

Katalán boltozatok textilerősítésű elemekből

TDK_2015

Ferenczi Edit és Hágen Kata

Konzulensek: Dr. Sajtos István, Dr. Orbánné Csicsely Ágnes

Tartalom

I.A. Köszönetnyilvánítás	3
I.B. Témaválasztás	4
II.1. Betonkenutól a textilbetonokig	5
II. 2. vályog	8
II. 3. Katalán boltozatok	11
II.4. Interjú a Polimertechnika Tanszékkal	13
III. Módszertan.....	14
1. Célkitűzések	14
2. Boltív geometriája	14
3. Elemek gyártásához készülő zsaluzat.....	15
4. Kísérletek a betonboltív létrehozására	16
5. Referencia boltív	27
6. Kísérletek a vályogboltív létrehozására	28
IV. Eredmény, értékelés	37
V. Összegzés	39
VI. Kutatás továbbélése.....	40
VII. Hivatkozások.....	40

Katalán boltozatok textilerősítésű elemekből

I.A. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni munkáját és segítségét, hogy hozzájárult ennek a dolgozatnak a létrejöttéhez:

Dr. Sajtos István és Dr. Orbánné Csicsely Ágnes

Gáspár Orsolya

Sebestyén Ottó

Juhász Károly Péter

Kutatásainkat a BME Építészmérnöki kar Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék Czakó Adolf Laboratóriumában végeztük. A kísérletekhez használt ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gépet a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosította.

Anyagfelajánlással járultak hozzá:

cement: Duna-Drava Cementgyárnak

mikroszilika por: BASF

adalékanyagok: Yorks bánya

agyag: Tapolcafői Téglaiipari Kft.

perlit: Magyar Perlit Kft.

folyosító: Kemikál Építőanyagipari Rt.

metakaolin: Meselia Hungária Kft.

modellgipsz: Rigips

I.B. Témaválasztás

A 2015-ös IV. MAPEI Betonkenu Kupára való készülés és a versenyen való részvétel miatt biztosak voltunk benne, hogy tovább szeretnénk kutatni a témában. Kíváncsiak voltunk, hogy milyen építészeti lehetőségeket rejt magában ez a hihetetlenül vékony, mégis nagy teherbírású szerkezet.

Ezek a betonkenu versenyek a 70-es évektől kezdve Amerikában éves szinten megszervezésre kerülő rendezvények voltak egyetemi csapatok között. Európában 1986-ban Limburgban rendeztek először ilyen fajta versenyt. Ezeknek a megmérettetéseknek az volt a célja, hogy a betontechnológiában innovációs lehetőségekkel kísérletezzenek egyetemi csapatok is. Ezeknek az üvegszállal erősített falú hajóknak előképként Joseph-Loius Lambot francia mérnök által tervezett és épített ferrocement¹ hajók tekinthetők. Napjainkban az üvegszál erősítés még vékonyabb falvastagságot enged meg, ez a filigrán szerkezet remek kiindulás volt a textilbeton alkalmazás felé, amely ma önállóan is fontos és innovatív terület.

Magyarországon negyedik éve rendeznek betonkenu kupát, a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék által szervezett csapat harmadik alkalommal vesz részt rajta. Idén sikerült a nemzetközi élvonal eredményeit (vastagság, súly) továbbra is igen egyszerű eszközökkel megközelíteni. A ferrocement alkalmazásának egyik úttörője, Pierre Luigi Nervi szerkezetei inspiráltak minket arra, hogy mi is a térlefedéssel foglalkozzunk. Nervi ferrocement elemeiben és a kenuban is a szerkezetek vékonysága ragadott meg minket, ezért tűztük ki célul magunknak, hogy mi is minél kisebb vastagságú födémekkel foglalkozzunk. Nervi esetében külön érdekesnek találtuk, hogy hogyan kombinálta az előregyártott ferrocement elemeket a monolit technológiával.

A BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék korábbi munkái között kutatva találtunk rá a katalán boltozatokra². Tovább olvasva a témában született meg bennünk a gondolat, hogy ha egy nagyon vékony elemből (a betonkenu megépítése során használt 3 mm vastag üvegszövet erősítésű beton) egy önmagában vékony szerkezetet (katalán boltozat) építünk, akkor meglehetősen vékony, teherbíró térlefedést hozhatunk létre. Ez jó mód arra, hogy csökkentsünk az anyagmennyiség felhasználását, ezáltal elérve a környezetterhelés csökkentését.

Mindkettőnket komolyan foglalkoztat a környezetbarát építés gondolköre: 2014 nyarán Edit részt vett egy hagyományos építőtáborban a Falufejlesztési Társaság által szervezett Nagyapám Háza program keretében, ahol egy borona- és paticsfalú 250 éves házat építettek újjá a Vas megyei oszkói szőlőhegyen. Kata pedig egy egyetemi tervezési tárgy keretén belül került kapcsolatba egy vályogház felújításának kérdésével. Innen származik az ötlet, hogy megpróbáljunk egy kiemelkedően természetbarát anyagból, vályogból is teherhordó boltívet létrehozni.

Ezek alapján határoztuk el, hogy betonból és vályogból is készítünk egy-egy teherhordó, katalán mintára szerkesztett boltívet.

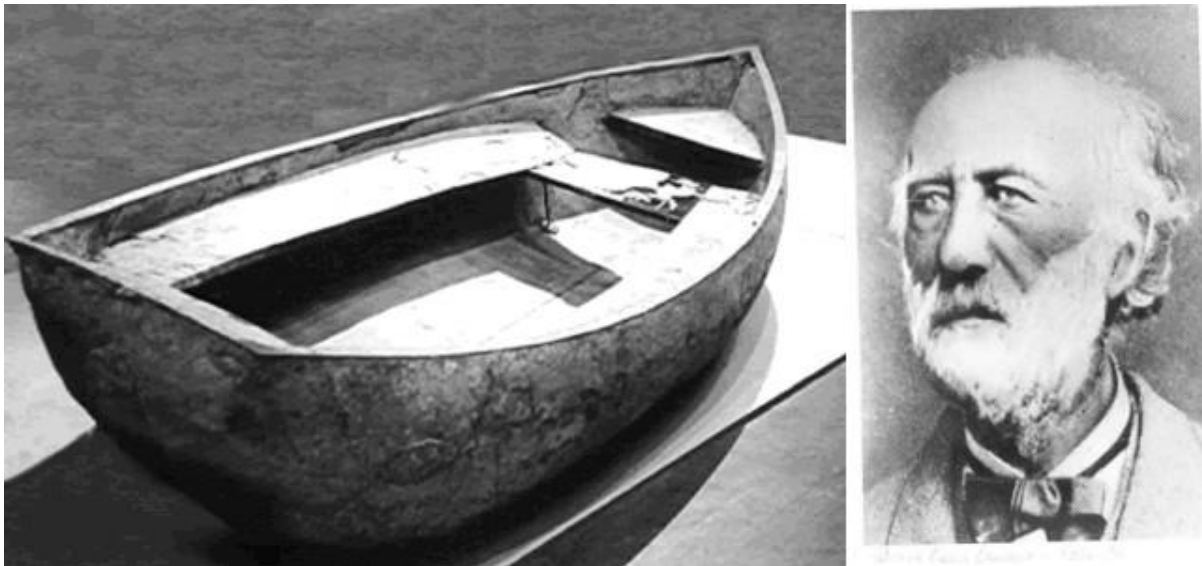
¹ A ferrocement fogalmát a II.1. alfejezetben közöljük.

² A katalán boltozatok tulajdonságait a II. 3. alfejezetben részletesen ismertetjük.

II.1. Betonkenutól a textilbetonokig

Ahogy a bevezetőben is említettük, az első betonkenu versenyeket az Egyesült Államokban rendezték. Az első, főiskolák között megrendezett verseny Illinoisban (USA) 1971. május 16-án volt, melyen akkor csupán két csapat vett részt. Azonban nem ők voltak az elsők, akik ebből az anyagból vízi járművet építettek.

1848-ban Joseph-Louis Lambot francia mérnök létrehozta a világ első, acélháló erősítésű betonból készült csónakját [], melyhez akkor született új anyagot használt fel, aminek a feltalálása Joseph Monier francia kertész nevéhez fűződik, aki a hagyományos kerámia helyett csirkehálóval erősített beton virágcserepeket készített⁴. Ezt az anyagot akkor ferrocementnek nevezték el.



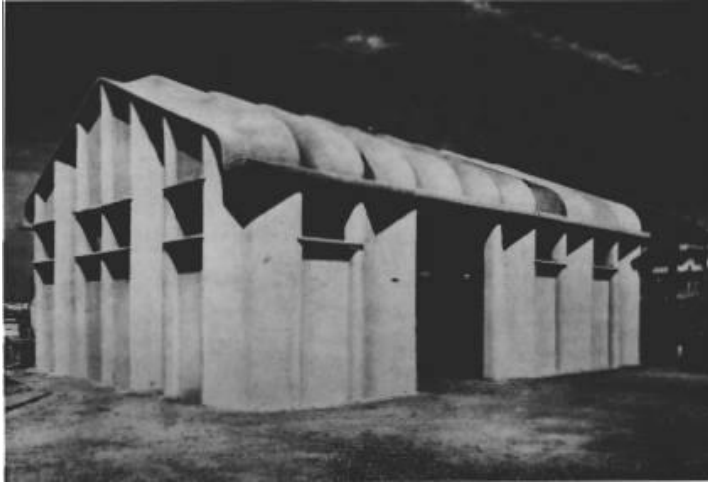
1. ábra Joseph-Louis Lambot és acélháló erősítésű betoncsónakja

A szakirodalomban a különböző forrásoknál más-más definíciókat találunk, így a pontos meghatározásban az Amerikai Beton Intézetre (American Concrete Institute) támaszkodunk, amely szerint bármely vékony (max. 30 mm vastag) keresztmetszetű, cement kötőanyagú fém vagy más szövet erősítésű kompozit anyag a ferrocement⁵. Hagományos betonkéhoz képest magasabb cementtartalom, nagyon finom adalékanyag szemnagyság jellemzi. Ennek az anyagnak az alkalmazása épületszerkezetként először a XX. század elején valósult meg.

Pierre Luigi Nervi (1891-1979) olasz származású építész és szerkezettervező mérnök korábbi, betonhajók tervezésekor szerzett tapasztalatait átültetve kezdte el használni a ferrocementet, mint építőanyagot a II. világháború pusztítását követően. A háború utáni állapotokra jellemző volt a nyersanyag hiány, ezért szükség volt olyan innovatív technológiákra, melyek csökkentik az anyaghasználat mennyiségét. Ennek a célnak megfelelt a ferrocement alkalmazása, hiszen jelentősen lecsökken a szerkezet vastagsága, a bennmaradó zsaluzatként alkalmazott elemek csökkentik a zsaluzás idő-és anyagigényét, ezért gazdaságosabban és gyorsabban építhető, mint a korábban alkalmazott vasbeton szerkezetek.

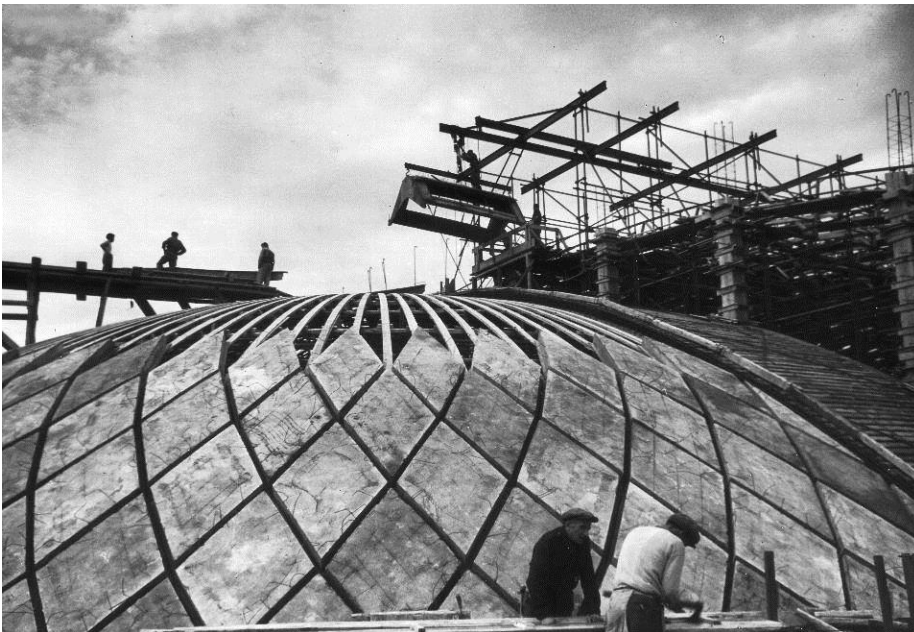
⁴ <http://www.architetto-contemporaneo.it/en/dossier/the-contemporary-architect-the-gardener-who-invented-reinforced-concrete-joseph-monier>

⁵ <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/ferrocement>



2. ábra Nervi: római raktárépület (1945)

Nervi első ferrocement épülete egy római raktárépület volt 1945-ben. Az építmény falának vastagsága alig haladta meg a 3 cm-t, ezért, hogy merevséget adjon az építménynek bordázottan készültek el a falak és a tető is. A szerkezet erősítése acél háló volt, az elemek előregyártással készültek, a helyszínen csak elhelyezték a már bordázott elemeket. A tervező korábbi munkái közül érdemes megemlíteni az orvietoi, az orbetelloi és a torre de lagoi hangárokat, melyek még vasbeton szerkezettel készültek, de már előregyártott elemeket használtak fel az építés során. Így a későbbiekben az előregyártásban és a ferrocement alkalmazásában szerzett tapasztalatait sikerrel tudta ötvözni. 1948-49-ben épült meg kiállítási csarnoka Torinóban, melynél szintén ferrocement elemeket alkalmazott a bordás héj benmaradó zsaluzataként. A csarnok tetőszerkezetét átlagosan kevesebb mint 4 cm vastag, előregyártott elemek adják, melyeket a helyszínen kiöntött monolit gerendákkal kapcsoltak össze, illetve kerültek az elemek hullámhegyére is. ¶



3. ábra Nervi kiállítási csarnoka Torinóban (1948-49)

Hazánkban is van példa Nervi épületeihez hasonlóan előregyártott kiselemes ferrocement elemek használatára. Az első ilyen épület Magyarországon a forgáshiperboloid alakú hűtőtorny, amely Ajkán épült 1949-ben Mátrai Gyula tervei alapján. A kehelybe állított kettős oszlopokra kéttámaszú, előregyártott elemeket helyeztek, amelybe körgyűrű vasalást

tettek. A körgyűrűből további vasak álltak ki, melyeket átfogással toldottak, amint az elemeket rögzítették. A köpeny elemei rombusz alakúak voltak, mindkét oldalon hálós vasalással. Az alsó elemek 43,5cm-es vastagsággal rendelkeznek, amelyek az alsó 7 m-es szakaszon fokozatosan csökkenek, míg el nem érik a 13,5 cm-t, onnantól kezdve tartják ezt a vastagságot. Széleik horony alakúak és vékony vasak állnak ki belőle. A hornyokat végük cementhabarccsal öntötték ki. Ehhez nagyon hasonló hűtőtorony épült Debrecenben is, szintén Mátrai Gyula tervei alapján.



4. ábra Mátrai Gyula: Ajkai hűtőtorony előregyártott elemei (1949)

Előregyártott elemek alkalmazása lehetővé teszi a kivitelezés fejlesztését, egyszerűsítését. Átala lecsökken az építéshelyi munkaerő-, a munkaidőigény, anyag- és faanyagszükséglet, illetve a költségek is. A kiselemes megnevezés relatív, hiszen egy-egy elem mérete mind a két irányban elérheti a több métert is. A fentebb megnevezett torinói sportcsarnok elemeinek mérete a ...ábrán látható. Monolit vasbeton szerkezet esetén az állványozási-zsaluzási költség a teljes költségvetés 30%-át adja, mely magas csarnokok esetén akár 60% is lehet. Ferrocement előnye a hagyományos vasbeton szerkezetekhez képest, hogy, jobb adhéziós tulajdonsággal, nagyobb teherbírással, kisebb repedésérzékenységgel rendelkezik és a szövet/háló-erősítés segítségével egyenletes feszültségeloszlás érhető el.

A ferrocement tönkremenetele eltér a vasbetonétól. Míg az előbbi teljes felületén berepedezik, de a repedéstágasság kicsi marad, addig az utóbbi szerkezeten kevés repedés keletkezik, de jóval nagyobb lesz a repedéstágasság. A vasbeton és acélerősítésű ferrocement tönkremenetelét okozhatja az erősítőanyag korróziója okozza. Mivel a ferrocement jellemzően kis keresztmetszeti mérettel készül, a fémszövet közel van a felszínhez, ezért célszerű azt galvanizálni, korrózióvédelemmel ellátni.⁶

A ferrocementet továbbfejlesztve, a benne lévő acél és fémszöveteket szén-, üveg-, bazalt- vagy egyéb megfelelő szövettel helyettesítve a tudomány eljutott a textilbetonokig. A kompozit anyag előnyeiként tartják számon, hogy a flexibilis szöveterősítésnek, illetve az extrém könnyű és vékony felépítésnek köszönhetően, a keletkező szerkezetet szabadon

⁶ <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:633742/FULLTEXT01.pdf>

formálhatjuk és változatos geometriájú építményeket hozhatunk létre. A beton és a szövet közti kapcsolat biztosítása érdekében 1 mm-nél kisebb szemnagyságú adalékanyagot használnak a textilbetonok esetében. Napjainkban a témában vezető kutatásokat és eredményeket az aacheni egyetem (RWTH Aachen University) építészkarának kísérleti csapata végzi és éri el. Kutatásaik során azt a célt tűzték ki, hogy a textilbeton alkalmazásának tudományos alapját dolgozzák ki.



5. ábra Textilbetonból készült bútor (Aachen)

A textilbeton felhasználása sokszínű, készülhetnek belőle bútorok, vagy héjszerkezetek, akár pavilonok is, mint amilyen az Aachenben található a Mies-van-der-Rohe utcában található.

További fejlesztések és új lehetőségek melyek a textilbetonban rejlenek többek között, hogy a vasbeton héjszerkezetekkel ellentétben a textil erősítés nem korrodálódik úgy, mint a betonacélok, illetve geometriai kialakítási lehetőségeket tekintve rugalmasabb.

II. 2. vályog

Személyes tapasztalataink és érdeklődésünk miatt tűztük ki többek között magunk elé azt a célt, hogy a vályoggal is kísérletezzünk, mint potenciális alapanyaggal, külön motivációt jelentett, hogy kevés példa van kis szerkezeti vastagságú vályog térlefedő szerkezetre. Először a vályoggal, mint anyaggal foglalkoztunk kutatásaink során, majd igyekeztünk feltérképezni az alkalmazási lehetőségeit kiselemes héjként. Vályog alatt a továbbiakban a következőket értjük: ez az anyag a természetben előforduló agyagos talaj, víz és az ehhez adott adalékanyagok keveréke. Ilyen adalékok például a nád, szalma, mész vagy a cement. Ezek mind-mind más tulajdonságát változtatják a vályognak. A kötőanyag szerepét az agyag tölti be, melynek szemcséi meghatározott méretűek és kémiai összetételűek. A természetben tisztán ritkán fordul elő, általában egyéb talajokkal keveredik. Ez az oka annak, hogy beszélhetünk sovány-, kövér-, és tiszta agyagról. Ezek a megnevezések a talaj agyagtartalmára utalnak.

A vályogépítés legfontosabb előnyei és hátrányai

A vályogból készült falazatoknak fontos tulajdonsága, hogy nagy hőtárolóképességük van illetve jó a páragazdálkodásuk, mivel "lélegző" szerkezetként működik. Emellett az építés technológiája könnyen elsajátítható. Környezetvédelmi szempontból szintén kedvező tulajdonságai figyelhetőek meg, alacsony környezetterhelés, természetes anyagok jellemzik és 100%-ban recirkulálható. Vályogszerkezetek hátrányai közül a legfontosabb, hogy

érzékeny a nedvességre, ezért nagyon fontos a megfelelő nedvesség elleni védelem, különben a vizesedés az anyag szilárdságvesztéséhez vezethet. A ma használatos falazatokhoz képest jelentősen kisebb nyomószilárdsággal és csak minimális húzószilárdsággal rendelkezik a vályogfal. A kivitelezés során problémák adódhatnak az időjárás miatt (nem bírja a nedvességet), illetve ez rendkívül időigényes és nagy az élőkommunkaigénye. A vályog fontos tulajdonsága még a zsugorodása, mely a száradás következtében megy végbe. Minél nagyobb az agyagtartalma, annál nagyobb %-ban zsugorodik össze az anyag. Ez a probléma az előregyártott elemes szerkezeteknél kevésbé okoz gondot, mivel a folyamat várhatóan a beépítés előtt nagyrésztben lejátszódik.

Adalékanyagok hozzáadásával módosíthatunk a vályog tulajdonságain. Ezek adagolásakor figyelembe kell vennünk a tapasztalati adatokat (vályog esetében gyakori, hogy az anyag sokfélesége miatt pontos kísérleti adatok helyett tapasztalati adatok, kvázi ökölszabályok állnak csak rendelkezésre) vagy az előírt értéket, különben ellentétes hatást érhetünk el velük.

Az adalékanyagokat két csoportra osztjuk, a természetes és a mesterséges adalékok.

A természetes adalékanyagok közé tartozik a homokos-kavics, amely növeli a teherbírást és a tömöríthetőséget. A szalma vagy a nád szintén ide sorolható, ami növeli a húzószilárdságot (csak 30 tömeg%-ig alkalmazva, efelett adagolva a szerkezet már nem lesz teherbíró, könnyűvályognak nevezzük) valamint javítja a vályog hőszigetelőképességét. Ebbe a csoportba tartozik még a fűrészpor vagy a faforgács, ami szintén növeli a hőszigetelést, viszont a nyomószilárdságot jócskán csökkenti, vagy a kender- és lenrostok, amik csökkentik a repedések kialakulásának valószínűségét, mivel növeli a húzószilárdságát.

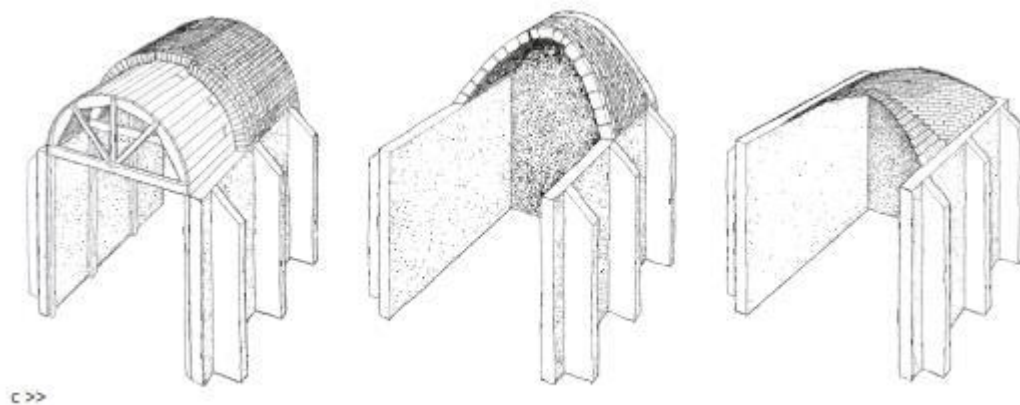
A mesterséges adalékanyagok közé soroljuk a cementet, amelyet egyfajta stabilizáló anyagként használnak, ugyanis megfelelő mennyiségben az agyaghoz adagolva növeli annak nyomószilárdságát és a vízzel szembeni ellenállóképességét.

A mész adagolásával szintén hasonló változásokat érhetünk el, azonban nagyban függ a talaj agyagtartalmától, hogy milyen mértékben módosítja a nyomószilárdsági értékeket.

Érdemes még megemlítenünk a gipszet, mellyel a zsugorodást csökkentjük, valamint a bitument melyet szintén stabilizálásra használnak.

A vályog sokfélesége miatt nincsenek hatályos szabványok a vályogépítéssel kapcsolatban, ezen rendelkezések hiányában csupán irodalmi adatokra illetve a tapasztalati úton szerzett értékekre lehet támaszkodni. Ennek ellenére Magyarországon az 1930-as években a lakóépületek kétharmada föld- vagy vályogfalú épület volt, és még 1993-ra is 25% maradt az arányuk. Ezeknek az épületeknek a karbantartása szakértelmet igényel, illetve az ökológikus építészet elterjedésével kezd újra előtérbe kerülni ez az építkezési forma. A vályog, mint természetben előforduló építőanyag, amely ráadásul rendkívül jó hőháztartási tulajdonságokkal rendelkezik kezd újra divatba jönni. Németországban és Svájcban már felkapott ez a hagyományos építkezési technika, persze ötvözve a mai kor technológiai vívmányaival. A német vályogépítés egyik "fellegvára" Kassel, ahol ökológikus városrészt alakítottak ki a helyi önkormányzattal együttműködve. Az épületek falának többségét vályogszerkezet adja, melyen hőszigetelést és faburkolatot helyeztek el. Hazánkban számos helyen megtalálhatóak a népi építészetből jól ismert vályogfalú parasztházak, újonnan épült épületek esetén azonban még nagyon ritka a vályog alkalmazása, mivel nincsenek hatályos szabályozások a vályoggal való építkezésre és a hatósági eljárás is bonyolult, viszont ökofalvakban népszerű pl. Gyűrűfű, Máriahalom.

A vályogszerkezet teherbíró térfelédő szerkezetként való alkalmazására kevés kortárs példa van - ez részben az anyag korlátozott húzószilárdságával magyarázható, ám ez boltozott kialakítással ellensúlyozható. Érdemesnek tartjuk megemlíteni a núbiai boltozatot, mint hagyományos alkalmazást, ami nagyon hasonló az általunk tárgyalt katalánhoz. A szintén zsalu nélkül épülő, ám elég jelentős szerkezetvastagsággal rendelkező boltozatot vályog- vagy földtégglák alkalmazásával építik meg.



6. ábra A donga-, a núbiai-, és a katalán boltozás

A kortárs európai vályog/föld építésben Gernot Minke és Martin Rauch nevét tartjuk fontosnak kiemelni. Az előbb említett építész a vályogépítés jelentős úttörője, nevéhez fűződik például a Németországban Kasselben kialakított ökofaluban számos lakóépület. A tengerentúlon is megfigyelhető munkássága, Paraguayban boltozott fedésű lakóházak formájában. Martin Rauch osztrák keramikus pedig a vályogösszetétel kutatásában játszik fontos szerepet.



7. ábra Gernot Minke vályogból készült boltozata

Számunkra a leginkább releváns előkép a BLOCK Research Group munkássága Etiópiában. A csoport célja, hogy minél költséghatékonyabban helyi építőanyagokból építkezzenek, akár kis falvakat vagy egész városokat így kialakítva. Gyakran alkalmaznak boltozott térlefedéseket föld és vályog építőanyagokból a hatékonyság miatt.

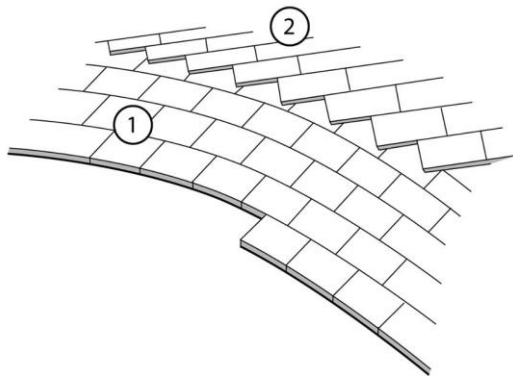


8. ábra BLOCK Research Group - boltozatok

Ezeket az előzményeket figyelembe véve kezdtük el a vályog-boltozat koncepciójának kidolgozását, a minél kisebb szerkezeti vastagságra fókuszálva.

II. 3. Katalán boltozatok

A katalán boltozatokat napjainkban kezdenek visszatérni az alkalmazott szerkezetek közé, hiszen nem csak esztétikus, de anyag- és költséghatékony is. Lényegük abban rejlik, hogy a szerkezet legalább 3 kerámia rétegből épül fel melyek különböző irányultsággal rendelkeznek, ennek köszönhetően a szerkezet merevsége nő. A térbeli merevség növelése lehetővé teszi a szerkezeti vastagság csökkentését. Az elemek tipikusan 3cm vastagok és 45°-ban vannak fektetve egymáshoz képest az átmenő hézagok elkerülése végett. Az első sor elemeit gipszhabarccsal illesztik össze, hogy pár másodperc alatt megkössenek, ezáltal nem igényelve zsuluzatot, csak mintaívet. A többi réteget cementhabarccsal ragasztják össze.



9. ábra Két rétegű katalán boltozat felépítése

Először a középső réteget ragasztják össze, erre kerül alulról és felülről a másik két réteg. A szerkezet előnye, hogy kis szerkezeti vastagság, alacsony ívmagasság mellett is relatív nagy teherbírással rendelkezik abban az esetben, ha a boltív alakja lehetővé teszi, hogy a fő teherre, amely általában az önsúly, hogy a boltozat membránhéjként tudjon viselkedni, azaz csak nyomás, húzás és nyírás alakuljon ki a középfelület mentén. Ezeket a boltozatokat ma is alkalmazzák zárófödémként, szintközi födémként (kis ívmagasságuk miatt kedveltek), lépcsőként, illetve esztétikus megjelenésük miatt álmennyezetként is.

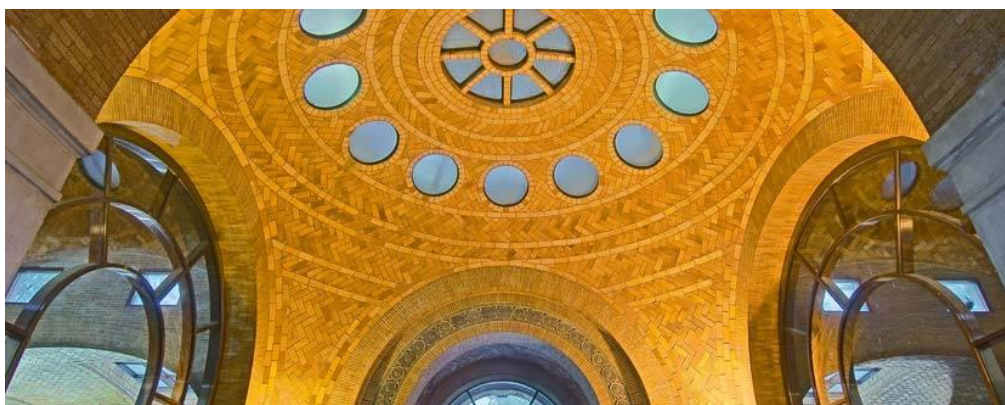
Történeti áttekintés

Maga a boltozat ősi eleme az építészetnek, jól példázzák ezt pl. a vernakuláris építészetben fennmaradt trullók. Kutatók rámutattak, hogy az ókor Egyiptomban is alkalmaztak boltozatokat, elsősorban alárendelt terek lefedésére. A mai értelemben vett téglaboltozatok az asszíroktól származnak, bár a falazási technika az Európában megszokottól eltérő. A boltozatok alkalmazása az európai műépítészetben a Római Birodalom idején terjedt el. A katalán boltozat hosszú evolúciója során (első írásos emlék: 14. sz., Valencia) feltehetően ötvözte a vernakuláris és műépítészeti hagyományokat. A mediterrán térségben fa hiányában térlefedésként indokolt volt a boltozat alkalmazása, a katalán technikát kis ívmagassága tette különösen népszerűvé, hiszen közbenső födémként is alkalmazható volt. Fontos vívmánya a konstrukciónak, hogy relatív kis vastagsága kis önsúlyt eredményezett, így oldalnyomása a hagyományos boltozatok töredéke. Ez különösen a középkorban, a támvékekkel támogatott súlyos boltozatok korában nagyon népszerűvé tette. E korban élte első fénykorát a szerkezet, olyan épületekben alkalmazták térlefedésre, mint a Santa Maria del Mar templom a XV. századból. A reneszánsz beköszöntével eltűnt, csupán a katalán népi építészetben maradt meg. A XIX. században azonban újra felfedezték, legismertebb alkalmazásai Antoni Gaudí nevéhez fűződnek.



10. ábra Trullók, Albarobello, Olaszország

Szintén spanyol építész, Rafael Guastavino volt az, aki a tengerentúlra is eljuttatta ezt az addig ott teljesen ismeretlen boltozási formát, ahol 1880 és 1960 között több, mint 1000 épületet épített ezen boltozat felhasználásával. A XIX. századi Amerikában a téglaboltozatok nyújtotta tűzállóság segítette a gyors terjedését. Ezt a korszakot olyan épületek jelzik, mint a bostoni közkönyvtár vagy a New York-i City Hall metróállomás.



11. ábra Guastavino: Bronx Zoo, Elephant House, New York

Jelenkor legnagyobb katalánboltozat építői közül feltétlenül meg kell említeni John A. Ochendorft és Philippe Blockot, akik a dél-afrikai Mapungubwe Nemzeti Parkba építettek katalán mintájú boltozatokat és kupolákat. A legnagyobb létrehozott szabadon formált boltívük 14,5m támaszközű volt, melyet 300mm szerkezeti vastagsággal értek el. A tradicionális katalánboltozat-építőelemet -a kerámiát- erősítés nélküli 20mm vastag tömörített földcsempékkel helyettesítették, ezáltal tovább csökkentve az energia- és vízfelhasználást, szemétermelés, építési időt és a költségeket.

Katalán boltozatokról a magyar szakirodalomban nagyon keveset lehet olvasni. A 2014-ben megrendezett TDK-ra két dolgozat is érkezett a témában, szerzőik tanulmányukból cikket írtak, publikáltak, alkotó héten boltozott lépcsőt építettek és részt vettek a Construmán is.

II.4. Interjú a Polimertechnika Tanszékkel

Lehetőségünk nyílt arra, hogy a BME Gépészmérnöki Karának Polimertechnika Tanszéken működő Kompozit Laboratóriumba betekintést nyerjünk, a laboratórium vezetője, Dr. Tamás-Bényei Péter vezetett körbe minket. Erre a kitekintésre a kutatómunkánk során azért volt szükség, hogy tájékozottabbak legyünk a különböző szövetekről, azok tulajdonságairól és felhasználási területükről.

A laborban szintén szövet erősítésű anyagokkal foglalkoznak, különböző hálókkel és textilekkel kombinálva a polimereket. Először olyan alapvető fogalmakat tisztáztunk, mint hogy mit jelentenek az 1D-s, 2D-s, illetve 3D-s szövetek és hogy azoknak milyen tulajdonságaik vannak.

Az 1D-s szövetek gyakorlatilag csak a tér egyik irányában futnak, ezek a szálkötegek (rovingok) adják a szövetet, az erre merőleges néhány szál csak lazán összetartja, ezek fizikai tulajdonsága gyakorlatilag elhanyagolhatóak. A 2D-s illetve 3D-s textilek, ahogy a nevük is mutatja, a tér 2 illetve 3 irányában képesek merevséget és szilárdságot adni. Üvegszövetekből láttunk mind a három féléit, illetve kísérleteztek még szén-, aramid- szövetekkel, illetve ezek ötvözetével is, hibridként. Az aramid- szövetek rendkívül nagy szilárdsággal bírnak, azonban nem túl rugalmasak, ezért keverik szénszállakkal.



12. ábra Üveg-, szén-, aramid- és bazaltszövet

Foglalkoznak a laborban természetes eredetű szövetekkel is: bambusszal, kenderrel, jutával és bazaltszövetekkel. Tapasztalatok alapján ezek felhasználása sokkal problémásabb, mint a mesterséges szöveteké, mivel nedvességre érzékenyek, duzzadnak és rosszabb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, illetve azok függenek a természetben való növekedés és kialakulás körülményeitől.

A mi érdeklődésünket különösen a bazaltszövet keltette fel, mivel ez természetes eredetű, mesterségesen elkészített anyag alkalmas lehet a vályog elemeink erősítésére. Emellett a jutáról is ez okból kérdeztük a tapasztalataikat. A jutát kifejezetten nem ajánlotta a laborvezető úr, mivel tapasztalataik szerint nehéz vele dolgozni, könnyen szétesik szállakra és nem annyira jók a fizikai tulajdonságai. A bazaltszövettel úgy gondolta érdemes próbálkoznunk, bár ő az olcsót-olcsóval, drágát-drágával elvet vallja, vagyis szerinte a vályoghoz valami olcsóbb és kevésbé strapabíró erősítést is elég lenne alkalmaznunk, mivel a bazalt- nagyságrendekkel nagyobb szilárdsága van, mint a vályognak. Kiemelt tulajdonságai ennek az anyagnak, mivel vulkanikus eredetű, hogy lúgnak, savnak és a

hőmérsékletnek is kiválóan ellenáll. Főbb összetevői a Fe, Na, Mg és a Si, kémiai összetételét tekintve nagyon hasonlít az üveghez. A szénzálhoz képest olcsóbb, illetve kevésbé merev, rideg, ezért gyakran ezzel helyettesítik. Megtudtuk még, hogy a szöveteket a fonalak különböző minta szerinti szövése alapján 3 nagy csoportba sorolják: a vászon-, sávoly-, és atlaszkötés. Főleg 0-90°-os szövással foglalkoznak, de léteznek ferde szövésű textilek is.

Ez a laboratóriumi látogatás és a sok információ, amit szereztünk arra inspirált minket, hogy többféle erősítést kipróbáljunk és megvizsgáljunk. Ezúton is köszönjük, hogy a rendelkezésünkre bocsátottak egy darab bazaltszövetet, hogy csinálhassunk próbatesteket és megnézhesük, hogyan működik ez az erősítés a vályog esetében. Ennek tapasztalatait és eredményeit a III. Módszertan részben részletesen kifejtjük.

szövet	ár (Ft/ fm)
szén	11600
üveg	890
aramid	6550
bazalt	4650

1. táblázat Szövet árak

III. Módszertan

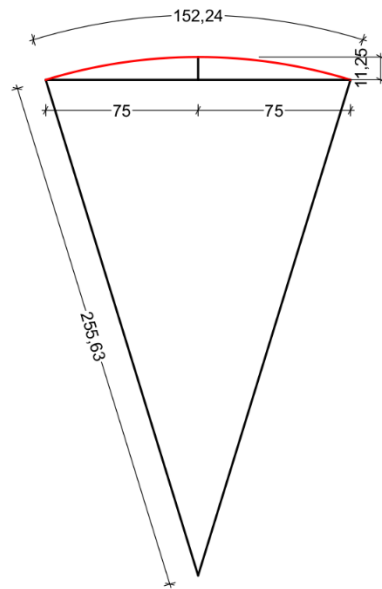
1. Célkitűzések

Célunk az volt, hogy a kutatásunk végére megépítsünk egy-egy teherhordó boltívet katalán mintára üvegszövet erősítésű betonból és természetes szállal erősített vályogból, majd összehasonlítsuk azokat. Az üvegszövet erősítésű beton anyagösszetételét egy az egyben a 2015-ös betonkenutól vettük át. A vályog esetében szükséges volt a megfelelő összetételek kikísérletezésére, próbatestek gyártására, ragasztási módok kutatására, összeépítési technológia kitalálására, összeépítésre és terhelésre.

2. Boltív geometriája

Katalán boltozat hagyományira visszavezetve a kisméretű téglá méreteit vettük alapul: 12*25 cm-es alaprajzi és a betonkenu 3mm-es falvastagságából kiindulva, 1 cm-nél kisebb magassági méreteket választottunk. A hagyományos katalán boltív 3 cm-es elemvastagságával szemben ez jelentős csökkentés, de a kenunál szerzett tapasztalatok bizalommal töltötték el minket. A boltív méreteit igyekeztünk úgy meghatározni, hogy könnyen megépíthető ugyanakkor a következtetések levonására alkalmas legyen, emellett görbületére illeszkedjenek a kiselemek. Ez alapján 1,5 m hosszú, 11,25 cm maximális magasságú, 2 futó

sor széles ívet határoztunk meg. Ennek legyártásához számításaink alapján körülbelül 36db elemre volt szükség.



13. ábra Boltív geometriája



14. ábra Elemkiosztás

3. Elemek gyártásához készülő zsaluzat

Első lépés az elemek zsaluzatának legyártása volt, mely 10*10 mm-es fenyőlécből készült, hiszen tudtuk, hogy az elemvastagság ez alá fog esni, mivel a vályoggal nem voltak korábbi tapasztalataink, nem szerettük volna ebben az irányban túlzottan lekorlátozni a lehetőségeinket. Ezen felül így egészen strapabíró szerkezet keletkezett. 45 elem számára elegendő zsaluzat készült (36 db + 25% az esetleges selejtes elemek számára). Egy rácsszerkezetet készítettünk belőle, amely a zsalu oldalát adta, alja egy OSB lap volt. Az OSB-re néhány elem legyártása után műanyag fóliát fektettünk, mert a kezdetben alkalmazott folpack nem vált be, elégedetlenek voltunk a leválasztott elemek felületével, illetve néha bele is ragadt az anyagba.



15. ábra Zsaluzat

4. Kísérletek a betonboltív létrehozására

4.1. A recept

A betonboltív elkészítésénél a 2015-ös Betonkenu Kupára fejlesztett, ígéretes tulajdonságokkal (nyomószilárdság, duktilitás) rendelkező betonösszetételt használtuk, erősítésként pedig két rétegben üvegszövetet alkalmaztunk. A beton alapreceptje (melyből mindig egyenes arányossággal számoltunk) a következő táblázatba található:

Ferrocement alaprecept			
		m%	45 elemhez grammban
cement	Portlandcement EN 197-1 CEM I 52,5 N /Duna-Drava Cement/	44,48	4129,4
mikroszilik a	BASF	2,67	247,5
metakaolin	Metaver I.	6,08	564,3
homok	York bánya	16,07	1491,6
víz		24,9	2312,1
folyósító	Plastol NAC /Kemikál Építőipari RT./	1,33	123,2
perlit		4,5	416g

2. táblázat Ferrocement alaprecept

4.2. Ferrocement elemek készítésének általános metodikája

Az összetevők kimérése után a betonhoz hozzáadtuk a vizet és a folyósítót, majd kikevertük a betont. A zsalut először lefújtuk zsaluleválasztó olajjal a könnyű kiszaluzás érdekében. Ezután a betont egy spatula segítségével hordtuk fel az előzetesen 12x25 cm-es nagyságra felvágott 90°-os üvegszövetre, majd betonos oldalával lefelé behelyeztük a zsaluzat egyik cellájába. Erre került az előzőhöz képest 45°-kal elforgatott üvegszövet, mivel 2 rétegben volt rá szükség, melyet ismételten betonnal vontuk be. A spatula segítségével az elemek felületét egyenletesre simítottuk. Az ekkor készített elemek vastagsága száradás után körülbelül 3-5 mm úgy, mint a betonkenunk átlagos vastagsága. Az kivitelezés pontatlanságából adódhat eltérés a vastagságban.



16. ábra Ferrocement lapok legyártásának folyamata

4.3. Próbaelemek

Mivel meg volt a receptünk, amivel dolgozni kívántunk, a ferrocementtel való kísérleteink az elemek összeragasztására korlátozódtak. Törésteszthez is szükségünk volt elemekre, mivel szeretnénk volna meghatározni milyen maximális törőerőt képesek elviselni egyenként. Legyártottunk 11 db elemet, amelyből 4-et szántunk töréstesztre, a többivel pedig a ragasztást (az elemek összeillesztését a boltozatban) próbáltuk ki.

Gyártást követő második napon az elemeket eltávolítottuk a zsaluzatból, mely könnyű folyamat volt a leválasztó olajnak köszönhetően. Ezután az elemeket a laboratórium szárítóhelyiségébe tettük, ahol 58%-os páratartalom mellett 25°C volt a beállított hőmérséklet. Hat nap elteltével történt meg a törésteszt 4 db elemen. Előzetesen lemértük ezek tömegét, a száradási idő alatt kétszer is, hogy lássuk távozik-e még belőlük víz, vagy már teljes mértékben kiszáradtak. A tömegek nem változtak nagymértékben, ezért döntöttünk a teszt elvégzése mellett. Az alábbi táblázatban olvashatók a tömegmérés, illetve a törés pontos eredményei.

Törésteszt I.					
Minta	09. 26. tömeg (g)	09. 28. tömeg (g)	A (mm²)	F_{törő} (N)	megjegyzés
Ferro1	189,14	188,82	250*120	29	4mm/perc törés nem is látszódik
Ferro2	176,64	176,38	250*120	32	4mm/perc törés nem is látszódik
Ferro3	179,54	179,26	250*120	21	4mm/perc törés nem is látszódik

3. táblázat Törésteszt I.

Ezután a maradék elemünket összeragasztottuk. Először kötősorban fektettünk egymás mellé két elemet síkban, majd ezekre a receptünkkel megegyező összetételű habarcsot kentünk, illetve a fugát is tömítettük. Erre az előzetesen habarccsal bekent további két elemet kötésben fektettük futósorként. A harmadik sort 45°-os szögben ragasztottuk hasonló módszerrel.

Száradás után azt tapasztaltuk, hogy az elemek elválnak egymástól, nem ragadtak össze. Ebből azt a következtetést vontuk le, hogy a száraz elemek valószínűleg elszívták a vizet a kötőanyagunkból, ezért nem tudott az megszilárdulni és megfelelő kötést biztosítani az elemek között. A következő ragasztásnál már előre nedvesített elemekkel dolgoztunk, hogy ezt a problémát kiküszöböljük.

4.4. Az első boltív legyártása

Miután tudtuk a betonösszetételt, a ragasztáshoz a receptúrát és a technológiát, elkezdhattük a boltív kivitelezését.

Először legyártottunk 45 elemet ugyanazzal a technikával, mint a próbaelemeket. Hogy ne kössön bele a vödörbe a cement a munka során, illetve ne legyen nehéz

összekeverni az anyagot két adagban kevertük be a betont, a 4. táblázatban olvasható recept alapján. A kiszaluzás és a szárítás is a korábban leírtak alapján történt.

Az elemek elkészítését követő ötödik napon kezdtük meg a ferrocement-boltív összeragasztását. A beépítésre kerülő betonlapok tömegét a ragasztás folyamata előtt egyesével lemértük, hogy lássuk van-e eltérés a próbaelemekhez viszonyítva. Átlagos tömegük 142,88 g, vastagságuk 3-4 mm. Az tömegben való eltérés a próbaelemekhez képest abból adódhat, hogy többségében vékonyabb elemeket készítettünk, melyek tömege ebből adódóan könnyebb volt.

4.4.1. Ferrocement-boltív zsaluzat

A boltív zsaluzatát a katalán minta alapján úgy képzeltük el, hogy csak 2 mintaívre lesz szükségünk és a legyártott elemeket ezek mentén helyezzük el. Az előzetesen leírt számításaink alapján határoztuk meg annak méreteit. A zsaluzat két darab, helyszínen kimért és kivágott makrokarton ív volt, melyeket nem láttunk el diafragmákkal, ráadásul a kézi szerkesztés miatt az eredmény nem is hasonlított körívre, inkább két derékszögű háromszög a rövidebbik befogójuknál összeragasztva. A teljes zsaluzatunk ennyiből állt, vízszintes erők megtámasztására nem volt szerkezetünk.

4.4.2. Boltív megépítése

A ragasztáshoz hasonló okokból kifolyólag, három adagban kevertük be ugyanazt a habarcsreceptet, amit korábban is használtunk. Ugyanannyi anyag került így a boltívbe ragasztóként, mint az elemekbe összesen. A recept a 4. táblázatban látható, ez az alaprecept, melyhez +9% vizet adtunk, hogy folyósabb legyen, és könnyebben el lehessen simítani, ez a bedolgozás szempontjából volt nagyon fontos.

A próbaragasztás tapasztalata alapján most az elemeket előzetesen vízbe merítettük nagyjából fél- egy percig, hogy nedvesek legyenek, és így ne szívják el a habarcsból a vizet. Legelőször az alsó, kötésben lévő sor elemeit ragasztottuk a két ív mentén egymáshoz. Erre került futósorban a második réteg úgy, hogy az összes érintkező felületet bekentük habarccsal. Vizesen az elemek könnyen vághatóvá váltak sniccerrel, amely kedvező volt a legfelső, 45°-ban rakott sor készítésénél, mivel az elemeket méretre kellett szabnunk a pontos illesztés érdekében. Azonban a hosszas áztatásnak hátránya is volt, a nedves elemek már kis erő hatására széttörték a kezünkben, ezáltal az építés során hat selejtes elemünk is keletkezett. Már ekkor látszódott a hosszú nedvesítés és a papírvékony elemek problematikája, ezért arra jutottunk, hogy a továbbiakban célszerű lenne vastagabb elemeket kell alkalmazni, illetve a nedvesítést másként végezni.



17. ábra Sniccerrel vágható nedvesen



18. ábra Összeépítés



19. ábra Alsó sor



20. ábra Összeépítés



21. ábra Harmadik sor



22. ábra Elkészült bóltív

Cementhabarcs a betonbóltív ragasztásához		
1 adag: 44,18 m% (1032,35g) cement 2,65 m% mikroszilika 6,03 m% metakaolin 15,96 m% homok 25,38 m% 1,34 m% folyósító 4,45 m% perlit	2.adag: 43,95 m% (2064,7g) cement 2,64 m% mikroszilika 6 m% metakaolin 15,87 m% homok 25,8 m% víz 1,31 m% folyósító 4,43 perlit	3. adag: 44,18 m% cement 2,65 m% mikroszilika 6,03 m% metakaolin 15,96 m% homok 25,38 m% 1,34 m% folyósító 4,45 m% perlit

4. táblázat Cementhabarcs anyagösszetétel

4.4.3. Eredmények

Három nap múlva zsaluztuk ki a kész szerkezetet. Ránézésre is látszott, hogy a geometriája nem megfelelő. Önsúlyát elbírta ugyan, állékony volt, de az oldalsó megtámasztások hiányában lényegében kézzel eltörhető volt. Kudarckunkhoz számos ok vezetett: egyrészt hibás volt az ív, amelyre ráépítettük, hibás volt maga a zsalu, hiszen nem láttuk el diafragmákkal, amelyek összetartották volna a két ívet, így pontos kivitelezést biztosítva, vízszintes teherre nem volt oldalsó megtámasztásunk, összeépítés során túl nedvesek lettek az elemek, ami a szilárságuk csökkenéséhez vezetett, illetve terheléskor nem voltak még teljesen szárazok sem az elemek, sem a elemkapcsolatok, vagyis nem érhatték el teljes szilárságukat. Építés közben ugyan nagyon vékonyak találtuk az elemeket, utólag visszatekintve mégis azt a következtetést vontuk le, hogy érdemes lenne ezzel a vastagsággal tovább próbálkozni, hiszen a törés utáni vizsgálatokból az derült ki, hogy a legalsó, kötő sorban lévő elemkapcsolatok mentén ment tönkre a bóltív, nem az elemek törtek el. Ezek

alapján a tanulságok alapján új boltív elkészítésének láttunk neki, ahol az itt felmerülő problémákat igyekeztünk minél jobban megoldani.

4.5. A végső verzió

Már megszerzett tapasztalataink alapján új boltív tervezésébe és építésébe kezdtünk. Ismételten 45 elem készült a 4. táblázat receptje alapján, ezúttal 1,5-szer vastagabbra hagyva az elemeket az előző boltívhez képest. Erre azért volt szükség, hogy az elemek önmagukban is erősebbek legyenek, bár a fő hangsúlyt a köztük lévő kapcsolat megerősítésére helyeztük. Az elemek száradása után, mely ugyanúgy zajlott, mint a korábbiakban, lemértük a tömegüket. A vastagságuk növelése miatt az átlagos elemtömeg 221,21 g volt, míg vastagságuk átlagban 5,3 mm.

4.5.1. Új zsaluzat és keret

Új zsaluzatot gyártottunk. ArchiCAD-ben kiserkesztettük pontosan az ívet, majd kinyomtatva mintaként használtuk a gyártáshoz. EPS-ből kivágtuk a két 3 cm vastag ívet, amelyeket folpackkal vontuk be a könnyebb leválaszthatóság érdekében (ebben az esetben a folpack használata nem volt probléma, mert nem hagyott nyomot a már megszilárdult felületeken). Diafragmákat helyeztünk el a két elem közé (az első ív tanulságából adódóan), amelyek XPS-ből készültek. Ezeket szegekkel erősítettük az ívekhez. Egy keretet is készítettünk a vízszintes erők felvételére, ehhez 6*9-es gerendákat csavaroztunk 3-3 ponton egy 19 mm vastag faforgács laphoz vállölvnek.



23. ábra Új zsaluzat

4.5.2. Boltív megépítése

Mivel az előző boltívnel a ragasztással adódtak problémák, ezért most kipróbáltunk egy új ragasztóanyagot, a Lassersberger- Knauf Kontakt CT korrózióvédő és tapadó híd nevű gyorskötő habarcsot, azonban ez szinte azonnal megszilárdult, ezáltal nehezen bedolgozhatóvá vált és az elemek felületén is gyorsan megszáradt, így nem ragasztotta össze azokat. Ezért visszatértünk a korábbi habarcsreceptünkhöz, azzal a módosítással, hogy most több vizet adtunk hozzá. Ez elősegítette az anyag bedolgozhatóságát, illetve kisebb lehetőséget adott arra, hogyha az elemek elszívják a vizet a habarcsból az teljesen kiszárad, anélkül hogy ragasztana. A habarcsból a mostani alkalommal is ugyanannyit használtunk fel, mint az elemek legyártása során.

Az építést a kötősorral kezdtük. A nedvesítést most kevesebb ideig végeztük, az elemeket 5 másodpercig vízbe mártottuk, majd a széleiket bekentük habarccsal, a szomszédosakat összeillesztettük, úgy helyeztük a boltívra, felülről a fugákat megerősítettük. A felső két sor építésénél azonosan jártunk el: 5 mp-ig víz alatt tartottuk és minden más elemmel érintkező felületét bekentük habarccsal. A boltíven az elemeket a lefektetni kívánt helyére ecsettel kevés vizet hordtunk fel és megkentük habarccsal. A fugákat extra habarcsréteggel láttuk el. A harmadik sorban lévő elemeket a pontos illeszkedés érdekében lemértük és flexszel méretre vágtuk, majd az előző módszerrel fektettük a helyére. Az oldalsó fugákat is tömítettük, majd száradni hagytuk a boltívet.





4.5.3. Törés előkészítése

Hat napig hagytuk száradni a boltívet. Számítások alapján, ha egy elem átlagos tömege 221,21 g, ebből 36 db került a boltívbe, illetve nagyjából ugyanennyi a habarcsból is, akkor a várható tömeg $2 \cdot 36 \cdot 0,221 = 15,84$ kg. Ezt követően ki emeltük a zsaluzatból és megmértük a szerkezetet, a tényleges tömege 15,240 kg volt. Ez a különbség adódhat a habarcs becsült mennyiségéből, illetve a száradás következtében elpárolgó víz tömegéből. Ezután szeretnénk volna a boltív teherbírását vizsgálni. Ennek érdekében a kizsaluzott ívet visszahelyeztük a keretbe (oldalsó megtámasztás és alaplap), hogy az vállövként funkcionáljon és felvegye a

terhelés során keletkező vízszintes terheket. Boltív pereme és a zsaluzat között a kivitelezési pontatlanságok miatt üreg képződött, ezt a részt Rigips modellgipsszel öntöttük ki 2:1-es (gipsz:víz) bedolgozási aránnyal. Erre a megfelelő felfekvés miatt is szükség volt, hogy a teher vonal mentén adódhasson át az oldalsó megtámasztásokra. A gipszet egy napig hagytuk szilárdulni, másnap végeztük el a töréstartást. Ennek eredményeit a *IV. Eredmények* bekezdésben közöljük.

5. Referencia boltív

Készítettünk egy 3mm vastag monolit ferrocement boltívet is azért, hogy ennek teherbírását a kisélemes ferrocement boltív teherbírásával össze tudjuk hasonlítani. Mivel nem állt több perlit a rendelkezésünkre, új, perlit nélküli betonösszetételt kellett keresnünk. A tavalyi betonkenuhoz használt receptet választottuk, mert tudtuk, hogy az már egy bevált anyagösszetétel és nem különbözik sokban az általunk használt recepttől. A 5. táblázatban látható a két anyag összehasonlítása.

5.1. Gyártási folyamat

A monolit boltív készítése a kisélemes boltív és a betonkenu kivitelezésének ötvözete. A zsaluhoz készült mintaívre makrokarton lapot hajlítottunk, amelyet szögekkel erősítettünk hozzá. Referencia boltívről lévén szó, nem találtuk fontosnak, hogy az alsó fele szép legyen, így gazdaságossági szempontból csupán folpackkal vontuk be, amelyet zsaluleválasztó olajjal kentünk be. Kivágtuk az üvegszövetből a szükséges 90° és 45°-os darabokat a megfelelő méretben. Mivel ezek nem érték át a teljes ívet, így a szövetek között 40mm-es átfedéssel dolgoztunk. A 5.táblázatban látható recept kikeverése után spatulával felhordtuk a 90°-os üvegszövetre nagyjából egy milliméter vastagon, ezután betonos oldalával lefelé ráfektettük a zsalutara, makrokarton által adott görbületre. A 45°-os üvegszövetet erre fektettük fel ügyelve arra, hogy ennek a rétegnek és a 90°-os rétegnek a toldása ne egymás felé essen. A fedőréteget szintén egy milliméter vastagon kentük a tetejére, úgy hogy az üvegszövetet mindenhol elfedje.

	Tavalyi IV. (megépült) m%	idei m%	Tavalyi III. m%
cement	33,85	42,76	32,2
szilika	4,24	4,04	4,08
metakaolin	-	6,36	-
homok	48,96	15,44	48,14
víz	11,96	25,74	15,34

folyósító	0,99	4,29	0,24
perlit	-	1,98	-

5. táblázat Anyagösszetétel

5.2. Törés

Gyártás után három napra kívántuk töréstesztnek alávetni a monolit boltívünket. A 3mm-es vastagságának köszönhetően ennyi száradási idő elegendő bizonyult. Könnyen eltávolítható volt a zsaluívről. Amikor a törés előkészítéseként megpróbáltuk visszatenni a keretre, hogy az előzőekhez hasonlóan begipszeljük az oldalsó támaszokhoz, azt tapasztaltuk, hogy az ív nem elég merev ahhoz, hogy ekkora fesztávon megálljon, összecsziklik a közepén. Egy kisebb sugarú ívben azonban az ív működött, anélkül hogy a szerkezeten repedések látszottak volna, nagyon hajlékony volt. Többször próbáltuk az ívet eredeti magasságba emelni, azonban mindig máshol horpadt be és a többszöri ismétlés hatására elkezdett helyenként berepedezni, majd tönkre is ment. Végző tanulságként azt vontuk le, hogy a 3 mm vastag szerkezet nem volt eléggé merev ahhoz, hogy ekkora fesztávot áthidaljon, ezért nem lehetett referenciaként használni a kisselemes ferrocement ívhez.



24. ábra Monolit ív horpadása

6. Kíséletek a vályogboltív létrehozására

A ferrocement mellett vályogból is létre szeretnénk hozni egy boltívet, hogy megtudjuk, alkalmas-e ez az anyag teherhordó térlefedés létrehozására, illetve, hogy össze tudjuk hasonlítani a két, merőben eltérő anyag viselkedését.

6.1. A recept

A vályog esetében az anyagösszetétel meghatározásával kezdtük a folyamatot. Ahogyan azonban már a dolgozatunk II.2. fejezetében kitértünk rá, a vályog egy rendkívül összetett anyag és nincs pontos meghatározás megfelelő összetételre, illetve nagyban függ az anyagminőség attól, hogy milyen körülmények között keletkezett a fő alkotóeleme, az agyag. Ezért úgy döntöttünk, hogy magával az anyagösszetétellel nem kísérletezünk, hanem agyagporhoz fogunk tapasztalati úton megfelelő mennyiségű vizet adni, további összetevőket nem használunk a szerkezeti erősítést kivéve, amire viszont többféle kísérletet is teszünk. Az anyagot mellyel dolgozunk a továbbiakban is vályognak hívjuk, annak ellenére, hogy az agyag megnevezés is helytálló lenne.

Elsősorban természetes erősítésekkel próbálkoztunk, a környezettudatosságot szem előtt tartva, de kipróbáltuk például az üvegszövetet is, hogy összehasonlíthassuk a ferrocement mintáinkkal. Használtunk rafiát, jutaszövetet, kenderkócot, illetve a Polimertechnika Tanszék által felajánlott bazaltszövetet is.

6.2. Vályogelemek készítésének általános metodikája

Az agyagporból kemény gyurma állagú masszát kevertünk ki víz hozzáadásával, melynek mennyiségét tapasztalati úton határoztuk meg, a fő szempont az volt, hogy az anyaggal könnyen tudjunk dolgozni. A természetes erősítőanyagokat, melyeket korábban felváltunk (a jutát és a bazaltszövetet 12x25 cm-es méretűre, 90°-os és 45°-os darabokat, a kenderkócot és a rafiát 1-1,5 cm-es szálakra) előző nap beáztattuk, a könnyebb bedolgozhatóság miatt és abból a célból, hogy ne szívják el a vizet az agyagtól.

A készítés módszertana a szövetes (juta, bazalt, üveg) darabok esetén: keretzsaruba raktunk annyi anyagot, hogy azt vizes spatulával egyenletesen eloszlatva kitöltse a rendelkezésre álló teret, ügyelve arra, hogy ne legyen túl vastag sem. A szöveteket használat előtt a vízből kiszedve kinyomkodtunk, úgy hogy még nedves maradjon, majd először a 90°-ban kivágott szövet került a vékony vályogrétegre. Mielőtt a 45°-os réteget ráhelyeztük volna minimális mennyiségű vályogot helyeztünk a két réteg közé. Ezután a szövet felső felszínét is bekentük vályoggal, amelyet szintén elsimítottunk, úgy hogy a szövet ne látszódjon. Bedolgozás során sokszor nedvesítettük meg a kezünket és a spatulát, ellenkező esetben nehéz volt dolgozni az anyaggal: hozzáragadt a kezünkhöz, levált a szövetről. Az így keletkező elemek az erősítés anyagától függően 5-8 mm vastagságúak voltak (ezeket anyagonként a III. 6.3-as alfejezetben részletezzük).

A készítés módszertana a szálás (kenderkóc, rafia) darabok esetén: erősítést adó összevágott szálakat nedves állapotban már a bekeveréskor hozzáadtuk a vályoghoz, így szinte homogén anyagként kengettük bele a zsaluzat celláiba. Nedvesített spatulával dolgoztuk egyenletesre a felületét, vastagságuk körülbelül 5-6 mm volt.

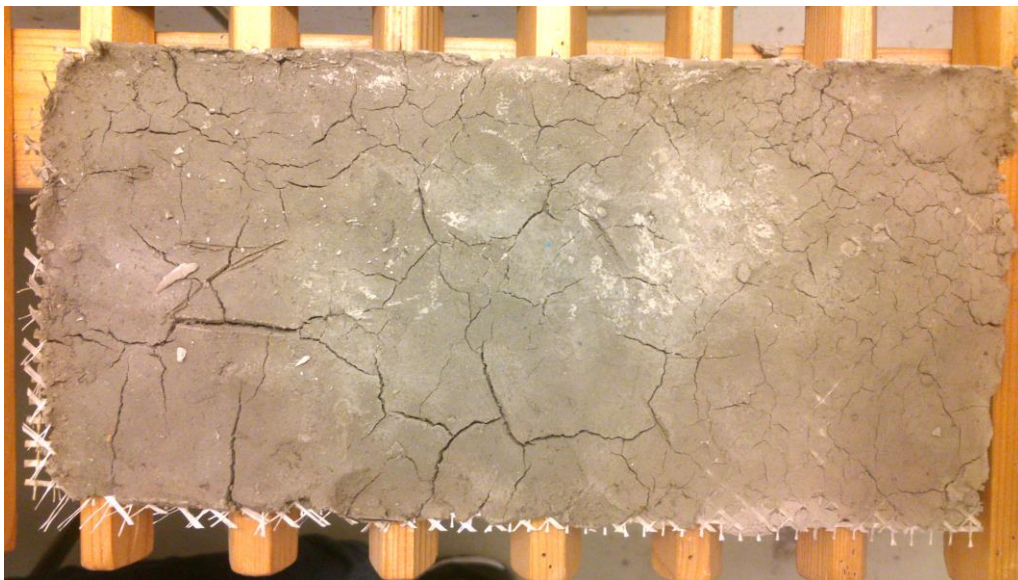
Erősítés nélküli vályogelemeket is készítettünk, hogy összevethessük az erősítéssel készülő lapokkal. Az anyagot ebben az esetben is közvetlenül a zsaluzatba kentük bele, ott simítottuk el nedvesített spatulával, 5-6 mm vastagságban.

A következő fejezetben pontos adatokkal mutatjuk be az elkészült próbalemezeket.

6.3. Próbaelemek

Legyártottunk 5 féle erősítésű próbaelemet, illetve egy erősítés nélkülit, azért hogy megnézzük a kivitelezhetőséget mindegyik esetben, valamint törésvizsgálatok szerettük volna alávetni, hogy megtudjuk melyik fajtával érdemes dolgoznunk, ha teherbíró szerkezetet szeretnénk létrehozni vályogból.

A 6. táblázat mutatja, hogy milyen anyagösszetétellel dolgoztunk, mi volt a szerkezeti erősítés, illetve hány darab elem készült abból a mintából. A kivitelezés során, mivel még nem dolgoztunk korábban vályoggal, kísérleti módon adagoltuk a vizet az agyagporhoz. Az első pár minta után megtaláltuk azt a megfelelő arányt, amivel jó állagú vályogot kaptunk a bedolgozáshoz. A továbbiakban ezzel az aránnyal kevertük ki a többi mintát. A 7. táblázatban pedig az erősítések alapján csoportosítva fogalmazunk meg általános tapasztalatokat, amelyeket a kivitelezés során szereztünk.



25. ábra Üvegszövetes vályog (N)



26. ábra Etört jutaszövetes

Kísérleti vályogreceptúrák				
Jelzés	Víz (m%)	Agyag (m%) és (gramban)	Erősítő anyag	Összesen készített elemek száma
I.	18,6 (+minimális a bedolgozhatósághoz)	81,4 (350)	1 réteg juta (90°)	1
II.	18,6 (+sok a bedolgozáshoz)	81,4 (350)	1 réteg juta (90°)	1
III.	23,9 (+minimális a bedolgozhatósághoz)	76,08 (350)	1 réteg juta (90°)	2
IV.	13,8 (+minimális a bedolgozhatósághoz)	86,2 (250)	kenderkóc	4
V.	13,57	86,4 (250)	40 gr vizes raffia	4
VI.	23,08	76,92 (250)	nincs	2
A/ IIA	21,57	78,43 (800)	2 irányú juta, szövetek között semmi	3
B/ IIB	21,57	78,43 (800)	2 irányú juta, szövetek között extra agyag	3
N	23,07	76,93 (500)	2 irányú üvegszövet	2
VII.	25,6	74,4 (250)	2 irányú bazaltszövet	4

6. táblázat Vályogreceptek

Erősítések, melyekkel kísérleteztünk			
megnevezés	mintadarab jelzése	készített mennyiség	tapasztalat
jutaszövet 1 rétegben	I. II. III.	4	nehéz bedolgozás, szövet szálakra bomlik
jutaszövet 2 rétegben	A, B, IIA, IIB	4	nehéz bedolgozás, szövet szálakra bomlik vastag elemméret (akár 1 cm),
kenderkóc	IV.	4	könnyű bedolgozás, szálak elvegyülnek
raffia	V.	4	közepesen nehéz bedolgozás, szálak kilógnak
erősítés nélkül	VI.	2	legkönnyebb bedolgozás
bazaltszövet	VII.	4	könnyű bedolgozás
üvegszövet	N	2	könnyű bedolgozás

7. táblázat Erősítések szerint csoportosítva

Az összes elemet egy nap után távolítottuk el a zsaluzatból, majd a laboratórium szárítóhelységébe vittük, ahol egy rácsra felhelyezve 58%-os páratartalom mellett 25°C-on hagytuk őket tovább száradni. A kizsaluzásnál már megfigyelhető volt, hogy az elemek jelentősen zsugorodtak, főleg a hosszanti irányban, a rövidebb oldalon nem volt észrevehető jelentős változás. Ez nem okozott számunkra meglepetést, hiszen a vályog meghatározó tulajdonsága a zsugorodás. Egyes elemek a zsaluból való eltávolítás során tönkrementek, az I. jelzésű elem kettétört, illetve egy V. elem közepén berepedt.

A vályog elemeket lemértük a 4. napon, hogy összevethessük majd a teljesen kiszáradt állapotban lévő tömegükkel. Ez az állapot a kivitelezéstől számított legkésőbb 6. napra bekövetkezett, ekkor tulajdonságaikat újra megfigyeltük. A jutával erősített elemek közül azok, amelyekben csak egyetlen réteg szövet volt hullámos felületűek voltak, illetve tapintásra is kis teherbírással rendelkeztek. A dupla rétegben használt jutás elemeknél ez a probléma már nem állt fent, azonban ezek jóval vastagabbak voltak, akár 8-10 mm is a szövetek közti plusz anyag miatt. Az üvegszövetes és bazaltszövetes elemeknél azt figyelhettük meg, hogy a zsugorodás következtében a vályog a szövetek felületén berepedezett, mivel azok nem követték az agyag alakváltozását. Szinte lepergett az anyag a szövetekről, ezért ezeket töréstesztnek sem vetettük alá. A rafiás és a kenderkócos elemeken különösebb elváltozás nem volt tapasztalható a zsugorodást kivéve. Az erősítés nélküli vályoglapok felülete volt a legsimább, a könnyű bedolgozhatóság miatt ezeket szépre lehetett elsimítani a nedves spatulával.

Ezekből a megfigyelésekből azt a tapasztalatot vontuk le, hogy a vályog nem alkalmazható szövetes erősítéssel, mert azok nem tudják követni az agyag jelentős zsugorodását, ezáltal a felületen nagy repedéseket okozva, vagy teljesen kettérepesztve az anyagot. továbbra is tartom, hogy erről lehetne többet, ez fontos és izgalmas felismerés. A szálerősítés ezzel szemben nem okozott ilyen károkat az elemeken így már a törésteszt előtt látszott, hogy azokkal lesz érdemes tovább folytatnunk a kutatásokat. Mielőtt maximális

törőerőt mértünk volna a testeken lemértük azok tömegét és hossz- és keresztmetszeti méreteit, hogy lássuk milyen mértékű volt a zsugorodás, illetve, hogy mennyit száradtak még a két nap alatt. Ezek az értékek a 8. táblázatban olvashatók.

6.4. Vályoglapok törése

Miután a vályogelemek tulajdonságait lejegyeztük, töréstesztnek vetettük alá őket, hogy megtudjuk melyik képes felvenni a legnagyobb törőerő értéket. A teszt adatai a 8. táblázatban találhatóak, míg a törőgép pontos adatai a mellékletben szerepelnek.

Vályog elemek örészesztje					
minta	09. 26. tömeg (g)	09. 28. tömeg (g)	A (cm)	F_{törő} (N)	megjegyzés
I. (juta)	190,66	190,34	24,3*12	-	alapból törött
II. (juta)	222,52	221,90	24*11,7	-	annyira puha, hogy nem lehetett törni
III.1. (juta)	249,02	248,38	23,7*11,6	-	túl hullámos a gép számára
III.2. (juta)	220,52	219,86	23,8*11,6	14	2mm/perc
A (juta)	326,96	324,6	24*11,5	30	4mm/perc
B (juta)	438,24	430,38	24*11,5	23	4mm/perc
IV.1. (kenderkóc)	252,58	252,6	23,8*11,3	12	4mm/perc
IV.2. (kenderkóc)	225,00	224,5	23,7*11,4	13	4mm/perc
IV.3. (kenderkóc)	232,04	231,44	23,6*11,9	11	4mm/perc
IV.4. (kenderkóc)	257,5	256,82	23,6*11,3	18	4mm/perc
V.1. (raffia)	250,02	249,44	23,5*11,2	5	4mm/perc
V.2. (raffia)	258,88	258,12	23,5*11,1	8	4mm/perc repedés majdnem észrevétlen

V.3. (raffia)	261,70	261,14	23,5*11,1	-	4mm/perc bemérés előtt is törött volt már
V.4. (raffia)	254,08	523,34	23,8*11,5	6	4mm/perc
VI.1. (sima)	235,92	235,52	23*11,4	12	4mm/perc totál kettétört
VI.2. (sima)	239,92	239,52	23,1*11,6	16	4mm/perc totál kettétört

8. táblázat Vályog elemek töréstesztje

A törés során mért legnagyobb értékek egyértelműen a kétrétegű jutaszövet-erősítésű vályogelemek esetében volt. Azonban a terhelés során megfigyelve az elemeket egyértelművé vált számunkra, hogy a vékony agyagréteg, ami a szöveten volt, szinte azonnal eltört és kizárólag a szövet dolgozott tovább ebben az esetben, ezért ezeket a mérési eredményeket nem tartjuk mérvadónak. Kivitelezés során ezzel az összetétellel volt a legnehezebb dolgozni, a szövet szétesett, az agyaggal nehéz volt összedolgozni.

A kenderkóccal erősített elemek teherbírása átlagosnak mért, kivitelezés során könnyen bedolgozható.

A rafiával erősített vályoglap bírta a legkisebb terhelést, megmunkálása nehézkes, időigényes.

Az erősítés nélküli vályog teherbírása egyezik a kenderkócos elemekével, azonban fontos szempont, hogy ez ridegen tört.

A törés adataiból, a kivitelezés nehézségeiből, illetve a száradás után kialakult tulajdonságokból levont következtetések alapján úgy döntöttünk, hogy a kenderkóccal erősített vályoggal fogunk tovább dolgozni.



27. ábra Jutaszövetes elem törés közben

6.5. A vályogboltív készítése

6.5.1. Elemek legyártása és vizsgálatuk

A töréstesztek után kiválasztottuk a boltívhez használandó kenderkócos erősítést, ezáltal meghatározva a pontos összetételt és elkezdtük legyártani a 45 db végleges elemet. Négy adagban kevertük be a vályogot, hogy ne száradjon meg túlságosan, egyszerűbben lehessen keverni és könnyű legyen vele dolgozni. A negyedik adag anyaghoz egy másik csomagból került agyagpor, mivel amit addig használtunk elfogyott. Az új agyagpor ugyan attól a gyártótól származik, azonban az ebből készült elemek sárgább színűek voltak és másnapra nedvesebbek maradtak, így a kiszaluzást csak harmadnap végeztük el. A kivitelezésből származó pontatlanságokat még snicerrel tudtuk korrigálni ebben a félig nedves állapotban. Ezután a szárítóba helyeztük az elemeket.

Végleges recept a vályogelemekhez (45 db)		
Víz (m%)	Agyag (m%) és (gramban)	kenderkóc szárazon(m%)
0,077	99,913 (12024g)	0,01

9. táblázat *Végleges vályogrecept*

Hét napon keresztül száradtak a vályogelemek, zt követően lemértük az összes elem befoglaló méretét, hogy a zsugorodásukat meg tudjuk vizsgálni, ezen felül a tömegüket is. Átlagos területük 238,9*116,1 mm-nek adódott, tömegük 247,02 grammnak. Megállapítható tehát, hogy 12 mm alakváltozás figyelhető meg a hosszanti oldalon, mely 5%-os, valamint 4 mm rövidülés keletkezik a keresztirányú oldalon, ami 3,3%-os változást jelent. Ezekkel az értékekkel a kivitelezés során számolni kell.

6.5.2. Boltív megépítése

Miután megszáradtak a vályoglapok megkezdődhetett ezek boltívvé ragasztása. Ebben az esetben is a ferrocementes boltívénél alkalmazott zsaluzatot használtuk, ugyanazokkal a paraméterekkel. A ferrocement boltívénél 12 db kötő elem került a legalsó sorba, míg habarcs nélkül a zsalura helyezve a vályog elemekből 13 fért fel, ennek oka az lapok 3,3%-os zsugorodása. Az elemek összeragasztásához hasonlóan a korábban alkalmazott technikához, ugyanazt az összetételt alkalmaztuk, mint az elemek legyártása esetében, csak több vizet adtunk a keverékhez, hogy azt habarcsként tudjuk használni. Kenderkócot is alkalmaztunk a biztosabb elemkapcsolatok érdekében. Agyaghabarcs recept: 1000 g agyag, 220 g víz, 88 g vizesen mért kenderkóc.

A technológia, amivel a boltívet építettük megegyezett a ferrocementnél alkalmazottal, csupán az volt a különbség, hogy a vályoglapokat nem merítettük víz alá, mivel a vályognak legjellemzőbb tulajdonsága, hogy nem bírja a fokozott nedvességet. Ezért csak ecsetvonással nedvesítettük a száraz elemeket, hogy a habarcs kötését biztosítsuk. A fugák miatt a boltív első sorába 12,5 elem került. Nedvesítés után a lapok sniccerrel vághatóvá váltak, azonban vigyáznunk kellett, mert nedvesített állapotban sokkal könnyebben törtek. A kivitelezésben azonban nem csak ez okozott nehézséget, a kenderkóc szálak is nehezen kezelhetővé váltak a spatula használata nélkül, mivel ennél az összeépítésnél kizárólag kézzel dolgoztunk a nagyobb óvatosság érdekében. Mire a harmadik sorhoz értünk már egyre több habarcsot kellett használnunk a görbület és az elemek pontatlan kivitelezése miatt kialakuló hézagok kitöltésére. Egyes elemek megrepedtek miközben felhordtuk rájuk a habarcsot, ezeket félre tettük, nem alkalmaztuk a boltívben. Azt tapasztaltuk, hogy a habarcs gyorsan szárad, nagyon erős kapcsolatot kialakítva az elemek között. A vályoglapok közötti fugákat kitöltöttük, hogy elemhézag mentén ne menjen tönkre a boltívünk.

6.5.3. Kizsaluzás tapasztalatai

A vályogelemekből összeragasztott boltívünket négy nap elteltével távolítottuk el a zsaluzatról. Még nem volt teljesen kiszáradt állapotában, ezért szerettük volna áthelyezni a

szárítóhelységbe, hogy ott jobb szellőzést biztosítsunk neki. Kiemelés közben a legalsó sorban egy középen lévő elemkapcsolatnál azonban megrepedt, itt és egyéb szemmel látható repedés helyén agyaghabarccsal megerősítettük és a szárítóba helyeztük, ahol az élére fordítva száradt, mivel a teljes száradás előtt az önsúlyát még nem tudta hordani, nem volt állékony a szerkezet. Valószínűleg problémát jelentett a túl korai mozgatás, mivel a még félig nedves szerkezet könnyen formálható, ezért még nem elérve a teljes szilárdságát a szerkezet ívén és alakján az egyszerű kiemeléssel is módosíthattunk. Ez különösen akkor lett szembetűnő probléma, mikor száradás után a boltívünket visszahelyeztük a zsaluzatba, ekkor már önördő szerkezetként megállt, azonban mellé helyezve a ferrocement ívünket látszott, hogy a vályog íven erős torzulás ment végbe, nem tartotta a mintaív által meghatározott formát, meggyógyott laposabb lett. Ennek ellenére mindenképp teherbírasi próbát akartunk végezni a szerkezeten.

6.5.4. Törésteszt előkészítése

Az összeragasztástól számított nyolcadik napon végeztük el a boltív terhelését, ekkor a tömege 17,150 kg volt, ami majdnem két kilóval nehezebb, mint a ferrocement ív. Ez a különbség valószínűleg az elemek vastagságából adódik, mivel a vályog esetében nem tudtunk olyan vékony elemméretet elérni, mint az üvegszövetes betonnál. Annak érdekében, hogy a vályogos boltívünket terhelhessünk hasonlóan jártunk el, mint a másik ív esetében. A terheléshez a keretben hagytuk, hogy az oldalsó támaszok felvehessék a vízszintes erőket, a boltív és a zsalu csatlakozásánál lévő hézagot modellgipszszel töltöttük ki, hogy azok érintkezése teljes felületen történjen. A gipsz ebben az esetben is egy napig szilárdult, ezután végeztük el a töréstesztet, melynek eredményeit a *IV. Eredmények* bekezdésben közöljük.

IV. Eredmény, értékelés



28. ábra Vályogboltív



29. ábra Ferrocement boltív tönkremenetele

A boltíveket két lépcsőben kívántuk terhelési próba alá vetni. Először szeretnénk volna több ponton terhelni, azzal hogy mi magunk ráállunk, ez után pedig a törőgépre akartuk helyezni, hogy a teherbírásáról pontos adatokat kaphassunk. Az oldalnyomás felvételére az íveket minden esetben a fent bemutatott keretben terheltük.

Először a beton elemes boltívet teszteltük. Miután az egyikünk már ráállt a boltívre és különösebb alakváltozás nem volt tapasztalható, ráállt a másikunk is, így már ketten terheltük a boltívet. Jelentős alakváltozás ekkor sem mutatkozott, súlyunkat igyekeztünk nagyjából az ív közepére összpontosítani, így hozzávetőlegesen 1100 N erővel nehezedtünk rá. A lehajlás nagyjából 1-1,5 cm volt. Miután leléptünk róla visszaállt eredeti állapotába, nem volt maradandó alakváltozás. Ezt követően a törőhelységbe vittük, ahol szintén a keretben hagyva a törőgépre helyeztük, két oldalt jól megtámasztva, hogy az erők megfelelően átadódhassanak. Az ív közepét bejelölve és a gépet erre a felezőpontra beállítva megkezdtük az egy ponton történő terhelést. A kezdeti törési sebesség 5 mm/perc volt. A végső erő melyet még tönkremenetel előtt fel tudott venni 960,8 N volt. Az ehhez tartozó lehajlási érték 20,63 mm volt. Ekkor hallottuk, hogy a szerkezet elkezd repedezni, vélhetően és utólagos megfigyelés alapján a szerkezeti elemek kapcsolata ment tönkre. Mire elértük a 35,76 mm-es lehajlást a szerkezet már csak 108,6 N erőt volt képes felvenni, a tönkremenetel a vállóvnél szétváló elemkapcsolatból szabad szemmel is látható volt. Ennek ellenére a szerkezet állva maradt, de súlyos deformációt szenvedett. A két terhelés között mérhető jelentős, körülbelül 140 N különbséget valószínűleg az okozhatta, hogy az első esetben nem egyetlen koncentrált teher hatott a boltívünkre, hanem nagyjából 4 ponton adódott át a teljes teher.

Ugyanezeket a lépéseket szeretnénk volna megtenni a vályogboltív kapcsán is. Azonban már ránézésre is látszott, hogy az ív saját önsúlyától is torzult, illetve, hogy sokkal kisebb teherbírásra számíthatunk a vályog esetében. Óvatosan kezdtük terhelni oly módon, hogy az egyikünk ráállt nagyjából az ív közepén, de alig helyezte testsúlyának kis százalékát a boltívre, az nem bírta el ezt a súlyt és a terhelés helyénél gyakorlatilag kettétört. Kiszedtük a zsáliból, hogy jobban megvizsgálhassuk a tönkremenetel okát és azt tapasztaltuk, hogy a kapcsolatok a beton boltívhez képest sokkal erősebbek voltak, azonban az hogy egy elem repedt ketté arra utal, hogy jóval gyengébbek az elemek. Szintén problémát okozhatott a

vállöveknél való felvizesedés. Valószínűleg a vályog elszívta a gipszből a vizet, ezáltal azon a két vonalon ahol letámaszkodik meggyengült a szerkezet, nem volt teljes a szilárdsága.

A kutatásunk elején magunk számára kitűzött célt, miszerint minél vékonyabb térlefedő szerkezetet hozunk létre abszolvtuk, mivel a 3 rétegű katalán boltozat eredeti 6-12 cm-es vastagságát sikerült a felére/harmadára, 3 cm-re redukálnunk az üvegszövet erősítésű betonboltív esetében. Kísérleteinket a vályog esetében is sikeresnek értékeljük, a hagyományos vályogépítészetben ennél sokkal vastagabb szerkezeteket alkalmaznak. A tapasztalataink azt mutatják, hogy van értelme a vályoggal folytatott vizsgálatnak a továbbiakban.

V. összegzés

Feladatunknak tűztük ki, hogy ferrocementből és agyagból olyan katalán mintára épülő boltíveket hozunk létre melyek az eddig létező boltozatok vastagságának töredéke. Ehhez először elmerültünk a szakirodalomban, tanulmányoztuk külön-külön a két anyagot. A ferrocement esetében Nervi munkássága volt mérvadó, valamint a textilbeton alkalmazásának lehetőségeiről is tájékozódunk. A vályog esetében megismerkedtünk először az anyaggal, illetve esettanulmányokat néztünk a vályogépítészetről. A katalán boltozatok technológiáját tanulmányoztuk, illetve külföldi példákat kerestünk ennek a szerkezetnek az alkalmazására. Miután kellő adatot gyűjtöttünk ahhoz, hogy célirányosan elkezdhesünk kísérletezni megkezdtük a laboratóriumi munkánkat.

A ferrocement esetében a ragasztóanyag megválasztásához végeztünk kísérleteket, mivel az anyagrecept már számunkra ismert volt. A boltív összeépítésénél alkalmaztuk először azt a tudást, amelyet a szakirodalomból megszereztünk. Első kísérletünk erre nem volt sikeres, ezeknek a tapasztalatoknak a birtokában módosítottunk a módszerünkön. Végül egy teherbíró ferrocement elemekből felépülő boltívet sikerült létrehozunk.

Referenciaként létre hoztunk egy monolit ferrocement ívet is, melyet szerkezeti vékonysága miatti merevség hiányában nem tudunk a kívánt módon alkalmazni és a kiselemes ívvel összehasonlítani

A vályognál kísérleteztünk az erősítéssel, hogy minél teherbíróbb szerkezetet hozhassunk létre. Összesen 5 fajta erősítést próbáltunk ki, ezek a következők: rafia, kenderkóc, juta, bazaltszövet és üvegszövet. A kenderkóc erősítés bizonyult a legmegfelelőbbnek a további kísérleteinkhez. Legyártottuk a szükséges számú elemeket, azonban mivel ezzel az anyaggal még nem voltak korábbi tapasztalataink a kivitelezés során a kísérleti tapasztalatokra hagyatkoztunk. A boltív összeépítése során ugyanazt a metodikát használtuk, mint a ferrocement esetében. Végeredményként egy önhordó szerkezetet hoztunk létre, rendkívül vékony vastagsággal, mely teherbírása azonban nem volt kielégítő, minimális terhelése tönkrement.

A VI. fejezetben javaslatokat teszünk a kísérletek során fellépő problémák kiküszöbölésére, illetve kutatásaink további lépéseire.

VI. Kutatás továbbélése

Ferrocement

Eredményeink azt bizonyítják, hogy üvegszövet erősítésű betonból létrehozható teherbíró kiselemes boltozat, akár 3 cm vastagság alatt (feszítáv függvénye lehet). Ezáltal nagyban csökkentjük az anyagfelhasználás mennyiségét, amely gazdaságossági és környezetvédelmi szempontból is előnyös. Fontos továbbá, hogy kivitelezése egyszerű, illetve nincs szükség teljes felületen alátámasztott zsaluzatra, elég egy mintaív a megépítéshez.

A 3 cm-es vastagsággal így is felére csökkent az általunk ismert legvékonyabb, 3 rétegből létrehozott katalán boltozat mérete, de az anyaggal való munkánk során kialakult véleményünk alapján még tovább csökkenthető lenne ez a méret, szeretnénk megtalálni a minimális elem-ragasztás vastagságot. Mivel a boltív az elemkapcsolatok mentén ment tönkre, ezért további kutatások fő irányvonala az elemek megfelelő összeragasztásának lehetőségeinek keresése, akár különböző habarcsreceptekkel, vagy akár eltérő anyag használatával. A jövőben vizsgálni szeretnénk az ív geometriájának hatását a vastagságra. Jelen kutatásban a legegyszerűbben kiszerezhető körívvel dolgoztunk, de a nyomott boltív esetében a nyomásvonal alak megtalálása lenne optimális.

Vályog

Mivel a vályogboltívünk nem hozta meg a kívánt eredményt további vizsgálatokra és kutatásra van szükség az elemek összetételét tekintve is. Többféle erősítő anyaggal érdemes még kísérletezni, illetve az agyagporhoz is lehetne olyan adalékanyagokat adni, mellyel nagyobb szilárdságot lehet elérni a vályog esetében. élszerű lehet tovább az elemek vastagságát kis mértékben növelni, ezzel a szerkezet teherbírását javítani.. Fontos szempont az elemek legyártása során a pontosabb kivitelezés, hogy egyenletes vastagságú elemek készüljenek, illetve a kiszaluzási-szárítási folyamatnál az elemek még kissé nedves állapotban ne torzuljanak. A száradási időt két munkafolyamat között mindenképpen olyan hosszúra kell hagyni, hogy teljesen mértékben kiszáradjanak az elemek.

VII. Hivatkozások

[1]:Mokk László (1961): *Helyszíni előregyártás*. Műszaki Könyvkiadó.MEgyasszay Péter Budapest

[2]:N. Rogers, Ernesto (1957): *The works of Pier Luigi Nervi*. The Architectural Press. London

[3]Mednyasszay Péter, Novák Ágnes (2006): *Föld- és szalmaépítésze*. Terc. Budapest

Michael H. Ramage, John Ochsendorf, Peter Rich, James K. Bellamy, Philippe Block (2000): *Design and Construction of the Mapungubwe National Park Interpretive Centre, South Africa*. ATDF JOURNAL Volume 7, Issue 1/2 2010 pp. 14-23.

Michael H. RAMAGE, John A. OCHSENDORF, Peter RICH (2009). *Sustainable Shells:New African vaults built with soil-cement tiles*. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia

JAN LUGOWSKI (2013). *Ferrocement Super-Insulated Shell House Design and Construction*. Master's Degree Project in Energy Technology Stockholm, Sweden

S.N. Krivoshapko¹ , Christian A. Bock Hyeng^{2,*} & I.A. Mamieva (2014). *CHRONOLOGY OF ERECTION OF THE EARLIEST REINFORCED CONCRETE SHELLS*.

C. Greco. *The „Ferro-Cemento” of Pier Luigi Nervi The new material and first experimental building*. University of Rome „Tor Vegata”. Italy

<https://www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/Aktuell/Pressemitteilungen/April/~hzxz/Neuer-Pavillon-aus-Textilbeton/>

http://www.uah.edu/student_life/organizations/ASCE/FortheRecord/1848record.htm

<http://concretecanoe.org/index.htm>