő falak így szinte teljesen tömörök lehetnek, ami nagy teherbírást és nagy merevséget eredményez. Az építészeti funkciók „húsként” települnek erre a vázszerkezetre.

Alapozás

Az előző fejezetekben megismerhettük a magasházak két fő problémáját, a nagy függőleges és nagy vízszintes terhek felvételének kérdését. A felmenő szerkezetekben a két problémakör különválasztható, és gyakran külön rendszerek veszik őket fel. Az alapozás síkjában azonban mindenképpen együtt kell kezelni ezt a két problémakört.

A nagy függőleges terhek nagy talajfeszültséget ébresztenek az építőanyagainkhoz képest gyenge talajokban. Ráadásul az egyszerű síkalapozások csak nyomófeszültséget tudnak felvenni, húzást nem. Ezért az épületekre ható vízszintes terhekből származó nyomatékok felvétele mindenképpen bonyolult kérdés.

függőleges hatás

Az átlagos szemcsés vagy kötött talajok teherbírása 200-400 kN/m² között változik, ha a talajtakarás 1-2 m. Ha ezt összevetjük azzal, hogy egy földem terhelése (hasznos és önsúly együtt, tervezési értékkel számolva) csak nagy igyekezet nélkül tud 10 kN/m² alá kerülni, de inkább ennél magasabb értéket vesz fel, akkor beláthatjuk, hogy a szokásos alapozásaink közül legnagyobb teherbírással rendelkező lemezalappal sem tudunk 30-40 szintnél magasabb épületeket építeni.

Ráadásul ebbe a becslésbe nem vettük számításba, hogy a falak és a pillérek súlya növeli a terhelést és a vízszintes hatások miatt mindenképpen külpontos a terhünk. Ha ezeket a körülményeket is figyelembe vesszük, akkor a lehetséges szintszám visszaesik 20-30 szintre.

A felső talajrétegek szinte mindig valamilyen szemcsés vagy kötött talajok, amik alatt az alapkőzet már lényegesen nagyobb teherbírással rendelkezik. De ezek a felső rétegek nem ritkán száz méternél is vastagabbak. Nagyobb teherbírást úgy érhetünk el, hogyha növeljük a talajtakarást. Különösen szemcsés talajok esetén ez nagyon hatékony, az 1-2 méteres takaráshoz számított érték többszörösét érhetjük el, hogyha tízméteres nagyságrendben alakítunk ki talajtakarást. Ez gyakran 30-40 m-es mélységet igényel, de szükség lehet 80-100 m-es takarásra is! Ezekben a mélységekben a talajrétegek minősége is jobb általában.

Amíg 10-20 m-es talajtakarással tudunk dolgozni, addig egy sokszintes mélygarázs és a hozzá tartozó vastag alaplemez is megoldás lehet, tehát síkalapozással is lehet biztosítani a talajhoz való csatlakozást. Itt fontos azt tudni, hogy a megfelelő merevség és teherbírás miatt az alaplemezek vastagsága 3-4 m, de több is lehet! Ha ennél mélyebbre kell menni, akkor mélyalapozásra van szükség.

Beton cölöpöket, esetleg résfalat szoktak alkalmazni toronyházak alapozásához. Ezekkel nem feltétlenül kell elérni az alapkőzetet, de a süllyedéskülönbségek és az abszolút süllyedés korlátozása érdekében szerencsés, hogyha az alapkőzetre támasztanak a cölöpök. Budapesten nem reális az alapkőzet elérése, de például New Yorkban néhány tíz méterre van a felszíntől az alapkőzetet formáló gránit tömb. De Torontóban még ennyire sem kell lemenni, néhány méterre a felszín alatt olyan szikla van, aminek a szilárdsága a betonéhoz hasonló. Így magasabb toronyházakat is fel tudnak építeni egyszerű sávalapokkal!

vízszintes hatás

A vízszintes hatásokból származó nyomatékok külpontossá teszik az alaptestre jutó nyomóerőt. Kedvező esetben az erő eredője még a keresztmetszeten belül marad és marad elég felület a teherátadásra ahhoz, hogy síkalapozással megoldható legyen a teherátadás a talajra.

Ha egyébként megoldható az épület alapozása síkalappal, csak a felborulás (az erő túl nagy külpontossága) a probléma, akkor az alapozás területének a megnövelése is megoldást jelenthet. Ha egyébként is készül mélygarázs és van hely annak az alapterületének a megnövelésére, akkor a nagyobb mélygarázs is alkalmas szerkezetet eredményezhet. A mélygarázst merev dobozként kell kialakítani ahhoz, hogy az épülettel leterhelt és terheletlen részei azonos mértékben süllyedjenek. Több szint magas merevítőfalakkal lehet ezt biztosítani.

Ha síkalapozással nem tudjuk megoldani a nyomaték felvételét, akkor a talajba való horgonyzással tudjuk ezt biztosítani. Cölöpözés vagy talajhorgonyok használhatóak erre.

Ha egyébként is gyengébb a talajunk, a függőleges terhekre tervezett cölöpözés alkalmas lehet a húzóerők felvételére is. Nagy teherbírású, magasan lévő alapkőzet esetén a talajhorgonyok adnak jobb eredményt, mert ezeket könnyebb lefúrni a keményebb rétegekbe.

A cölöpök és a horgonyok a talaj súlyát használják fel a felfelé mutató erők felvételére. A cölöpfal és a talaj közötti súrlódás horgonyozza le a cölöpöket, így a cölöpöt körbefogó altalaj súlya veszi fel a húzóerőt. Lehorgonyzás esetén a horgony feletti talajtömeg (vagy az alapkőzet tömege) végzi el ugyan ezt a feladatot.

Különleges igények, jelenségek

alsó szint

A fent bemutatott problémák mind arra mutatnak, hogy toronyházak esetén egyszerű, az épület teljes magasságában végig menő szerkezeti rendszert érdemes csak választani. Sajnos az építészeti, de inkább a funkcionális igények gyakran megkívánnak más elrendezéseket is. Az alsó szintekre gyakran terveznek nagy előcsarnokokat, előadó tereket vagy egybefüggő üzlettereket. Ezek megszakíthatják a függőleges és a merevítő szerkezetet is, de a legszerényebb igény is általában az, hogy a homlokzatok sűrű osztása az alsó szinteken legyen megritkítva.

Egy-egy ilyen kiváltás elkészítése különösen nehéz feladat. Nem csak azt kell megoldani, hogy a függőleges és a vízszintes terheket váltsuk ki, de ezt úgy kell megtennünk, hogy az épület dinamikai viselkedése is kedvező maradjon. Ez különösen nehéz akkor, amikor az egymástól eltérő felső és alsó rész merevítő rendszerének súlypontja, csavarási középpontja és tömegközéppontja is változtatja helyét. Mindig nagy költségekkel és fokozódó kockázatokkal jár együtt egy ilyen kiváltás, ezért egy toronyházon belül ritkán készül egynél több ilyen kiváltás.

A kiváltások technikai megoldására két alapvető megoldás van: egy masszív keretváz készül az alsó szintekre vagy egy alapvetően rudakból álló támrendszer.

Keretváz alkalmazása esetén arra kell számítani, hogy a vízszintes elemek akár 1-2 szintet is elfoglalhatnak és a függőleges elemek keresztmetszete is „szintmagas”. Mindez persze a kiváltandó támaszközök és kiváltandó elemek függvénye.

Rudas rendszerek esetén rácsostartós-támpilléres megoldást lehet kialakítani. Ilyenkor a keresztmetszetek kisebbek, szellősebb lehet a végeredmény, viszony a ferde rudak vízszintes erőinek felvétele jelent problémát. Magasházaknál a pillérekben működő erő 10-100 ezer kN-os skálán mozog, a vízszintes erő kis dőlésszög esetén is 1-10 ezer kN, nagyobb dőlésszöge esetén 100 ezer kN! Ennek felvétele már különleges feladat.

Az emeleti igényekhez igazodó sűrűbb pillérosztást gyakran földemmel váltják ki. Erre akkor van lehetőség, hogyha ezek a pillérek nem vesznek részt az épület merevítésében. Egy ilyen „mindent tudó” földem önmagában szintmagas szerkezet. 2-3 m vastag betonlemez méretezése és megépítése is különleges feladat. A friss beton zsálatának 60-80 kN-os terhet kell elviselnie négyzetméterenként, a kötési hőt kontrolálni kell, akár hűtőrendszerrel, a beton zsugorodásából származó alakváltozások és erők kezelése nagy gondosságot igényel, a vasszerelés koordinálása különleges megfontolásokat igényel.

aszimmetrikus, csavart geometria

Az a laikusok számára is érzékelhető, hogy az egyenestől és a szimmetrikustól való eltérés különleges eredményt hoz. Az építészeti és a szerkezettervezés során gyakran cél a meghökkentés, figyelemfelkeltés, ami lehet a megbízó igénye is. Ennek eszköze lehet például az aszimmetria és a csavart geometria.

Szerencsés esetben az geometriai deviáció csak a homlokzaton jelenik meg, és mögötte a tartószerkezet és az épület tömege szabályos rendszert követ. Tartószerkezetileg szerencsétlenebb, de adott esetben sokkal izgalmasabb, hogyha az épület teljes koncepciója „deviáns”.

De miért is jelent problémát az, hogyha eltérünk a szabályos geometriától? Az talán mindenkinek világos, hogy húzott-nyomott szerkezetek esetén sokkal kisebb keresztmetszetekkel tudunk terheket felvenni, mint hajlított-nyírt (gerenda jellegű) szerkezetekkel. A különbség léptékváltást jelent a keresztmetszet méretében. Ha egy tömeget kötéllel függesztünk fel, oszloppal támasztunk alá vagy gerendával gyámolítunk, akkor a szükséges szerkezeti méret a felsorolás szerinti sorrendben látványosan növekszik. Kötélnél tisztán normál feszültségekkel hordjuk a terhet, nyomás esetén már a stabilitásvesztés is hatással van a szerkezetünkre, azaz a másodlagos hatásokon keresztül nyomatókat ébreszt a keresztmetszetben. Hajlított-nyírt szerkezetek esetén pedig nyomatók és nyírás ébred a szerkezetekben. Normál erők esetén a teherfelvétel egynemű feszültségekkel történik, ami sokkal hatékonyabb annál, minthogyha a nyomatók húzó-nyomó feszültségeivel kell egyensúlyozni valamit. Egészen kis támaszközű, alapvetően nyírt gerendák esetén a nyíró feszültség lesz a mértékadó, ami ideális esetben is csak a 0,57-szerese a normál feszültséghez tartozó ellenállásnak (a von Miseses képlékenyedési feltétel alapján), ráadásul amíg a normálerővel terhelt keresztmetszeten egyenletes a feszültségeloszlás, addig nyírás esetén parabola szerint oszlanak meg a nyírófeszültségek, ami optimális esetben is csak 2/3-os kihasználtságot eredményezhet.

A csavarás hatását nehezebb ennyire szemléletesen összevetni a nyomatókkal, de ott is hasonló a léptékváltás. Csavarás esetén a terheket (nagyobb részt) nyírással egyensúlyozzuk normál feszültségek helyett, ami önmagában majdnem megduplázza a keresztmetszetet a fentiek szerint. A nyírófeszültségek eloszlása csavarás esetén hasonlóan kedvezőtlen, mint a hajlított tartók esetén.

Aszimmetria és csavart megjelenés esetén csavarás ébred a merevítő rendszerben, ez eredményez megnövekedett feszültségeket.

Szerencsés esetben csak a vízszintes hatásokból származik csavaró hatás. A merevítő rendszerhez és az épület tömegéhez a következő geometriai, keresztmetszeti paramétereket köthetjük: a keresztmetszet súlypontja, a keresztmetszet nyírási középpontja, az épület tömegközéppontja és a homlokzatok súlypontja.

Ha a csavarási középpont és az épület tömegközéppontja nem esik egybe, akkor csavaró nyomatékok ébrednek földrengés hatására. Ugyanis a földrengés gyorsító hatása az épület tömegére hat és eredményez terhet a merevítő rendszerre.

Ha a homlokzatok, vagy azok közül valamelyik felületének súlypontja úgy helyezkedik el, hogy a rá ható szélteher eredője nem megy át a merevítő rendszer nyírási középpontján, akkor ugyancsak csavarás ébred a szerkezetben. A szélteher eredőjének helyzete függ a szélteher irányától, a szélteher intenzitásától, ami a magasság mentén változik, és a homlokzat felületének változó minősége is befolyásolhatja azt, hogy csak a legfontosabb tényezőket említsük. Ez a problémakör a földrengésnél bonyolultabb. Nem elég, hogy egy homlokzat többé-kevésbé szimmetrikus legyen, de a peremeinek és az átellenes homlokzatoknak is követnie kell a szimmetriát. Magas, karcsú szerkezetek esetén az élek mentén kialakuló örvényleválások meghatározóak a szélteher szempontjából. A periodikusan ismétlődő örvényleválások az átellenes oldalakon önmagukban csavaró lengéseket ébreszthetnek a merevítő rendszerben szimmetrikus geometria esetén is!

A vízszintes terhek mellett a függőleges terhek is eredményezhetnek csavarást a merevítő rendszerben. Ha a függőleges megtámasztás szerkezetei tartalmaznak ferde elemeket, az azokban ébredő vízszintes erőkomponensek is eredményezhetnek csavarást.

A csavaró hatás felvétele nem lehetetlen, de olyan többletköltségekkel jár,

amit nem biztos, hogy érdemes felvállalni, hogyha más oldalon nem jár komoly előnyökkel a csavarást eredményező építészeti megoldás.

csillapítás

A magasházak merevítése szempontjából kulcskérdés, hogy a dinamikus hatásokra hogyan reagál a szerkezet. A szélteher részben, a földrengés teher teljes egészében dinamikus hatásként jelenik meg a szerkezeteinken. A dinamikus terhek esetén a teher hatása a szerkezetre függ a szerkezet válaszreakciójától. Ha a teher frekvenciája közel esik a szerkezet sajátfrekvenciájához vagy annak felharmonikusaihoz, akkor a hatás felnagyítódik. Ha a szerkezetünk nagyon merev és a sajátfrekvenciája magasabb a gerjesztésnél, akkor kicsit leegyszerűsítve a problémát, a szerkezetre ható gyorsulás egy az egyben erővé alakul ($F=m \times a$). Ha a szerkezetünk nagyon lágy és távol kerülünk a gerjesztő frekvenciától, akkor csökken a dinamikus hatásból származó terhelés. Mindezt az is befolyásolja, hogy a szerkezet rendelkezik-e csillapítással, ami csökkenti a rugalmas mozgási energiát. Továbbá a szélteher esetén a szerkezet mozgása hatással van az örvényleválásokra, így magára a teherre is.

A fentiek alapján az látszik, hogy az épületeink dinamikus viselkedése egy nagyon összetett problémakör.

Tekintettel arra, hogy a magasházak karcsú szerkezetek, viszonylag lágyak: alacsony a sajátfrekvenciájuk, magas a lengésidejük. Emiatt a terheiket viszonylag nagy alakváltozásokkal veszik fel. A viszonylag lágy rendszernek komoly előnyei vannak: a gerjesztő frekvenciától jobbra távolodva (lágylítva a szerkezetet) csökken a gerjesztés hatása és kisebb terheket kapunk. Szélteher esetén az örvényleválások frekvenciája közelebb kerül az épület lengéséhez, tehát nő a szerkezetre ható teher is. A földrengés szempontjából a szerkezet kitér a rá ható terhelés elől, viszont a szélteher hatása felerősödik. A lágylításnak további kedvezőtlen

hatása is van: megnőnek az alakváltozások, amik károsíthatják a csatlakozó szerkezeteket és rontják az épület használhatóságát is (tengeri betegséghez vezethet az épület ingása). Ezért az egyébként lágy szerkezet lengéseit az autókhoz hasonlóan csillapítani kell.

A csillapítás kedvező hatása az, hogy megakadályozza a periodikus lengések kialakulását és közben disszipálja a szerkezet mozgási energiáját. Tehát a csillapítás hatására lassul, de legalábbis nem gyorsul a lengőmozgás, folyamatosan csökken az amplitúdója, illetve az egymást követő gerjesztő hatások nem tudnak összeadódni. Az energia disszipáció következtében a mozgási energia nem tud akkora alakváltozásokhoz és erőkhöz vezetni, amelyek már tönkre tennék a szerkezetet.

A csillapító rendszert többféleképpen kialakíthatunk. Használhatjuk erre a szerkezet képlékeny alakváltozó képességét, képlékenyedő vagy viszkózus segéd szerkezeteket, hangolt tömegeket.

A képlékenyedő tartószerkezeti elemek nagyon hatékonyan képesek csökkenteni a dinamikus hatások által okozott igénybevételeket. Jó tervezéssel és anyagválasztással ötödére-hatodára csökkenthetjük a földrengés hatását. Ehhez arra van szükség, hogy a szerkezet kritikus csomópontjaiban olyan szerkezeti anyagokat alkalmazzunk, amik nagy képlékeny alakváltozásra képesek, és ezt a képességet sok terhelési periódusban képesek produkálni. Tipikusan ilyen helyek a nagy nyomatékokat viselő keretsarkok. Az alkalmazható anyagok pedig az acél és különböző műgyanták. A szilikát alapú anyagok (mint a beton és a tégl) nem jók ilyen szempontból, mert ugyan alkalmasak képlékenyedésre, de az acél 10-20%-os alakváltozó képességével szemben 0,3-0,5%-os alakváltozásra képesek csak, és erre is csak néhány periódus erejéig.

A fentiek alapján az acélvázak önmagukban is jól viselkednek,

alkalmasak csillapító elemként is megfelelő csomópontképzés esetén. Ez azt jelenti, hogy a csomópontok sem tartalmazhat rideg elemeket (pl. csavarokat), vagy ezeket a rideg elemeket jelentősen túl kell méretezni. Vasbeton vázszerkezetek esetén a kritikus csomópontokban a beton helyett gyakran alkalmaznak műgyantát. Illetve megfelelő vasalással megnövelhető a beton képlékenyedő képessége, azaz elérhető az, hogy az összemorzsolódó beton az őt körbevevő vasalással együtt biztosítsa a szerkezet állékonyságát legalább ideiglenesen. A megfelelő vasvezetésről szerkesztési szabályok adnak útmutatást, rendszerint sűrű kengyelezés és a nyírási repedésekre merőleges vasbetétek elhelyezésére van szükség.

Ez a fajta csillapítás akkor aktivizálódik, amikor a szerkezeti elemek elkezdenek képlékenyedni, ami nagy terhelések esetén következik be. Tehát a teherbírasi határállapotban vagy rendkívüli terhelési helyzetekben vehetjük hasznát, használati határállapotban nem. A széltehernél már szó volt róla, hogy pont a szerkezet használhatóságával van gondunk. Tehát megoldást kellene találni arra, hogy kis terhelés esetén is csillapítani tudjuk a szerkezet lengéseit. Ehhez kiegészítő elemekre van szükség.

Megoldás lehet lengéscsillapító beépítése. Ez lehet egyszerű dugattyú: olajjal öltött munkahenger, ami a lengő tömeg mozgását fékezi. Léteznek ilyen dugattyúk, de ezek drága rendszerek, amiknek nehéz jó helyet találni az épületeinkben. Jobb megoldás, hogyha a szerkezetbe helyezünk el olyan elemeket, amik viszonylag kis erőt képesek felvenni, de közben nagy a csillapításuk. Ilyen elemek lehetnek a merevítő falakat összekapcsoló nyírási betétek, melyeket acélból és speciális gumilemezekből alakítanak ki. Ezek kis terhelés esetén is kifejtik a csillapító hatásukat, és ha nagy terhelés esetén tönkremennének, akkor viszonylag könnyen cserélhetőek.

A hangolt tömegek alkalmazása esetén kiválasztanak tipikus gerjesztő frekvenciákat, és elhelyeznek a szerkezetben olyan nagy tömegű szabad

testeket, amik ellene dolgoznak az adott gerjesztő frekvenciának. Ilyen lehet egy nagy inga vagy egy vízzel teli medence. Bármely hasonló megoldásnak az a problémája, hogy nagy helyet igényel, és csak egy bizonyos frekvenciatartomány csillapítására alkalmas.

Az alapozás szintjén is hatékonyan alkalmazhatunk csillapítást. Képzeljünk el három helyzetet: egy kocsit behúzott fékkel helyezünk egy asztalra, amit megrázunk. Ekkor a kocsi együtt mozog az asztallappal, érvénysül rajta az asztallap gyorsulása. Ilyen egy lealapozott ház. Ha kiengedjük a féket, akkor a kocsi egyhelyben marad, miközben az asztallap elmozdul alatta. A házaink így nem tudnak viselkedni, mert ugyan tervezhetnénk ilyen alapozást, de az rengeteg problémát vetne fel a csatlakozó tereptárgyak és közművek kapcsán. Ha a féket félig húzzuk be, akkor a kocsi nem mozog együtt teljesen az asztallappal, de követi annak a mozgását. A kocsira ható gyorsulás lényegesen kisebb lehet ilyen kapcsolat esetén, a mozgási energia egy részét „elégeti” a fék súrlódása. Ilyen kapcsolatot reálisan betervezhetünk, mert a korlátozott mértékű elmozdulások az épület és a terep között még rendszerint kezelhetőek.

A legegyszerűbb esetben kavicságyra helyezhetjük az épületünket, ami kis erőket fel tud venni, de nagyobb erők hatására már mozogni enged az épületet a talajhoz képest, így csillapítva a lengést. Jobban szabályozható egy acélgolyókból álló rendszer. Azonban minden ilyen megoldásnál gondot jelent az elmozdulások kordában tartása. Létezik olyan megoldás is, amikor a golyókat íves „tányérba” rakják, ahol a gyorsuló hatás után a rendszer visszatérhet a tányér mélypontjára.

Gumitalpra építve a házat a gumi képlékeny alakváltozásai csillapítják az épület lengéseit. A gumilapok korlátozott teherbírása miatt ez nagy épületeknél nem működik, valamint a tönkrement elemek cseréje is nehezen megoldható.

analízis

A fent elmondottak alapján a magasházakat nagyon sok hatásra kell vizsgálni, melyek közül sok nagyon összetett és egymással is összefüggenek. Az egyes szerkezeti elemek közötti kölcsönhatás gyakran nem elhanyagolható. Az egyszerű hierarchikus szemlélet alkalmazása esetén (mikor is különválasztjuk a függőleges, vízszintes és merevítő elemeket) az eredmények nem tudnak kellően pontosak lenni, különösen a dinamikai vizsgálatok esetén. Ráadásul egy-egy elem figyelembevétele vagy elhanyagolása nem egyértelmű, hogy a biztonság javára vagy kárára okoz hibát. Mindehez hozzáadódik a probléma, hogy az egyes szerkezeti anyagok mechanikai paramétereit is csak korlátozott pontossággal ismerjük. A rugalmas alakváltozó képességet általában még pontosan ismerjük, de a képlékenyedő képességet és az időtől függő alakváltozásokat már kevésbé pontosan. Ezek a nem rugalmas alakváltozások pedig hatással vannak a számított igénybevételek nagyságára.

Az általános gyakorlat az, hogy a szerkezet minden eleme szerepel a vizsgálatokban és azok kölcsönhatása így figyelembe van véve. Külön vizsgálatok készülnek a dinamikus hatásokra, a statikus terhekre és az építés közbeni állapotokra. Mindenhol olyan anyagmodellekkel, amik releváns eredménnyel szolgálnak az adott problémára. Statikus vizsgálatnál például a rugalmas vizsgálat általában elegendően pontos, de a kúszási alakváltozások vagy a képlékeny nyomatéki átrendeződés is fontos lehet. Dinamikai vizsgálatoknál a szerkezet képlékenyedő képességének van nagy jelentősége.

A teljes szerkezet komplex vizsgálata mellett az egyes kritikus elemek hierarchikus vizsgálatára is szükséges lehet. Ha például egy gerendát pillérek és falak is megtámasztanak, akkor a nagyobb keresztmetszetű falak csak kisebb mértékben nyomódnak össze, mint a kisebb

keresztmetszetű pillérek, ezért egy sokszintes épület esetén a földem terhek a nagyobb merevségű falakra húzódnak a globális vizsgálat során. Abban azonban nem lehetünk biztosak, hogy a szerkezet időtől függő alakváltozásai és a képlékeny igénybevétel átrendeződés során nem rendeződnek-e át az így számolt igénybevételek. Ezért meg kell nézni, hogy egyszerű terhelő mezőkkel számolva mi adódna egy pillérré, és azt arra kell méretezni. Nagyon nagy különbségek is adódhatnak így, és józan mérnöki megfontolásokkal nem tudjuk eldönteni, hogy a globális érték vagy a „kézi számítás” a realisabb!

Ne felejtsük el, hogy a nagyon fejlett szoftverek is csak azt tudják kiszámolni, amit beléjük programoztak, és a számítás pontossága függ az ismerhető anyagállandóktól és terhelési viszonyoktól!

Az építési állapotok vizsgálata fontos az ideiglenes terhelési helyzetek miatt és amitatt is, hogy az időtől függő alakváltozásokhoz hozzá tudjuk igazítani a szerkezetünket. A fent említett pillérek minden bizonnyal többet fognak kúszni, mint a falak. Ha ezt nem vesszük figyelembe, akkor a pillérek irányába fognak lejtene a gerendáink és földmjeink néhány év elteltével. Hogy a kúzás lezajlása után közel vízszintesek legyenek a szerkezeteink, hosszabbra kell építeni a pilléreket a tervezettnél!

Felhasznált és ajánlott irodalom:

-
-
-

Ábrák, forrásképek:

-