



Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

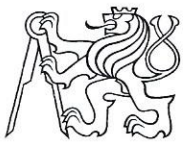
Bakalářská práce

Možnost využití tradičních kotev v tenkých deskách z textilního betonu

Jakub Hájek

Květen 2019

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Vlach



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hájek Jméno: Jakub Osobní číslo: 422174
Zadávatel katedra: 124 Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Možnost využití tradičních kotev v tenkých deskách z textilního betonu
Název bakalářské práce anglicky: The possible use of traditional anchors in thin plates of textile reinforced concrete

Pokyny pro vypracování:


Rešerše na způsoby zkoušení kotevních prvků (transportních kotev) v betonu, rešerše současného stavu použití kotevních prvků v elementech z textilního betonu (TRC), návrh a provedení zkoušky únosnosti kotvy, návrh případných opatření a vyhodnocení vhodnosti aplikace kotevních prvků do TRC.


Seznam doporučené literatury:

AÏTCIN, Pierre-Claude. High performance concrete. CRC press, 1998.
BRAMESHUBER, Wolfgang (ed.). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. RILEM publications, 2006.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Vlach

Datum zadání bakalářské práce: 19. 2. 2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 26. 5. 2019
Údaj uveďte v souladu


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

19. 2. 2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma "Možnost využití tradičních kotev v tenkých deskách z textilního betonu" vypracoval samostatně za odborného vedení vedoucího práce Ing. Tomáše Vlacha a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v seznamu použité literatury.

V Praze, 25. května 2019

.....
Jakub Hájek



Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem kteří mi pomohli při zpracování bakalářské práce. Ing. Tomáši Vlachovi děkuji za rady a pomoc při návrhu, přípravě a betonáži experimentu a za jeho trpělivost při zpracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Pavlu Kokešovi za jeho ochotu při odzkoušení vzorků. Za pomoc při betonáži vzorků také děkuji Ing. Jakubovi Řepkovi. Nakonec bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala během celého mého bakalářského studia na fakultě.

Abstract

The behaviour of load bearing anchors in subtile concrete elements with textile reinforcement is not very well known and proved yet. Thickness of such concrete element can be designed only in a few centimeters. This is possible thanks to non-corroding reinforcement materials from e.g. carbon or glass which allow to reduce the thickness of cover layer just to a few milimeters. The problem is that there is no suitable standard regulation today which would describe design of these thin elements. There were prepared and tested 40 mm thick concrete elements with carbon fibre reinforcement in this work. Two types of anchors were used - threaded transport anchor with straight end and threaded sleeve with transverse opening through which the bent reinforcement has been placed. Two types of tests were executed on these elements with anchors - tension and shear test. Testing elements where anchors were loaded by axial load in tension broke due to material failure of an anchor. Testing elements where anchors were loaded by shear broke in a concrete surrounding anchors. There were created and tested adjustments of surroundings of anchors to strenghted concrete element when imposed to shear load. This additional reinforcement increased strength and toughness of the element.

Keywords: anchors; textile-reinforced concrete; TRC; UHPC

Abstrakt

Chování transportních kotev v subtilních betonových prvcích vyztužených s textilní výztuží není v současné době dostatečně známo a ověřeno. Tloušťka takového betonového prvku může být pouze v řádu jednotek centimetrů. To je umožněno nekorodující výztuží z uhlíku či skla, což umožňuje ztenčit krycí vrstvu na tloušťku v řádech milimetrů. Problém je, že v dnešní době neexistuje vhodná norma, která by se věnovala takto tenkým prvkům. Tato práce byla zaměřena na přípravu a experimentální ověření 40 mm tlustých betonových desek vyztužených uhlíkovou výztuží. Byly použity dva typy kotev - závitová přepravní kotva s rovným koncem a závitové pouzdro s příčným otvorem, kterým byla protažena ohnutá výztuž. Na těchto kotvách v deskách byly provedeny zkoušky v tahu a smyku. U vzorků zatížených tahem se kotva porušila dříve v tahu, než došlo k porušení betonu. U vzorků, kde byla kotva zatížena smykem, došlo k porušení betonu v okolí kotvy. Pro vzorky zatížené smykem bylo následně navrženo opatření, které pomohlo prostor kolem kotvy vyztuzit a tím zvýšit pevnost a tuhost prvku.

Klíčová slova: kotvy; beton s textilní výztuží; TRC; UHPC

Použité zkratky

CEN	Comité Européen de Normalisation - Evropský výbor pro normalizaci
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
ETAG	European Technical Approval Guidelines
FIB	Fédération Internationale du Béton - Mezinárodní organizace pro beton
HPC	High Performance Concrete - Vysokohodnotný beton
LCA	Life Cycle Assessment - Posuzování životního cyklu
OETA	European Organisation for Technical Assessment - Evropská organizace pro technická schválení
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems, and Structures
TRC	Textile-Reinforced Concrete - Beton s textilní výztuží
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
UHPC	Ultra-High Performace Concrete - Ultra-vysokohodnotný beton
UHPRFC	Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete - Ultra-vysokohodnotný beton s rozptýlenou výztuží

Použité symboly

γ	Tíha betonu
ρ	Objemová hmotnost
$\psi_{ec,N}$	Součinitel zohledňující přítomnost více kotev
$\psi_{re,N}$	Součinitel zohledňující vyztužení
$\psi_{s,N}$	Součinitel zohledňující blízké okraje vzorku u kotvy

A_c	Plocha vzorku, na kterou působí zatížení
$A_{c,N}$	Plocha dosahu kužele na povrchu vzorku
A_s	Plocha výztuže kotvy
b	Šířka
c_{al}	Vzdálenost kotvy od okraje
c_1	Vzdálenost osy kotvy od hrany vzorku
d	Délka
F	Působící síla
F_{max}	Maximální působící síla
\bar{F}_{max}	Průměrná maximální působící síla
f_c	Pevnost v tlaku
f_{cf}	Pevnost v tahu při třibodovém ohybu
$f_{ck,cube}$	Charakteristická pevnost betonu v tlaku na krychlích
f_{uk}	Charakteristická únosnost ocele
h	Výška
h_{ef}	Efektivní výška kotvy
k	Koeficient pro $h_{ef} \geq 60mm$
k_1	Součinitel zohledňující betonu bez trhlin a s trhlinami
l	Délka
N	Působící síla v tahu
N_n	Působící síla v tahu
$N_{Rk,c}^0$	Charakteristická únosnost kotvy v betonu;
$N_{Rk,c}$	Únosnost kotvy při porušení betonu za tahu
$N_{Rk,s}$	Charakteristická únosnost kotvy při přetržení za tahu
q_k	Užitné charakteristické zatížení
$S_{cr,N}$	Hrana idealizovaného čtverce představujícího plochu kužele na povrchu
\check{s}	Šířka
t	Tloušťka
v	Výška
V	Objem
V_n	Působící síla ve smyku
$V_{Rk,cp}$	Charakteristická únosnost kotvy při přetržení za smyku
$V_{Rk,s}$	Charakteristická únosnost kotvy při přetržení za smyku

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Cíl práce	2
2	Rešerše	3
2.1	Vysokohodnotný beton	3
2.2	Technické textilie	4
2.2.1	Skleněné textilie	4
2.2.2	Uhlíková textilie	5
2.2.3	Čedičová textilie	5
2.2.4	Aramidová textilie	6
2.3	Textilní beton	6
2.4	Transportní kotvy	8
2.5	Využití kotev do TRC	9
2.6	Normové podklady	9
2.6.1	Normy pro TRC	9
2.6.2	Normy pro návrh kotev	9
2.6.3	Druhy porušení vzorků podle ETAG 001	10
3	Návrh experimentu	12
3.1	Předběžný návrh kotev pro aplikaci na lomenicové schodiště	12
3.2	Rozměry desek	14
3.3	Zkouška vzorku tahem	15
3.4	Zkouška vzorku smykem	16
3.5	Zkoušení ztvrdlého betonu	17
3.5.1	Tříbodový ohyb	17
3.5.2	Zkouška v tlaku	17
3.6	Předpokládaná únosnost kotev podle ETAG 001 [1]	18
3.6.1	Přetržení kotvy za tahu	18
3.6.2	Vytáhnutí kotvy ze vzorku za tahu	18
3.6.3	Porušení betonu za tahu	18

3.6.4	Rozštěpení betonu	19
3.6.5	Přetržení kotvy za smyku	19
3.6.6	Porušení betonu za smyku	19
4	Příprava experimentu	20
4.1	Použité materiály	20
4.1.1	Vysokohodnotný beton	20
4.1.2	Uhlíková síť	21
4.1.3	Kotvy	21
4.2	Příprava vzorků	22
4.2.1	Forma	22
4.2.2	Betonáž vzorků	23
4.2.3	Odbednění a ošetřování vzorků	23
5	Průběh a vyhodnocení experimentu	25
5.1	Zkouška tahem	25
5.1.1	Zkouška tahem přímé kotvy	26
5.1.2	Zkouška tahem pouzdra s provlečenou výztuží	27
5.1.3	Vyhodnocení zkoušky tahem	28
5.2	Zkouška smykem	28
5.2.1	Zkouška smykem přímé kotvy	29
5.2.2	Zkouška smykem pouzdra s provlečenou výztuží	30
5.2.3	Vyhodnocení zkoušky smykem	31
5.3	Zkoušení doprovodných těles	32
5.3.1	Zkouška krychlí v tlaku	32
5.3.2	Zkouška trámečků v tahu za ohybu a tlaku	32
6	Opatření na porušení betonu	34
6.1	Návrh a příprava vzorků	34
6.2	Průběh a vyhodnocení experimentu	35
6.3	Doprovodná tělesa	38
7	Závěr	39
	Literatura	40

Seznam obrázků

1.1	Vykonzoloované betonové lomenicové schodiště	1
2.1	Graf vlastností textilií	4
2.2	Technická textilie ze skla	5
2.3	Technická textilie z uhlíku	5
2.4	Technická textilie z čediče	6
2.5	Textilní výztuže	7
2.6	Ukázky využití TRC v praxi	7
2.7	Ukázky kotev a jejich použití	8
2.8	Ukázky porušení vzorků při zatížení tahem	10
2.9	Ukázky porušení vzorků při zatížení smykem	10
2.10	Porušení v betonu za tahu a smyku	11
2.11	Porovnání porušení v běžném betonu a v UHPC při zatížení tahem	11
3.1	Graf závislosti reakce normálové síly v kotvě na vykonzoloování schodiště	13
3.2	Graf závislosti reakce posouvající síly v kotvě na vykonzoloování schodiště	13
3.3	Schéma vrstev v prvky	14
3.4	Schéma vzorku pro zkoušku tahem	15
3.5	Nástavec pro zkoušku tahem	15
3.6	Schéma vzorku pro zkoušku smykem	16
3.7	Nástavec pro zkoušku smykem	16
3.8	Schéma zkoušky tříbodovým ohybem	17
4.1	Nařezaná uhlíková síť pro vložení do bednění	21
4.2	Použité kotvy	21
4.3	Přípevnění kotev do formy	22
4.4	Distančníky v uhlíkové síti	23
4.5	Formy před a po betonáži	24
4.6	Vzorky po odbednění	24
5.1	Zkoušení tahem - kotva přímá	26
5.2	Graf průběhu síly na posunu při tahu u kotvy přímé	26

5.3	Zkoušení tahem - pouzdro s provlečenou výztuží	27
5.4	Graf průběhu síly na posunu při tahu u kotevního pouzdra z provlečenou výztuží	27
5.5	Zkoušení smykem - kotva přímá	29
5.6	Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy	29
5.7	Zkoušení smykem - pouzdro s provlečenou výztuží	30
5.8	Graf průběhu síly na posunu při smyku u u kotevního pouzdra z provlečenou výztuží	30
5.9	Tlaková zkouška krychlí betonu	32
5.10	Zkouška trámečku v tahu za ohybu a v tlaku	33
6.1	Příprava opatření	35
6.2	Zkouška smykem na vzorcích s opatřením	36
6.3	Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy s opatřením	36
6.4	Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy s opatřením a bez opatření	37

Seznam tabulek

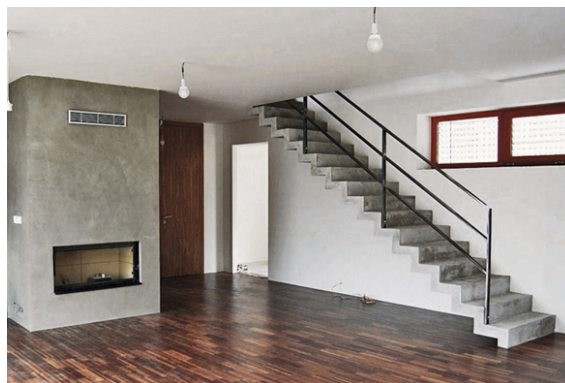
2.1	Porovnání vlastností textilií	4
3.1	Únosnosti transportních závitových kotev s přímým koncem od firmy Mirra czech	12
4.1	Použitá receptura na 1 m ³ betonu.	20
5.1	Výsledky ze zkoušky tahem	28
5.2	Výsledky ze zkoušky smykem	31
5.3	Výsledky ze zkoušky tlakem na krychlích	32
5.4	Výsledky ze zkoušky tahem za ohybu na trámečcích	33
5.5	Výsledky ze zkoušky tlakem na úlomcích trámečků	33
6.1	Výsledky ze zkoušky smykem s opatřením	37
6.2	Výsledky ze zkoušky tlakem na krychlích z betonáže s opatřením . . .	38
6.3	Výsledky ze zkoušky tahem za ohybu na trámečcích z betonáže s opatřením	38
6.4	Výsledky ze zkoušky tlakem na úlomcích trámečků z betonáže s opatřením	38

Úvod

1.1 Motivace

TRC, neboli Textile-Reinforced Concrete je beton vyztužený textilní výztuží. Jeho předností je výztuž, která nekoroduje, tudíž je možné navrhovat betonové prvky s menší krycí vrstvou. Při současném použití vysokohodnotného betonu tak lze dosáhnout tloušťek v řádu jednotek centimetrů. Doposud se TRC využívá spíše pro nenosné prvky, jako jsou soklové panely, panely na obvodové pláště nebo doplňkové interiérové a exteriérové prvky, jako jsou lavičky, stoly atd... V zájmu rozšíření použití textilního betonu na nosné prvky je potřeba mimo jiné znát, jak se v takových prvcích chovají kotvy. Kotvy se používají k manipulaci s prvkem nebo ke kotvení k jiné konstrukci.

Jako příklad možné aplikace kotev v TRC se dá uvést vykonzolované lomenicové schodiště, k jehož vývoji by tato práce mohla přispět. Lomenicové schodiště je zajímavým architektonickým prvkem, které vyniká svou subtilností, což je důvod, proč mě tato konstrukce zaujala. Jedná se o schodiště o konstantním průřezu, jehož deska vytváří stupnice a podstupnice. Z estetických důvodů není vhodné, aby byla schodišťová deska uložena po obou stranách do stěny. Požadavek, aby vynikla subtilnost schodiště, dělá z tohoto typu schodiště náročný konstrukční prvek. [2] Příklad betonového lomenicového schodiště je vidět na obrázku obr. 1.1.



Obr. 1.1: Vykonzolované betonové lomenicové schodiště [3]

1.2 Cíl práce

Cílem práce je ověření únosnosti tradičních kotevních prvků ve formě závitových pouzder v tenkých betonových deskách vyztužených textilní výztuží. Byly provedeny dvě laboratorní zkoušky - zkouška tahem a smykem. V obou případech byla zatížená kotva, jejíž zakotvení v tenkém betonovém prvku bylo předmětem zkoumání. Výsledky byly vyhodnoceny, posouzeny a byla provedena opakování mechanických zkoušek s navrženým opatřením. Byl sledován vliv a efektivnost navržených opatření pro zlepšení únosnosti, případně duktility kotev v tenkých TRC prvcích při zatížení na hranici samotné únosnosti. Součástí práce je rešerše věnující se zkoušení kotevních prvků v betonu se zaměřením na možnou aplikaci tradičních zkušebních postupů na zkoušku tenkých TRC prvků tak, aby mohly být navrženy dvě plánované sady experimentů včetně vhodných rozměrů TRC prvků.

Rešerše

2.1 Vysokohodnotný beton

V dobách, kdy ještě nebyly vyvinuty plastifikátory, se pro lepší zpracovatelnost betonové směsi používal větší podíl vody. To ovšem mělo negativní dopad na pevnost betonu, protože vysycháním při hydrataci betonu docházelo k úniku vody z betonu. To mělo za následek vznik prasklin a pórů, což oslabovalo beton. Vznikem superplastifikátorů bylo možné snížit podíl vody v receptuře a dosáhnout tak větších pevností. Superplastifikátor zaručí, že se neshlukují cementová zrna do tzv. flokulí a že je celá směs rovnoměrně promíchána s vodou. Vodní součinitel směsí takovýchto betonů by se měl pohybovat pod hodnotou 0,4.

Dříve používané vysokopevnostní betony, u kterých se dosáhlo větších pevností díky úpravě receptury, se vyvinuly v betony vysokohodnotné, jejichž vlastnosti byly vylepšeny ve více směrech. [4] Mezi přednosti těchto betonů patří lepší tekutost a tedy zpracovatelnost, vyšší pevnost v tlaku a ohybu, kvalitnější povrch a tedy větší trvanlivost a odolnost vůči vnějším podmínkám.

Pevnosti v tlaku vysokohodnotných betonů (HPC - High Performance Concrete) se pohybují od 50 MPa do 150 MPa. Betony, které překonávají hranici 150 MPa se nazývají ultra-vysokohodnotné (UHPC - Ultra-High Performace Concrete). [5]

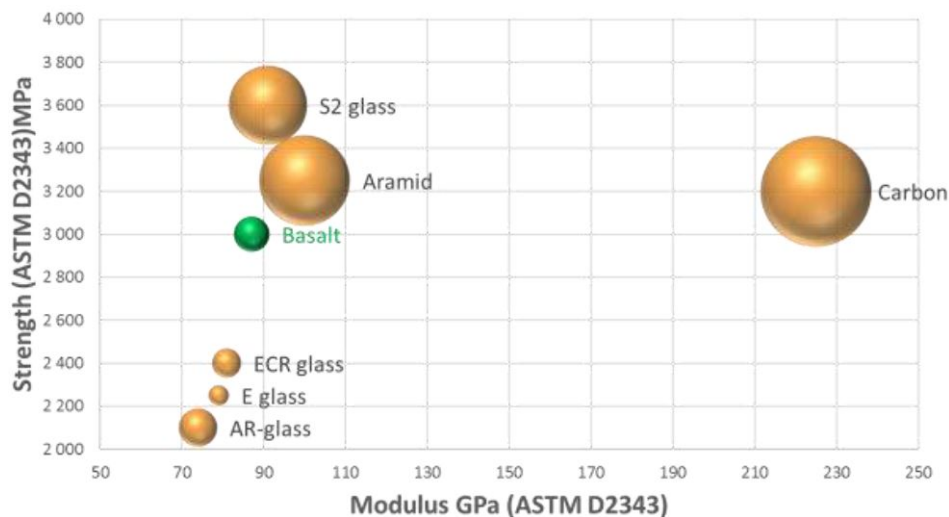
Z hlediska LCA (Life Cycle Assessment - posuzování životního cyklu materiálu od výroby po likvidaci z hlediska dopadu na životní prostředí) je pokrok směrem k vysokohodnotným a vysokopevnostním betonům pozitivní. Receptura těchto lepších betonů zpravidla obsahuje větší podíl cementu, který je velmi energeticky náročný na výrobu, takže by se dalo předpokládat, že používání vysokohodnotných betonů není tak výhodné. Ovšem z hlediska celkové stavby je úspora betonu taková, že se z environmentálního hlediska vyplatí používat lepší betony. [4]

2.2 Technické textilie

Technické textilie díky svým vlastnostem představují nové možnosti využití v mnoha odvětvích průmyslu. Svou pevností a lehkostí dávají možnost vzniknout subtilnějším a lehčím prvkům. Zpravidla se vlákna daného materiálu uspořádávají do svazků, tzv. rovingy. Z těchto rovingů se dále tvoří sítě, tkaniny, příze či prostorové prvky. K dosažení potřebných tvarů z textilií se většinou používá pryskyřice, kterou se natrou vlákna či tkaniny daného materiálu. Takto lze vytvořit například výztužné sítě do betonu, 3D náplety pro betonové sloupy, části automobilů či letadel, nebo kladením více tkanin přes sebe se vyrábí laminátové lodě. Mezi nejčastější textilie, které se používají ve stavebnictví, patří skleněná, uhlíková, čedičová a aramidová. Porovnání jejich vlastností je znázorněno v následující tabulce tab. 2.1 a grafu fig. 2.1.

Tab. 2.1: Porovnání vlastností textilií. [6]

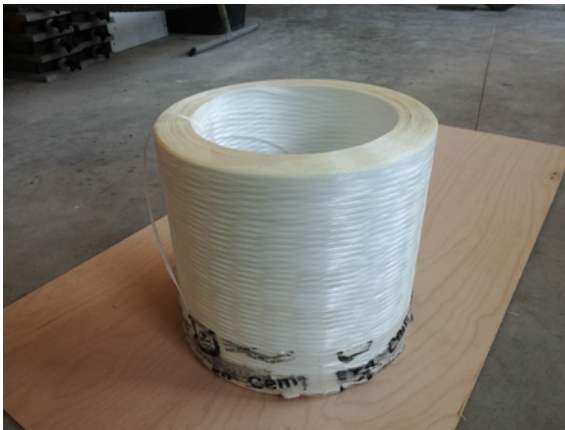
Vlastnost	E glass	AR-glass	S2 glass	Basalt	Aramid	Carbon
Hustota v kg/m ³	2550-2580	2680	2450	2670	1450	1740-1800
Modul pružnosti v GPa	78-80	74	91	85-89	70-140	200-250
Pevnost v tahu v MPa	2000-2500	2000-2200	3410-3830	2900-3100	2900-3600	2700-3750



Obr. 2.1: Graf vlastností textilií. Velikost kuliček znázorňuje porovnání průměrných cen na jeden kilogram. [6]

2.2.1 Skleněné textilie

Skleněné textilie mají dobrou odolnost proti požáru, mají dobrou pevnost v tahu a také jsou chemicky odolné. Vzhledem k lepší ceně oproti uhlíku, se hojně využívají ve stavebnictví. Základní složkou, ze které se skelná vlákna vyrábí, je oxid křemičitý (SiO_2). Přidáním dalších látek lze materiál upravit pro potřeby použití. Například pro zvýšení chemické odolnosti proti zásaditým a kyselým látkám se při výrobě do skelných vláken přidává oxid zirkoničitý (ZrO_2). Takto upravená skelná vlákna se nazývají AR-glass (Alkali-Resistant glass), které lze použít ve velmi zásaditém prostředí betonu. [7] Ukázka skelné textilie je na obr. 2.2.



(a) Skleněná příze



(b) Detail rovingu skla

Obr. 2.2: Technická textilie ze skla.

2.2.2 Uhlíková textilie

Uhlíková vlákna vynikají dobrými mechanickými vlastnostmi a díky nízké hustotě jsou oblíbené v leteckém či automobilovém průmyslu. Mezi další přednosti uhlíku patří dobrá elektrická vodivost, nízká teplotní roztažnost nebo nízký stupeň dotvarování. [5] Důležitou vlastností je také dobrá odolnost proti záru ohně, což se například využívá u hasičských vybavení. [8] Nevýhoda této textilie je v ceně, která je vysoká, takže není tento materiál tolik rozšířený mezi běžnými materiály. Fotky uhlíkové textilie jsou na obr. 2.3.



(a) Uhlíková příze

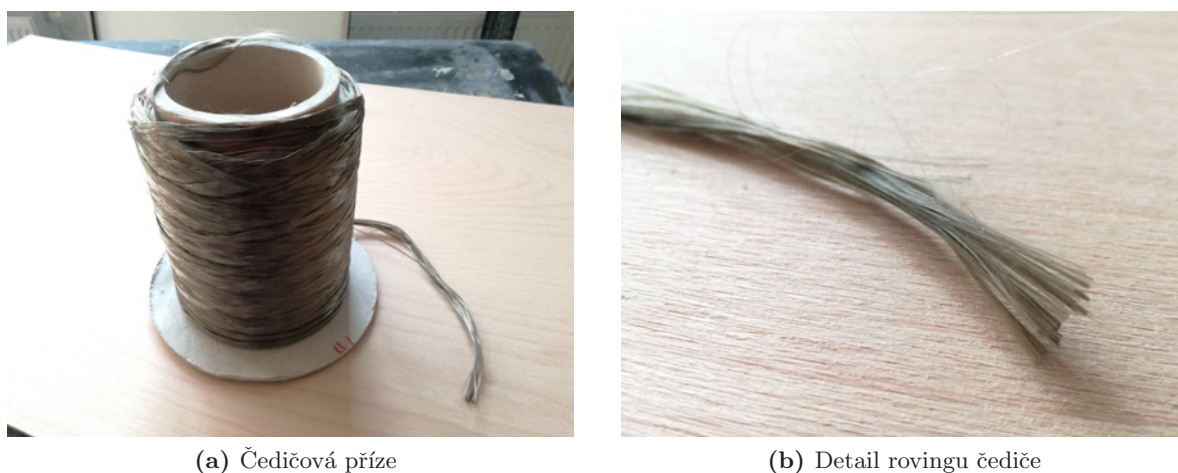


(b) Detail rovingu uhlíku

Obr. 2.3: Technická textilie z uhlíku.

2.2.3 Čedičová textilie

Čedičové textilie se vyrábí tavením následujících dvou hornin: olivín ($2(\text{MgFe})\cdot\text{O}\cdot\text{SiO}_2$) a nefelin ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$). [8] Izolační vlastnosti patří mezi přednosti tohoto materiálu. Čedičová vlákna dobře izolují elektrinu, teplo i zvuk. Mezi dobré vlastnosti patří také chemická odolnost, ale například v kyselých prostředích se čedičová vlákna rozpadají. Čedičové textilie se dají kompletně recyklovat a jejich dostupnost je běžná. [5] Čedičová textilie je na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Technická textilie z čediče.

2.2.4 Aramidová textilie

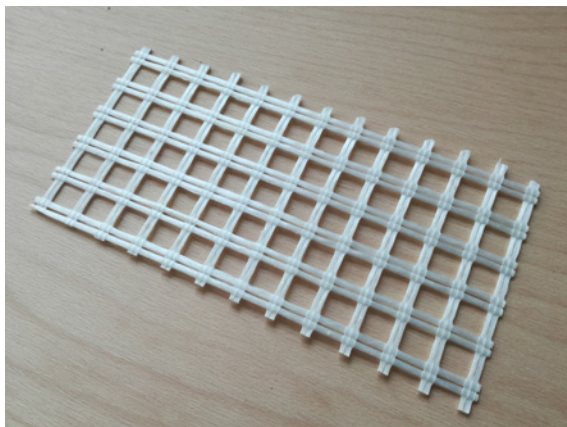
K jednomu z nejlepších materiálů pro textilie patří aramid. Aramid má velkou pevnost v tahu a má nižší hustotu a křehkost než uhlík. Nevýhodou tohoto materiálu je jiná teplotní roztažnost oproti betonu, proto je využití aramidů omezené. Navíc je cena výrobku velmi vysoká, takže se v praxi aramidové textilie málo používají. [5]

2.3 Textilní beton

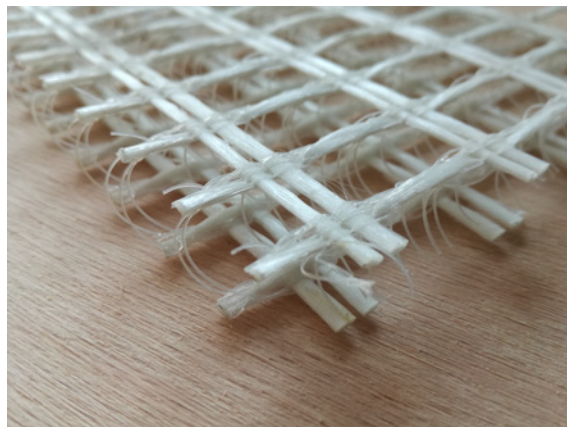
Textilní beton, tzv. TRC (Textile Reinforced Concrete) byl vyvinut na konci 90. let v Německu na univerzitách v Cáchách a Drážďanech. Jedná se o kompozitní materiál, který využívá předností dvou různých materiálů - betonu a textilní výztuže. Princip je stejný jako u železobetonu, tedy využívá se vysoké pevnosti v tlaku u betonu a vysoké pevnosti v tahu u textilní výztuže. [9] Jelikož se jedná o relativně nový materiál, tak nejsou prokázány vlastnosti za dlouhodobé aplikace a také nejsou doposud vytvořené žádné předpisy a normy pro návrh konstrukcí z TRC. [5]

Díky své odolnosti proti korozi představují textilie velké možnosti pro vyztužení betonů. V kombinaci s vysokohodnotnými betony se takovéto prvky mohou dostat až na tloušťku v řádech jednotek centimetrů. Celková tloušťka prvku je snížena díky vysoké pevnosti samotného betonu a navíc není potřeba řešit krycí vrstvu výztuže, neboť textilní výztuže nekoroďují. Z krycí vrstvy o tloušťce například 20 mm se dostáváme na krycí vrstvu v řádech milimetrů. Jak již bylo zmíněno v kapitole o vysokohodnotných betonech, tak tenčí prvky přispívají k menší spotřebě betonu a tudíž více šetří životní prostředí.

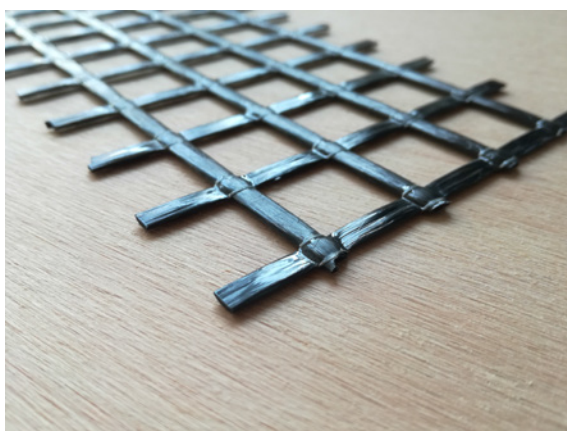
K vyztužení betonu se používají již zmíněné materiály - sklo, uhlík, čedič nebo aramid. Výztužné sítě existují jako 2D, tedy klasické sítě o čtvercovém rastru. Další variantou výztužných sítí jsou 3D sítě, které tvoří dvě patra 2D sítí, která jsou propojena vlákny, které vytváří distanci mezi patry. Také je možné použít náplety pro výrobu nosníků. Ukázky textilních výztuží jsou na obr. 2.5.



(a) 2D skleněná výztuž



(b) 3D skleněná výztuž



(c) 2D uhlíková výztuž



(d) Uhlíkový náplet

Obr. 2.5: Skleněná textilní výztuž o čtvercovém rastru (a), skleněná textilní výztuž o dvou patrech, jejichž rozestupy zajišťují taktéž skleněná vlákna (b), uhlíková 2D výztuž (c) a cylindrický náplet z uhlíku (d).

Možnosti využití tenkých betonových prvků jsou mnohé. Díky minimální tloušťce textilních betonových konstrukcí lze TRC využít pro designové výrobky, jako jsou lavičky či mobiliáře. V oblasti stavebnictví se textilní beton používá pro zesilování stávajících konstrukcí, stavbu skořepin nebo tvorbu fasádních panelů, jako je vyobrazeno na obr. 2.6. [9]



(a) Fasáda z TRC panelů [10]



(b) Lavička z TRC [11]

Obr. 2.6: Ukázky využití TRC v praxi.

2.4 Transportní kotvy

Transportní kotvy se používají, jak již název napovídá, k přepravě betonových dílů od výroby po osazení na stavbě. Jedná se tedy o využití především u prefabrikovaných konstrukcí.

Některé kotvy lze použít pouze pro manipulaci s prvky. Tímto typem je například kotva s kulovou hlavou. Po zabetonování kotvy je ponechána kulová hlava ve žlábkku. Za tento žlábek lze lehce betonový dílec uchopit zdvihákem a manipulovat s ním. Výhodou toho systému je tedy rychlost manipulace. Nevýhodou je, že se kotvy po osazení nedají dále využívat.

Naopak transportní kotvy se závitovým pouzdrem lze používat i po osazení, neboť pomocí závitového pouzdra lze betonový dílec kotvit do konstrukce. To se dá například využít i u zmiňovaných vykonzolovaných schodišť, kdy se skrz nosnou zeď provleče závitová tyč, kterou se schodiště přišroubuje a různými konstrukčními způsoby ukotví ke zdi. Nevýhodou těchto kotev je, že při manipulaci je potřeba na dílec přišroubovat lanová oka, aby ho bylo možné uchopit. Existuje několik typů kotev se závitovým pouzdrem. Jedná se o kotvy s integrovanou přímou či vlnitou výztuží, s výztuží, která je na konci rozšířená, tedy tzv. hřebíková kotva. Nebo lze použít pouze samotné závitové pouzdro jehož otvorem lze provléct vlastní výztuž. Ukázkové systémy a kotev jsou na obr. 2.7.



(a) Kotva s kulovou hlavou a zdvihákem [12]



(b) Hřebíková závitová kotva s lanem [13]



(c) Přeprava dílce na stavbě [14]



(d) Závitová kotva v betonovém svodidle [13]

Obr. 2.7: Na obrázcích (a) a (b) lze vidět dva různé systémy pro manipulaci s betonovými prvky. Na obrázku (c) je vidět manipulace s dílcem na stavbě, což je možné díky transportním kótám. Na posledním obrázku (d) je vidět závitová kotva v poškozeném betonovém svodidle pro auta.

2.5 Využití kotev do TRC

Doposud bylo zveřejněno velmi málo vědeckých článků věnujících se kotevní technice v TRC. Samotný článek z října 2017 [15] vyzývá k prozkoumání možností kotvení v tenkých prvcích vyztužených textilní výztuží. Co se týká kotvení v UHPC, tak o tom pojednávají následující články. V prvním článku [16] je zkoumáno kotvení v UHPFRC (Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete). Zde došli k závěru, že zvýšená pevnost betonu v tahu zvětšila oblast, kde se beton poruší a zároveň byla zvýšena únosnost prvku. Druhý článek [17] říká, že při použití HPC hrozí náhlé porušení při mezním zatížení, což je nežádoucí účinek.

Na téma použití tradičních kotevních prvků v TRC a UHPC, či HPC nebylo provedeno příliš mnoho publikovatelných experimentů a tudíž se jedná o zajímavou oblast, kterou by bylo potřeba blíže prozkoumat.

2.6 Normové podklady

2.6.1 Normy pro TRC

Normové podklady pro TRC zatím nejsou k dispozici. Existují však doporučení, kterým se například věnuje publikace od RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems, and Structures) s názvem Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. [18] V současné době na tvorbě dokumentů pro návrh TRC konstruují spolupracují subjekty RILEM a FIB (Fédération Internationale du Béton).

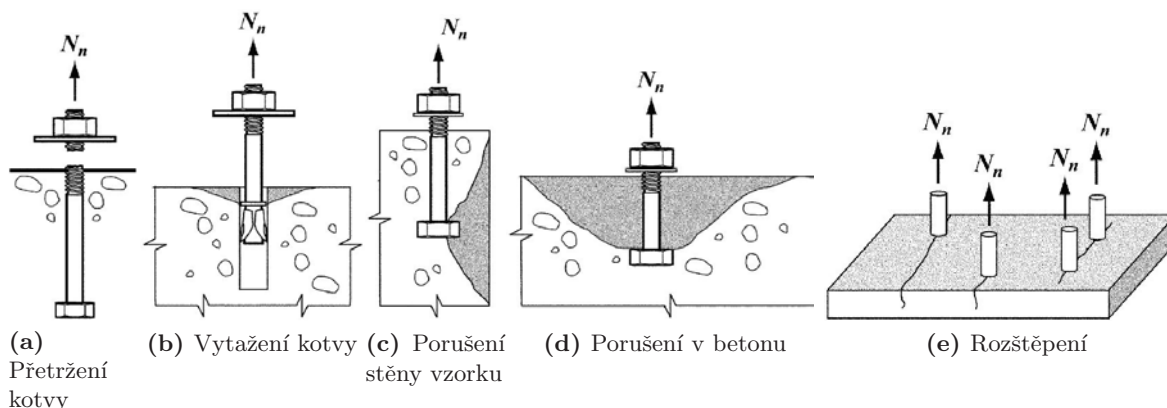
2.6.2 Normy pro návrh kotev

Návrhu kotev se nevěnují žádné ČSN normy, za to existuje několik mezinárodních dokumentů, které se této oblasti věnují. Patří mezi ně publikace od mezinárodní federace pro beton (FIB) [19] a norma od evropského výboru pro standardizaci (CEN - Comité Européen de Normalisation). [20] Obě tyto normy vychází ze směrnice ETAG (European Technical Approval Guidelines), která byla vytvořena organizací OETA (European Organisation for Technical Assessment). Směrnice věnujícím se mechanickým kotvám má označení ETAG 001. [1] Norma popisuje návrh kotev v betonových konstrukcích, způsoby porušení, návrh laboratorní zkoušky pro určení únosnosti kotvy atd... Dokument nezmiňuje žádný postup pro návrh kotev v TRC, či v tenkých prvcích. Na druhou stranu popisuje návrh kotev ve velké blízkosti jednoho kraje vzorku a výpočet by se dal i aplikovat na kotvy v tenkých prvcích, které mají blízký okraj ze dvou stran. Tato situace se vyskytuje v tenkých deskových prvcích s TRC výztuží, které jsou předmětem této práce. Výpočet podle ETAG 001 je proveden v kapitole věnující se návrhu experimentu, ale předpokládá se, že budou vypočtené hodnoty zavádějící, protože norma nebyla navržena na prvky tenké v řádu centimetrů a také se v ní neuvažuje s textilní výztuží, která se ve zkušebních prvcích bude vyskytovat.

2.6.3 Druhy porušení vzorků podle ETAG 001

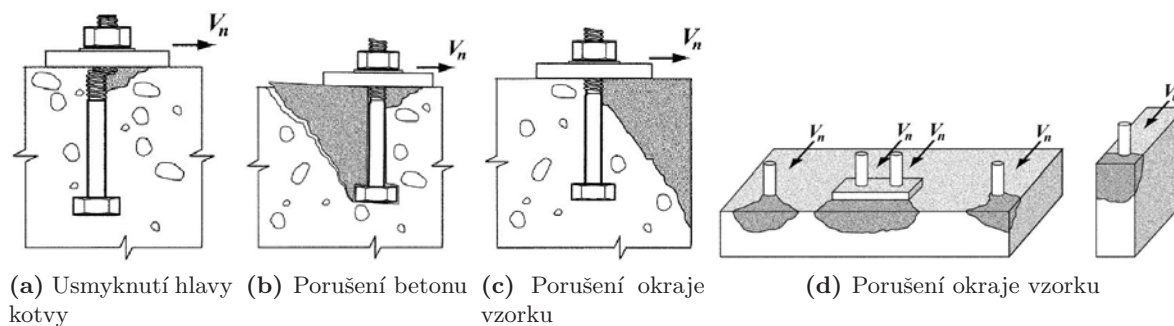
Řádné zkoušení únosnosti kotev podle ETAG 001 uvažuje s masivními prvky. To znamená, že níže uvedené druhy porušení se zcela nebudou týkat tenkých prvků zkoumaných v této práci. Na druhou stranu lze z těchto základních případů dále vycházet při návrhu a vyhodnocení odzkoušených těles.

Při zatěžování vzorku s kotvou, ať už tahem, či smykem, vždy může nastat porušení buď v kotvě, nebo v betonovém prvku. Na obr. 2.8 jsou znázorněny druhy porušení vzorků při zatížení tahem.



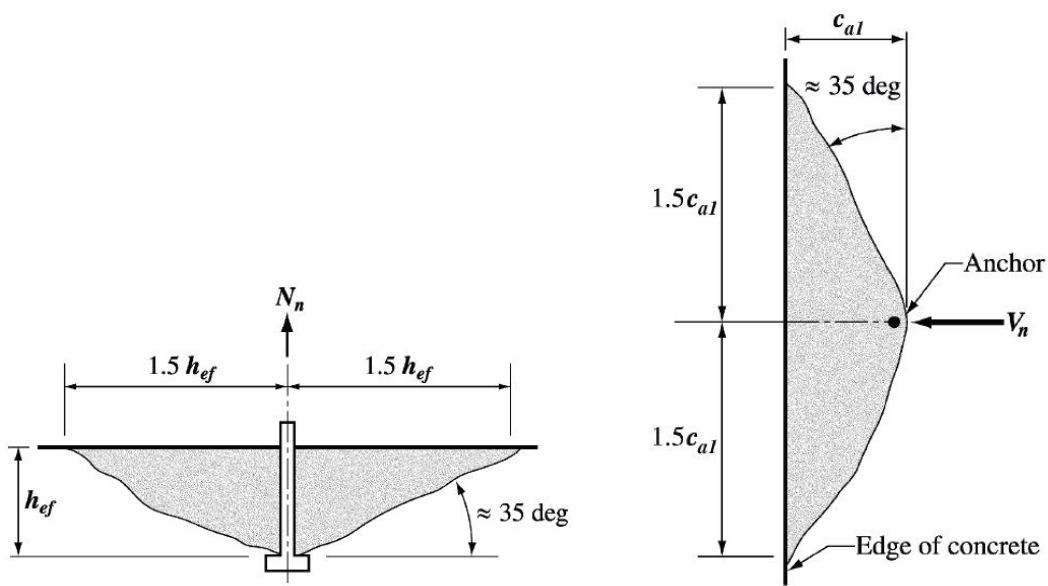
Obr. 2.8: Porušení může být způsobeno únosností samotného materiálu kotvy (a), špatnou soudržností mezi kotvou a betonem (b), blízkým umístěním kotvy k okraji (c), nebo malou pevností betonu v tahu (d), (e). [21]

Na obrázku Fig. 2.9 jsou znázorněny příklady porušení smykem.



Obr. 2.9: Usmyknutí hlavy kotvy (a) je způsobeno překročením únosnosti kotvy ve smyku. Porušení (b) je způsobeno překročením tahové únosnosti betonu a v případech (c) a (d) dochází k rozdrčení okraje vzorku a následnému usmyknutí kotvy. [21]

Pokud dojde k porušení betonu při zatěžování, znamená to, že kotva je dostatečně únosná a je potřeba navrhnout opatření pro betonový vzorek. Porušení v betonu za tahu se zpravidla projeví vytažením kotvy s betonovým kuželem. Tento kužel má poloměr o velikosti 1,5 násobku účinné výšky kotvy, tedy zabetonované části kotvy. Podobné porušení vzniká i u zatížení smykem, jen se nebere v potaz efektivní výška kotvy, ale vzdálenost kotvy od okraje vzorku. Oba případy jsou vidět na obrázcích obr. 2.10.

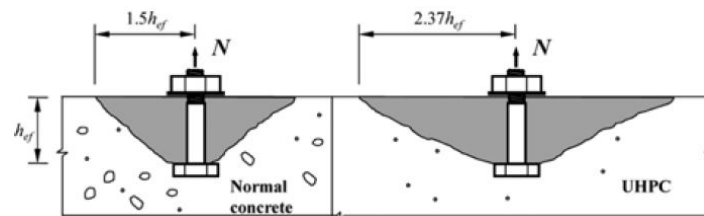


(a) Schéma porušení v betonu za tahu [21]

(b) Schéma porušení v betonu za smyku [21]

Obr. 2.10: Na schématech jsou vidět rozměry kužele, který vznikne při vytržení kotvy spolu s betonem. Použité zkratky: h_{ef} je efektivní výška kotvy, c_{al} je vzdálenost kotvy od okraje, N_n je působící síla v tahu a V_n je působící síla ve smyku.

V již zmíněném článku [16] bylo zjištěno, že při použití betonů s vyšší pevností v tahu, dojde ke zvětšení poloměru vytrhnutého kužele a tudíž se zvýší únosnost prvku. Schémata znázorňující tento jev jsou na obr. 2.11.



(a) Porovnání porušení v běžném betonu a v UHPC při zatížení tahem [?]

Obr. 2.11: Schéma ukazuje porovnání porušení za tahu v normálním betonu a v UHPC. Z obrázku je vidět, že UHPC má větší poloměr vytrhnutého kužele, než u normálního betonu. Použité zkratky: h_{ef} je efektivní výška kotvy a N je působící síla v tahu.

Návrh experimentu

Pro zkoušení kotev v tenkých betonových prvcích byly předem vytipovány dvě základní zkoušky. Zkouška tahem a smykem. Tyto zkoušky poskytnou dostatečný podklad pro další výzkum a modelování, případně ověření pro základní návrh tradičních kotevních prvků pro konkrétní aplikace. Pro více výsledků k porovnání byly dále vybrány dva druhy kotev.

3.1 Předběžný návrh kotev pro aplikaci na lomenicové schodiště

Návrh kotev byl inspirován případnou aplikací pro vykonzolované lomenicové schodiště s kotvením ke stěn podél jeho délky. Deska schodiště působí staticky jako prizmatická lomenice. Níže je proveden zjednodušený výpočet základních reakcí v podpoře tak, aby bylo zřejmé, pro jak moc vykonzolovaná schodiště jsou potřeba jaké kotvy. Uvažuje se, že se kotva nachází v každém rohu zalamované schodišťové konstrukce. Počítá se s následujícími hodnotami:

Šířka stupně $b = 300$ mm

Výška stupně $h = 165$ mm

Tloušťka stupně $t = 40$ mm

Tíha betonu $\gamma = 24$ kN/m³

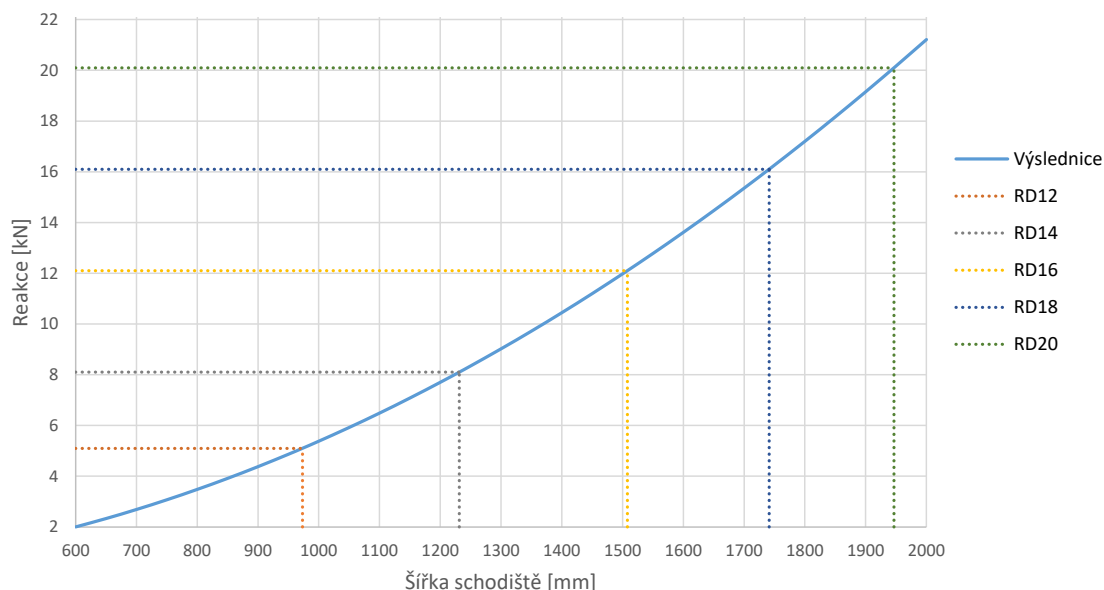
Užitné zatížení charakteristické $q_k = 3$ kN/m²

Dále se uvažuje s hodnotami únosností transportních závitových kotev s přímým koncem od firmy Mirra czech, které byly k dispozici pro provedení experimentu v laboratořích. Hodnoty jsou znázorněné na tab. 3.1.

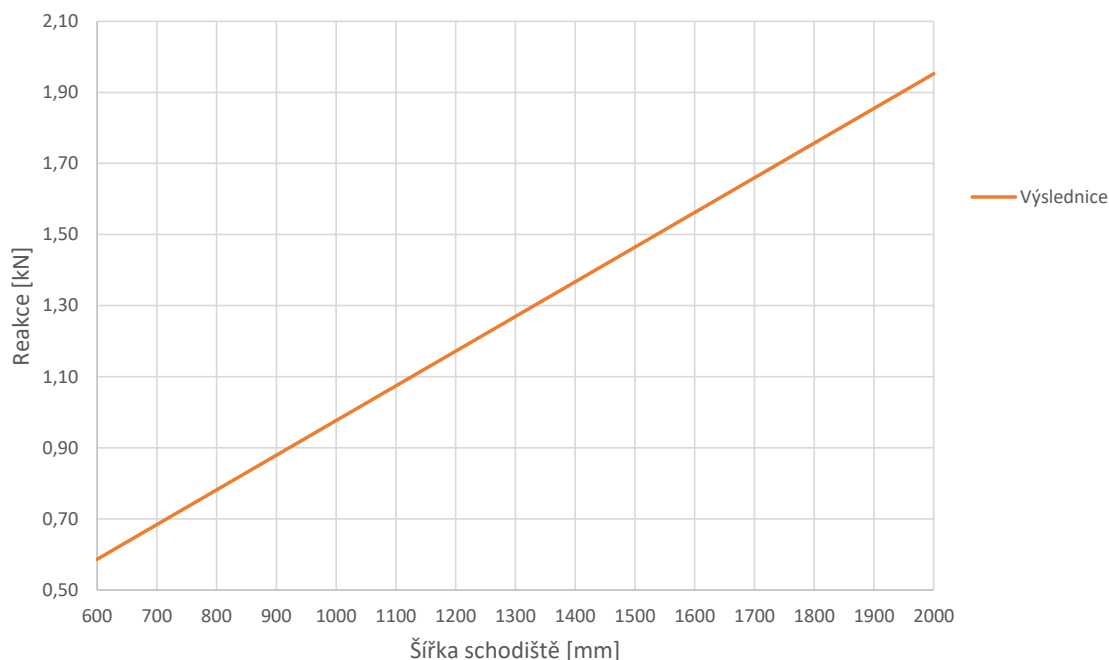
Tab. 3.1: Únosnosti transportních závitových kotev s přímým koncem od firmy Mirra czech. [22]

Označení kotvy	Závit [mm]	Nosnost v tahu [kN]	Nosnost ve smyku [kN]
RD12	12	5,0	2,5
RD14	14	8,0	4,0
RD16	16	12,0	6,0
RD18	18	16,0	8,0
RD20	20	20,0	10,0

Z výše zadaných údajů lze na základě proměnné, kterou je šířka vyložení schodiště, spočítat jaké kotvy jsou potřeba do schodiště osadit, což popisují grafy obr. 3.1 a obr. 3.2.



Obr. 3.1: Výslednice grafu ukazuje jak velká normálová reakce vzniká v kotvě při daném vykonzolování schodiště. Při vynesení deklarované únosnosti kotvy lze zjistit, jaké vykonzolování si můžeme dovolit. Ve zdejších případech je kotva namáhána normálovou silou, tedy bereme v úvahu její únosnost v tahu.

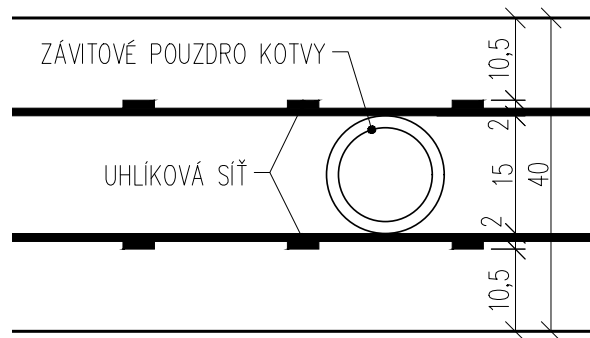


Obr. 3.2: Výslednice grafu ukazuje jak velká posouvající reakce vzniká v kotvě při daném vykonzolování schodiště. V grafu nejsou znázorněny žádné únosnosti kotev, neboť únosnost nejmenší kotvy RD12 začíná na 2,5 kN, což je mnohem více, než je potřeba pro znázorněné rozpětí.

Pokud by bylo uvažováno schodiště například pro bytové domy, bez ohledu na požární odolnost materiálu, jenž není předmětem této práce, je minimální šířka vyložení 900 mm. Pak můžeme podle grafu použít kotvu RD12 se závitovým pouzdrem o průměru 12 mm. Právě tyto kotvy se budou posuzovat v této práci pro aplikaci do textilního betonu.

3.2 Rozměry desek

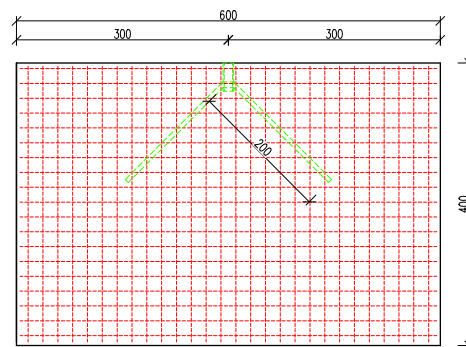
Předmětem práce je zkoumání chování vybraných tradičních kotevních prvků v tenkých deskách z TRC. Tenkou konstrukci v našem případě tedy představuje deska z HPC s dvěma uhlíkovými sítěmi, které nahrazují vyztužení tradičními sítěmi z betonářské výztuže při okrajích desky s minimální krycí tloušťkou výztuže. Celková tloušťka 40 mm byla zvolena po přihlédnutí k velikosti kotev, tloušťce uhlíkových sítí, tloušťce krycí vrstvy doporučené výrobcem sítí a proveditelnosti betonáže. Na obr. 3.3 lze vidět schéma skladby vzorku. O výšce a délce vzorků pojednávají jednotlivé zkoušky tahem a smykem, neboť na každou zkoušku byl na základě provedené rešerše zvolen jiný rozměr desek, viz následující kapitoly práce.



Obr. 3.3: V tomto schématu jsou vidět vzájemné vzdálenosti kotvy a výztužných sítí od okraje betonového prvku.

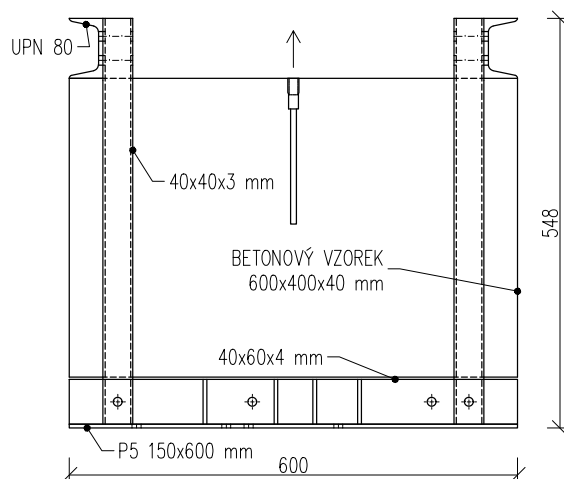
3.3 Zkouška vzorku tahem

Rozměry desky vzorku byly zvoleny podle předpokládaného porušení. Výška vzorku byla určena na 400 mm, aby nedocházelo při vytahování kotvy k nosníkovému efektu a vzorek se neprohýbal. Délka desky byla zvolena na 600 mm. Zde se předpokládalo, že by se deska mohla rozštěpit paralelně s uložením sítí, což by vedlo k vytažení kotvy. Zároveň byly zohledněny možnosti zkušebního zařízení. Druhým předpokladem bylo porušení betonu a vzniku kužele. Že by vznikl kužel o poloměru 1,5 násobky efektivní výšky kotvy bylo nepravděpodobné, protože se jedná o velmi tenký prvek, který má při okrajích uhlíkovou výztuž. Ovšem předpokládalo se, že by se mohl vytvořit malý kužel o průměru šířky desky. Schéma na vzorku pro zkoušku tahem je na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Schéma ukazuje rozměry vzorku a polohu kotvy pro zkoušku tahem. V této variantě je vidět vzorek s kotvou, kde se závitovým pouzdrům provléká výztuž. V našem případě se jedná o výztuž o průměru 6 mm. Červeně jsou znázorněny uhlíkové výztužné sítě. Zeleně jsou znázorněny kotvicí prvky.

Jelikož na zkoušku kotev na tah v tenkých betonových vzorcích neexistuje žádná norma, ani speciální přístroje, tak bylo potřeba vymyslet a nechat vyrobit aparaturu, která dovolí vzorky odzkoušet. Schéma a fotka takového přípravku je vidět na obr. 3.5.



(a) Schéma nástavce

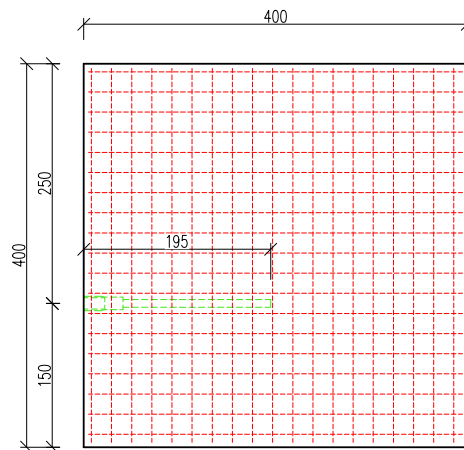


(b) Fotografie nástavce se vsunutým vzorkem

Obr. 3.5: Nástavec je tvořen čtyřhranným profilem a plechem, které jsou k sobě svařeny a vyztuženy výztuhami, aby nedocházelo k ohýbání sestavy při zatěžování tahem. K této základové konstrukci jsou přišroubované čtyřhranné profily, které jsou zakončeny profily U o které se opře vzorek.

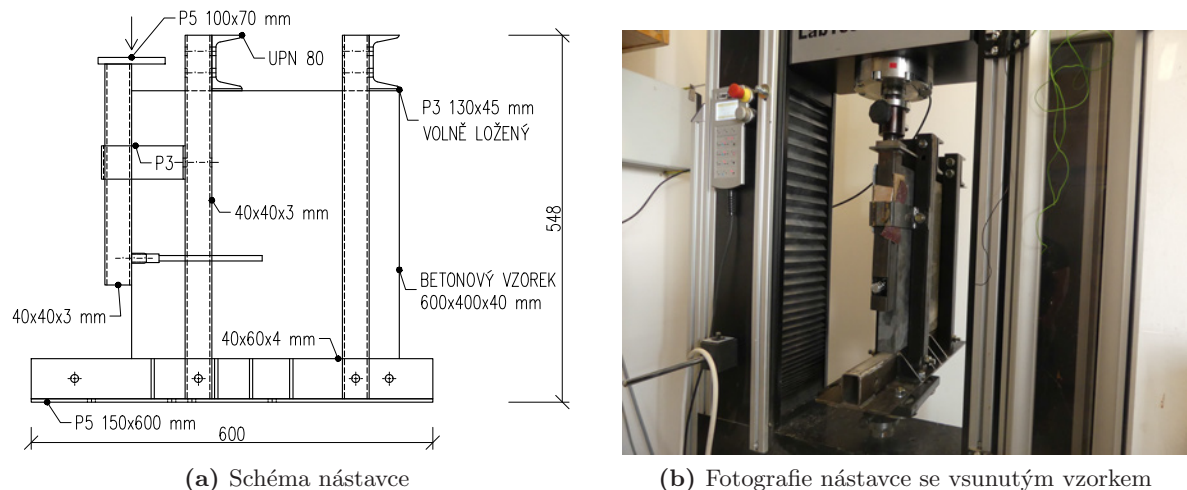
3.4 Zkouška vzorku smykem

Výška a délka desky pro zkoušku smykem byla určena na 400 x 400 mm. Při zatěžování kotvy se předpokládalo, že budou nad kotvou vznikat tahová napětí a pod kotvou tlaková napětí, jak je znázorněno v kapitole o druzích porušení podle ETAG 001. Z toho důvodu byla kotva umístěna 150 mm od dolního okraje vzorku, aby tažená část měla větší prostor nad kotvou. Schéma uložení kotvy je znázorněno na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Schéma ukazuje rozměry vzorku a polohu kotvy pro zkoušku smykem. U této varianty je znázorněn vzorek s kotvou s přímou výztuží o průměru 8 mm. Červeně jsou znázorněny uhlíkové výztužné sítě. Zeleně jsou znázorněny kotvící prvky.

Žádný dokument nepojednává ani o zkoušce kotev na smyk v subtilních betonových vzorcích, tudíž byl připraven přípravek, který zkoušku umožnil uskutečnit. Pro úsporu materiálu a snadnější provedení i vzhledem k časovému omezení na vypracování bakalářské práce byla využita konstrukce aparatury pro zkoušku tahem, kde se přesunutím částí přípravek upravit pro zkoušku smykem. Obrázek a schéma lze vidět na obr. 3.7.



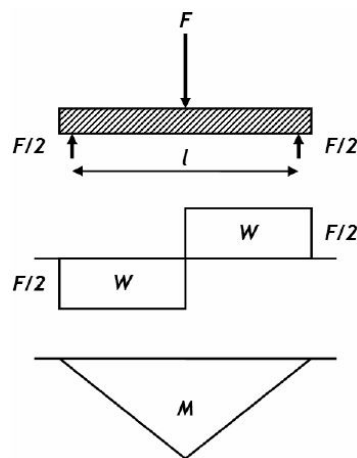
Obr. 3.7: Nástavec je tvořen stejnými součástkami, jako při variantě pro tah. Navíc byla přidána čtyřhranná trubka, přes kterou se vnášelo zatížení do kotvy. Pod U profily se volně vložily plechy pro zafixování prvků v nástavci, aby nedocházelo k nežádoucím napětím.

3.5 Zkoušení ztvrdlého betonu

Ke každé betonáži byly vybetonovány tři kostky o rozměrech 100x100x100 mm a tři trámečky o rozměrech 40x40x160 mm, které slouží k ověření pevností použité betonové směsi.

3.5.1 Tříbodový ohyb

Zkouška tříbodovým ohybem udává pevnost materiálu v tahu za ohybu. Zkoušky ohybem jsou popsány v normě ČSN EN 12390-5. [23] Existují dva typy zkoušek - tříbodovým a čtyřbodovým ohybem. Obě zkoušky se liší rozdílným průběhem vnitřních sil na zkoušených vzorcích a také tím, že tříbodový ohyb udává cca o 13% větší únosnosti. Zkouška probíhá na trámečcích. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 3.8.



Obr. 3.8: V horní části je vidět schéma zatížení vzorku při zkoušce tříbodovým ohybem. Ve střední části je vidět vykreslení posouvacích vnitřních sil a v dolní části je znázorněn průběh momentů. [24]

Pevnost v tahu při tříbodovém ohybu je dána rovnicí

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (3.1)$$

- kde f_{cf} je pevnost v tahu za ohybu v MPa;
 F maximální působící síla při porušení v N;
 l vzdálenost mezi podporami v mm;
 b šířka příčného řezu v mm;
 h výška příčného řezu v mm.

3.5.2 Zkouška v tlaku

Zkouška v tlaku se provádí na krychlích o rozměrech 100x100x100 mm a věnuje se jí norma ČSN EN 12390-3. [25] Pevnost v tlaku se určí následujícím vztahem

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (3.2)$$

- kde f_c je pevnost v tlaku v MPa;
 F maximální působící síla při porušení v N;
 A_c plocha vzorku, na kterou působí zatížení v mm².

3.6 Předpokládaná únosnost kotev podle ETAG 001 [1]

Směrnice ETAG 001 pro návrh kotev popisuje postup pro výpočet únosnosti kotev. Tento výpočet lze aplikovat na tenké prvky. Je otázkou jak výsledek bude odpovídat realitě, protože tloušťka zkoušených těles 40 mm je velmi malá, ale na druhou stranu směrnice nikde neudává minimální rozměry pro tloušťku vzorků. Je nutné také zmínit, že navržené vzorky mají v sobě aplikovanou uhlíkovou síť, se kterou směrnice neumí počítat. Níže provedené výpočty odpovídají pro kotvu přímou s výztuží o průměru 8 mm. S druhým typem kotvy, kde se provléká závitovým pouzdrem výztuž, směrnice neuvažuje. V následujících podkapitolách jsou uvedeny předpokládané teoretické základní hodnoty únosnosti před provedením zatěžovacích zkoušek.

3.6.1 Přetržení kotvy za tahu

Pokud zatížení nevydrží samotný materiál kotvy a dojde k jejímu přetržení, tak její únosnost je dána:

$$N_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} = 50,3 \cdot 500 = 25130,7 \text{ N} \quad (3.3)$$

kde $N_{Rk,s}$ je char. únosnost kotvy při přetržení v tahu v N;
 $A_s = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 4^2 = 50,3 \text{ mm}^2$ plocha výztuže 8 mm kotvy;
 $f_{uk} = 500 \text{ MPa}$ charakteristická únosnost ocele B500B.

3.6.2 Vytáhnutí kotvy ze vzorku za tahu

Směrnice udává, že není stanoven žádný obecný postup k výpočtu vytažení kotvy ze vzorku, protože vždy záleží na typu konkrétní navržené kotvy. Obecně u zvolené kotvy s přímou zalisovanou prutovou výztuží může dojít o tento způsob porušení.

3.6.3 Porušení betonu za tahu

Při porušení betonu za zkoušky tahem dochází k vytrhnutí kotvy s kuželem betonu. Únosnost je dána:

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} = 326574,9 \cdot \frac{15600}{342225} \cdot 0,71 \cdot 0,49 \cdot 1 = 5179 \text{ N} \quad (3.4)$$

Mezivýpočty:

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot h_{ef}^{1,5} = 10,1 \cdot \sqrt{141} \cdot 195^{1,5} = 326574,9 \text{ N} \quad (3.5)$$

kde $N_{Rk,c}^0$ je char. únosnost kotvy v betonu v N;
 $k_1 = 10,1$ součinitel pro aplikaci do betonu bez trhlin;
 $f_{ck,cube} = 141 \text{ MPa}^1$ charakteristická pevnost betonu v tlaku na krychlích;
 $h_{ef} = 195 \text{ mm}$ efektivní výška kotvy.

¹Hodnota pevnosti betonu převzatá z průměrné hodnoty naměřených pevností doprovodných těles.

$$A_{c,N} = (c_1 + c_1) \cdot S_{cr,N} = (20 + 20) \cdot 2 \cdot 195 = 15600 \text{ mm}^2 \quad (3.6)$$

kde $A_{c,N}$ je plocha dosahu kužele na povrchu vzorku v mm^2 ;
 $c_1 = 20 \text{ mm}$ vzdálenost osy kotvy od hrany vzorku;
 $S_{cr,N} = 585 \text{ mm}$ hrana čtverce představujícího plochu kužele na povrchu.

$$A_{c,N}^0 = S_{cr,N} \cdot S_{cr,N} = (1,5 \cdot h_{ef} \cdot 2)^2 = (1,5 \cdot 195 \cdot 2)^2 = 342225 \text{ mm}^2 \quad (3.7)$$

kde $A_{c,N}^0$ je idealizovaná plocha dosahu kužele na povrchu v mm^2 ;
 $S_{cr,N}$ hrana čtverce představujícího plochu kužele na povrchu v mm ;
 $h_{ef} = 195 \text{ mm}$ efektivní výška kotvy.

Součinitel zohledňující blízké okraje vzorku u kotvy:

$$\psi_{s,N} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{c_1}{S_{cr,N}} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{20}{585} = 0,71 \leq 1,5 \quad (3.8)$$

Součinitel zohledňující vyztužení:

$$\psi_{re,N} = 0,5 \cdot \frac{h_{ef}}{200} = 0,5 \cdot \frac{195}{200} = 0,49 \leq 1 \quad (3.9)$$

Součinitel zohledňující přítomnost více kotev:

$$\psi_{ec,N} = 1 \quad (3.10)$$

3.6.4 Rozštěpení betonu

Směrnice uvažuje, že při rozštěpení projde trhлина celým vzorkem. Toto v našem případě nenastane, protože je vzorek velmi vysoký. Vzorek se může z části rozštěpit, což zapříčiní vytrhnutí kotvy, ale výpočet poskytnutý ve směrnici nelze použít.

3.6.5 Přetržení kotvy za smyku

Přetržení materiálu kotvy smykem je dáno rovnicí:

$$V_{Rk,s} = 0,5 \cdot A_s \cdot f_{uk} = 0,5 \cdot 50,3 \cdot 500 = 12566,4 \text{ kN}, \quad (3.11)$$

kde $V_{Rk,s}$ je char. únosnost kotvy při přetržení ve smyku v N;
 $A_s = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 4^2 = 50,3 \text{ mm}^2$ plocha výztuže 8 mm kotvy;
 $f_{uk} = 500 \text{ MPa}$ charakteristická únosnost ocele B500B.

3.6.6 Porušení betonu za smyku

Porušení betonu ve smyku je dáno následující rovnicí:

$$V_{Rk,cp} = k \cdot N_{Rk,c} = 2 \cdot 5179 = 10358 \text{ kN}, \quad (3.12)$$

kde $V_{Rk,cp}$ je charakteristická únosnost kotvy při přetržení ve smyku v kN;
 $k = 2$ koeficient pro $h_{ef} \geq 60 \text{ mm}$;
 $N_{Rk,c} = 5179 \text{ N}$ únosnost kotvy při porušení betonu v tahu;

Příprava experimentu

Byly navrženy dva druhy zkoušek - zkouška tahem a zkouška na smyk. V obou případech bude zatížení do prvku vnášeno přes kotvu, jejíž chování v betonovém vzorku je předmětem zkoumání. Pro zkoušení byly vybrány dva různé druhy kotev. Vzorek ve tvaru tenké desky má tloušťku 40 mm a při obou površích je umístěna uhlíková síť. Pro každou kotvu a každý typ zkoušky byly vybetonovány tři vzorky, v součtu tedy celkem 12 vzorků.

4.1 Použité materiály

Vzorky se skládají z vysokohodnotného betonu, výztuže z uhlíkových sítí při obou površích desky a ze dvou druhů kotev.

4.1.1 Vysokohodnotný beton

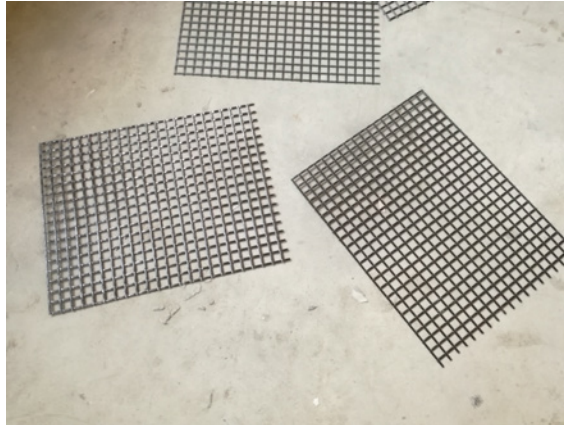
K přípravě vzorků byl použit vysokohodnotný beton, který byl vyvinut na ČVUT v Praze. Pevnost v tlaku na krychlích o ohraně 100 mm dosahuje 143 MPa a pevnost v tahu při tříbodovém ohybu na trámečcích 40x40x160 mm dosahuje 15,6 MPa. Použitá receptura vysokohodnotného betonu je přibližně znázorněna v tab. 4.1. [26]

Tab. 4.1: Použitá receptura na 1 m³ betonu.

Přísada	Hmotnost
Cement	680 kg
Křemičitý písek	960 kg
Mikrosilika	175 kg
Křemičitá moučka	325 kg
Superplastifikátor	29 kg
Voda	171 kg

4.1.2 Uhlíková síť

Použitá textilní výztuž byla zakoupena u firmy Solidian. Konkrétně se jedná o typ solidian GRID Q85/85-CCE-21. [27] Uhlíková vlákna, která jsou naimpregnovaná epoxidovou pryskyřicí, tvoří síť o rozstupech 21 mm na oba směry. Průřezová plocha jednoho pramene je $1,81 \text{ mm}^2$ a průřezová plocha sítě je $85 \text{ mm}^2/\text{m}$. Pevnost v tahu dosahuje 4300 MPa a modul pružnosti 240 GPa . Použitá uhlíková síť je vyfocena na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Nařezaná uhlíková síť pro vložení do bednění

4.1.3 Kotvy

V této práci byly použity dva vytypované druhy kotev, které byly objednány u firmy Mirra - závitová přepravní kotva s rovným koncem [22] a závitové pouzdro s příčným otvorem s provlečenou výztuží [28]. Obě kotvy se závitovým pouzdrem o poloměru 12 mm by umožňovaly snadnou instalaci případného prefabrikátu ke stěně na stavbě a zároveň by sloužily jako transportní kotvy pro manipulaci při použití transportních ok. Kotva s rovným koncem má délku 195 mm a v sobě integrovanou výztuž o průměru 8 mm. Závitové pouzdro s příčným otvorem bylo opatřeno výztuží o průměru 6 mm dlouhou 400 mm. Tato výztuž byla ohnutá do úhlu 90° . Kotvy jsou vidět na obr. 4.2.



(a) Kotevní závitové pouzdro, kterým se provléká výztuž



(b) Přímá kotva se zabudovanou výztuží $\varnothing 8 \text{ mm}$

Obr. 4.2: Použité kotvy v experimentu.

Kotvy použité pro výrobu vzorků byly zakoupeny bez antikorozičního opatření. Použitý vysokohodnotný beton můžeme díky svým vlastnostem považovat za nepropustný vodě, tudíž by kotva měla být dostatečně chráněná. Problém nastává u závitové části kotvy, v jejímž okolí může beton snadněji popraskat a následně tudý může vniknout voda k výztuži kotvy, což by vedlo ke karbonataci. Z tohoto důvodu by bylo lepší používat nerezové kotvy. Typ kotvy, z hlediska koroze, neovlivňuje její pevnost, proto lze k experimentu použít i standardní kotvu.

4.2 Příprava vzorků

Tloušťka vzorků byla zvolena na hodnotu 40 mm. Při menší tloušťce by hrozilo, že se beton kolem závitového pouzdra poruší vlivem smršťování a odprýskne. Velikost desky pro zkoušku tahem byla určena na 600x400x40 mm a pro zkoušku smykem 400x400x40 mm.

Pro zkoušku tahem byla kotva umístěna do středu desky z důvodu očekávaného symetrického porušení. U vzorků pro zkoušku smykem byla kotva umístěna cca do 1/3 výšky vzorku z důvodu očekávaného porušení v betonu vylomením. Procesy porušení byly popsány v rešerši.

4.2.1 Forma

Forma byla nařezána z lamina o tloušťce 18 mm a následně smontována vruty. Betonáž se plánuje tak, že forma bude stát na straně, kde je připevněna kotva. Beton se tedy bude lít otvorem z druhé strany. Tato strana byla zvolena z toho důvodu, že nebude v kontaktu s žádnou podporou, tudíž nevadí, když její povrch nebude dokonale rovný a hladký.

Na straně, kde bude zabetonována kotva, byla vyvrtána díra o průměru 12 mm. Touto dírou se provleče šroub, kterým se na druhé straně uchytí kotva, aby držela správný směr během betonáže. Mezi kotvou a deskou byla na šroub přidána podložka, aby se po utáhnutí kotva nezařízla do stěny formy a po odbednění nepřesahovala okraj vzorku. V případě závitové přepravní kotvy s rovným koncem bylo potřeba dát pozor na to, aby výztuž kotvy byla pokud možno co nejvíce v rovině desky. U závitového pouzdra s příčným otvorem bylo potřeba provlečenou výztuž připevnit drátek k uhlíkové síti, aby držela správnou polohu. Upevnění kotev ve formě je vidět na obr. 4.3.



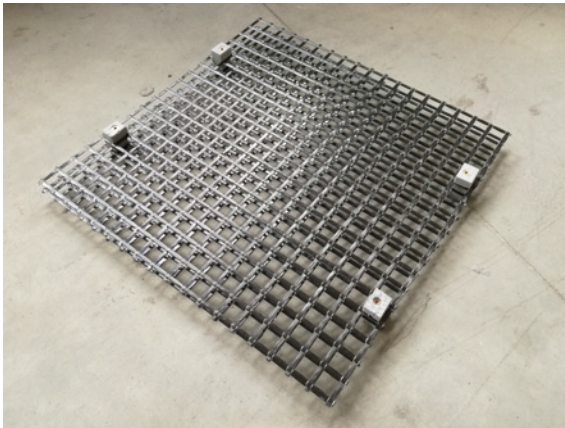
(a) Kotva s přímým koncem ve formě



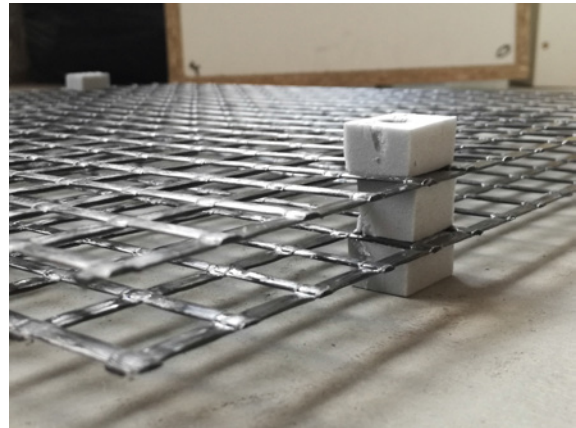
(b) Kotva s provlečenou výztuží před zabudováním do formy

Obr. 4.3: Kotvy se do formy připevnily přes šroub, který procházel skrz desku lamina. U kotvy s provlečenou výztuží (b) bylo potřeba výztuž připevnit drátkem k uhlíkové síti, aby držela správnou polohu.

Textilní výztuž, která je tvořena uhlíkovými sítěmi, byla nařezána na rozměry odpovídajícím vzorkům. Sítě jsou uloženy u obou povrchů v rovině desky. Aby sítě držely svou polohu ve formě, tak byly předem opatřeny distančními podložkami. Tyto distančníky byly tvořeny třemi kostkami z polystyrenu, které se sešroubovaly vrutem, zatímco mezi nimi byly umístěny uhlíkové sítě. Systém je vidět na obr. 4.4. Po opatření dvou sítí čtyřmi takovými distančníky držely sítě tvar a bylo možné je jednoduše zasunout do formy. Tato distanční tělesa byla zvolena z důvodu rychlosti přípravy a vzhledem k účelu vzorků nebyl problém s jejich následným prokreslením na povrch.



(a) Distančníky v uhlíkové síti



(b) Detail distančníku

Obr. 4.4: Distančníky vytvořené ze tří kostiček polystyrenu, které se provrtaly vrutem, čímž se spojily uhlíkové sítě k sobě.

4.2.2 Betonáž vzorků

Šroub držící kotvu na svém místě se nachází na straně, na které má forma stát při betonáži. Aby hlava šroubu nepřekážela, tak byly formy podloženy dřevěnými prkny, čímž se zajistila stabilita. Spolu s formami na desky se připravily formy pro doprovodná tělesa. Forma na trámečky 40x40x160 mm a kostky 100x100x100 mm se vymazaly odbedňovacím olejem. Formy na desky nebyly vymazány, protože díky hladkým povrchům je možné vzorky odbednit i bez použití odbedňovacího oleje během prvních několika betonáží.

Po navážení a umíchání betonové směsi byly vzorky vylité betonem. Jelikož byl použit samozhutnitelný beton, tak nebylo potřeba vzorky vibrovat na vibračním stole. Po naplnění forem betonem se stěny forem stáhly svěrkou na potřebnou šířku 40 mm (obr. 4.5). Tlak betonu by bez toho opatření působil na stěny, čímž by je rozevřel a tloušťka vzorku by pak byla větší, než 40 mm. Nakonec se vzorky přetáhly fólií, aby se z nich neodpařovala voda, což by jinak mohlo způsobit popraskání vzorku vysycháním.

4.2.3 Odbednění a ošetřování vzorků

Odbednění vzorků probíhalo stylem rozšroubování části formy tak, aby šla deska bez problémů z formy vyndat. Poté se vzorky označily názvy a datumem betonáží. Vzorky se uložily do vodní lázně v klimatické místnosti, kde se nechaly 28 dní zrát, než se odvezly na zkoušení. Fotky vzorků po odbednění jsou vidět na obr. 4.6.



(a) Formy před betonáží



(b) Formy stáhnuté svěrkami a překryté fólií po vylití betonem

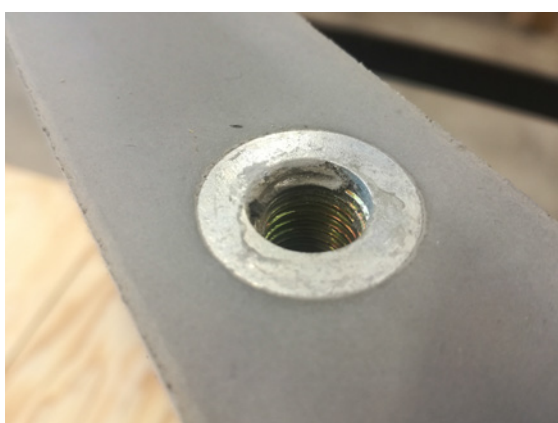
Obr. 4.5: Betonáž probíhala 5. a 6. 3. 2019, tedy na dva záběry. Při prvním záběru se betonovaly vzorky s přímou kotvou a při druhém záběru se betonovaly vzorky s kotvou tvořené pouzdrem s provlečenou výztuží. Na jednu betonáž o objemu 60 litrů se vybetonovaly tři vzorky na tah, tři vzorky na smyk, tři trámečky na zkoušku v tahu za ohybu a tři kostky na zkoušku v tlaku.



(a) Rozšroubovaná forma během odbedňování



(b) Hotové desky na zkoušku smykem



(c) Detail závitů kotvy v desce



(d) Uložené vzorky v kádi s vodou

Obr. 4.6: Vzorky byly bez problémů odbedněné (a), popsané (b) a uložené ke zrání do vody (d). U detailu závitů (c) je vidět podložka, která bránila kotvě, aby se zařízla do formy.

Průběh a vyhodnocení experimentu

Zkoušení tenkých desek z TRC se zabetonovanými kotvami bylo provedeno v laboratoři na Fakultě stavební ČVUT v Dejvicích u pana Ing. Pavla Kokeše. Byl použit zatěžovací přístroj LabTest 4.100SP1. Zkoušení doprovodných těles bylo provedeno v laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB).

5.1 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem bylo nutné připevnit do lisu vyrobený nástavec, přípravek pro upevnění vzorku ke zkušebnímu stroji a zajištění jeho stabilní polohy při provádění experimentu. Schéma nástavce je patrné z obr. 3.5 výše. Po vsunutí vzorku do nástavce bylo do kotvy zašroubováno oko, přes které se vzorek zatěžoval tahem. Vzorek se opíral na krajích o pásnice U profilů nástavce.

5.1.1 Zkouška tahem přímé kotvy

Během zatěžování v bezprostředním okolí konce kotvy docházelo k drobení betonu, ale nevznikaly žádné větší trhliny, které by naznačovaly rozštěpení vzorku. Větší trhliny byly způsobeny typem kotvy. Provlčená výztuž má větší kotvící oblast a tím, že se během vytahování opírá o beton, tak v něm vznikají trhliny. U přímé kotvy se výztuž držela ve vzorku čistě soudržnými silami mezi povrchy obou materiálů a díky vysoké pevnosti betonu nevznikaly žádné větší trhliny. Při maximálním porušení se ozvala rána, kterou způsobilo přetrhnutí kotvy. Po vytažení části kotvy ze vzorku bylo vidět, že se kotva přetrhla v místě, kde se závitové pouzdro lisuje k výztuži. Betonový vzorek zůstal bez většího porušení. Fotky ze zkoušky jsou na obr. 5.1.



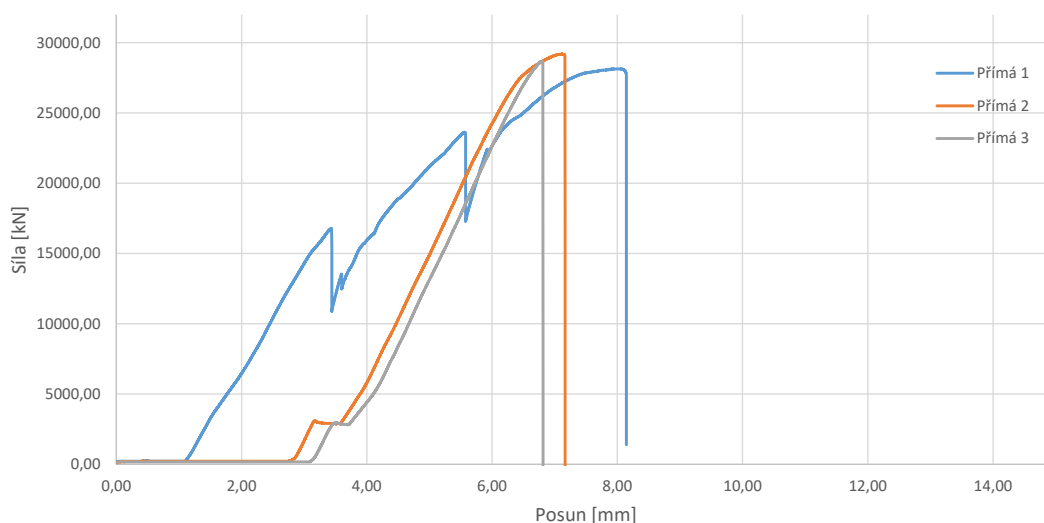
(a) Porušení za zkoušky tahem u přímé kotvy



(b) Vytrhnuté závitové pouzdro přímé kotvy

Obr. 5.1: Na obrázku (a) je vidět, že betonový vzorek není moc poškozen, což je způsobeno malou únosností kotvy, která se přetrhla (b).

Z grafu obr. 5.2 můžeme vyčíst, že v momentě přetržení kotvy ztratil vzorek únosnost, což charakterizuje kolmo klesající křivka síly. Tento jev není žádoucí, neboť konstrukce nevaruje před svým kolapsem a není tedy bezpečná. Nicméně k přetržení dochází daleko za tabulkovou hodnotou únosnosti a opatření by bylo předmětem pro výrobce kotev, nikoliv pro návrh opatření při aplikaci kotev.



Obr. 5.2: Graf průběhu síly na posunu při tahu u kotvy přímé.

5.1.2 Zkouška tahem pouzdra s provlečenou výztuží

Průběh zkoušky druhého typu kotvy již provázal vznik větších trhlin, ovšem výsledek byl víceméně stejný, jak u přímé kotvy. Po překročení maximální únosnosti prvku a vytažení zbytku kotvy ze vzorku bylo vidět, že závitové pouzdro přestříhlo provlečenou výztuž, která byla průměru 6 mm. Fotky ze zatěžování jsou na obr. 5.3.



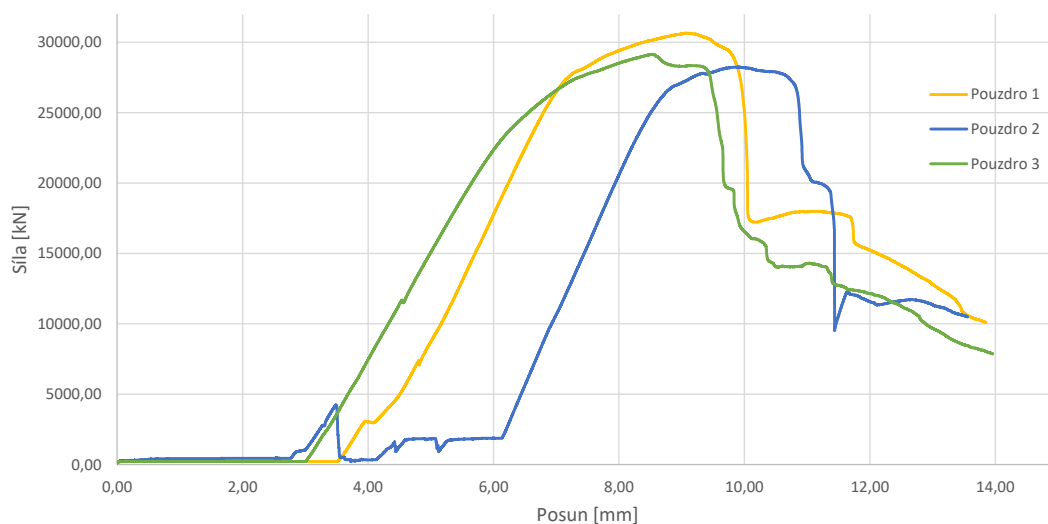
(a) Porušení za zkoušky tahem u kotvy tvořené pouzdrům s provlečenou výztuží



(b) Vyrhnuté závitové pouzdro kotvy

Obr. 5.3: Na obrázku (a) je vidět, že betonový vzorek je více poškozen, což je způsobeno jiným tvarem kotvy. Ve vyrhnutém závitovém pouzdře (b) je vidět přestřížená výztuž, která pouzdrům procházela.

Z grafu obr. 5.4 je vidět, že v momentě dosažení maximální únosnosti vzorek neselhal rázem, ale jeho pevnost postupně klesala. Konstrukce by v tomto případě varovala, že ztrácí únosnost a jeví se tedy bezpečnější v případě extrémního zatížení, než předchozí kotva. Opět však k porušení kotvy dochází daleko za daleko za tabulkovou hodnotou únosnosti a opatření by bylo předmětem pro výrobce kotev, nikoliv pro návrh opatření při aplikaci kotev.



Obr. 5.4: Graf průběhu síly na posunu při tahu u kotevního pouzdra z provlečenou výztuží.

5.1.3 Vyhodnocení zkoušky tahem

Číselné výsledky zkoušek lze vidět v tab. 5.1. Únosnosti obou kotev jsou přibližně stejné, i když se jednalo o dva různé druhy kotev.

Tab. 5.1: Výsledky ze zkoušky tahem

číslo vzorku	název	š [mm]	t [mm]	v [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	$\varnothing F_{max}$ [kN]
1	Přímá-tah	599,33	40,29	400,00	22053	0,0097	2283	28139,2	
2	Přímá-tah	599,67	39,87	400,17	22116	0,0096	2312	29184,8	28668,6
3	Přímá-tah	599,83	39,64	399,33	21846	0,0095	2301	28681,8	
4	Pouzdro-tah	600,50	40,46	400,50	22166	0,0097	2278	30657,3	
5	Pouzdro-tah	600,50	39,73	399,33	21846	0,0095	2293	28232,8	29346,1
6	Pouzdro-tah	599,83	39,99	400,00	22110	0,0096	2304	29148,1	

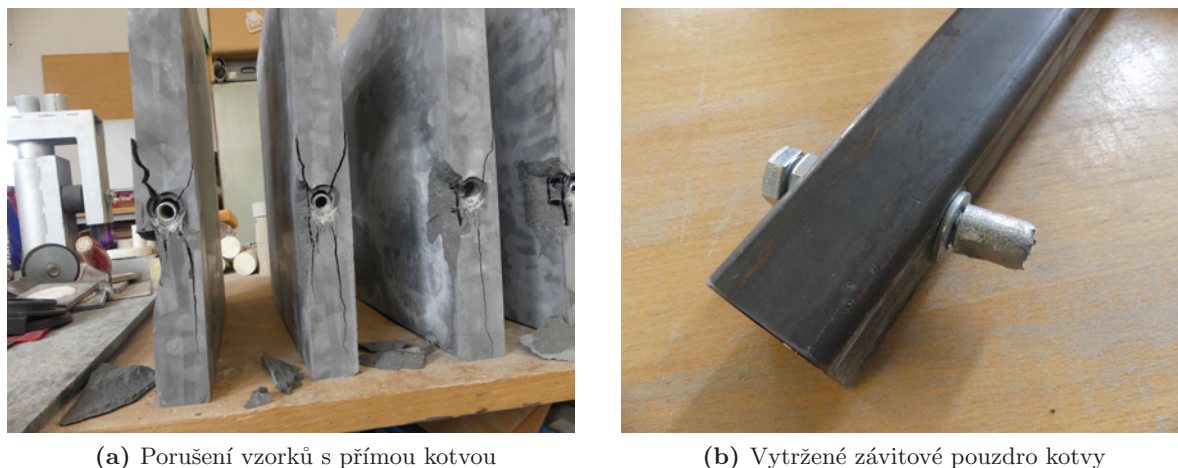
Vzhledem k tomu, že se vzorky porušily z důvodu neúnosnosti materiálu, ze kterého byly kotvy vyrobeny, tak můžeme usuzovat, že návrh desek byl správný a další postup zde není potřeba. Vzhledem k prozkoumání dalších možností kotvení a chování kotev v TRC je doporučeno se tomuto tématu věnovat dále se silnějšími kotvami, nebo s tenčími deskami TRC, jelikož tento experiment plně neproověřil možnost, kdy by k porušení docházelo v TRC, nikoliv v kotvě. Toto opatření však vzhledem k časovým omezením v bakalářské práci nebylo dále řešeno.

5.2 Zkouška smykem

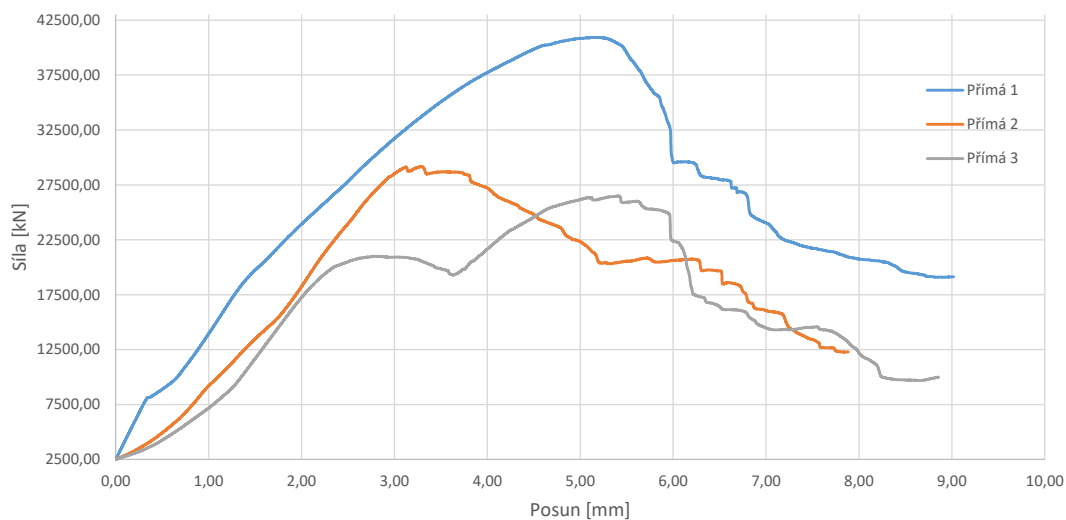
Pro zkoušku smykem bylo nutné připevnit do lisu vyrobený přípravek pro upevnění vzorku ke zkušebnímu stroji a zajištění jeho stabilní polohy při provádění experimentu. Schéma nástavce je patrné z obr. 3.7. Po vsunutí vzorku do nástavce bylo potřeba pod U profily vložit ocelové destičky, aby byl vzorek dobře usazen do aparatury a při zatěžování nevznikaly nežádoucí napětí. Zatěžovací čtyřhranný profil byl připevněn pomocí šroubu ke kotvě a byl opatřen objímkou, která zajišťovala, aby se při zatěžování profil nevyklonil.

5.2.1 Zkouška smykem přímé kotvy

Při zatěžování vzorku se kolem kotvy objevovaly radiální trhliny, které naznačovaly postupné rozštěpení betonu. U vzorku číslo 3 bylo před zatěžováním zjištěno, že se kotva v betonovém vzorku protáčí. Následně při zkoušení vzorku byla hlava kotvy ulomena. Obrázky ze zkoušky jsou uvedeny na obr. 5.5.



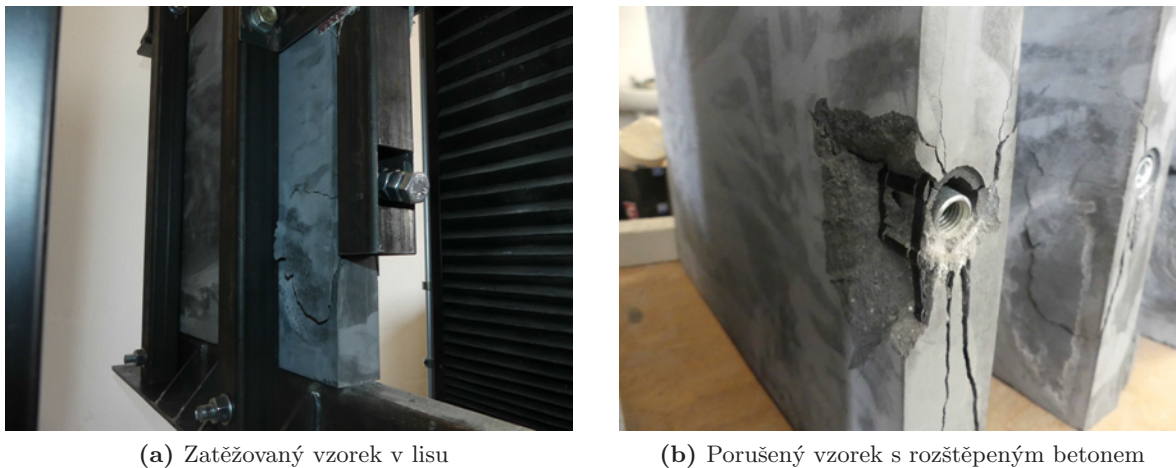
Obr. 5.5: Obrázek (a) ukazuje porušení u všech tří desek s přímou kotvou. Je vidět, že se beton rozštěpil, což vedlo k porušení prvku. Na obrázku (b) je vidět vytržené závitové pouzdro přímé kotvy ze vzorku č.3.



Obr. 5.6: Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy.

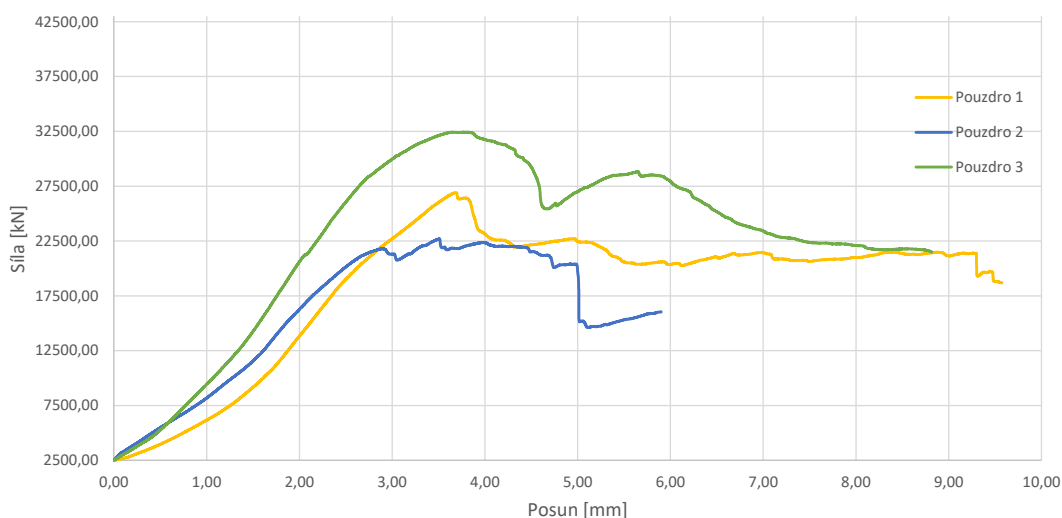
5.2.2 Zkouška smykem pouzdra s provlečenou výztuží

Zkouška smykem u druhého typu kotvy probíhala stejně, jako u přímé kotvy. Fotky ze zkoušky lze vidět na obr. 5.7.



Obr. 5.7: Na obrázku (a) je vidět odlamující se kus betonu od vzorku během zatěžování. Na druhém obrázku (b) si můžeme kromě porušení všimnout uhlíkové výztuže. Výztuž je lehce vyboulena do strany, což bylo způsobeno rozštěpením betonu, kterému výztuž dostatečně nezabránila.

Z grafu na obr. 5.8 je vidět, že si vzorek po dosažení maximální únosnosti udržoval jistou únosnost ještě po určitou dobu. Podobné křivky se nachází i u předchozího experimentu s přímou kotvou, jak je vidět na obr. 5.6. Jak již bylo dříve řečeno, tento jev je žádoucí, neboť konstrukce varuje před svým kolapsem při mimořádném zatížení. Opět však můžeme bezpečně také konstatovat, že naměřené hodnoty dalece převyšují hodnoty únosnosti uváděné v tabulce výrobcem a kotva je tak i při aplikaci v tenkých prvcích bezpečná.



Obr. 5.8: Graf průběhu síly na posunu při smyku u kotevního pouzdra z provlečenou výztuží.

5.2.3 Vyhodnocení zkoušky smykem

Výsledky zkoušek lze vidět v tab. 5.2, kde si lze všimnout, že přímá kotva vychází na únosnost lépe. To může být způsobeno jejím tvarem, jelikož závitové pouzdro je přilísované k prutu výztuže a tvoří tak tuhý celek, který je rovnoměrně namáhán tahem. U druhé kotvy, kde se závitovým pouzdem provléká výztuž, nedochází k tuhému spojení a pak je kotva náchylnější na smykové namáhání v místě provlečení výztuže kotevním pouzdem.

Tab. 5.2: Výsledky ze zkoušky smykem

číslo vzorku	název	š [mm]	t [mm]	v [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	ØF _{max} [kN]
1	Přímá-smyk	400,83	39,60	400,00	14497	0,0064	2283	40933,9	
2	Přímá-smyk	400,00	40,52	399,17	14757	0,0065	2281	29181,7	32204,7
3	Přímá-smyk	400,00	40,39	400,00	14700	0,0065	2275	26498,6	
4	Pouzdro-smyk	400,17	40,37	400,17	14735	0,0065	2280	26921,3	
5	Pouzdro-smyk	400,50	40,21	400,00	14587	0,0064	2264	22688,9	27348,0
6	Pouzdro-smyk	399,83	39,56	399,83	14335	0,0063	2267	32433,7	

Všechny vzorky byly porušeny rozštěpením betonu. Rozštěpení vzorku způsobilo, že betonová matrice nebyla kompaktní, výztužné uhlíkové sítě neudržely příčná napětí a začala se od sebe oddalovat. To vše vedlo ke ztrátě únosnosti kotvy, která se nemohla opírat o pevný beton. Tomuto jevu by se dalo předcházet, nebo alespoň zvýšit únosnost vzorku. Návrhu tohoto opatření se věnuje další kapitola.

5.3 Zkoušení doprovodných těles

5.3.1 Zkouška krychlí v tlaku

Zkoušení krychlí o rozměru 100x100x100 mm se provádělo podle normy ČSN EN 12390-3. [25] Během zkoušky se nevyskytly žádné abnormality. Výsledky jsou vidět v tab. 5.3 a fotky na obr. 5.9. Vzorky vybetonované 5. 5. 2019 vyšly s průměrnou pevností v tlaku 138,7 MPa a vzorky vybetonované 6. 5. 2019 měly průměrnou pevnost v tlaku 143,3 MPa. V celkovém průměru obou betonáží vychází hodnota 141 MPa, která byla použita při předběžném výpočtu podle směrnice ETAG 001 v návrhu.

Tab. 5.3: Výsledky ze zkoušky tlakem na krychlích

číslo vzorku	š [mm]	t [mm]	v [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A_c [mm ²]	F_{max} [kN]	f_{ck} [MPa]	$\varnothing f_{ck}$ [MPa]
1	100,12	98,82	100,04	2278	0,00099	2302	9894	1306,9	132,1	
2	100,32	99,69	99,99	2306	0,00100	2307	10000	1457,4	145,7	138,7
3	100,34	100,17	100,04	2311	0,00101	2298	10051	1389,9	138,3	
4	100,21	98,44	99,91	2285	0,00099	2318	9865	1428,4	144,8	
5	100,31	99,31	100,23	2282	0,00100	2286	9961	1317,1	132,2	143,3
6	100,06	99,31	100,24	2323	0,00100	2332	9936	1517,9	152,8	



(a) Betonová krychle vložená do lisu



(b) Vzorek krychle po odzkoušení

Obr. 5.9: Tlaková zkouška krychlí betonu.

5.3.2 Zkouška trámečků v tahu za ohybu a tlaku

Zkoušení trámečků o rozměru 40x40x160 mm se provádělo podle normy ČSN EN 12390-5. [23] Během zkoušky se nevyskytly žádné abnormality. Výsledky jsou vidět v tab. 5.4. Vzorky vybetonované 5. 5. 2019 vyšly s průměrnou pevností v tahu za ohybu 15,3 MPa a vzorky vybetonované 6. 5. 2019 měly pevnost 15,5 MPa.

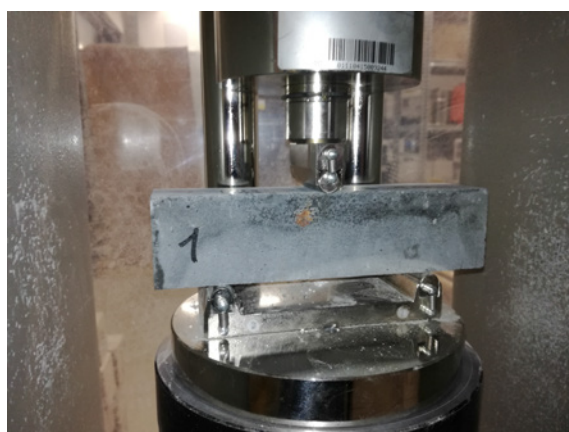
Po odzkoušení trámečků na tah za ohybu se vzaly oba kusy úlomků a vyzkoušely se v tlaku. Výsledky jsou vidět v tab. 5.5 a fotky z obou zkoušek na obr. 5.10. Vzorky vybetonované 5. 5. 2019 vyšly s průměrnou pevností v tlaku 139,8 MPa a vzorky vybetonované 6. 5. 2019 měly pevnost 139,3 MPa.

Tab. 5.4: Výsledky ze zkoušky tahem za ohybu na trámečcích

číslo vzorku	š [mm]	v [mm]	d [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A _c [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	∅f _{ck} [MPa]
1	39,81	39,98	160,00	584,8	0,00026	2296	1592	6,30	15,8	15,3
2	41,47	40,17	160,00	585,0	0,00027	2195	1666	6,08	14,5	
3	40,21	40,15	160,00	594,4	0,00026	2301	1614	6,32	15,6	
4	40,05	40,11	160,00	590,6	0,00026	2298	1606	6,07	15,1	15,5
5	39,46	40,03	160,00	583,0	0,00025	2307	1580	6,31	16,0	
6	40,39	39,96	160,00	594,0	0,00026	2300	1614	6,26	15,5	

Tab. 5.5: Výsledky ze zkoušky tlakem na úlomech trámečeků

číslo vzorku	š [mm]	v [mm]	d [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A _c [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	∅f _{ck} [MPa]
1a	39,81	39,98	160,00	584,8	0,00026	2296	1592	227,36	142,8	139,8
1b	39,81	39,98	160,00	584,8	0,00026	2296	1592	225,82	141,8	
2a	41,47	40,17	160,00	585,0	0,00027	2195	1659	222,03	133,8	
2b	41,47	40,17	160,00	585,0	0,00027	2195	1659	223,05	134,5	139,3
3a	40,21	40,15	160,00	594,4	0,00026	2301	1608	219,87	136,7	
3b	40,21	40,15	160,00	594,4	0,00026	2301	1608	240,01	149,2	
4a	40,05	40,11	160,00	590,6	0,00026	2298	1602	224,43	140,1	139,3
4b	40,05	40,11	160,00	590,6	0,00026	2298	1602	219,71	137,1	
5a	39,46	40,03	160,00	583,0	0,00025	2307	1578	214,46	135,9	
5b	39,46	40,03	160,00	583,0	0,00025	2307	1578	231,79	146,9	139,3
6a	40,39	39,96	160,00	594,0	0,00026	2300	1616	224,84	139,2	
6b	40,39	39,96	160,00	594,0	0,00026	2300	1616	220,75	136,6	



(a) Trámeček při zkoušce v tahu za ohybu



(b) Úlomek trámečku při zkoušce v tlaku

Obr. 5.10: Zkouška trámečku v tahu za ohybu (a) a v tlaku (b).

Opatření na porušení betonu

V předchozí kapitole v sekci věnované výsledkům bylo zjištěno, že vzorky zkoušené ve smyku dosáhly své únosnosti porušením betonu. Tato kapitola se věnuje návrhu opatření, aby tomuto způsobu porušení bylo zabráněno, či omezeno, nebo aby byla zlepšena únosnost prvku.

6.1 Návrh a příprava vzorků

Pro opatření byly zvoleny vzorky s přímou kotvou. K porušení docházelo rozštěpením betonu, při kterém vznikaly trhliny v radiálním směru. Uhlíkové výztužné sítě byly při krajích lehce vyboulené do stran, což také vedlo ke kolapsu prvku. Aby bylo těmto jevům zabráněno, tak byla navržena uhlíková spirála, která se provleče uhlíkovými sítěmi a bude do ní zasunuta přímá kotva. Tato spirála by měla pomoci držet uhlíkové sítě proti vyboulení do stran a zároveň uhlíkové svazky budou probíhat kolmo na radiální trhliny, čímž by měla bránit, či omezit vznik těchto trhlin.

Spirála byla vyrobena namotáním uhlíkového rovingu s podobnou průřezovou plochou, jako je plocha jednoho svazku použité výztuže, na plastovou trubku, kde byla natřena epoxydovou pryskyřicí a opatřena křemičitým pískem za účelem větší soudržnosti mezi spirálou a betonem. [29] Po zatvrdnutí epoxydové pryskyřice byla spirála sundána, nařezána a navlečena na uhlíkové sítě. Celek byl nakonec vložen do formy a následně byly vzorky vybetonovány. Fotky z přípravy opatření jsou prezentovány na obr. 6.1.



(a) Tvorba opatření



(b) Hotová uhlíková spirála



(c) Namotaná spirála do uhlíkových sítí



(d) Opatření s kotvou

Obr. 6.1: Uhlíkový roving byl namotán na trubku a následně byl natřen epoxydovou pryskyřicí a posypán pískem (a). Po sundání byla spirála nařezána a očištěna od přebytečné pryskyřice (b). Na fotce (c) je spirála namotána mezi uhlíkové sítě a na poslední fotce (d) je vidět ukázka, jak bude vypadat celek v betonovém vzorku.

6.2 Průběh a vyhodnocení experimentu

Zatěžování vzorků bylo provedeno v laboratoři na Fakultě stavební ČVUT v Dejvicích u pana Ing. Pavla Kokeše. Byl použit zatěžovací přístroj LabTest 4.100SP1. Byl tedy použit stejný lis, jako u předchozího zatěžování vzorků.

Průběh zkoušení vzorků probíhal podobně, jako u vzorků bez opatření. Kolem kotvy byly postupně v průběhu zatěžování vytvořeny radiální trhliny, které zapříčinily postupné rozevírání desky, což vedlo ke ztrátě podpory kotvy na místě a následnému kolapsu vzorku. Obrázky porušení betonu jsou vidět na obr. 6.2.



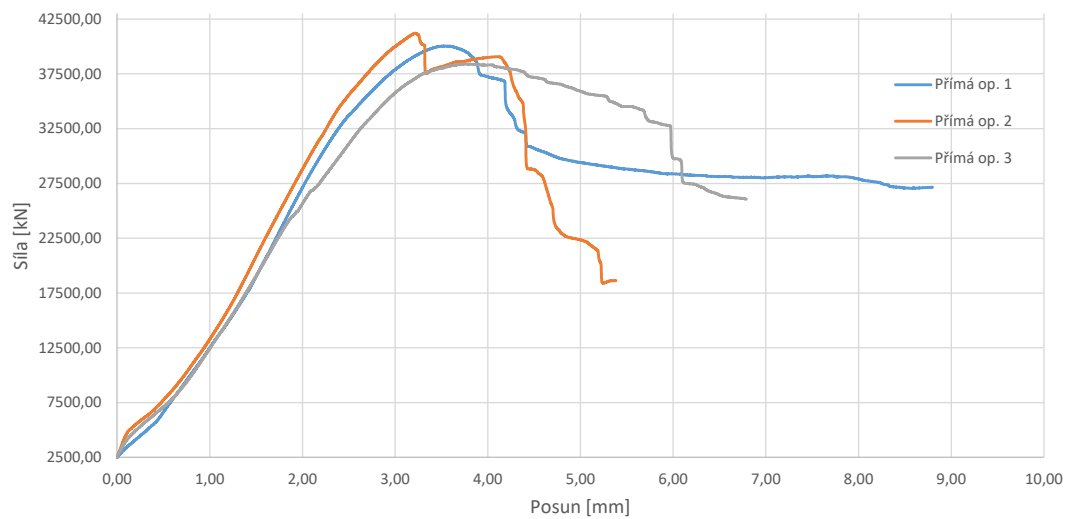
(a) Deska s opatřením po odzkoušení smykem



(b) Všechny tři vzorky s opatřením po odzkoušení smykem

Obr. 6.2: Na obrázku (a) je vidět odzkoušený betonový vzorek v lisu. Na druhém obrázku (b) jsou vidět všechny tři odzkoušené vzorky s opatřením.

Z grafu na obr. 6.3 je vidět, že po dosažení maximální únosnosti prvek nezkolaboval naráz, ale že si ještě držel určitou únosnost. Tento jev je vhodný, jelikož by případná konstrukce před kolapsem varovala, že se něco děje a bylo by možné se podle toho v danou chvíli zachovat.



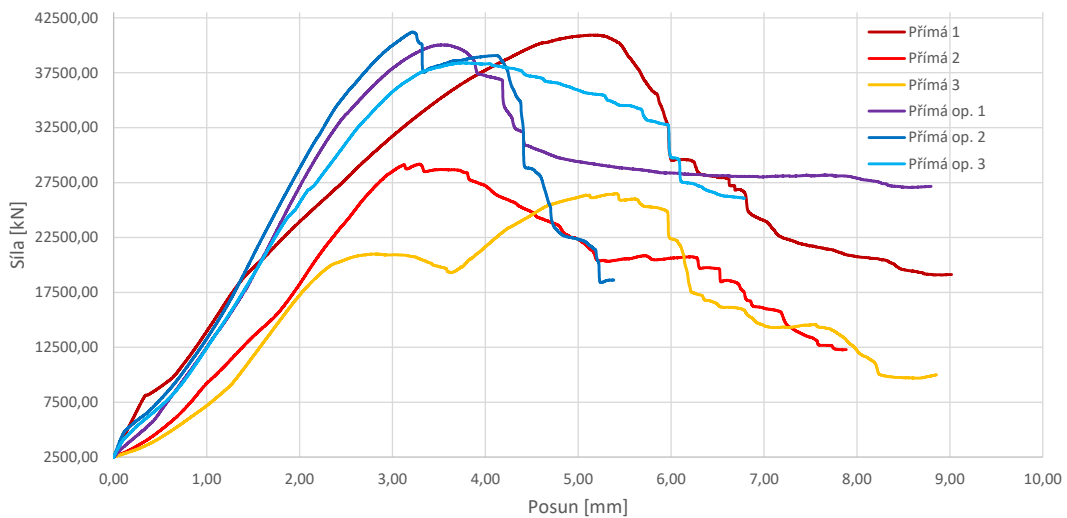
Obr. 6.3: Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy s opatřením

Oproti výsledkům vzorků bez opatření je vidět, že hodnoty únosností vzorků ve smyku s opatřením jsou průměrně větší. Průměrná hodnota maximálního zatížení vzorků bez opatření s přímou kotvou je 32205 kN a s opatřením je 39885 kN. Výsledky únosností vzorků s opatřením ve smyku jsou vidět v tabulce tab. 6.1. Dá se předpokládat, že ke zvýšení únosnosti přispělo opatření. K jasnému závěru by bylo potřeba provést více zkoušek na více vzorcích.

Tab. 6.1: Výsledky ze zkoušky smykem s opatřením

číslo vzorku	název	š [mm]	t [mm]	v [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	F _{max} [kN]	∅F _{max} [kN]
1	Tyč-smyk-op	400,83	39,32	399,67	14676	0,0063	2330	40043,6	
2	Tyč-smyk-op	400,50	38,57	400,00	14390	0,0062	2329	41215,6	39885,2
3	Tyč-smyk-op	400,00	39,68	400,00	14629	0,0064	2305	38396,3	

Na grafu na obr. 6.4 můžeme vidět porovnání grafů vzorků s opatřením a bez opatření. Vzorky s opatřením mají výsledky stabilnější a jejich křivka je strmější, než u vzorků bez opatření. K tomu nejspíše přispěla uhlíková spirála, která nedovolila vzorku, aby se v místě kotvy rozštěpoval. Uhlíková spirála, která je propletená uhlíkovými sítěmi, udržuje síť na svém místě a tím nedává prostor kotvě, aby se zařezávala hlouběji do betonu. Na grafu je také vidět, že oba typy vzorků nevykazovaly náhlý kolaps, což je vhodné, jak již bylo popsáno.



Obr. 6.4: Graf průběhu síly na posunu při smyku u přímé kotvy s opatřením a bez opatření.

6.3 Doprovodná tělesa

V následujících tabulkách jsou vidět výsledky pevností betonu z doprovodných těles ke zkoušce smykem s opatřením tab. 6.2, tab. 6.3 a tab. 6.4.

Zkoušení krychlí o rozměru 100x100x100 mm se provádělo podle normy ČSN EN 12390-3. [25] Průměrná pevnost v tlaku krychlí vyšla 148,8 MPa. Během zkoušky se nevyskytly žádné abnormality.

Tab. 6.2: Výsledky ze zkoušky tlakem na krychlích z betonáže s opatřením

číslo vzorku	š [mm]	v [mm]	d [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A _c [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	∅f _{ck} [MPa]
1	99,92	100,76	100,75	2298	0,00101	2266	10068	1507,60	149,7	
2	99,85	101,05	100,35	2292	0,00101	2263	10091	1525,10	151,1	148,8
3	100,00	100,10	100,37	2294	0,00101	2283	10010	1456,20	145,5	

Zkoušení trámečků o rozměru 40x40x160 mm se provádělo podle normy ČSN EN 12390-5. [23] Průměrná pevnost v tahu za ohybu u trámečků vyšla 11,4 MPa a průměrná pevnost v tlaku na úlomcích byla 144,1 MPa. Během zkoušky se nevyskytly žádné abnormality.

Tab. 6.3: Výsledky ze zkoušky tahem za ohybu na trámečcích z betonáže s opatřením

číslo vzorku	š [mm]	v [mm]	d [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A _c [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	∅f _{ck} [MPa]
1	40,81	39,90	160,00	584,4	0,00026	2243	1632	4,95	11,4	
2	39,76	40,19	160,00	580,0	0,00026	2269	1590	4,48	10,5	11,4
3	39,97	40,03	160,00	581,8	0,00026	2273	1599	5,27	12,3	

Tab. 6.4: Výsledky ze zkoušky tlakem na úlomcích trámečků z betonáže s opatřením

číslo vzorku	š [mm]	v [mm]	d [mm]	m [g]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	A _c [mm ²]	F _{max} [kN]	f _{ck} [MPa]	∅f _{ck} [MPa]
1a	40,81	39,90	160,00	584,4	0,00026	2243	1632	240,39	147,3	
1b	40,81	39,90	160,00	584,4	0,00026	2243	1632	226,99	139,1	
2a	39,76	40,19	160,00	580,0	0,00026	2269	1590	231,34	145,5	144,1
2b	39,76	40,19	160,00	580,0	0,00026	2269	1590	240,99	151,5	
3a	39,97	40,03	160,00	581,8	0,00026	2273	1599	231,03	144,5	
3b	39,97	40,03	160,00	581,8	0,00026	2273	1599	218,53	136,7	

Je nutno zmínit, že při této betonáži byl do směsi použit cement od jiného výrobce, což mělo však jen nepatrný vliv na vlastnosti výsledného betonu. Průměrná pevnost na krychlích u vzorků bez opatření byla 141 MPa a u krychlí z betonáže s opatřením byla 148,8 MPa. Průměrná pevnost trámečků v tahu za ohybu byla u první várky 15,4 MPa a u druhé várky byla 11,4 MPa. Průměrná pevnost v tlaku na úlomcích byla u betonáže bez opatření 139,5 MPa a s opatřením 144,1 MPa. Z výsledků lze vyčíst, že se pevnost v tlaku mírně zvětšila a v tahu za ohybu zmenšila. Vliv na zkoušku smykem tento jev mohl lehce mít, neboť trhliny vznikající kolem kotvy jsou způsobeny tlakem a tahem, ale na druhou stranu proti rozštěpení vzorku působí uhlíková spirála, která se aktivuje právě popraskáním betonu. Lze tedy uvažovat, že nepatrně jiné vlastnosti betonové směsi neměly výrazný vliv na vyhodnocení experimentu a vzájemné porovnání výsledků.

Závěr

Cílem této práce bylo ověření únosnosti kotevních prvků v tenkých betonových deskách vyztužených textilní uhlíkovou výztuží, jelikož tato problematika nebyla dosud podrobněji řešena. Dále bylo cílem provést rešerši věnující se kotevním prvkům v TRC a zkoušení kotevních prvků v betonu.

Byly provedeny dvě sady zkoušek se dvěma typy nosných kotev. Pro oba druhy zkoušek, zatížení kotevního prvku tahem a smykem, byly navrženy vzorky a pro ně speciální nástavce pro zkoušení, jelikož se nejednalo o normovou zkoušku. Byla použita závitová přepravní kotva s přímým koncem a závitové pouzdro s provlečenou ohnutou výztuží. Betonový vzorek o tloušťce 40 mm se skládal z HPC a uhlíkových sítí při každém z obou povrchů desky.

Při zkoušce tahem docházelo k porušení v kotvě dřívě, než k porušení betonu. V rámci dalšího výzkumu chování kotev v TRC namáhaných tahem by bylo vhodné pokračovat v práci a vyrobit buď subtilnější desky TRC, nebo vložit do stejných desek o tloušťce 40 mm bytelnější kotvu. To za účelem, aby došlo k porušení v betonu a bylo možné zkoumat chování kotvy a textilní výztuže v betonu.

Betonové desky byly při zkoušce smykem porušeny rozštěpením betonového vzorku. Vlivem rozštěpení kotva ztratila pevné ukotvení v prvku a tím i svou únosnost. Jako opatření pro zvýšení únosnosti přímé kotvy byla navržena uhlíková spirála, která byla namotána mezi uhlíkové sítě a do ní byla umístěna zkoušená kotva. Uhlíková spirála při zkoušení udržovala uhlíkové sítě v daném rozestupu a bránila otevírání vznikajících radiálních trhlin v těsné blízkosti kotvy, což vedlo k průměrně vyšším hodnotám únosnosti prvku a k větší tuhosti prvku, což dokazuje strmost křivky z grafu ze zatěžování.

Téma této práce mě zaujalo z důvodu možné aplikace zkoušených kotev pro vykonzolované lomenicové schodiště, což je směr, kterým bych se chtěl dále zabývat a případně jednou takové schodiště navrhnout a vyrobit z TRC.

Literatura

- [1] ETAG 001 guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete. Brusel: EOTA - European Organisation for Technical Approvals, duben 2013.
- [2] Tomáš Vlach. Lomenicová schodiště. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha, 2012.
- [3] Břetislav Eichler. Co sluší betonovému schodišti. https://www.mujdum.cz/rubriky/interier/co-slusi-betonovemu-schodisti_175.html. [Online]. vid. 21. května, 2019.
- [4] Pierre-Claude Aïtcin. *Vysokohodnotný beton*. ČKAIT, Praha, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [5] Lenka Laiblová. Využití textilií pro vyztužení prvků z vysokohodnotného betonu - experimentální ověření a vyhodnocení. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha, 2014.
- [6] Basaltex <http://www.basaltex.com/index.aspx>. Basalt basic properties. http://www.basaltex.com/files/cms1/basaltfibersbasicproperties_636669004437905000.pdf, 2018. [Online]. vid. 20. dubna, 2019.
- [7] L. Y. Ming M. F. M. Tahir A. A. R. Amer1, M. M. A. B. Abdullah1. Performance and properties of glass fiber and its utilization in concrete- a review. *American Institute of Physics*, 2018.
- [8] Tomáš Vlach. Soudržnost uhlíkové a čedičové výztuže kompozitní výztuže s uhpc. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha, 2013.
- [9] Jakub Řepka Lenka Laiblová, Tomáš Vlach. Co je to textilní beton (trc). <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18732-co-je-to-textilni-beton-trc>, 2019. [Online]. vid. 24. března, 2019.
- [10] Hering Architectural Concrete Groß-Beckert. betoshell®classic - groz-beckert in albstadt. https://www.heringinternational.com/fileadmin/images/content/de/beton/betoshell/betoshell_classic/Classic_Albstadt_Sozialzentrum-Groz-Beckert_Foto-Groz-Beckert_1000x700.jpg, 2019. [Online]. vid. 12. dubna, 2019.

- [11] <https://paulsberg.co/> Paulsberg. Furniture made of concrete by paulsberg. <https://www.themethodcase.com/wp-content/uploads/2011/08/furniture-made-of-concrete-paulsberg-01.jpg>, 2012. [Online]. vid. 12. dubna, 2019.
- [12] HALFEN s.r.o. Kkt přepravní úchyty s kulovou hlavou. <https://www.halfen.com/cz/2061/product-ranges/stavba/systemy-prepravnich-kotevnich-uchytu/kkt-prepravni-uchyty-s-kulovou-hlavou/uvod/>. [Online]. vid. 21. května, 2019.
- [13] HALFEN s.r.o. Přepravní úchyty s objímkou ha. <https://www.halfen.com/cz/2079/product-ranges/stavba/systemy-prepravnich-kotevnich-uchytu/prepravni-uchyty-s-objimkou-ha/uvod/>. [Online]. vid. 21. května, 2019.
- [14] HOCHTIEF CZ a. s. Prefabrikáty - výroba, montáž. <http://www.hochtief.cz/prefabrikaty>. [Online]. vid. 21. května, 2019.
- [15] Stefan Kaeseberg Klaus Holschemacher, Katrin Mende. Innovations in construction of carbon concrete composite members. EASEC-15, 2017.
- [16] Changbin Joh Sokhwan Choi and Sung-Chul Chun. Behavior and strengths of single cast-in anchors in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (uhpfr) subjected to a monotonic tension or shear. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2014.
- [17] Lennart Elfgren Rasoul Nilforoush, Martin Nilsson. Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal- and high-strength concrete. *Elsevier*, 2017.
- [18] RILEM. *Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM, Aachen, 2006. ISBN 2-912143-99-3.
- [19] FIB International Federation for Structural Concrete. *Design of anchorages in concrete*. Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2011. ISBN 978-2-88394-098-7.
- [20] DD CEN/TS 1992-4-1:2009 design of fastenings for use in concrete. Brusel: CEN - European Committee for Standardization, květen 2009.
- [21] ACI American Concrete Institute. *Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-06) and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2011. ISBN 978-0-87031-251-9.
- [22] MIRRA czech. Závitové přepravní kotvy. <http://www.mirra.cz/cs/vlnove-kotvy.html>, 2019. [Online]. vid. 21. března, 2019.
- [23] ČSN EN 12390-5 zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, říjen 2009.
- [24] ÚFMI Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Statické zkoušky krátkodobé. http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf, 2011. [Online]. vid. 24. března, 2019.
- [25] ČSN EN 12390-3 zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.
- [26] Tomáš Vlach et al. Petr Bouška, Petr Hájek. *UHPC matrix for ultra-thin elements with non-conventional reinforcement*. Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague and Klokner Institute, CTU in Prague, Prague, 2017. ISBN 978-80-01-06120-6.

- [27] solidian. Flat reinforcement. <https://www.solidian.com/en/products/flat-reinforcement/>, 2019. [Online]. vid. 21. března, 2019.
- [28] MIRRA czech. Závitová pouzdra. <http://www.mirra.cz/cs/zavitova-pouzdra.html>, 2019. [Online]. vid. 21. března, 2019.
- [29] Michal Ženíšek et al. Tomáš Vlach, Lenka Laiblova. The effect of surface treatments of textile reinforcement on mechanical parameters of hpc facade elements. *Key Engineering Materials*, 2016.