

A.25. Az igénybevétel-számítás módszerének megválasztása

A.25.1. A szerkezeti analízis módszerének megválasztásával kapcsolatos általános megjegyzések

A.25.1.1. Az elsőrendű és a másodrendű analízis közötti választás

Már az előtervezés során általában el kell dönteni, hogy a szerkezet merevített lesz-e vagy merevítetlen. Ez meghatározza, hogy a függőleges és a vízszintes terhek (beleértve a keret imperfekciókból származó erőket is) milyen igénybevételeket okoznak a szerkezetben.

Amikor eldöntöttük, hogy milyen elrendezésű lesz a keretszerkezetünk, az előtervezés keretében fel kell vennünk a szerkezeti elemek keresztmetszetét és a kapcsolati jellemzőket. Ekkor egy előzetes analízis alapján eldöntjük, hogy a keret kilengő-e vagy sem. Alternatív megoldásként valamelyik lehetőség feltételezhető, amelyet később igazolni kell. Mindezek alapján kiválasztjuk, hogy milyen módszerrel végezzük el a szerkezet analízisét, azaz milyen módon határozzuk meg a szerkezetben ébredő igénybevételeket. A legtöbb szokásos kialakítású kereten elegendő elsőrendű analízist végezni.

Bár másodrendű analízist (rugalmast vagy képlékenyt, ez utóbbit azonban csak bizonyos típusú szerkezeti elemek és kapcsolatok esetén) mindig használhatunk, vannak esetek, amikor:

- elegendő az elsőrendű analízis, mert nincs szükség a másodrendű hatások figyelembevételére,
- ha $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,25$, a kilengő keretek vizsgálhatók elsőrendű elmélettel is, amennyiben a jelentősebb másodrendű hatásokat alkalmas korrekció formájában figyelembe vesszük;
- elsőrendű merev-képlékeny analízis használható, ha $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,20$, továbbá amennyiben az összes igénybevételt megnöveljük egy $1 / (1 - V_{sd} / V_{cr})$ nagyságú tényezővel. Ez az eset tulajdonképpen a *Merchant-Rankine*-módszer alkalmazása.

A döntés meghozatalához meg kell határozni, hogy milyen mértékben befolyásolják a másodrendű hatások az igénybevételek eloszlását (azaz meg kell vizsgálni, hogy a kilengési jellegű eltolódások ($P-\Delta$) és a szerkezeti elemek imperfekciói, illetve alakváltozásai ($P-\delta$) jelentősek-e vagy sem). Emlékeztetünk rá, hogy a kilengő keretekben a kilengési eltolódásoknak van a legjelentősebb szerepe. A szerkezeti elemek imperfekcióinak és alakváltozásainak következményei kilengő keretek bizonyos típusú, viszonylag karcsú szerkezeti elemei esetén jelentősek lehetnek, nem kilengő keretben erre nem kell számítani.

A kilengés következményeinek meghatározására ki kell számítani a λ_{cr} kritikus teherparaméter értékét, vagyis a keret síkbeli kilengő jellegű stabilitásvesztését okozó teherszint és a ténylegesen működő teherszint viszonyát. (Megjegyzendő, hogy az Eurocode 3 1.1. része ezen érték reciprokát, az $1 / \lambda_{cr} = V_{sd} / V_{cr}$ arányt használja ehhez a számításhoz.) Amikor már felvettük az oszlopok kiindulási méreteit, a V_{sd} / V_{cr} arány alapján megbecsülhetjük, hogy a keretben melyik oszlop a leginkább terhelt. Ezt az előzetes vizsgálatot a szerkezeti analízis végrehajtása után ellenőrizni kell.

Többszintes épületekben ezt a paramétert egy közelítő képlet segítségével határozhatjuk meg. Ez a módszer azonban nem használható ferde gerendájú egyszintes portálkeretek esetén; ilyenkor lehet hasznos a vonatkozó számpélda és az [1] irodalom.

Ha a λ_{cr} paraméter értéke elegendően nagy, azaz ha $\lambda_{cr} \geq 10$ (vagy másképpen: ha a V_{sd} / V_{cr} arány elegendően kicsiny, azaz ha legfeljebb 0,1), akkor a keret nem kilengő, és elegendő elsőrendű analízist végezni.

Ha a keret kilengő, akkor másodrendű analízis szükséges. Számos szerkezet esetén azonban még ilyenkor is lehetséges az elsőrendű analízis eredményeiből kiindulni, és az így kapott belső erőket és nyomatékokat a másodrendű hatások figyelembevételére alkalmas módon megnövelni (tehát közvetett módszer szerint eljárni).

A szerkezeti elemek alakváltozásainak hatása kilengő és nem kilengő keretek viszonylag karcsú nyomott-hajlított elemeiben lehet érdekes. Bár keretszerkezetekben ritkán alkalmazunk karcsú szerkezeti elemeket, néha célszerű lehet ellenőrizni, hogy figyelembe kell-e venni a szerkezeti elemek alakváltozásainak hatását. Az EC3 a szerkezeti elemek helyi imperfekcióinak fontosságát csak kilengő keretek bizonyos típusú nyomott-hajlított elemei esetén említi. Mivel a szerkezeti elemekben a terhek következtében kialakuló alakváltozások következményeire nincs konkrét követelmény, a szerkezeti elemek imperfekcióinak jelentőségére vonatkozó ellenőrzés úgy is felfogható, hogy azt vizsgáljuk, hogy a helyi másodrendű hatásoknak ($P-\delta$) mennyire jelentős a hatása egy adott szerkezeti elemen, függetlenül attól, hogy miből származnak. A karcsú elemek ellenőrzését hasonlóan kell végrehajtani, mint a keretek kilengés szerinti osztályba sorolását, azzal a különbséggel, hogy a felhasználandó paraméter most a szerkezetből kiemelt nyomott-hajlított elem $1 / \lambda_{cr} = N_{Sd} / N_{cr}$ értéke. Ha valamely elemre $N_{Sd} / N_{cr} \geq 0,25$, akkor figyelembe kell venni a szerkezeti elem imperfekcióit (legalábbis a kérdéses elemét) a szerkezet analízisében, és általános másodrendű analízist kell végezni. Az N_{cr} (Euler-féle kritikus erő) meghatározása során kihajlási hosszként a hálózati hosszt kell tekinteni. A figyelembe veendő imperfekció nagysága függ a kérdéses szerkezeti elemtől és a vonatkozó kihajlási görbétől.

A.25.1.2. A kapcsolat leírasi módjának megválasztása a keretmodell felállításakor

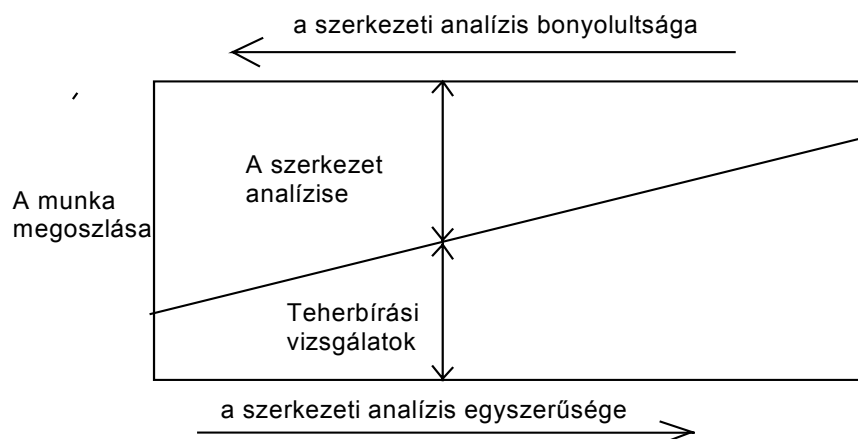
Ezt a kérdést részletesen a „Hagyományos és korszerű tervezési eljárások” című fejezet tárgyalja.

A.25.1.3. A szerkezeti analízis rugalmas és képlékeny módszerei közötti választás

A tervezés során arról is dönteni kell, hogy a szerkezeti analízist rugalmas vagy képlékeny módszerrel kívánjuk-e elvégezni. Képlékeny analízist csak bizonyos, az acélanyagra, a rudak keresztmetszeti osztályára és a kapcsolatok elfordulási képességére vonatkozó feltételek teljesülése esetén szabad végezni.

Attól függően, hogy milyen szerkezeti analízist végzünk, az analízis végeztével több-kevesebb ellenőrzést el kell végezni. Másodrendű analízis esetén például általában nem szükséges a keret vagy a keretet alkotó szerkezeti elemek keretsíkban való stabilitását vizsgálni. A szerkezeti analízis típusának megválasztása ennek megfelelően nem csupán az EC3 előírásaitól függ, hanem szerepet kap a tervezői szabadság – egyéb szempontok, például a rendelkezésre álló szoftverek stb. is meghatározzák, hogy adott esetben milyen típusú szerkezeti analízist végzünk. Célszerű végiggondolni, hogy a szerkezeti analízisre áldozunk-e több erőfeszítést, vagy a teherbírási határállapot ellenőrzésére (A.25.1. ábra).

A következőkben áttekintjük, hogy a szerkezeti analízis egyes módszerei esetén milyen feltételeknek kell teljesülnie, és az egyes módszereknek a tervezés szempontjából milyen következményei vannak. Ennek a tudásnak a birtokában a tervező elvileg képes kiválasztani a rendelkezésére álló eszközök közül a legmegfelelőbbet. Nyilvánvaló, hogy a szerkezeti analízis módszerének megválasztása nagyban függ attól, hogy milyen módon kívánjuk a szerkezet méretezését elvégezni. A képlékeny tervezésre például csak bizonyos megszorítások keretei között van lehetőség, és a szerkezeti analízis külön módszerei tartoznak hozzá. A megválasztott tervezési módszertől függetlenül azonban mindig különösen fontos azokat a helyzeteket felismerni, amikor figyelembe kell venni a másodrendű hatásokat. A legtöbb szokásos kialakítású síkbeli keret esetén a szerkezeti analízis bármely módszere alkalmazható.



A.25.1. ábra: A szerkezeti analízis és a teherbírési határállapot ellenőrzése során elvégzendő munkamennyiség egymáshoz való viszonya

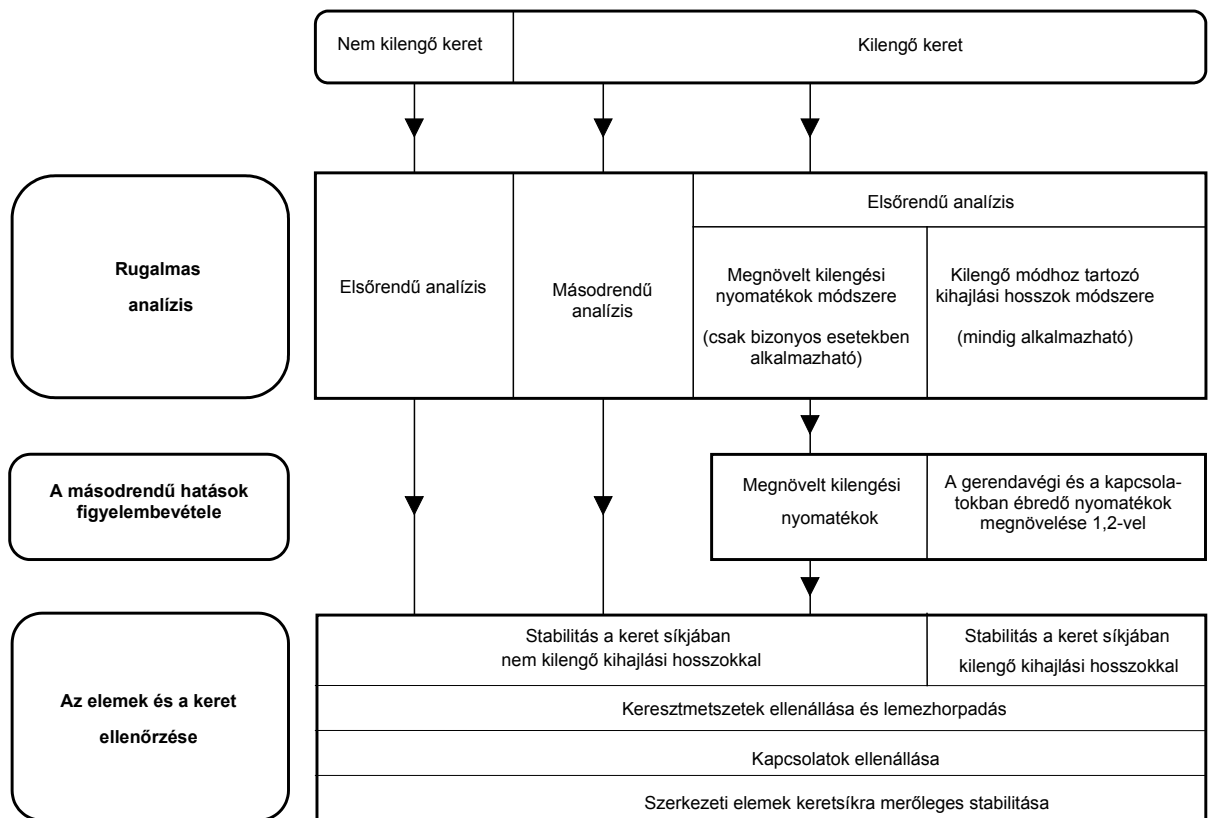
E helyütt nem foglalkozunk a keretszerkezetű épület egészének egyensúlyával (helyzeti állékonyságával): a felemelkedés, a felborulás vagy az elcsúszás kérdésével. Ezek a problémák általában külön modellezés nélkül vizsgálhatók a keretszerkezet analíziséből kiadódó reakcióerők és az alapozás reakciókkal szembeni ellenállása alapján.

A.25.2. Rugalmas szerkezeti analízis és tervezés: útmutatás

A.25.2.1. A rugalmas analízis és az elvégzendő ellenőrzések

Rugalmas szerkezeti analízis esetén a keretet alkotó szerkezeti elemekre és kapcsolatokra nem vonatkozik semmiféle, elfordulási képességgel kapcsolatos korlátozás. A módszer mindig használható.

A A.25.2. ábra az Eurocode 3 1.1. része alapján összefoglalja a rugalmas analízissel és az elvégzendő ellenőrzésekkel kapcsolatos tudnivalókat.



A.25.2. ábra: A rugalmas szerkezeti analízis és az elvégzendő ellenőrzések az Eurocode 3 1.1. része szerint

A következő szakaszokban áttekintjük, milyen lépéseket kell elvégezni a rugalmas szerkezeti analízis során.

A.25.2.2. Az elsőrendű rugalmas analízis alkalmazási területe

Amennyiben a keret globális imperfekcióit alkalmas módon figyelembe vesszük, az elsőrendű rugalmas analízis minden olyan esetben közvetlenül alkalmazható a nem kilengő keretek igénybevételeinek számítására, amikor a másodrendű hatások nem jelentősek.

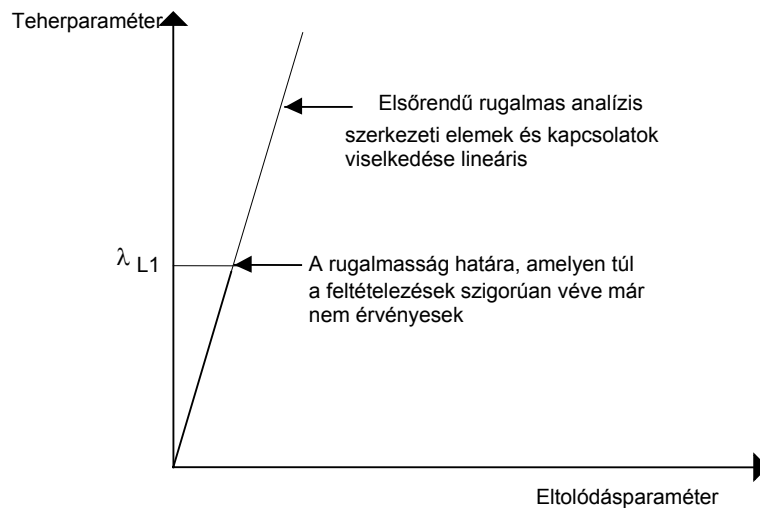
A szerkezeti analízisnek ez a típusa bizonyos feltételek teljesülése mellett kilengő keretek esetén is alkalmazható. Az elsőrendű analízis megkezdése előtt mindig meg kell győződni arról, hogy alkalmazható-e ez az eljárás az adott keretszerkezetre. Az analízis elvégzése után, az ellenőrzések megkezdése előtt pedig meg kell vizsgálni, hogy szükséges-e figyelembe venni a másodrendű hatásokat.

A keretet különböző teherkombinációkra kell megvizsgálni. A kilengésre képes, de nem kilengőnek minősülő keretek esetén (azaz ha $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,1$) a kilengési eltolódásokban és a nyomatéki igénybevételekben a másodrendű elmélet eredményeihez képest legfeljebb 10%-os hiba várható.

A.25.2.3. A keret tervezése elsőrendű analízis esetén

A.25.2.3.1. Másodrendű hatások

Az elsőrendű analízis mindaddig biztonságos alapot szolgáltat a tervezés számára, ameddig a terhek egy jelentős tartományában (azaz olyan szerkezetek esetén, amelyekben kicsik a normálerők) a szerkezet viselkedése csak jelentéktelen mértékben tér el az előre jelzettől. Ezt szemlélteti a A.25.3. ábra.



A.25.3. ábra: Teher–eltolódás viselkedés: az elsőrendű rugalmas analízis érvényességi tartománya

Ha a szerkezetben viszonylag nagyok a normálerők, a λ_{L1} paraméter (A.25.3. ábra) nem lesz alsó korlátja annak a legnagyobb tehernek, amelyet a keret fel képes venni, mert nem tartalmazza a másodrendű hatásokat.

Az elsőrendű rugalmas analízis kilengő keretekben is alkalmazható bizonyos feltételek teljesülése esetén, oly módon, hogy az analízis végeztével a másodrendű hatások figyelembevételére az eredményeket alkalmas módon kiigazítjuk (lásd később, a másodrendű analízissel foglalkozó részeket).

A.25.2.3.2. Keresztmetszetek és kapcsolatok

Miután meghatároztuk, hogy a tervezési igénybevételek (normálerő, hajlító nyomaték, nyíróerő) hogyan oszlanak meg a szerkezetben, a szerkezeti elemek keresztmetszeti ellenállásának ellenőrzése során (a teherbírási határállapotokban) azt kell kimutatni, hogy a mértékadó keresztmetszetekben az igénybevétel (vagy feszültség) nem haladja meg a tervezési ellenállás (szilárdság) értékét.

A rugalmas analízist követő ellenőrzések esetén az volna logikus, ha a szerkezeti elemek határállapotának azt az állapotot tekintenénk, amikor a legjobban igénybe vett keresztmetszet szélső szála megfolyik. Ez a feltétel tetszőleges osztályú keresztmetszetre és kapcsolatra alkalmazható. A 3. és 4. osztályú keresztmetszetek esetén például az ellenállás a szélső szál megfolyásán alapul, 4. keresztmetszeti osztály esetén a hatékony keresztmetszeten számítva.

Általánosan elfogadott azonban az a gondolat, hogy az elsőrendű és a másodrendű rugalmas analízis biztonsággal alkalmazható annak a teherszintnek a meghatározására is, amelynél az első „képlékeny esemény” (az első képlékeny csukló kialakulása) bekövetkezik. Amennyiben tehát a keresztmetszetek megfelelő alakváltozási képességgel rendelkeznek (1. és 2. osztályú keresztmetszetek esetén), a keresztmetszetek ellenőrzése elvégezhető a képlékeny interakciós képletek segítségével. Hasonló alapon a kapcsolatok ellenállásának (teherbírási határállapotának) ellenőrzése annak kimutatásából áll, hogy a kapcsolatban ébredő igénybevételek (a hajlító nyomaték, illetve a nyíróerő) nem haladják meg a kapcsolat (hajlítási vagy nyírési) ellenállását. Emellett az Eurocode 3 1.1. része lehetővé teszi az elsőrendű analízissel meghatározott nyomatéki igénybevételeknek legfeljebb a számított legnagyobb nyomaték 15%-ával való átrendezését bármely olyan szerkezeti elemben, amely 1. vagy 2. osztályú keresztmetszetekkel rendelkezik, feltéve, ha az egyensúlyi követelmények az átrendezett nyomatékokra is teljesülnek.

Ha a kapcsolatokról az analízis során feltételeztük, hogy merevek vagy csukósak, akkor olyan kapcsolati kialakítást kell választani, amely az adott kategória követelményeit teljesíti.

A.25.2.3.3. Stabilitás

A legjobban igénybe vett keresztmetszet vagy kapcsolat tervezési ellenállása alapján kiszámítható az a λ_{L1} legnagyobb érték (A.25.3. ábra), ameddig a keret keresztmetszeteiről és kapcsolatairól biztonsággal feltételezhető, hogy lineárisan rugalmas módon viselkednek.

Ez a gondolatmenet azonban magában rejti azt a feltételezést, hogy a szerkezet és annak elemei stabil állapotban maradnak. Ezért igen fontos, hogy megvizsgáljuk a különböző fajtájú stabilitásvesztési lehetőségeket akár a keret síkjában, akár arra merőlegesen (kihajlás, kifordulás). A stabilitásvesztési jelenségek ténylegesen csökkenthetik λ_{L1} értékét. A szerkezet akkor megfelelő, ha a λ_{L1} érték legalább egységnyi.

Ha a kilengési másodrendű hatásokat a kilengéshez tartozó kihajlási hosszok alapján vesszük számításba, akkor az oszlopok keretsíkban való stabilitását a kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszok alapján ellenőrizzük. Minden más esetben az oszlopok keretsíkban való stabilitását a nem kilengő módhoz tartozó kihajlási hossz alapján vizsgáljuk. Ilyenkor nem kell külön megvizsgálni a kilengési módban való instabilitást.

A.25.2.3.4. Horpadás

Bizonyos szerkezeti elemekben ellenőrizni kell a lemezhorpadás kialakulásának lehetőségét és a koncentrált erőkkel szembeni ellenállást (lásd a „Lemezhorpadás és a keresztmetszetek osztályozása” című fejezetet).

A.25.2.3.5. Használhatóság

A legtöbb keret esetén az elsőrendű rugalmas számítás jó eszközt jelent a teljes szerkezet és az egyes szerkezeti elemek használhatósági határállapotban való viselkedésének megítélésére (megengedett alakváltozások). Ilyenkor ezen a teher szinten a nemlineáris hatások (a másodrendű hatások és/vagy a kapcsolati viselkedés nemlinearitása) viszonylag kicsinyek.

Bizonyos esetekben vizsgálni kell a szerkezet rezgéseit is (például az irodai célú és a lakóépületekben érvényes kényelmi szinteknek megfelelően).

A.25.2.3.6. Tűzzel szembeni ellenállás

Igen fontos ellenőrizni a szerkezet tűzzel szembeni ellenállását is. A megfelelő tűzzel szembeni ellenállás sok esetben meghatározza a szerkezeti elemek és a kapcsolatok megválasztását.

A.25.2.4. A másodrendű rugalmas analízis alkalmazási területe

Amennyiben a keret globális imperfekcióit alkalmas módon figyelembe vesszük, a másodrendű rugalmas analízis minden esetben alkalmazható. Mindig másodrendű analízist kell végezni, ha a keret kilengő, valamint amikor a szerkezeti elemek imperfekcióit figyelembe kell venni.

Az Eurocode 3 1.1. része többféle típusú másodrendű rugalmas analízis alkalmazását is lehetővé teszi. A következőkben ezeket tekintjük át.

Fel kell ismerni, hogy ezen módszerek közül egyik-másik (az ún. közvetett módszerek) igazából nem másodrendű analízist jelentenek, hanem olyan egyszerű, elfogadott eljárások, amelyek bizonyos feltételek teljesülése esetén elfogadható eredményeket szolgáltatnak. Például sem az „egyenértékű keresztirányú teher módszere”, sem pedig a közvetett módszerek nem alkalmasak a szerkezeti elemek imperfekciói, illetve alakváltozásai miatti lokális másodrendű ($P-\delta$) hatások figyelembevételére.

A.25.2.4.1. Általános eljárás

Az általános eljárás a másodrendű analízis közvetlen módszere. A másodrendű analízis általános eljárásának végrehajtásakor közvetlenül vesszük figyelembe a keret imperfekcióiból, a kilengési alakváltozásokból és (általában) a szerkezeti elemeknek a keret síkjába eső alakváltozásaiból származó másodrendű hatásokat. Lehetőség van továbbá figyelembe venni a szerkezeti elemeknek a keret síkjába eső imperfekcióiból származó másodrendű hatásokat is.

A.25.2.4.2. Az egyenértékű keresztirányú erők módszere

Használható az „egyenértékű keresztirányú erők módszere” néven ismert közelítő eljárás is (lásd a „Keretek modellezése és számítása” című fejezet). A módszer egy fokozatosan közelítő eljárást jelent, amelynek minden egyes lépésében elsőrendű analízist hajtunk végre.

Ez az eljárás ugyan tekinthető a másodrendű analízis közvetlen módszerének is, azonban csak a kilengési ($P-\Delta$) hatásokból származó másodrendű hatások figyelembevételére képes. Az eljárás általában kielégítő eredményeket ad, kivéve akkor, ha a kilengő keretben viszonylag karcsú szerkezeti elemek is vannak, ami azonban ritkán fordul elő.

A.25.2.4.3. A megnövelt kilengési nyomatékok módszere

A közvetlen másodrendű analízis helyett alkalmazható egy közvetett módszer is, az úgynevezett „megnövelt kilengési nyomatékok módszere”. Ezt az eljárást csak akkor szabad alkalmazni, ha a másodrendű hajlítónyomatékok ábrája hasonló alakú, mint az elsőrendű hajlítónyomatékoké (ez a kis vagy közepes kilengésű keretekre jellemző). Ezt a feltételt az az előírás garantálja, hogy a módszert csak akkor szabad használni, ha a λ_{cr} értéke nem kisebb 4-nél (azaz $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,25$).

A kilengési nyomatékok a keretre működő vízszintes erőkből, illetve a keret vagy a függőleges erők aszimmetriájából származnak.

Elsőként elsőrendű analízissel meghatározzuk a függőleges erőkből származó „nem kilengési” igénybevételeket, azzal a feltételezéssel, hogy a keret kilengés ellen az egyes födém szintjén meg van támasztva. A kilengési igénybevételeket ezek után úgy kapjuk, hogy a vízszintes erők (beleértve az előző analízisben az oldalirányú megtámasztások felszabadítása révén kapott vízszintes erőket is) végrehajtott analízis alapján kapott igénybevételeket alkalmas értékkel megnöveljük.

A kilengésből származó tervezési igénybevételeket tehát a következő lépésekben nyerjük:

1. elvégezzük a keret analízisét csak a függőleges terhekre, azzal a feltételezéssel, hogy a keret oldalirányban minden födém szintjén meg van támasztva (a kilengés meg van gátolva);
2. meghatározzuk a födémeknél feltételezett megtámasztásokban keletkező reakcióerőt;
3. elvégezzük a keret analízisét az oldalirányú megtámasztások elhagyásával az összes működő vízszintes teherre plusz a 2. lépésben meghatározott reakcióerők ellentettjére;
4. a kapcsolatok, a keresztmetszetek és a kifordulás vizsgálatához felhasználandó nyomatékokat ezek után úgy kapjuk, hogy az 1. lépésben meghatározott nyomatékokhoz hozzáadjuk a 3. lépés szerinti nyomatékok megnövelt értékét. (A nyíróerőket és a normálerőket hasonló módon meg kell növelni.) A növelő tényező a következő:

$$\frac{1}{1 - V_{sd} / V_{cr}}$$

(megjegyzendő, hogy a módszer akkor használható, ha $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,25$).

A tervezési értékek kiszámításához ezek után a megnövelt kilengési nyomatékokat hozzáadjuk a keret „nem kilengő módhoz” tartozó nyomatékaihoz. A módszer során tehát csak a kilengésből származó nyomatékokat növeljük a megadott növelő tényezővel, a „nem kilengő módhoz” tartozó nyomatékokat nem.

A módszer alkalmazása esetén a keretet alkotó elemeknek a keret síkjában való kihajlásvizsgálata során a nem kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszokat kell használni. Ellenőrizni kell a keret síkjára merőleges irányú kihajlást is.

A.25.2.4.4. A kilengési módhoz tartozó kihajlási hosszok módszere

A „kilengési módhoz tartozó kihajlási hosszok módszere” a másik olyan közvetett eljárás, amellyel a kilengési másodrendű hatások figyelembe vehetők elsőrendű analízis alkalmazása esetén. Ez a módszer olyan keretek esetén is alkalmazható, amelyeknek nem ismert a kilengéssel szembeni érzékenysége.

A módszer alkalmazása során az igénybevételeket (nyomatékokat, nyíróerőket és normálerőket) elsőrendű analízis alapján határozzuk meg, ezután a gerendákban és a kapcsolatokban keletkező kilengési nyomatékokat

egy névleges, 1,2 nagyságú tényezővel megnöveljük, majd hozzáadjuk a többi („nem kilengő módhoz”) tartozó nyomatékhöz.

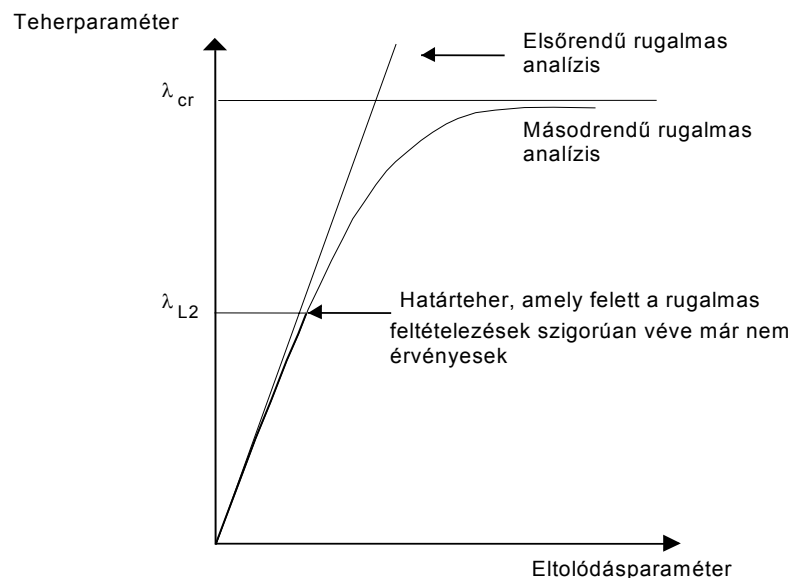
A szerkezeti elemek keret síkjába eső és arra merőleges irányú kihajlásának vizsgálatához, továbbá a kapcsolatok és a keresztmetszetek vizsgálatához ezeket az ily módon megnövelt igénybevételeket használjuk. A szerkezeti elemek keret síkjába eső kihajlásának vizsgálata során a kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszokat kell használni.

A.25.2.5. A keret tervezése másodrendű analízis esetén

A.25.2.5.1. A keresztmetszetek és a kapcsolatok ellenállása

A végrehajtandó ellenőrzések megegyeznek az elsőrendű analízis esetére megadottakkal.

A legjobban igénybe vett keresztmetszet vagy kapcsolat alapján meghatározható a teherparaméter azon λ_{L2} legnagyobb értéke (A.25.4. ábra), amelyre a rugalmas analízis még használható. A szerkezet akkor megfelelő, ha a λ_{L2} érték legalább egységnyi.



A.25.4. ábra: Teher–eltolódás viselkedés: a másodrendű rugalmas analízis érvényességi tartománya

A.25.2.5.2. Stabilitás

a) Általános másodrendű analízis

Ha a keretet az általános másodrendű analízissel vizsgáltuk, akkor a keret saját síkjába eső kilengő módú stabilitásának vizsgálatát a szerkezet analízise már tartalmazza. Ha az általános eljárást oly módon alkalmazzuk, hogy figyelembe vesszük mind a keret, mind pedig a szerkezeti elemek imperfekcióit, és az analízist egészen a kritikus teherig folytatjuk, akkor sem magán a kereten, sem a szerkezeti elemeken nem kell elvégezni a keret síkjába eső stabilitás vizsgálatát.

A másodrendű analízis általános módszerét azonban csak igen ritkán folytatjuk egészen a rugalmas kritikus teher eléréséig, és általában nem vesszük figyelembe sem a szerkezeti elemek imperfekcióit, sem a keretnek a saját síkjára merőleges viselkedését. Ezért meg kell vizsgálni a szerkezeti elemeknek és a keretnek a keret síkjára merőleges irányú stabilitásvesztését; nem kell azonban vizsgálni a keret saját síkjába eső stabilitásvesztését. Általában tanácsos ellenőrizni a viszonylag karcsú elemeknek a keret síkjába eső stabilitását minden olyan esetben, ha az analízisben nem vettük figyelembe a szerkezeti elemek imperfekcióit. Ilyenkor – függetlenül attól, hogy a keret kilengő-e vagy sem – a nem kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszokkal kell a vizsgálatokat elvégezni.

b) Alternatív közvetett módszerek

A *megnövelt kilengési nyomatók módszerének* vagy a *kilengési módhoz tartozó kihajlási hosszok módszerének* alkalmazása esetén a keret és a szerkezeti elemek keretsíkba eső és arra merőleges irányú stabilitását mindig meg kell vizsgálni.

A *megnövelt kilengési nyomatók módszere* esetén a *megnövelt* nyomatókokra ellenőrzünk, a keret síkjában érvényes nem kilengő módhoz tartozó kihajlási hossz alapján.

A *kilengési módhoz tartozó kihajlási hosszok módszere* esetén a keret síkjában a kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszokat használjuk. Azt javasoljuk azonban (bár ezt az Eurocode 3 1.1. része külön nem mondja ki), hogy a kihajlásvizsgálatot a *nem növelt* kilengési nyomatókkal számított igénybevételekre végezzük el, a *megnövelt* nyomatókat pedig csak a keresztmetszetek és a kapcsolatok, valamint a gerendakifordulás vizsgálatához használjuk.

Az Eurocode 3 1.1. része szerint az előzőekben ismertetett közvetlen vagy közvetett módszerek alkalmazása esetén ha a felsorolt ellenőrzések teljesülnek, akkor a keret mint egész kilengési stabilitásvesztése kizárható. A további stabilitásvizsgálatok azonban gyakran vezetnek arra az eredményre, hogy a megengedhető teher kisebb a $\lambda_{1,2}$ érték által jelzettel.

A.25.2.5.3. További ellenőrzések

A további ellenőrzéseket ugyanúgy kell elvégezni, mint az elsőrendű rugalmas analízis esetén.

A.25.3. Képlékeny szerkezeti analízis és az elvégzendő ellenőrzések: útmutatás

A.25.3.1. A képlékeny analízis alkalmazási feltételei

Képlékeny analízist akkor szabad alkalmazni, ha a következő alapvető feltételek fennállnak:

1. Az acélananyag kielégíti a következő követelményeket:

- az f_u előírt legkisebb szakítószilárdság és az f_y előírt legkisebb folyáshatár arányára: $f_u / f_y \geq 1,2$;
- az $5,65\sqrt{A_0}$ bázishosszon mért szakadó nyúlás legalább 15% (ahol A_0 az eredeti keresztmetszeti terület);
- a feszültség–alakváltozás görbén mért, az f_u szakítószilárdsághoz tartozó e_u nyúlás legalább 20-szorosa az f_y folyáshatárhoz tartozó, a folyás kezdetén mért e_y nyúlásnak.

2. Oldalirányú megtámasztást kell alkalmazni minden olyan keresztmetszetben, amelyben valamely teheresetre képlékeny csukló alakul ki és képlékeny elfordulásokra számítunk. A megtámasztást a képlékeny csukló elméleti helyétől legfeljebb a keresztmetszet magasságának felével egyenlő távolságra kell elhelyezni.

3. A keresztmetszeteknek, különösen azokon a helyeken, ahol képlékeny csuklók alakulnak ki, 1. osztályúaknak kell lenniük. Ahol nem alakul ki képlékeny csukló, ott megengedett a 2. és a 3. osztályú keresztmetszetek alkalmazása is. A 2. osztályba tartozó keresztmetszet képlékeny csukló helyén is alkalmazható abban az esetben, ha az adott helyen nem szükséges nagy elfordulási képesség (lásd a „Lemezhorpadás és a keresztmetszetek osztályozása” című fejezetet). Ha kapcsolatokban is tételezünk fel képlékeny csuklót, akkor a kérdéses kapcsolatnak nagy elfordulási képességgel kell rendelkeznie (lásd az „Kapcsolatok” című modult).

4. Ha a keresztmetszet a szerkezeti elem hossza mentén ugrásszerűen változik, akkor bizonyos korlátozások érvényesek a képlékeny csukló elméleti helye és a gerinclemez-vastagság, illetve a gerinclemez és a nyomott övlemez osztályának változási helye közötti távolságra.

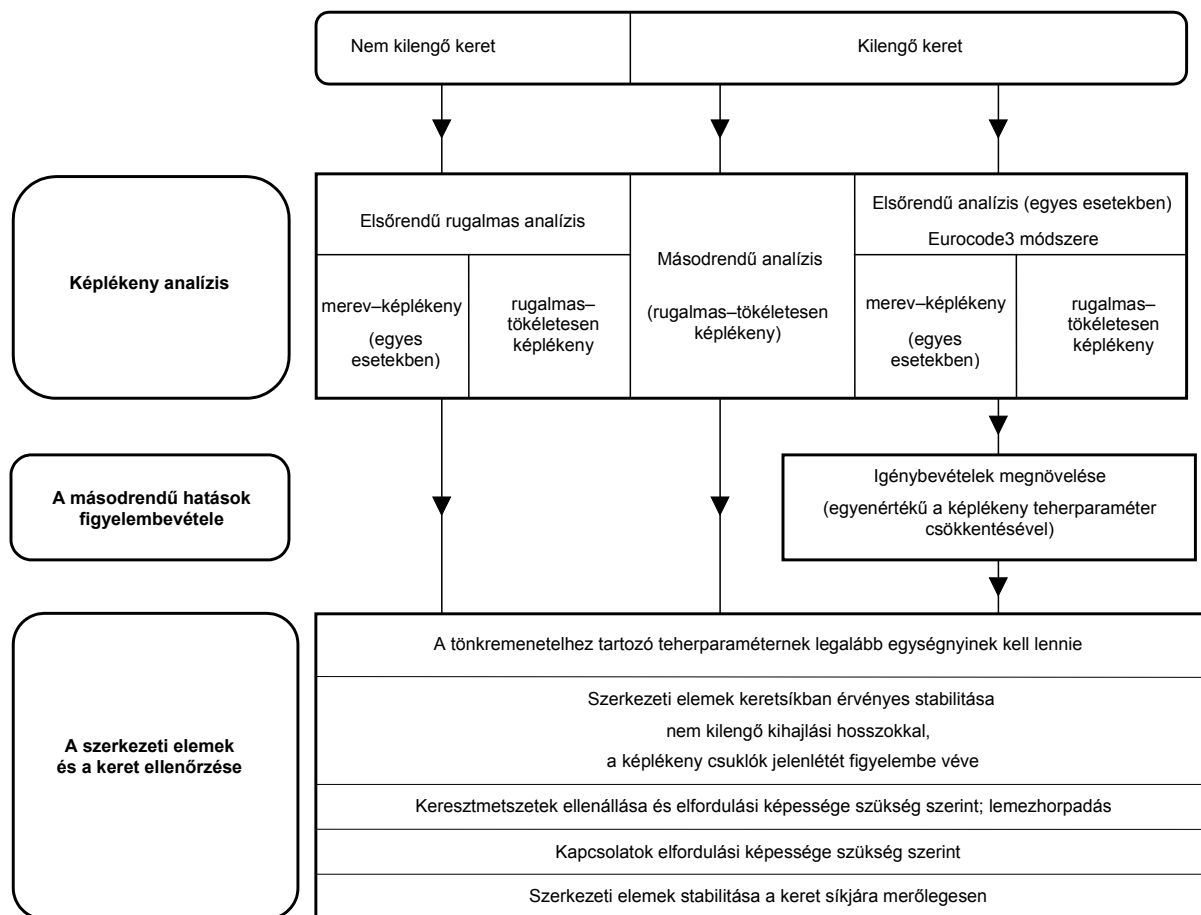
Ezek a korlátozások azt hivatottak biztosítani, hogy a keresztmetszetek és a kapcsolatok, legalábbis ott, ahol a képlékeny csuklók kialakulnak, elegendő elfordulási képességgel rendelkezzenek a szerkezet képlékeny mechanizmussá alakulásához.

A.25.3.2. A képlékeny analízis alkalmazása

Ha feltételezzük, hogy a terhek arányosan és monoton módon növekednek, akkor a tönkremenetelhez, azaz a képlékeny mechanizmus kialakulásához szükséges teherparaméter értékének legalább egységnyiinek kell lennie.

Az A.25.5. ábra összefoglalja a képlékeny szerkezeti analízis végrehajtására vonatkozó lehetőségeket, valamint az Eurocode 3 szerint végrehajtandó ellenőrzéseket.

A következőkben részletesen, lépésről lépésre áttekintjük, mi a teendő a képlékeny szerkezeti analízis végrehajtása során.



A.25.5. ábra: Képlékeny szerkezeti analízis és a kapcsolódó ellenőrzések az Eurocode 3 1.1. része szerint

A.25.3.3. Elsőrendű képlékeny analízis és tervezés

Az elsőrendű (merev–képlékeny vagy rugalmas–tökéletesen képlékeny) analízis különösen alkalmas a nem kilengő keretek vizsgálatára, míg kilengő keretek esetén csak bizonyos esetekben alkalmazható. A módszer használható egyszintes, ferde gerendájú portálkeretek vizsgálatára is.

Az elsőrendű képlékeny analízis során, különösen a merev–képlékeny módszer esetén, a keret imperfekcióit valószínűleg az „egyenértékű keresztirányú erők módszerével” a legcélszerűbb figyelembe venni.

Mivel az elsőrendű képlékeny módszer nem foglalkozik a szerkezeti elemekben bekövetkező esetleges stabilitási (kihajlási, kifordulási) problémákkal, ezeket a jelenségeket külön meg kell vizsgálni, tekintettel a képlékeny csuklók esetleges jelenlétére. Ha az elsőrendű merev–képlékeny módszer alkalmazható, akkor a szerkezeti elemek keretsíkban való kihajlásának ellenőrzése során a nem kilengő módhoz tartozó kihajlási hosszok vehetők figyelembe, azonban tekintettel kell lenni az esetleges képlékeny csuklók elhelyezkedésére. A kilengő módban való keretkihajlást a keret síkjában nem kell külön vizsgálni.

Az elsőrendű merev–képlékeny analízis nem alkalmazható kétszintesnél magasabb merevítetlen keretek esetén (kivéve a másodrendű rugalmas–képlékeny analízis kapcsán említett eseteket). Ilyenkor továbbá, ha az oszlopokban képlékeny csuklók alakulnak ki, akkor az oszlopokat a hálózati hosszuknak megfelelő kihajlási hossz feltételezésével ellenőrizni kell a keret síkjában való kihajlásra. Ezen oszlopok keretsíkban érvényes karcsúságának ki kell továbbá elégítenie a következő feltételt, amely biztosítja az oszlopok kellő elfordulási képességét:

- merevített keretekben:

$$\bar{\lambda} \leq 0,4 \cdot \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Sd}}} \quad \text{vagy} \quad \frac{1}{\lambda_{cr}} = \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} \leq 0,16;$$

- merevítetlen keretekben:

$$\bar{\lambda} \leq 0,32 \cdot \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Sd}}} \quad \text{vagy} \quad \frac{1}{\lambda_{cr}} = \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} \leq 0,10,$$

ahol N_{cr} az oszlop *Euler*-féle kritikus ereje a keretsíkban.

Ha a képlékeny csuklókban kialakuló elfordulásokat meghatároztuk (rugalmas–képlékeny analízis esetén), akkor ellenőrizhető, hogy rendelkezésre áll-e a szükséges elfordulási képesség. Merev–képlékeny analízissel az elfordulások nagyságát nem lehet meghatározni, ezért a képlékeny csuklók helyén mindig 1. osztályú keresztmetszeteket és nagy elfordulási képességgel rendelkező kapcsolatokat kell alkalmazni.

Az elsőrendű képlékeny analízis közvetlenül a keret tervezési ellenállását szolgáltatja; azonban utólag ellenőrizni kell a keresztmetszetek és a kapcsolatok ellenállását – ha az analízis során ezeket nem vettük figyelembe – a kialakuló normálerők és nyíróerők hatásának figyelembevételére (mint például a merev–képlékeny módszer számos alkalmazása esetén).

A merev–képlékeny analízis semmilyen információt nem szolgáltat a kialakuló lehajlásokra és elfordulásokra. Ezért elvileg a használhatósági határállapothoz tartozó terhekre mindig végre kell hajtani egy rugalmas analízist is.

El kell végezni továbbá minden olyan ellenőrzést, amelyet az elsőrendű rugalmas analízis kapcsán ismertettünk és itt most nem említettünk.

A.25.3.4. Másodrendű képlékeny analízis és tervezés

Amennyiben a keret imperfekcióit alkalmas módon figyelembe vesszük, a másodrendű képlékeny analízis minden olyan esetben alkalmazható, amikor a képlékeny analízis alkalmazási feltételei fennállnak. Ezt a módszert kell alkalmazni azokra a kilengő keretekre, amelyeket képlékeny analízis segítségével kívánunk vizsgálni.

Az általános másodrendű rugalmas–képlékeny analízis helyett bizonyos típusú keretekben elsőrendű merev–képlékeny analízis is végezhető, amennyiben a meghatározott igénybevételeket alkalmas módon megnöveljük.

A.25.3.4.1. Általános módszer

Általános módszerként leggyakrabban a másodrendű rugalmas–tökéletesen képlékeny analízist használjuk. Ez az eljárás kilengő és nem kilengő keretek esetén egyaránt alkalmazható. Az elasztó-plasztikus eljárást főként kutatási célra használjuk. E módszerek esetén is érvényesek a képlékeny szerkezeti analízisre vonatkozó, a keresztmetszetekkel, (szükség esetén) a kapcsolatokkal, valamint az anyagjellemzőkkel kapcsolatos korlátozások.

A szerkezeti analízis végrehajtása során figyelembe vesszük a keret imperfekciói és kilengési alakváltozásai következtében fellépő másodrendű hatásokat. Általában ugyancsak figyelembe vesszük a szerkezeti elemek imperfekcióiból (ha szükséges), illetőleg alakváltozásaiból származó másodrendű hatásokat is.

Az analízis során felhasznált ellenállásértékekben figyelembe vehető a normálerőknek, illetve a nyíróerőknek a keresztmetszetek és a kapcsolatok képlékeny nyomatóki ellenállására való hatása is.

A másodrendű rugalmas–tökéletesen képlékeny analízis a következő előnyökkel rendelkezik (például az elsőrendű merev–képlékeny analízissel szemben).

- Meghatározzuk a keret tönkremeneteli állapotát (a képlékeny mechanizmust vagy a stabilitásvesztést).
- Valamennyi képlékeny csukló helyét megállapítjuk, azokét is, amelyek a terhelési folyamat során bezáródnak (és így a keret képlékeny mechanizmusában nem vesznek részt) – ezeknél is, mint minden más képlékeny csuklónál, szükséges oldalirányú megtámasztást alkalmazni.
- Meghatározható, hogy mely képlékeny csuklók alakulnak ki a teherbírási határállapothoz tartozó teherértékek felett.
- A terhelési folyamat minden szakaszában, egészen a tönkremenetelig meghatározhatók az igénybevételek és a másodrendű hatások.

Ha az analízis során figyelembe vesszük a normál- és nyíróerők hatását, akkor nem szükséges külön ellenőrizni a keresztmetszetek és a kapcsolatok tervezési ellenállását. Mivel kiszámítjuk a képlékeny csuklóknál kialakuló elfordulásokat, ellenőrizni tudjuk, hogy a rendelkezésre álló elfordulási képesség elegendő-e.

Karcsú szerkezeti elemek esetén, ha a szerkezeti elemek imperfekcióit nem vesszük figyelembe az analízis során, ajánlatos ellenőrizni a szerkezeti elemek stabilitását a keretsíkban. Ennek során a nem kilengő kihajlási hosszokból lehet kiindulni, és figyelembe kell venni a képlékeny csuklók esetleges jelenlétét.

A rugalmas–tökéletesen képlékeny analízis alkalmazásakor legtöbbször csak a szerkezeti elemek keretsíkban való viselkedésével foglalkozunk. Emiatt utólag külön ellenőrizni kell a keretnek és a szerkezeti elemeknek a keret síkjára merőleges stabilitását.

Külön nem kell vizsgálni a keretnek a saját síkjában való, kilengő mód szerinti stabilitásvesztését, mert ezt a kérdést a szerkezet analízise már tartalmazza.

El kell végezni továbbá minden olyan ellenőrzést, amelyet az elsőrendű rugalmas analízis kapcsán ismertettünk és itt most nem említettünk.

A.25.3.4.2. Egyszerűsített másodrendű képlékeny analízis

A képlékeny analízis során figyelembe kell venni a kilengő alakváltozások miatti másodrendű hatásokat.

Másodrendű analízis esetén a merev-képlékeny módszer általában nem elegendő, hanem kilengő keretek esetén általában másodrendű rugalmas-képlékeny analízist kell végezni.

A másodrendű rugalmas-képlékeny analízis helyett azonban az Eurocode 3 1.1. része bizonyos típusú kilengő keretek esetén megengedi az elsőrendű merev-képlékeny analízis alkalmazását. Hasonlóan az elsőrendű rugalmas analízisen alapuló közvetett eljárásokhoz, a kilengési alakváltozások miatti másodrendű hatásokat ez esetben is közvetett módon vesszük figyelembe, oly módon, hogy a nyomatékokat (és a hozzájuk tartozó erőket) egy hasonló növelő tényezővel megszorozzuk. Ez esetben azonban minden nyomatéki igénybevételt (és belső erőt) megnövelünk (és nem csak a kilengés miatt bekövetkezőket, mint a rugalmas analízis esetén). Ez a közvetett módszer nem használható igen karcsú szerkezeti elemek esetén, amelyekben a szerkezeti elem imperfekcióit is figyelembe kell venni. *King* kimutatta [1], hogy ez az eljárás közvetlenül származtatható a *Merchant-Rankine*-kritériumból.

A növelő tényező megegyezik az elsőrendű rugalmas analízisnél alkalmazott növelő tényezővel:

$$\frac{1}{1 - \frac{V_{sd}}{V_{cr}}}$$

A módszer akkor használható, ha $V_{sd} / V_{cr} \leq 0,20$, továbbá teljesülnek a következő követelmények.

1. A keret egy- vagy kétszintes, és igaz az alábbi feltételek valamelyike:
 - az oszlopokban nem alakulnak ki képlékeny csuklók;
 - az oszlopoknak a keret síkjában érvényes, a hálózati hossz mint kihajlási hossz alapján számolt karcsúsága kielégíti az elsőrendű merev-képlékeny analízissel tervezett keretek oszlopaíra vonatkozó követelményt.
2. A keretoszlop alul befogott, és a kilengő tönkremenetel úgy következik be, hogy az oszlopokban csak a befogásnál alakul ki képlékeny csukló. A tervezés olyan részleges képlékeny mechanizmus alapján történik, amelyben az oszlopokat a képlékeny csuklóban feltételezett nyomatéokra rugalmasan méretezzük, továbbá gondoskodunk róla, hogy az oszlop kielégítse a képlékeny csuklókat magában foglaló oszlop keretsíkban érvényes karcsúságára vonatkozó követelményt.

Összefoglalva, az elsőrendű merev-képlékeny analízis alkalmazása csak speciális kilengő keretekre megengedett – általában egy- és kétszintes, illetve igen körültekintően megtervezett többszintes keretekre.

Mint láttuk, a vizsgált teherbírasi határállapothoz tartozó terhekből meghatározott igénybevételeket oly módon növeljük meg, hogy a kapott, önmagában ellentmondásmentes igénybevétel-eloszlás már tartalmazza a másodrendű hatásokat. Az eljárás alternatívája az a módszer lehet, amely szerint a szerkezet analízisét a növelő tényezővel megnövelt terhekre végezzük el (szükség esetén fokozatos közelítéssel).

Kiegészítésképpen el kell végezni a keresztmetszetek és a kapcsolatok ellenőrzését a normál-, illetve a nyíróerők miatt esetleg lecsökkenő nyomatéki ellenállással. El kell továbbá végezni a szerkezeti elemek keretsíkban és a keret síkjára merőleges értelemben bekövetkező stabilitásvesztésének vizsgálatát is, a nem kilengő kihajlási hosszok alapján, de az esetleg kialakuló képlékeny csuklók figyelembevételével.

Az Eurocode 3 1.1. része szerint ezek az ellenőrzések garantálják a teljes keretnek a saját síkjában és arra merőlegesen érvényes stabilitását.

El kell végezni továbbá minden olyan ellenőrzést, amelyet az elsőrendű merev-képlékeny analízis kapcsán ismertettünk és itt most nem említettünk.

Megjegyzés: Mivel egyes országok fenntartásait fejezték ki nemzeti alkalmazási dokumentumukban az eljárás helyességét és értelmezését illetően, a másodrendű képlékeny analízis e közvetett módszerének használata mindaddig nem ajánlott, ameddig ezek a kérdések nem tisztázódnak.

A.25.3.4.3. A Merchant–Rankine-módszer

A *Merchant–Rankine*-módszert ugyan az Eurocode 3 1.1. része közvetlenül nem említi, de alkalmazási feltételei megegyeznek a keretek kilengés szerinti osztályozásának kritériumaival. Emellett az is közismert, hogy az elsőrendű merev–képlékeny analízissel vizsgált keretek esetén alkalmazott megnövelt nyomatékok módszere e módszeren alapul.

A tudományos kutatások meggyőzően bizonyítják [2–5], hogy a *Merchant–Rankine*-módszer jól használható kilengő keretekre, és több nemzeti szabvány tartalmazza is.

Az ajánlások szerint a módszer a következő feltétel teljesülése esetén alkalmazható:

$$4 \leq \frac{\lambda_{cr}}{\lambda_p} \leq 10,$$

ahol:

- λ_{cr} a lineárisan rugalmas kritikus teherparaméter;
- λ_p az elsőrendű merev–képlékeny vizsgálat szerinti tönkremenetelhez (elsőrendű képlékeny mechanizmushoz) tartozó teherparaméter.

A teljes keret ellenőrzése annak kimutatásával történik, hogy a *Merchant–Rankine*-formulával (lásd lejjebb) meghatározott λ_f tönkremeneteli teherparaméter értéke legalább egységnyi:

$$\frac{1}{\lambda_f} \leq 1,0.$$

A λ_f tönkremeneteli teherparaméter értékét a *Merchant–Rankine*-formulából számítjuk (amely az eredeti *Rankine*-féle formula módosított változata):

$$\frac{1}{\lambda_f} = \frac{1}{\lambda_{cr}} + \frac{0,9}{\lambda_p}.$$

Ez a feltétel igen egyszerűen alkalmazható keretek ellenőrzésére. A kiegészítő ellenőrzésekhez szükséges, biztonságos és ellentmondásmentes igénybevétel-eloszlások ezek után elsőrendű merev–képlékeny analízissel határozhatók meg.

A módszer alkalmazási feltételei alapján nem használható karcsú oszlopok esetén, ahol a szerkezeti elem imperfekciója és alakváltozásai következtében kialakuló másodrendű hatásokat is figyelembe kell venni.

Kiegészítésképpen el kell végezni a keresztmetszetek és a kapcsolatok ellenőrzését a normál-, illetve a nyíróerők miatt esetleg lecsökkenő nyomatéki ellenállással. A *Merchant–Rankine*-módszer alkalmazása esetén el kell továbbá végezni a szerkezeti elemeknek a keret síkjára merőleges értelemben bekövetkező stabilitásvesztésének vizsgálatát is. Bizonyos esetekben egyes szerkezeti elemekben a lemezhorpadást is meg kell vizsgálni.

El kell végezni továbbá minden olyan ellenőrzést, amelyet az elsőrendű merev–képlékeny analízis kapcsán ismertettünk és itt most nem említettünk.

A.25.3.4.4. A Merchant–Rankine-módszer eredete

Kimutatható, hogy a *Merchant–Rankine*-módszer alkalmazási feltételei inverz alakjukban megtalálhatók az Eurocode 3 1.1. részében is, bár ott ugyanezeket a feltételeket más célra alkalmazzák.

Az Eurocode 3 1.1. része szerint egy keret kilengő, ha

$$V_{Sd} / V_{cr} > 0,1 \quad \text{azaz} \quad V_{cr} / V_{Sd} < 10.$$

A megnövelt kilengési nyomatékok módszerének alkalmazási feltétele:

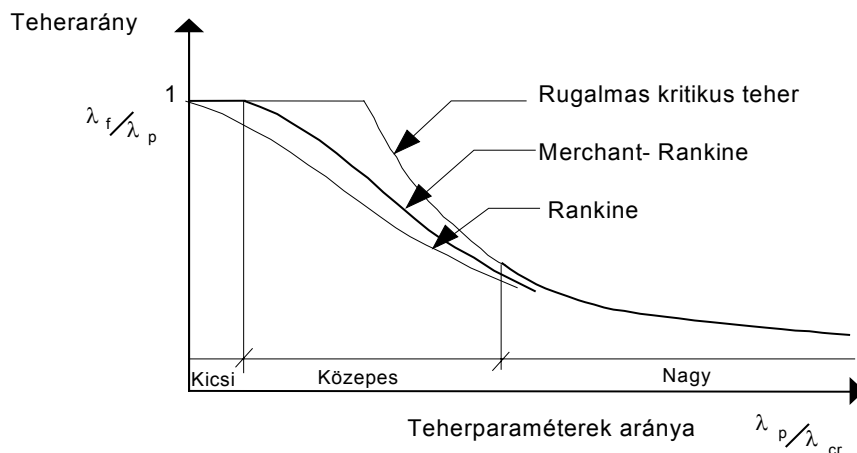
$$V_{Sd} / V_{cr} \leq 0,25 \quad \text{azaz} \quad V_{cr} / V_{Sd} \geq 4.$$

Ezek a korlátok tulajdonképpen megegyeznek az empirikus tervezési képletre *Wood* és *Merchant* szerint „jó mérnöki érzékkel” javasolható érvényességi határokkal. Az általános vélekedés szerint azonban a képlet érvényességi tartománya jóval tágabb az előzőekben megadottnál.

Az eredetileg *Rankine* által empirikus alapon javasolt formula a következő:

$$\frac{1}{\lambda_f} = \frac{1}{\lambda_{cr}} + \frac{1}{\lambda_p}.$$

Ez a képlet az oszlopok kihajlására biztonságosabb alsó korlátot jelent *Perry* és *Robertson* képleténél, míg a *Merchant–Rankine*-féle változat jobban illeszkedik a kísérleti eredményekhez. *Merchant* később észrevette, hogy ugyanez a képlet a kilengő keretek ellenállásának meghatározására is kiválóan alkalmas. A megközelítésmódot nemrégiben *Wood*, *Kirby* és *Nethercot*, majd *Jaspart* is továbbfejlesztette, és alkalmazhatóvá tette félmerev kapcsolatokkal kialakított keretekre is [2–5]. Az egyes képleteket a *A.25.6. ábra* ábrázolja.



A.25.6. ábra: A Rankine- és a Merchant–Rankine-képlet