

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Návrh zkoušek pro vytvoření materiálového
modelu soudržnosti betonových vrstev

Development of testing methods for
concrete-to-concrete bond modeling

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2024

Marek Kříž

Vedoucí práce: Ing. Michaela Frantová, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kříž** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **502291**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Specializace: **Pozemní stavby**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh zkoušek pro vytvoření materiálového modelu soudržnosti betonových vrstev

Název bakalářské práce anglicky:

Development of testing methods for concrete-to-concrete bond modeling

Pokyny pro vypracování:

- soudržnost betonových vrstev s ohledem na různé vlastnosti jednotlivých vrstev (stáří, pevnost, ...)
- spojování vrstev betonu - možnosti úprav a ošetřování povrchu - vliv na soudržnost (mechanické i chemické hledisko)
- analýza porušení na styku betonových vrstev (např. miktotrhliny)
- zkoušky soudržnosti - výhody x nevýhody, hledisko vybavení laboratoře, možnosti "low-cost experimentů"
- návrh vzorků a postupu zkoušení + vyhodnocení experimentů s cílem tvorby materiálového modelu na základě pracovního diagramu a z toho vyplývající možnosti validace komerčních software

Seznam doporučené literatury:

- [1] JÍLEK, Antonín a NOVÁK, Václav. Betonové stavitelství I. Praha: SNTL, 1986.
[2] Y. Khmurovska, P. Štemberk Numerical Modelling of the Polymer Cement Bonding Under Cyclic Thermal Load. MECHANIKA 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michaela Frantová, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Michaela Frantová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23-02-2024

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a veškeré použité informační zdroje jsem uvedl v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Marek Kříž

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucí své bakalářské práce Ing. Michaele Frantové, Ph.D. za odborné rady a vedení této práce. Dále bych rád poděkoval za cenné připomínky prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng. a za pomoc s experimentální částí práce Ing. Martinu Petříkovi, Ph.D. a Ing. Václavu Wudimu. V neposlední řadě děkuji celé své rodině za podporu při studiu.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá soudržností betonových vrstev, způsoby měření soudržnosti vrstev a dalšího užití změřené soudržnosti při tvorbě materiálového modelu vícevrstevných konstrukcí. V práci je popsána problematika soudržnosti vrstev betonů různých pevností a různého stáří. Jsou zde popsány jednotlivé metody měření soudržnosti betonových vrstev a provedena navržená zkouška soudržnosti na vzorcích s různým tvarem povrchu v rozhraní a různého stáří.

KLÍČOVÁ SLOVA

beton, soudržnost betonových vrstev, vícevrstvé betonové stěny, sendvičové stěny, smyková pevnost, zkoušky soudržnosti, spolupůsobení betonových vrstev

ABSTRACT

This bachelor thesis addresses the cohesion of concrete layers, methods for measuring their cohesion, and the subsequent utilization of cohesion measurements in developing a material model for multilayer structures. It explores the cohesion of concrete layers across various strengths and ages, discussing different measurement methods and conducting selected cohesion test on specimens with varying surface shapes at the interface and different ages.

KEYWORDS

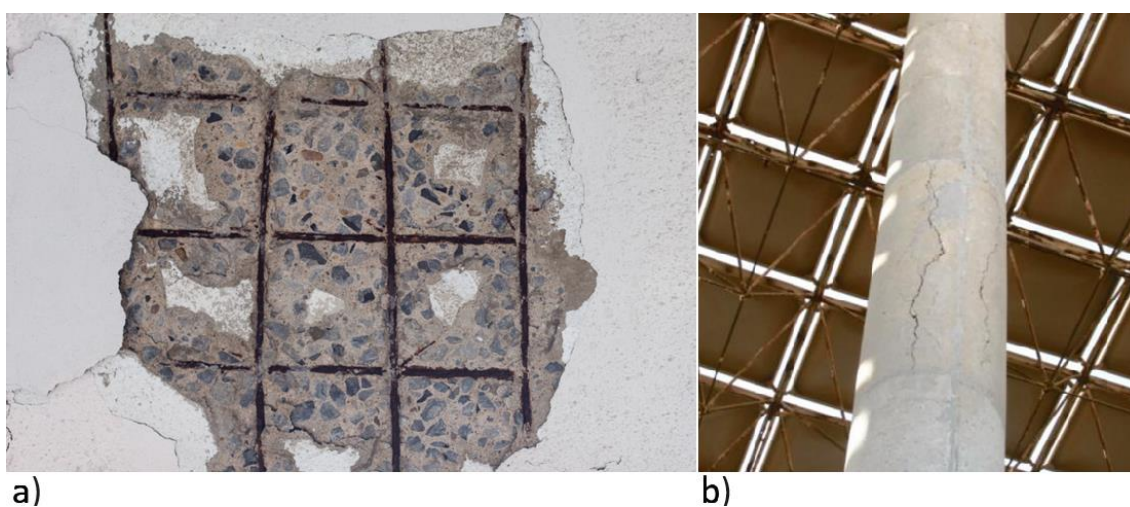
concrete, cohesion of concrete layers, multilayer concrete walls, sandwich walls, shear strength, measurement of cohesion, multilayer wall analysis, interaction of concrete layers

Obsah

Úvod	8
1 Soudržnost betonových vrstev	9
1.1 Složení čerstvého betonu	12
1.1.1 Příměsi	12
1.2 Příprava povrchu	14
1.2.1 Mechanické úpravy povrchu	14
1.2.2 Vlhčení povrchu	16
2 Metody měření pevnosti v soudržnosti	18
2.1 Zkouška v příčném tahu	20
2.2 Zkouška v šikmém smyku	21
2.3 Zkouška kroucením	25
2.4 Zkouška v prostém tahu	27
2.5 Smyková 4 bodová zkouška	29
2.6 Zkouška soudržnosti vzorků tvaru Z	30
3 Experimentální část	32
3.1 Návrh metody zkoušení	32
3.2 Postup provedení zkoušky	33
3.3 Výsledky experimentu	37
4 Závěr	43
Seznam použité literatury	44
Seznam obrázků	47

Úvod

Potřeba zajistit soudržnost betonových vrstev je jedním z nejdůležitějších faktorů při spojování staršího a mladšího betonu. Zajištění soudržnosti vrstev se objevuje u sanací degradovaných, nebo jinak poškozených konstrukcí, u zesilovaných konstrukcí a při zjišťování zbytkové životnosti objektu, kdy je třeba soudržnost vrstev změřit pro korektní výsledky. Zároveň musí být soudržnost zajištěna u sendvičových konstrukcí, aby při posouzení únosnosti bylo možné uvažovat plný průřez.



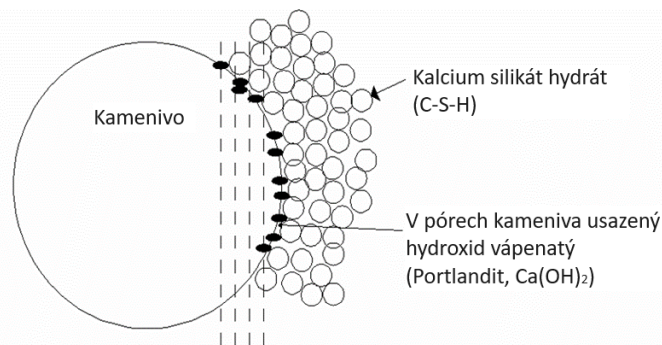
OBR. 1 A)-DEGRADOVANÁ ŽELEZOBETONOVÁ STĚNA [1], B)-PŘETÍŽENÝ ŽB. SLOUP [2]

Existuje mnoho faktorů, které mají vliv na soudržnost různě starých betonových vrstev. Soudržnost vrstev ovlivňuje složení betonu, zejména vodní součinitel a příměsi, a úprava podkladního povrchu v rozhraní, například tvarování, broušení, vlhčení atd.

Soudržnost vrstev betonů je možné měřit mnoha způsoby. Jednotlivé typy zkoušení disponují různými výhodami a nevýhodami. Zkoušky jsou odlišné typem zatěžování, způsobem uchycení vzorků, náklonem rozhraní atd. Problém se objevuje ve snaze vytvořit ve vzorku „čisté“ smykové napětí, kdy společně se smykovým napětím je rozhraní zatíženo kroučícími momenty, tlakem apod.

1 Soudržnost betonových vrstev

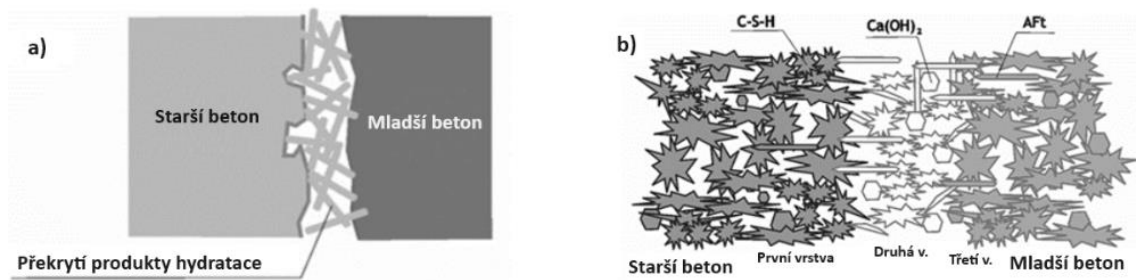
Soudržnost staršího a mladšího betonu závisí na adhezi čerstvé betonové směsi k povrchu staršího betonu, tedy na schopnosti směsi dokonale přilnout k povrchu. Po zatvrdnutí čerstvé betonové směsi vznikne na rozhraní vrstev mezipovrchová zóna. Vzniklá mezipovrchová zóna má podobné vlastnosti jako mezifázová přechodová zóna (ITZ) mezi kamenivem a hydratovanou cementovou pastou. Mezipovrchová zóna je oslabena v důsledku tzv. stěnového efektu (obr. 2), obdobně jako je oslabena ITZ mezi kamenivem a cementovou pastou. V důsledku stěnového efektu je v rozhraní přítomno méně částic produktů hydratace a více pórů, které jsou nepřímo úměrné adhezi čerstvého betonu a zmenšují stykovou plochu vrstev. Adhezi lze zlepšit různými způsoby, například úpravou povrchu, optimalizací složení čerstvého betonu a přísadami a příměsemi. [3]



OBR. 2 SCHÉMA TRANZITNÍ ZÓNY KAMENIVA V BETONU-STĚNOVÝ EFEKT

Stykové plochy mezi starším a mladším betonem mají obvykle odlišný poměr kameniva a cementu, vodní součinitel a vývoj teploty během doby tuhnutí a tvrdnutí ve srovnání s novým betonem. Porušení rozhraní mezi starším a novým betonem je obdobné k porušení v tranzitní zóně na rozhraní mezi kamenivem a ztvrdlou cementovou pastou. [4]

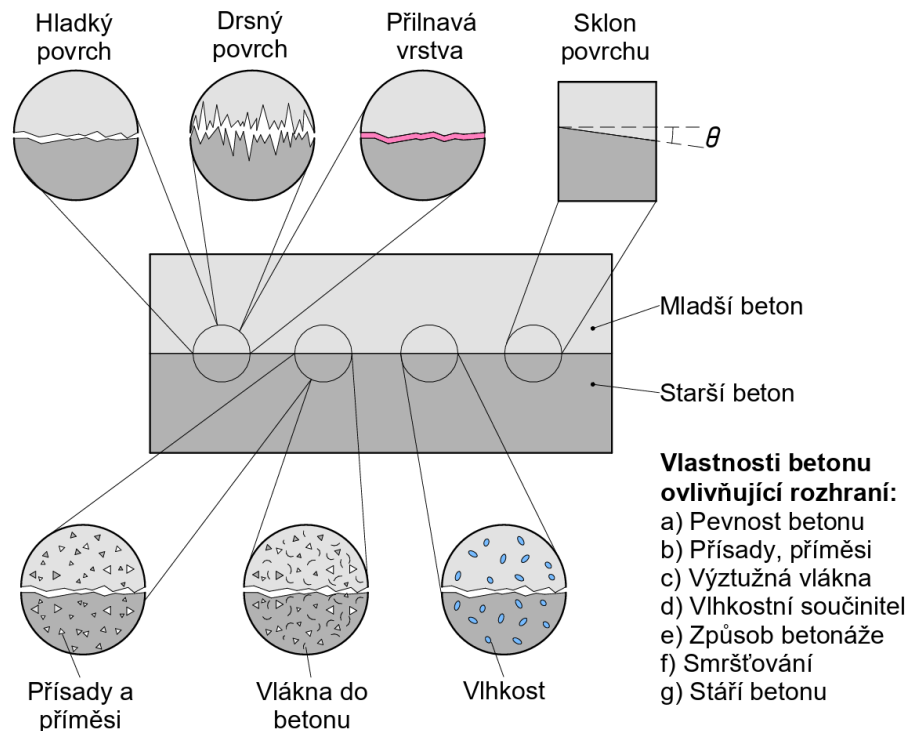
Mezipovrchovou zónu mezi betony, schematicky znázorněnou na obr. 3 a), lze z mikropohledu dělit do tří vrstev, jak je schematicky znázorněno na obr. 3 b).



OBR. 3 A) MAKROPOHLED PŘECHODOVÉ ZÓNY, B) MIKROPOHLED PŘECHODOVÉ ZÓNY [5]

První vrstvu lze označit jako vrstvu penetrační, nachází se ve starším betonu a je tvořená převážně C-S-H produkty s menším množstvím AFt (ettringitu) a Ca(OH)_2 . Složky čerstvého betonu do určité míry reagují s aktivními složkami ve starším betonu. Druhá vrstva je nejslabší, je v rozhraní nejvíce pórovitá, obsahuje Ca(OH)_2 , vysoce orientované jehlicovité krystaly AFt a má méně částic C-S-H, tato vrstva definuje nízké pevnosti soudržnosti vrstev. Třetí vrstva se nachází v novém betonu a má téměř stejnou mikrostrukturu jako nový beton, jednotlivé krystaly AFt jsou orientovány do rozhraní.

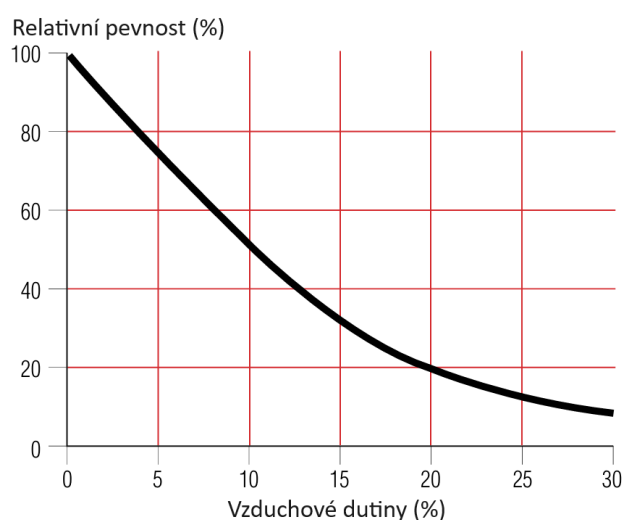
Vlivy na soudržnost betonových vrstev



OBR. 4 SCHÉMA FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍ SOUDRŽNOST VRSTEV

Vlivy na soudržnost betonových vrstev můžeme dělit na aspekty, které ovlivňují betonovou směs již při výrobě, soudržnost ovlivňují z materiálové podstaty betonu na molekulární úrovni, na obr. 4 se jedná například o přísady, příměsi, vlhkostní součinitel a výsledná pevnost a smršťování betonu. Aspekty, které ovlivňují soudržnost vrstev z mechanického hlediska jsou například z obr. 4 výztužná vlákna, způsob a technologie betonáže, úpravy povrchu ve styku vrstev a případná adhezní složka (lepidla).

Předpokladem dobré soudržnosti je i dodržení technologické kázně během výstavby. Například při lití čerstvého betonu do prefabrikovaných betonových desek, které mají funkci ztraceného bednění, je nutné čerstvý beton důkladně zhutnit a obdobně jako hutnící prostředek nesmí přijít do kontaktu s výztuží, tak nesmí přijít do kontaktu ani s betonovými deskami. Hutnění pomáhá čerstvé betonové směsi vyplnit dutiny mezi povrchem staršího betonu a tím se zvětšuje kontaktní plocha mezi betony. Další výhodou je vytvoření hutnější a méně propustné vrstvy v rozhraní, to napomáhá delší trvanlivosti rozhraní. Ke vzniku vzduchových mezer v rozhraní dochází zejména na drsném a nerovném povrchu. Tyto úpravy povrchu mají soudržnost zlepšit, ale při špatném nebo žádném zhutnění se spojení oslabuje obdobně, jako klesá pevnost betonu při nedokonalém zhutnění (obr. 5) [6].



OBR. 5 ZTRÁTA PEVNOSTI V DŮSLEDKU NEDOKONALÉHO ZHUTNĚNÍ [7]

Soudržnost mezi jednotlivými vrstvami, například u vícevrstvých stěn, lze zajistit i lepíci a spřahovacími prvky. Vrstvy lze spojit pomocí malt, nebo lepidel na bázi epoxidu, nebo cementu [8]. Po zmonolitnění konstrukce lze k únosnosti vícevrstvé stěny započítat i spřahovací prvky, které jsou zde obvykle z konstrukčního hlediska, aby krajní stěny drželi při betonáži svoji polohu. [9]

Dále se ve své práci budu zabývat pouze soudržností vzniklou při zmonolitnění betonových vrstev bez přídavných spojovacích prvků.

1.1 Složení čerstvého betonu

Složení čerstvého betonu, resp. výsledné vlastnosti nového betonu, ovlivňují kvalitu rozhraní. Při větších drsnostech podkladu, staršího betonu, je důležité zohlednit rozměry použitého kameniva, aby se kamenivo mladšího betonu podílelo na provázání se starším betonem. Dále množství cementu i optimální vodní součinitel má příznivý vliv na soudržnost mezi betony.

- **Vodní součinitel**

Vodní součinitel, w/c , je poměr hmotnosti vody ku hmotnosti cementu. Pevnost v tlaku betonu s nižším poměrem w/c vede k vyšší pevnosti v tlaku, w/c se pohybuje v rozmezí (0,3-0,6).

Příliš malý vodní součinitel ve směsi by mohl vést k nedostatečnému množství záměsové vody a nedostatečné hydrataci cementu. Výsledný beton by byl pórovitý, kvůli nevyhovující zpracovatelnosti čerstvého betonu. U betonu se zvýšeným vodním součinitelem je beton pórovitý kvůli přebytečné vodě, která se z betonu dostává na povrch. [10]

1.1.1 Příměsi

Na soudržnost vrstev mohou mít vliv i některé přísady a příměsi, například vysokopepční struska, popílek a křemičitý úlet. Také přidavek uhlíkových vláken může výrazně zvýšit pevnost spoje ve smyku [11]. Dále se v kapitole budu věnovat příměsím běžně používaným v prostém betonu, bez výztužných vláken.

- **Mikrosilika**

Mikrosilika, tzv. křemičitý úlet, vzniká jako odpad při výrobě slitin obsahujících křemík v elektrické obloukové peci. Při vysokých teplotách dochází k odpařování SiO_2 , který následně kondenzuje. Částice mikrosiliky jsou mnohonásobně menší (0,1-0,3 μm) než částice portlandského cementu (10-15 μm). Vzhledem ke své jemnosti může vyplňovat mezery mezi zrny cementu, lépe reagovat a zlepšovat pevnosti tranzitních zón na povrchu kameniva, i v rozhraní betonových vrstev. Čerstvý beton s použitím mikrosiliky má lepší zpracovatelnost, zároveň se podílí na tvorbě hydratačních produktů, výsledný beton je hutnější a lépe odolává agresivnímu prostředí. [12]

- **Vysokopecní struska**

Vysokopecní struska je latentně hydraulická látka, která vzniká rychlým ochlazováním taveniny, která odpadá jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Je-li tavenina rychle zchlazena, zabrání se její krystalizaci a zachová si sklovitý charakter, protože taková má při vhodném složení latentně hydraulické vlastnosti. Dále se musí struska semlít, aby bylo dosaženo potřebného specifického měrného povrchu, podobného jako u cementu, 350 až 450 m^2/kg . Po aktivaci budičem v betonové směsi vznikají C-S-H a C-A-S-H minerály, které mají vysokou pevnost a mohou zlepšit pevnost v rozhraní betonových vrstev. [13]

- **Popílek**

Popílek vzniká jako odpadní surovina při spalování uhlí, můžeme ho dělit na typy C (vápenatý) a F (křemičitý). Částice popílků mají podobnou velikost jako částice portlandského cementu (10-15 μm). Popílek je jednou s nejvíce používaných příměsí, neboť v betonové směsi může nahradit až 30% hmotnosti cementu, který je dražší. Popílek se podílí na pevnosti výsledného betonu, reaguje pomalu, prakticky až po více, než 28 dnech a zlepšuje odolnost betonu v agresivním prostředí. [13]

1.2 Příprava povrchu

Pro dosažení potřebné soudržnosti musí být povrch staršího betonu před nanesením čerstvého betonu očištěn od znehodnocených a poškozených částí, například nesoudržné kusy betonu, zkorodovaný beton od agresivního prostředí. Ideální je odstranit i zkarbonatovanou vrstvu betonu.

Povrch lze upravit různými způsoby. V této kapitole se budu věnovat pouze běžně používaným způsobům přípravy a ošetření povrchu, jako je tvarování, zdrsňení a vlhčení povrchu. [14]

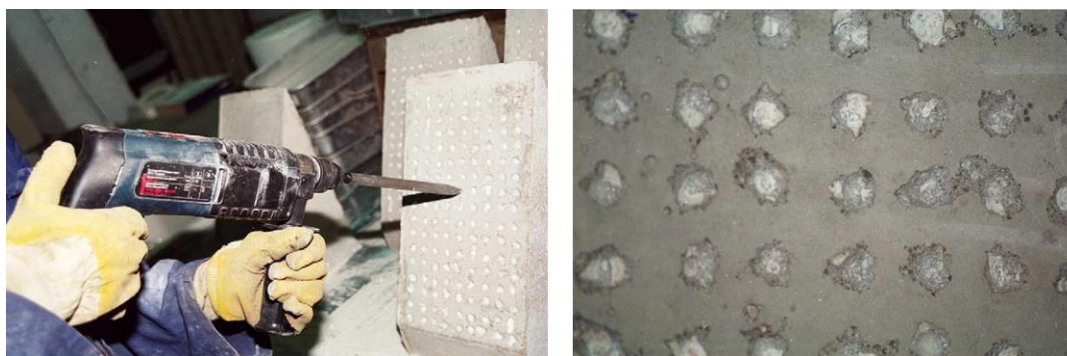
1.2.1 Mechanické úpravy povrchu

Pokud se povrch upraví razantní metodou, například pomocí sbíjecího kladiva, bude povrch drsný, ale v povrchu se vyvolají mikrotrhliny, které rozhraní a blízké okolí podkladu oslabí. Mikrotrhliny snižují soudržnost rozhraní a zmenšují efektivní plochu rozhraní, mohou se tvořit i několik milimetrů pod zdrsňeným povrchem. [6]

Příklady běžně používaných úprav povrchů pro zajištění soudržnosti:



OBR. 6 ÚPRAVA POVRCHU BROUŠENÍM [15]



OBR. 7 ÚPRAVA POVRCHU SBÍJECÍM KLADIVEM [15]



OBR. 8 ÚPRAVA POVRCHU PÍSKOVÁNÍM [15]



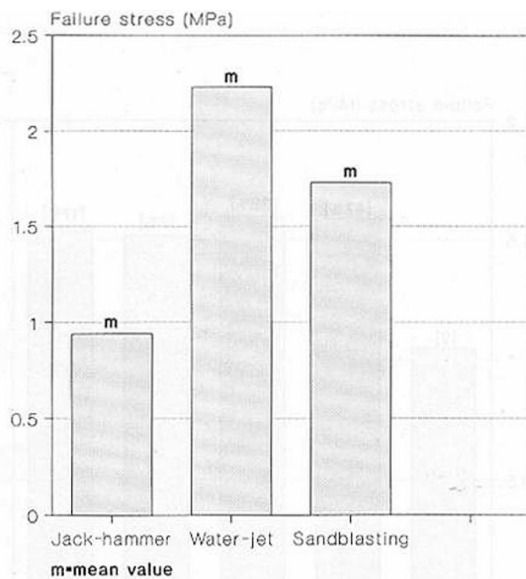
OBR. 9 ÚPRAVA VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPSREM [16] [17]

Julio [15] provedl tahové zkoušky se čtyřmi typy úprav povrchu. Níže, tabulka 1, jsou uvedeny výsledky experimentu tahové zkoušky, vzorky s úpravou povrchu dle označení: 1=hladký povrch z ocelového bednění, 2=zbroušený povrch, 3=povrch upravený sbíjecím kladivem suchý a 4=navlhčený, 5=pískovaný povrch. Úprava povrchu pískováním dosahuje největších hodnot pevnosti v tahu v rozhraní. [15]

Situations considered	Substrate surface treatment	Bond strength in tension (MPa)	Variation coefficient (%)
1	As-cast against steel formwork	–	–
2	Wire-brushing	1.92	13.54
3	Partially chipped	1.47	7.48
4	Partially chipped and pre-wetted	1.02	12.75
5	Sand-blasting	2.65	6.42

TABULKA 1 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY [15]

Mechanické metody, hlavně sbíjecí kladiva, přispívají více ke vzniku mikrotrhlin na povrchu staršího betonu. Silfwerbrand [6] provedl testy na vzorcích s upravenými povrchy staršího betonu a porovnával soudržnost vzorků. Porovnával typy úprav povrchů staršího betonu pomocí (zleva na obr. 10) sbíjecího kladiva, vysokotlakého vodního paprsku a pískování. Nejpříznivějších hodnot v tahové zkoušce dosahovala úprava vodním paprskem, takto upravený povrch vykazuje vysokou drsnost a zároveň má méně mikrotrhlin v rozhraní. [6]



OBR. 10 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY [6]

Courard [18] porovnával vzniklé mikrotrhliny od úprav povrchu sbíjecím kladivem a vysokotlakým vodním paprskem. Porovnával množství, délky a šířky trhlin na určité ploše. Z jeho výzkumu plyne, že šetrnější úpravou povrchu lze dosáhnout vysokotlakým vodním paprskem. Takový způsob úpravy povrchu v měření Silfwerbranda [6] vykazuje největší hodnoty pevnosti v tahu v rozhraní. [19] Lze vyvodit, že přítomnost mikrotrhlin v povrchu rozhraní výrazně ovlivňuje soudržnost betonových vrstev.

1.2.2 Vlhčení povrchu

Na soudržnost betonových vrstev mají vliv také vlhkostní parametry podkladního povrchu (staršího betonu). V literatuře bylo provedeno několik

laboratorních měření týkajících se vlhkostních poměrů v rozhraní betonových vrstev.

Gillette [20] svým výzkumem dospěl k závěru, že pokud je podklad mokrá, na povrchu se nachází voda, vykazuje menší soudržnost než podklad, který byl pouze se vzdušnou vlhkostí.

Austin [14] porovnal 4 typy vlhkostních poměrů v rozhraní. Vzorky staršího betonu byly vloženy do nádrže, ve které byly nejméně 3 dny. Po vyndání vzorků z nádrže byl povrch buď stlačeným vzduchem vyfoukán do sucha, aby simuloval stav nasyceného suchého povrchu (SSD), nebo bylo jen stlačeným vzduchem odstraněno přebytečné množství vody, aby se simuloval stav nasyceného vlhkého povrchu (SSW). Další suché vzorky byly ponechány na vzduchu v laboratoři. Povrchy byly buď kropeny vodou po dobu přibližně 20 minut, ale volná voda na povrchu byla od fouknuta před druhou betonáží, aby se simulovaly vlhkostní podmínky vlhkého povrchu (ASW), nebo ponechány bez dalšího ošetření v laboratoři, aby se simulovaly podmínky suchého povrchu (ASD). Vzorky po druhé betonáži a době zrání byly zkoušeny na prostý tah (obr. 11).

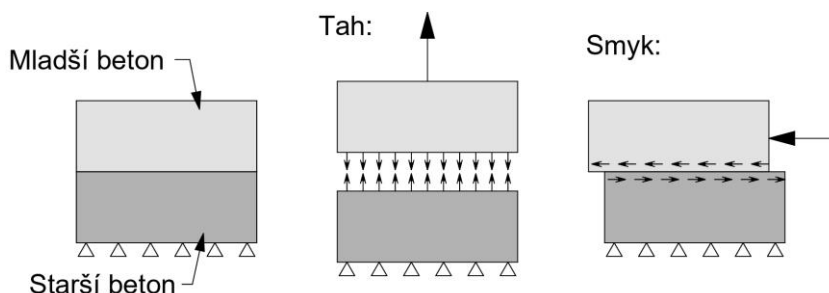
Moisture condition	Number of tests	Number of failures		Average failure stress (MPa)	Coefficient of variation
		Bond	Concrete		
ASW	10	2	8	2.85	8.9%
SSW	10	6	4	2.80	10.6%
SSD	10	5	5	2.98	5.7%
ASD	10	6	4	2.77	9.8%

OBR. 11 TABULKA S POROVNÁNÍM ÚNOSNOSTI A VLHKOSTI [14]

Ačkoliv výsledky pevností v rozhraní nejsou jednoznačné, vlhkostní stav SSW a ASD poskytly o něco nižší hodnoty než zbylé dva stavy, ASW a SSD, přičemž u vzorků SSW a ASD došlo k většímu počtu poruch v rovině rozhraní. Naznačuje to, že podmínky SSW a ASD jsou příliš vlhké resp. suché. Pokud se na suchý povrch staršího betonu nanese čerstvý beton, část záměsové vody se vsákne do staršího betonu dříve, než čerstvý beton v rozhraní začne hydratovat. Zároveň pokud se na rozhraní betonů nachází volná voda, může se lokálně zvýšit vodní součinitel, tím dojde ve většině případů k lokálnímu snížení pevnosti.

2 Metody měření pevnosti v soudržnosti

Pro stanovení míry soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami je třeba experimentálně ověřit pevnost v soudržnosti. Zkoušky pevnosti v soudržnosti lze dělit na převážně smykové a převážně tahové. Princip jednotlivých namáhání je schematicky znázorněn na obr. 12.



OBR. 12 HLAVNÍ TYPY ZKOUŠENÍ SOUDRŽNOSTI V ROZHRANÍ

K dosažení příslušného typu namáhání při experimentálním zjišťování pevnosti v soudržnosti je třeba vybrat vhodnou metodou zkoušení.

Metody zkoušení existují různé, každá zkouška je různě ovlivněna například pevností betonu, drsností povrchu atd. (kap 1.). Vzorky je vhodné zkoušet takovým způsobem, jakým jsou, resp. budou, v konstrukci převážně namáhány. Záleží také, zda bude zkouška probíhat na již existující konstrukci, nebo se budou zkušební vzorky vyrábět přímo pro experiment [21].

a)	b)	Zkoušky in-situ		
c)	d)	e)	f)	"Čistě" smykové a smykové tlačené zkoušky
g)	h)	ch)	Tahové a nepřímo tahové zkoušky	

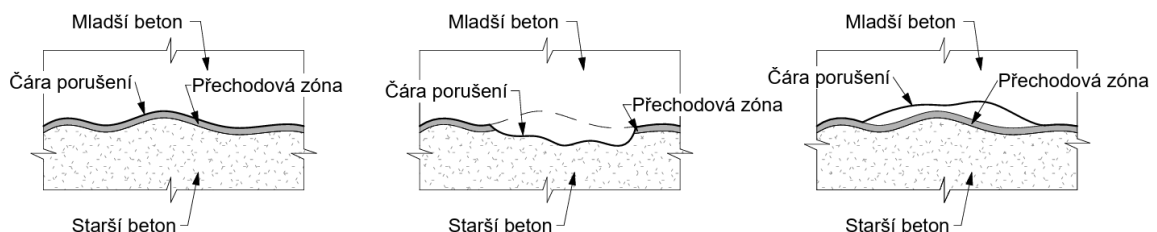
OBR. 13 SCHÉMATICKÉ PŘÍKLADY POUŽÍVANÝCH ZKOUŠEK

Na obr. 13 a), b) jsou schematicky znázorněny zkoušky in-situ, zkoušky prováděné přímo na konstrukci. Nejdříve dojde ke zbrúšení horního povrchu do roviny, předvrtají se styčné plochy, na horní povrch se přilepí zatěžovací soustava a zatěžuje se dle vybrané zkoušky. Zkoušky označené c), d), e) a f) jsou zkoušky, které vyvolávají v rozhraní "čisté" smykové napětí, pouze s výjimkou c), zde je přítomný i tlak v rozhraní. Bohužel se smykovým napětím se tvoří i jiné, nechtěné, vnitřní síly, které působí na vzorek, který se pak může porušit jiným způsobem, než bylo předpokládáno (podrobněji jsou zkoušky rozepsány níže). Typově poslední zkoušky, na obr. 13 označeny g), h), ch), slouží ke zjištění tahové únosnosti rozhraní, ze které lze smykovou únosnost dopočítat. Vztah mezi smykovou únosností, zjištěnou ze zkoušky šikmým smykem (c)), a mezi tahovou únosností, zjištěnou ze zkoušky v prostém tahu (g)), experimentálně určil Julio [15]:

$$y = 0,1855 \cdot x; R^2 = 0,948$$

Kde y = tahové napětí v rozhraní; x = smykové napětí v rozhraní; R^2 = koeficient determinace (čím více se blíží hodnotě 1, tím více je závislost determinovaná).

V českých technických normách nalezneme oporu ve třech používaných zkouškách k určení pevnosti soudržnosti (kap. 2.1, 2.2 a 2.4), pouze na vzorcích vytvořených v laboratorních podmínkách, další podrobněji popsané zkoušky v kap. 2 jsou běžně používané metody pro měření soudržnosti betonových vrstev nalezené v odborné literatuře.



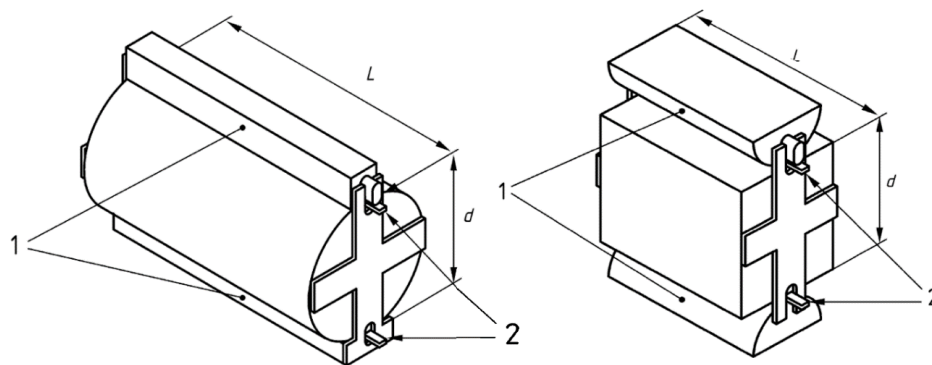
OBR. 14 MOŽNÉ TYPY PORUŠENÍ VZORKŮ

Při zkoušení je třeba vyhodnotit i způsob porušení vzorku. Vzorky se mohou porušit různě, pokud se vzorky poruší jiným způsobem, než bylo předpokládáno, musí se z celkové analýzy vyřadit. Základní typy porušení

jsou schematicky znázorněny na obr. 14. K porušení může dojít v rozhraní vrstev, ve starší betonové vrstvě a v mladším betonu. Pokud opakovaně dochází k jinému porušení než v prostoru rozhraní, znamená to, že vzniklé rozhraní není nejslabším místem ve vzorku.

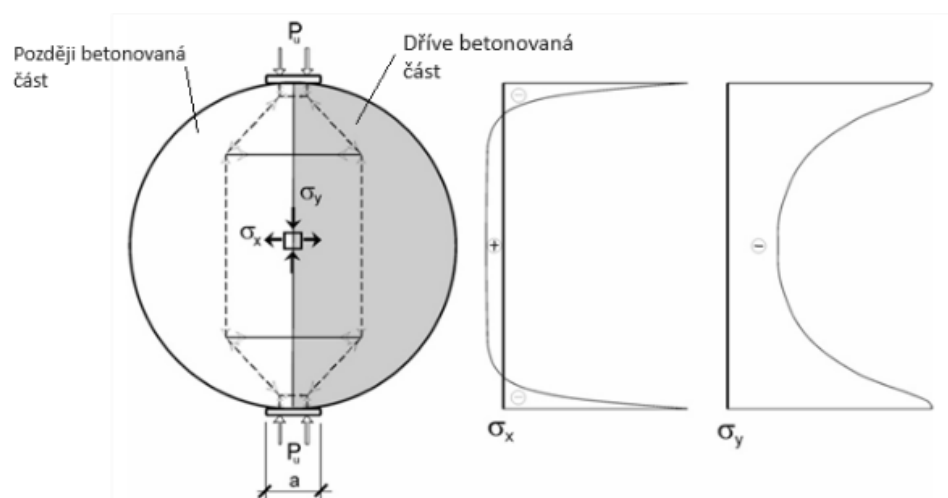
2.1 Zkouška v příčném tahu

Norma ČSN EN 12390-6 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles pojednává o zkoušce v příčném tahu celistvého vzorku betonu. Zkoušku je možné použít i na vzorky z různě starých betonových vrstev spojené soudržností.



OBR. 15 VZORKY PRO ZKOUŠKU V PŘÍČNÉM TAHU [22]

Zkouška v příčném tahu spočívá v působení tlakových liniových zatížení na vzorek, rozložených přes ocelové pásky (2 na obr. 15), které jsou podélně se vzorky. [22]



OBR. 16 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ „STRUT AND TIE“ MODELU VE VZORKU [5]

Tento způsob zatížení vytváří ve vzorku dvouosý stav napjatosti s tlakovými svislými a bočními tahovými napětími (obr. 16). Příčné tahové napětí dle ČSN lze určit podle rovnice:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot d}$$

kde σ_x = pevnost v příčném tahu; P = maximální zatížení [N]; L = délka dotykové přímky tělesa; d = výška tělesa. [22]

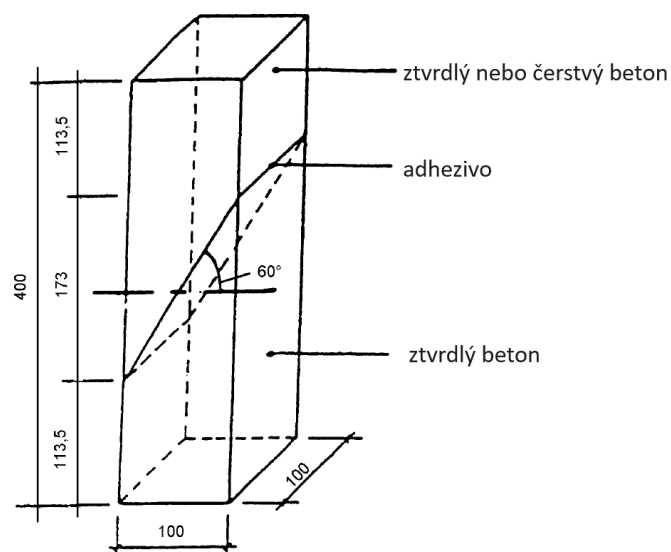
Současné tlakové napětí σ_y ve středu vzorku lze určit podle rovnice: [5]

$$\sigma_y = -\frac{6 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot d}$$

Tento typ zatěžování vzorku je výhodný, protože v kontaktu vrstev nevzniká druhotný moment, nebo tlakové napětí.

2.2 Zkouška v šikmém smyku

Norma ČSN EN 12615 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody - Stanovení pevnosti v šikmém smyku pojednává o zkoušce v šikmém smyku. Dále se zkouška v šikmém smyku objevuje také v normě ČSN EN 12618-3 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Část 3: Stanovení soudržnosti injektážních výrobků, s nebo bez teplotních cyklů - Metoda šikmého smyku.



OBR. 17 ROZMĚRY A TVAR ZKUŠEBNÍHO TĚLESA DLE ČSN [23]

Při zkoušce je rozhraní vrstev namáháno tlakovým a smykovým namáháním. Norma uvádí vzorky pouze kvádrové a rozhraní vrstev betonů 60°. Smyková síla se pro zkušební vzorky s rozměry 100 x 100 x 400 mm (obr. 17) vypočte jako a), pro zkušební vzorky s rozměry 40 x 40 x 160 mm jako b). [23]

$$a): f_b = \frac{F \cdot \sqrt{3}}{40\,000}; \quad b): f_b = \frac{F \cdot \sqrt{3}}{6\,400}$$

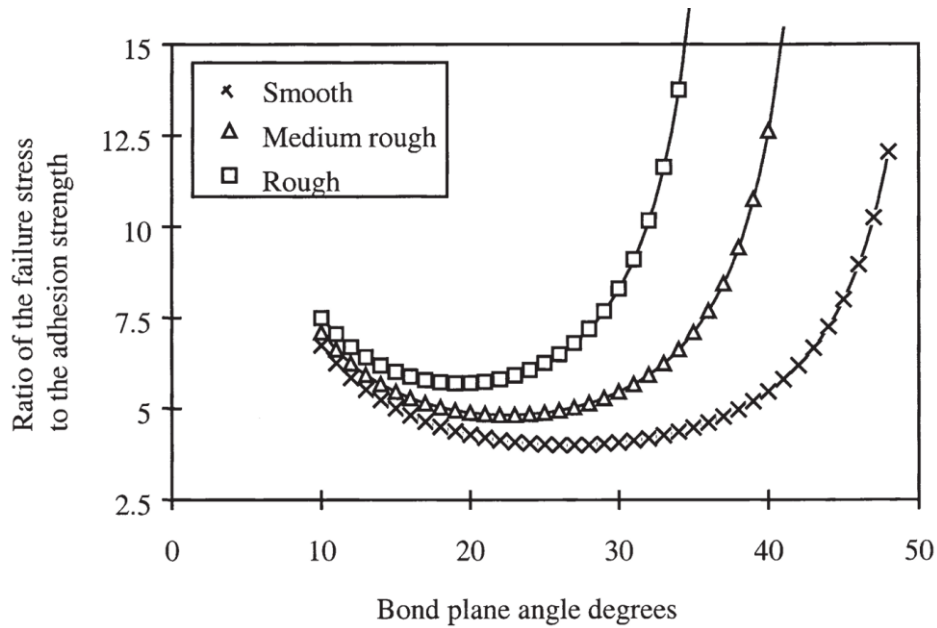
Při posuzování vzorků, kde je soudržnost vrstev větší (byly provedeny úpravy, aby soudržnost byla co největší- viz. kap. 1) může docházet k porušení tlakem. [24]

Šikmý smyk obecně (mimo postup uvedený v ČSN):

Obecně lze použít vzorky i válcovitého tvaru. Bylo prokázáno, že soudržnost klesá s přítomností mikrotrhlin [25], avšak tato zkouška nereaguje na přítomnost mikrotrhlin v rozhraní vrstev, protože tlaková napětí se mohou přenášet přes mikrotrhliny, nemají tak vliv na výsledné smykové napětí.

Zkouška má zásadní nevýhodu, že porušení je závislé na úhlu roviny rozhraní vrstev, který je stanoven a neumožňuje možnost porušení v jiné rovině, kde by mohla být výsledná smyková únosnost menší (v důsledku této skutečnosti se vzorky se drsnějším povrchem mohou porušit tlakovým namáháním).

Sklon stykové plochy má významný vliv na způsob porušení a výslednou smykovou pevnost. Norma předepisuje úhel 30° od svislice vzorku (60° od vodorovné roviny kolmou na svislici), obecně je kritický úhel mezi 15° až 30° od svislice, v závislosti na drsnosti povrchu. Kritický úhel spojení vrstev lze definovat jako sklon, při kterém je zatížení potřebné k porušení spojení minimální. Na obr. 18 se kritický úhel v jednotlivých křivkách nachází na vodorovné ose v místě, kde je nejnižší poměr σ_0/c , tedy nejnižšího vynaloženého napětí, protože c , pevnost ve smyku v rozhraní při $\sigma_0 = 0$, je konstantní. Kritický úhel je závislý na drsnosti povrchu. [24]



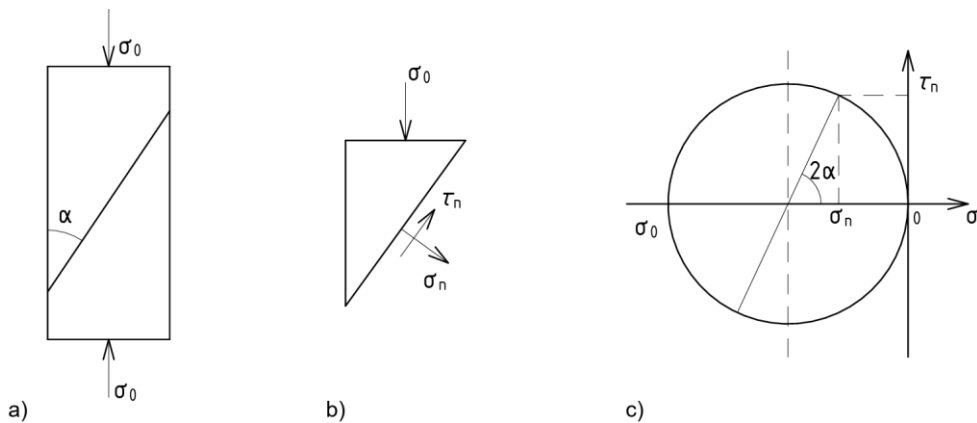
OBR. 18 ZÁVISLOST POMĚRU σ_0/c NA ÚHLU STYKU VZORKŮ α [24]

Na obr. 18 je možné vidět, že při postupu zkoušení dle ČSN, pod daným úhlem 30° , je při užití vzorků s drsnou povrchovou úpravou potřeba vyvinout větší zatížení na vzorek, než při úhlu zhruba 19° . Tím může dojít k chybnému porušení ve vzorku, a tedy i k různým výsledkům.

Hlavní metodu výpočtu hlavních napětí se uvažuje Mohr-Coulombova metoda, kde se k výpočtu pevnosti spoje na rozhraní používají rovnice (obr. 20 křivka A):

$$\tau_n = c + \mu \cdot \sigma_n \quad \text{resp.} \quad \tau_n = c + \tan(\phi) \cdot \sigma_n$$

Kde τ_n je smykové napětí působící na rozhraní vrstev; σ_n je normálové napětí působící na rozhraní vrstev; c je pevnost ve smyku (pevnost ve smyku, když $\sigma_n=0$); μ je koeficient tření; ϕ je úhel vnitřního tření [$\phi = \tan^{-1}(\mu)$].



OBR. 19 NAPĚTÍ VE ZKOUŠCE V ŠIKMÉM SMYKU A ZOBRAZENÍ V MOHROVĚ KRUŽNICI

Ze znalostí vzorců vycházejících z obr. 19, lze vyjádřit napětí σ_0 , které vyvolá smykové porušení jako:

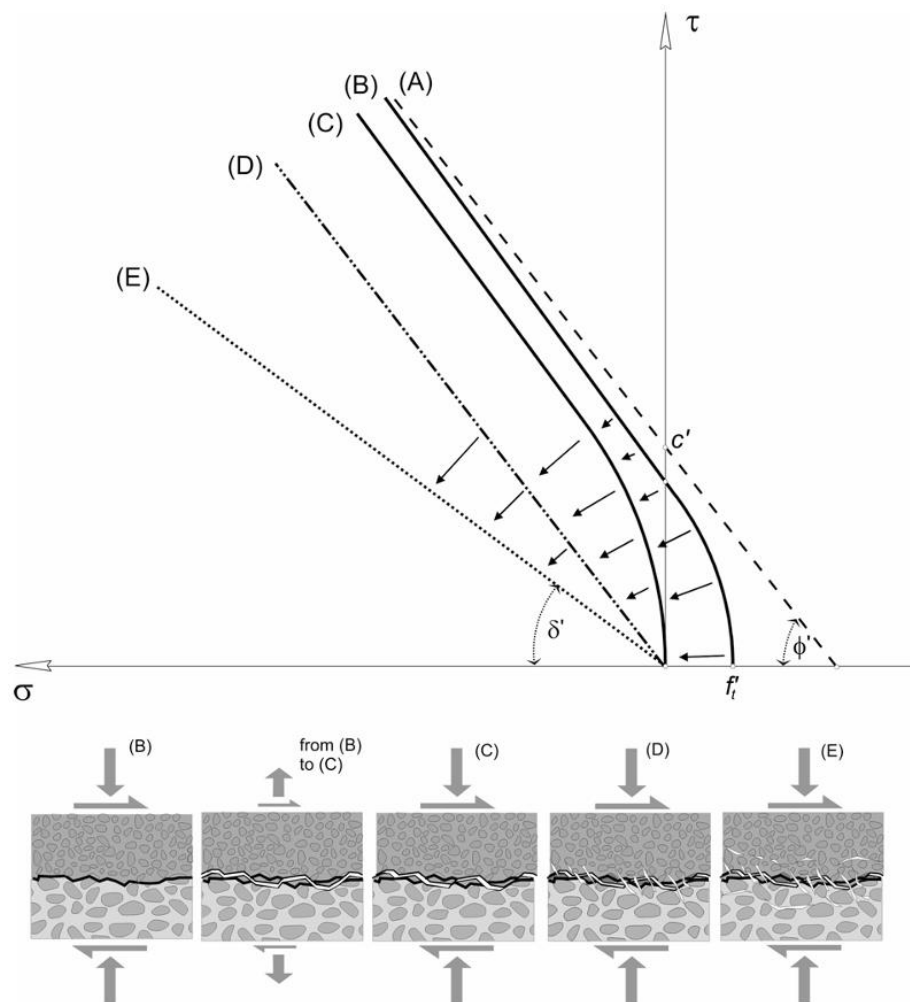
$$\sigma_0 = c \cdot [\cot(\alpha) + \tan(\tan^{-1}(\mu) + \alpha)]$$

Napětí σ_0 je závislé na úhlu vnitřního tření ϕ [$\phi = \tan^{-1}(\mu)$] a úhlu sklonu roviny rozhraní vzorků α . Lze si vyjádřit kritický úhel v závislosti na úhlu vnitřního sklonu, respektive koeficientu vnitřního tření. Po zpětném dosazení do rovnic si lze vyjádřit kritická napětí:

$$\alpha_{crit} = 45^\circ - \frac{\phi}{2}; \quad \tau_{n,crit} = c \cdot (\sin(\phi) + 1); \quad \sigma_{0,crit} = 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

Kritický úhel jsou závislé na úhlu vnitřního tření, a tedy i na drsnosti povrchu.

[24]



OBR. 20 OBÁLKA ÚNOSNOSTI V ZÁVISLOSTI NA PŘÍTOMNOSTI TRHLIN VE SPOJENÍ [5]

Obálka únosnosti prvku závisí na přítomnosti, případně rozvoji, trhlin v rozhraní vrstev. Obr. 20 porovnává jednotlivé stavy při porušení rozhraní. Přímkou (A) představuje teoretickou křivku únosnosti rozhraní. Skutečná pevnost v tahu f'_t je oproti teoretické pevnosti vycházející z Mohr-Coulombova kritéria téměř vždy menší, jak ukazuje křivka (B), která představuje modifikovanou Mohr-Coulombovu křivku únosnosti. Pokud je v rozhraní dosaženo pevnosti v tahu, respektive ve smyku, prvotní křivka únosnosti se zredukuje k téměř nulové pevnosti v tahu s téměř nulovou soudržností (C). Dalším nárůstem vnějších sil dochází k degradaci rozhraní, což způsobuje poškození soudržnosti, kohezních sil, zůstává pouze vazba („zámek“) mezi vrstvami (D). V poslední degradační fázi rozhraní dochází ke vzniku smykových trhlin i mimo rozhraní vrstev. Vrstvy jsou pak spojené pouze třecí silou zcela rozrušeného betonu (E). [5]

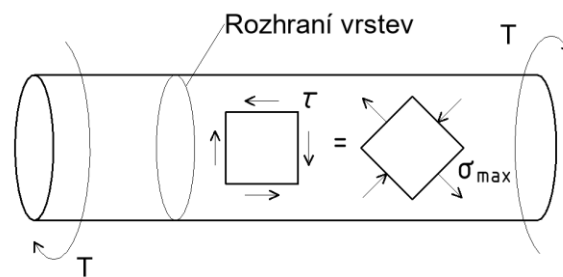
2.3 Zkouška kroucením

Zkouška spočívá v zatížení vzorku kroutícím momentem, tím je vzorek v rozhraní zatížen pouze smykovým namáháním.

Výhoda zkoušky kroucením je, že se dá provést v konstrukci, tzv. in-situ, s tahovou zkouškou jsou to jediné metody, které lze provést přímo v konstrukci. Nevýhoda zkoušky je, že ke správnému provedení je potřeba kroutící moment vyvolat takovým způsobem, aby na vzorek nepůsobilo tlakové napětí od zatěžovací soustavy (v uchycení vzorku). Ideálním uchycením lze docílit např. přes lepidlem nalepený plech k betonovému vzorku, nebo skrz předem vytvarovanou prohlubeň do vzorku, kam se vloží stejně vytvarované těleso a tím lze provést zatížení volným kroucením. Další nevýhoda je předem definovaný způsob porušení, u vzorků s větší soudržností v rozhraní se vzorky mohou porušit tahem, tedy ne v rozhraní. Ke zkoušení používá válec o průměru 100mm i kvádr.

K porušení může docházet v důsledku vzniku tahových trhlin ve vzorku, ale napětí, smykové, které působí na vzorek, je způsobené kroucením. Málokdy se stane, že konstrukce je zatížená kroucením, ale protože kroucení může

způsobit čistý smyk v povrchu, byla by tato zkouška dobrou simulací pro zjištění chování rozhraní vrstev pod smykovým napětím. Jednou z nevýhod zkoušky je vybočení průřezu z roviny vlivem kroučícího momentu, tzv. deplanace průřezu. Za předpokladu volného kroucení ve vzorku má průřez tendenci se vlivem kroučícího momentu „smrštit a natáhnout“ ve směru hlavních napětí. Proto nelze přesně vyjádřit smykové napětí v průřezu a jen uvažovat rozmezí mezi elastickým a plastickým tvarem smykového napětí.



OBR. 21 SCHÉMA NAPĚTÍ V PRVKU ZATÍŽENÝM KROUCENÍM

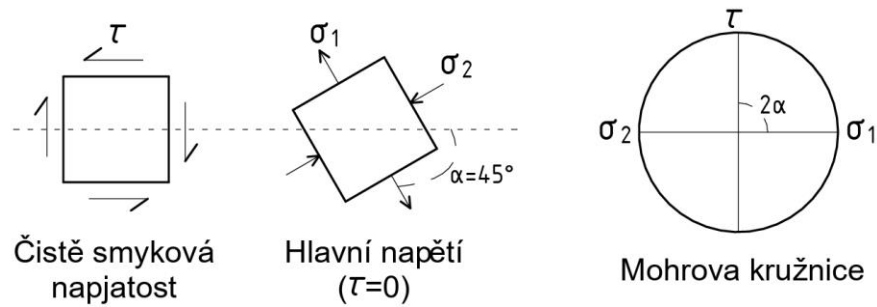
Smykové napětím v rozhraní (obr. 21) vyvolané kroučícím momentem lze vypočítat podle následujících rovnic [21]: pro a) elastické materiály; b) plně plastické materiály

$$a) \tau = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{T}{d^3}; \quad b) \tau = \frac{12}{\pi} \cdot \frac{T}{d^3}$$

Kde d je průměr vzorku, τ je smykové napětí a T je kroučící moment.

Beton je křehký materiál, který není zcela elastický, nebo čistě plastický. Výsledné smykové napětí má hodnotu mezi výše zmíněnými vztahy. Bezpečně lze uvažovat hodnotu smykového napětí pro pružný materiál.

Dvourozměrná napětí lze vyjádřit pomocí Mohrovy kružnice (obr. 22). Ve sklonu 45° od vodorovné roviny po obvodě vzorku je vzorek vystaven hlavním napětím.



OBR. 22 MOHROVA KRUŽNICE S HLAVNÍMI NAPĚTÍMI

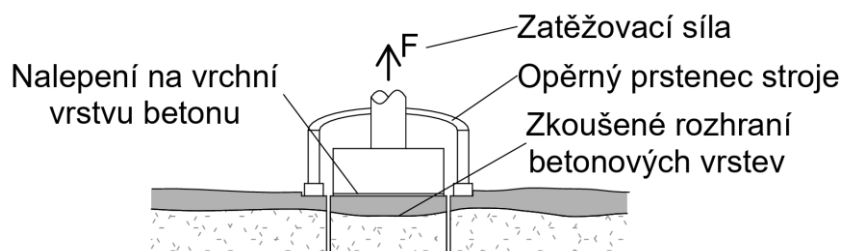
Ve zkoušeném betonovém vzorku se vytvářejí hlavní napětí v rovinách, které svírají s průřezem úhel 45° , od tahového napětí se mohou tvořit trhliny do tvaru spirály po obvodu vzorku a prvek se neporuší v rozhraní smykovým napětím, ale od napětí tahového v jiné rovině.

Řešení by mohlo být zabránit protažení vzorku, tím by se do vzorku vnášel tlak, který by vyrušil tahové síly, ale za cenu zavedení tlakových napětí do rozhraní vrstev. Dalším řešením by mohlo být naklonění roviny rozhraním pod úhlem 45° , ovšem to bychom neměřili smykové napětí, ale napětí tahové.

2.4 Zkouška v prostém tahu

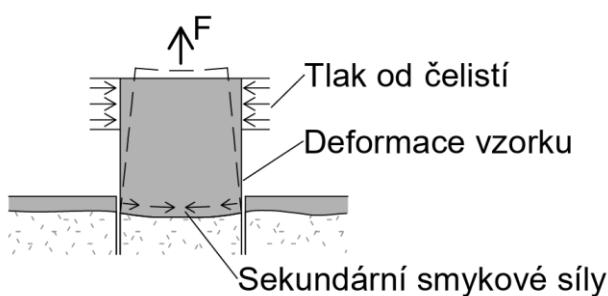
Zkouška v tahu je jednoduchá na provedení i co se týče zatěžování. Jediné úskalí je v uchycení vzorku do tažného zařízení. Hlavní výhoda této zkoušky je možnost ji provádět přímo v konstrukci, tzv. in-situ, oproti laboratornímu zkoušení je výhoda v tom, že se vzorek uchytí pouze u jedné strany pro zatěžování.

Zkušební vzorky nejsou standardizované, při zkoušení in-situ lze použít vývrty o průměru 50 až 100mm, menší vzorky by mohli vykazovat větší pevnosti. Délka jádrového vývrty by měla zasahovat minimálně 25mm do starší vrstvy betonu. [26]



OBR. 23 SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ IN-SITU

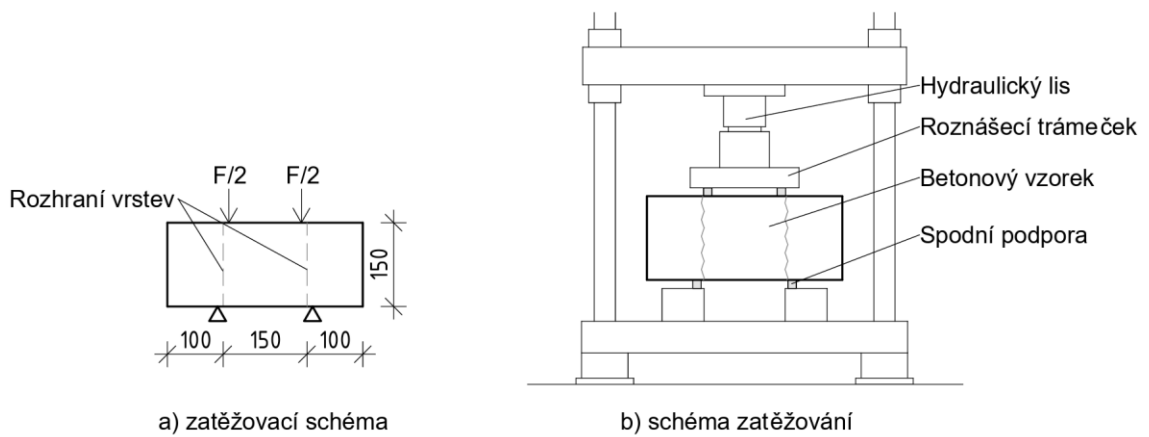
Při zkoušení in-situ (obr. 23) se nejprve vyvrtá jádro, povrch se zbrousí do roviny a očistí od prachu, na jádro se přilepí ocelový kotouč (například pomocí rychle tvrdnoucího epoxidu), přes který se do vzorku vnáší tahové napětí. V laboratorních podmínkách je možné uchytit vzorek do čelistí, napětí do vzorku se vnáší přes třecí sílu mezi čelistmi a vzorkem. Nevýhoda při uchycení do čelistí je, že vzorek je lokálně zatížen tlakovou silou, které může ve vzorku v rozhraní vytvářet smykové napětí. Při tažení se průměr vzorku zmenšuje po výšce, v rozhraní se má průřez tendenci zmenšit, tím vzniká v rozhraní smykové napětí, tzv. Hoyerův efekt (obr. 24).



OBR. 24 VZNIK SMYKOVÉ SÍLY V ROZHRANÍ- HOYERŮV EFEKT

2.5 Smyková 4 bodová zkouška

Smyková 4 bodová zkouška je principiálně stejné zatěžovací schéma, jako 4 bodová zkouška ohybem s tím rozdílem, že zatěžovací síly a podpory jsou nad sebou, dělí je pouze zkoušející rozhraní vzorku.



OBR. 25 SCHÉMA ZATÍŽENÍ NA VZOREK

Zkouška se provádí v lisu, vzorek je zatěžován svislou silou přes roznášecí prvky- například ocelovou desku, která zatížení přenáší do ocelových tyčí plného čtvercového průřezu (obr. 25, b)), nebo přes speciální odlitky (obr. 26), které vzorek zatěžují liniově po šířce vzorku a v rozhraní vrstev vyvolávají smykové napětí až do porušení vzorku.



OBR. 26 PŘÍKLAD ZKOUŠENÍ VZORKU [27]

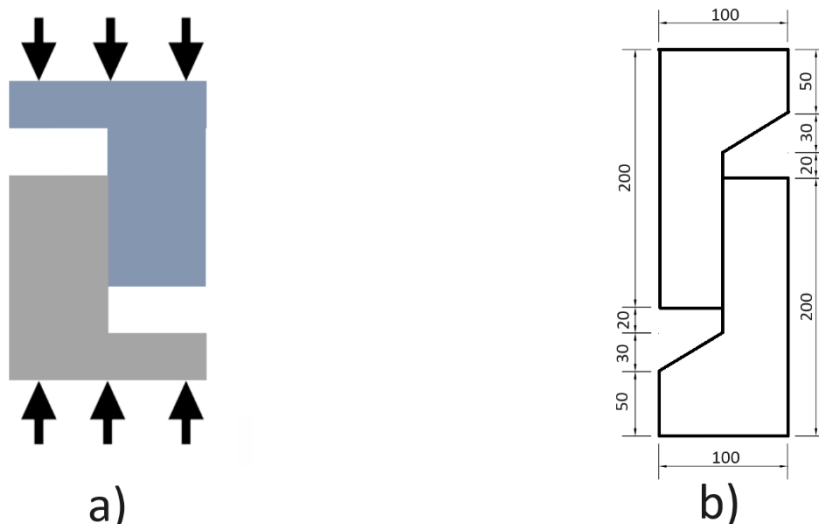
Hlavní výhoda zkoušky je možnost měření prokluzu v rozhraní vrstev při smykovém napětí. Při velké soudržnosti by mohlo docházet k lokálnímu drcení betonu v podporách a v zatížení. Při spodním okraji vzorku vzniká malý moment od vyosení podpor a zatěžovacích sil mezi rozhraním, může dojít k selhání rozhraní v tahu na okraji vzorku a progresivního porušení od smyku [27]. Výsledné smykové napětí lze spočítat z:

$$\tau_n = \frac{R}{2 \cdot A}$$

Kde τ_n je smykové napětí v rozhraní, A je styková plocha vrstev, R je vyvolané zatížení.

2.6 Zkouška soudržnosti vzorků tvaru Z

Zkouška soudržnosti na vzorcích tvaru Z se opět zaměřuje na smykovou pevnost rozhraní betonů. Zkouška se provádí v lisu, vzorek je zatěžován svislou silou, která v rozhraní betonových vrstev vyvolává „čisté“ smykové napětí až do porušení vzorku. Rychlost zatěžování je 6kN/min a při prokluzu pak 0,05 mm/min (dle Wu a Zhang [28]).



OBR. 27 SCHÉMA A ROZMĚRY VZORKŮ [29]

Hlavní nevýhoda od typického zkušebního vzorku (obr. 27 a)) je přítomnost momentu na rozhraní betonových vrstev a tím i zkreslení výsledné smykové síly, kdy k porušení může dojít kombinací tahu a smyku. Upravený vzorek se šikmými vnitřními hranami u hlavy a paty vzorku (obr. 27 b)) lépe přenesení zatížení k rozhraní a tím redukuje vzniklý moment ze zatěžovací plochy k rozhraní. Rozhraní vrstev se pak může zdeformovat (zkosit) od nechtěného momentu, tím nedochází k poruše čistě smykem- tomuto jevu by se dalo částečně předejít zkosením rozhraní- ale k tomu by bylo potřeba znát soudržnost rozhraní. Výsledné smykové napětí lze spočítat z:

$$\tau_n = \frac{R}{A}$$

Kde τ_n je smykové napětí v rozhraní, A je styková plocha vrstev, R je vyvolané zatížení.

3 Experimentální část



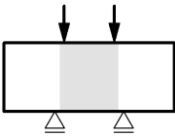

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo navrhnout a provést smykovou zkoušku soudržnosti na vzorcích z různě starých betonů. Zkouška měla být zároveň snadno opakovatelná pro případný větší počet vzorků s různými drsnostmi povrchu v rozhraní. Celkové zkoušení se drželo v nízko nákladové hladině, tedy s běžně dostupnými nástroji menší školní laboratoře.

Vyhodnocení experimentu se skládá z celkové únosnosti v rozhraní a způsobu porušení, případného prokluzu vyhodnoceného pomocí obrazové analýzy. Aby byl prokluz zřetelný, vzorky se zatěžovali v dobu, kdy byly stále tuhé, tedy do určité míry tvárné.

3.1 Návrh metody zkoušení

Výchozími zkouškami byly smyková 4 bodová zkouška podrobněji popsána v kap. 2.5 a zkouška na vzorcích tvaru Z podrobněji popsána v kap. 2.6.

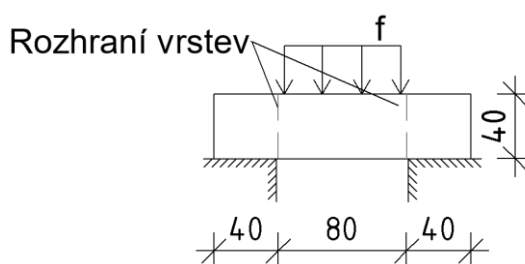
Zde je uvedené shrnutí klíčových faktorů jednotlivých zkoušek, které byly brány v potaz při výběru výchozí zkoušky:

Zkouška:	Smyková 4 bodová zkouška	Zkouška na vzorcích tvaru Z
Tvar vzorků:	Rozhraní vrstev 	Rozhraní vrstev 
Zat. schéma:		
Výhody:	Jednoduchý tvar vzorku	Jedno rozhraní
Nevýhody:	Dvě rozhraní Nechtěný moment v rozhraní od vyosení zat. sil od podpor	Složité tvar vzorku Rozhraní se může od zatížený zkosit a tím se porušit jiným způsobem, než bylo zamýšlené

Pro experimentální část byla zvolena výchozí zkouška smyková 4 bodová, hlavně pro jednodušší tvar vzorku, na který lze použít formy, které jsou

v běžné laboratoři, a protože výsledné vzorky lze snadněji odbednit, než u vzorků složitějších tvarů.

Celkové rozměry vzorků byly zvoleny 40x40x160 mm, protože se jedná o standardní rozměry vzorků používaných při jiných laboratorních zkouškách a bylo možné použít formy, které se nemusí mazat olejem pro snadné odbednění (více viz. Příprava formy). Vzhledem k menším rozměrům vzorků a celkovému možnému zjednodušení zatěžování bylo zatěžovací schéma upraveno:



OBR. 28 SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ VZORKŮ

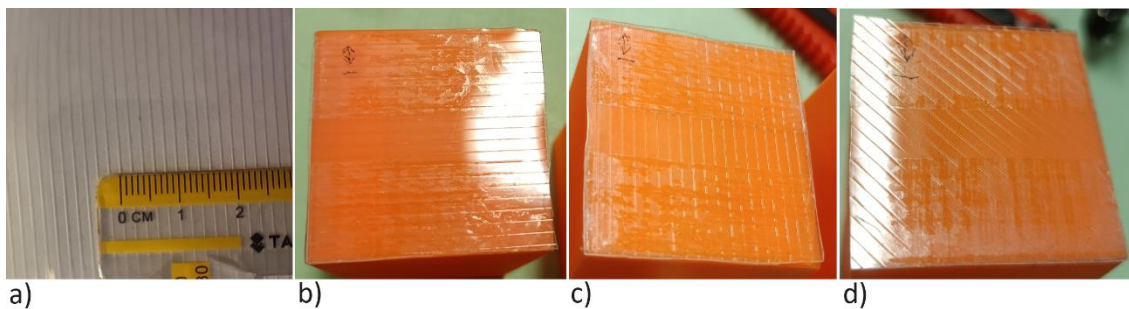
3.2 Postup provedení zkoušky

Vzorky se skládají z dvou betonáží, které jsou časově oddáleny. Formy bylo nutné připravit pro dvě betonáže, abychom se nejvíce přiblížili vrstvené prefamonolitické stěně, to znamená, že boční strany vzorků bylo třeba betonovat dříve

- **Příprava formy**

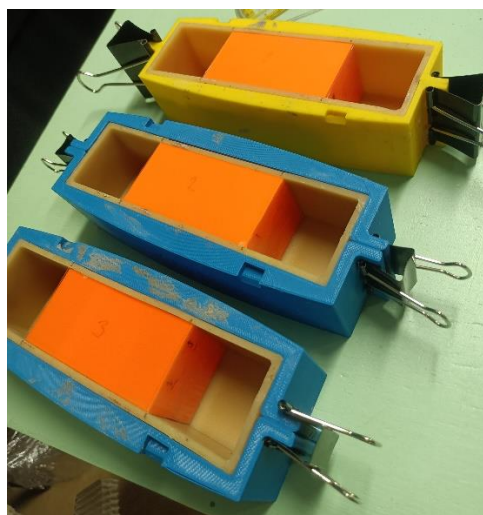
Formy na vzorky byly použity vytištěné na 3D tiskárně se silikónovou vložkou (obr. 30). Jejich hlavní výhoda je v tom, že se nemusí mazat olejem pro bezproblémového odbednění, který by mohl vzniklé rozhraní oslabit.

Formy byly pro tři vzorky, každý vzorek měl tvarované rozhraní stejným způsobem, podložkou s výstupky (obr. 29 a)), které byly vysoké 0,2mm. Rozhraní jednotlivých vzorků bylo odlišné podle orientace výstupků s natočením kolem podélné osy vzorku o 0°, 90° a 45°, jak můžeme vidět na obr. 29.



OBR. 29 TVORBA TVARU ROZHRANÍ VE VZORCÍCH

Pro první betonáž bočních stran vzorků byly použity výplně do středů forem plastové kvádry vytištěné na 3D tiskárně, aby výplň dobře zapadla do forem a měla stejné rozměry (pouze s odchylkou z 3D tisku). Na boční strany kvádrů se nalepily nařezané destičky z fólie tvarující povrch, výplně se nalepily po obvodě do forem na bocích, aby se při hutnění neposunuly.



OBR. 30 PŘÍPRAVA FOREM NA PRVNÍ BETONÁŽ

- **První a druhá betonáž**

V první fázi betonování se betonovaly boční strany vzorků.

Směs byla použita doporučená a již odzkoušená s maximální frakcí kameniva, s ohledem na velikost vzorků, do 0,6-1,2mm.

Dávkování směsi:

Složky betonu	Druh složky	Záměs na 0,5l [g]
Cement	CEM 52,5 R	300
Kamenivo	f. 0-0,25	75
	f. 0,1-0,5	250
	f. 0,4-0,85	100
	f. 0,6-1,2	50
Voda		105
Přísady	Plastifikátor	15
Příměsi	Mikrosilika	50
	Vápenec	75

Záměs se zpracovala ručně dle receptury a ve formách se čerstvý beton nechal dostatečně dlouho vibrovat, aby ve tvarovaném rozhraní nebyly vzduchové póry. Vzorky se přikryly fólií a nechaly zrát po dobu 10 dnů.



OBR. 31 BOČNÍ STRANY VZORKŮ

Boční strany vzorků se odbednily. Byla provedena vizuální kontrola pórů. Z obr. 31 je patrné, že doba hutnění první záměsi byla dostačující, i přesto jsou na vzorcích vždy 1-2 defekty, póry, do průměru 1mm. Po odbednění a kontrole bočních stran se vzorky vložily zpět na stejné strany forem, ze kterých se odbednily. Namíchala se další záměs stejným postupem, jako první záměs, vzorky se vybetonovaly a opět řádně zhutnily, aby v rozhraní nebyly přítomny póry vlivem špatného zhutnění vzorků.



OBR. 32 VZORKY PŘED ZATĚŽOVÁNÍM

- **Zatěžování vzorků**

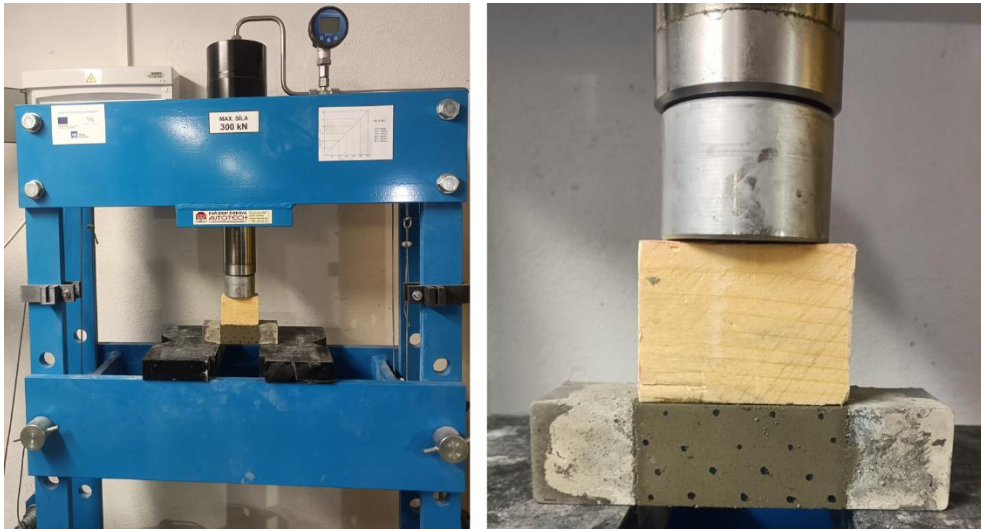
Vzhledem ke snaze držet nízkonákladové zkoušení, byl použit ruční lis, který byl k dispozici v laboratoři, a rok a půl starý mobilní telefon hardwarově průměrný. Kamerový záznam měl být později použit pro obrazovou analýzu pro zjištění deformací.

Aby bylo možné porovnat i způsob porušení a případný prokluz v rozhraní, vzorky byly zatěžovány v době, kdy středy byly stále tuhé, do určité míry tvárné. Pro zjištění vhodného času od betonáže k zatěžování, bylo nutné si záměs připravit zvlášť a v pravidelných intervalech zkoušet, zda je vzorek stále tvárný, ale zároveň únosný. Referenční vzorek se nechal zrát v místnosti s teplotou 21 °C a vlhkostí vzduchu 52%. Ideální doba k zatěžování byla určena pocitově, jaký odpor kladl vzorek vůči lokálnímu zatížení. Doba byla stanovena cca 10 až 12 hodin od betonáže.



OBR. 33 REFERENČNÍ VZOREK PRO URČENÍ DOBY ZATĚŽOVÁNÍ OD BETONÁŽE

Na vzorky se před samotným zatěžováním nakreslil vzor, který sloužil jako vodící body pro obrazovou analýzu. Pro pozdější a správné využití obrazové analýzy bylo potřeba řádně osvětlený vzorek natáčet s funkcí zpomaleného záběru (pro nejvíce snímků za sekundu), co nejbližší ke vzorku, kolmo na vzorek a nehýbat s kamerou. Zároveň bylo třeba natáčet kamerou lis, tedy vzorek a vynaložené bary, které by se později přepočítali na sílu. Zatěžovací síla se do vzorku vnášela přes roznášecí dřevěný prvek, který byl dlouhý 79 mm, aby zatěžoval pouze střed vzorku.



OBR. 34 ZATĚŽOVÁNÍ V HYDRAULICKÉM LISU

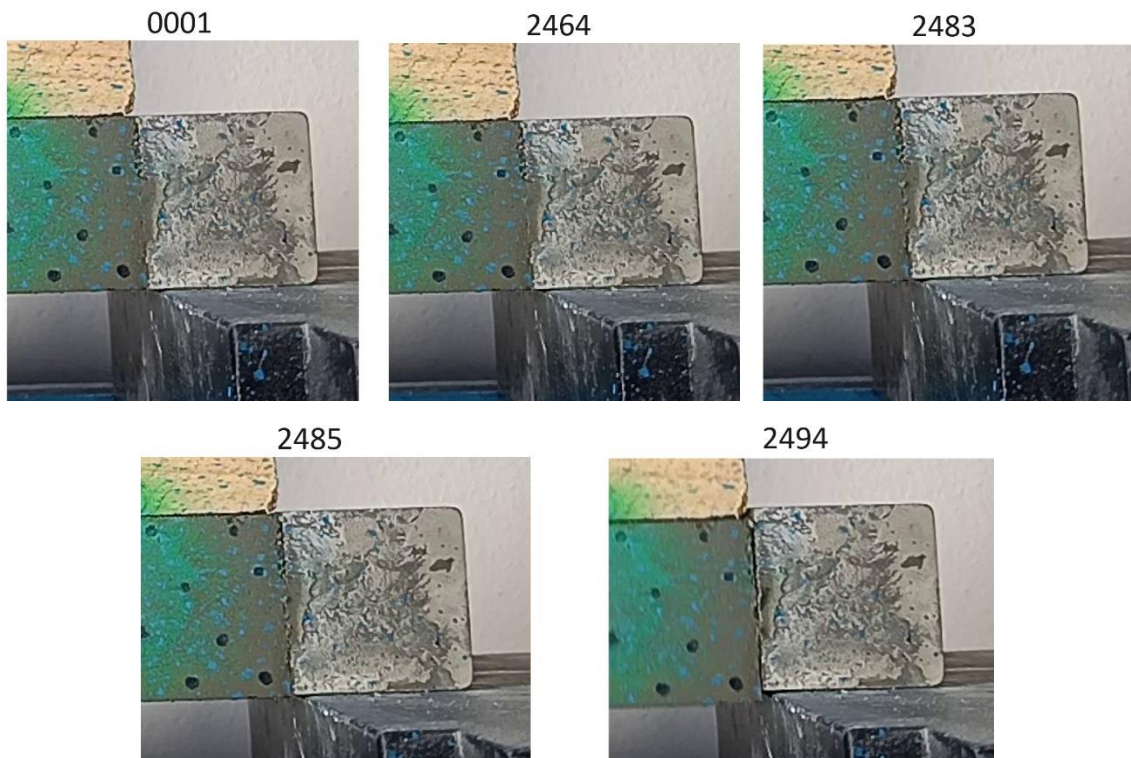
První vzorek se zkoušel s drážkami pod úhlem 45° . Vzorek se zatěžoval pomalu v lisu až do porušení. Bohužel lis, jak se ukázalo, neměl na vynaloženou sílu dostatečnou citlivost. K porušení došlo po zhruba 15 sekundách od začátku plynulého zatěžování. Přešlo se k zatěžování pomocí jednotlivých těles, která se postupně přidávala na vzorky. K zatěžování se použily kvádry a válec z železa a hliníku se známou hmotností.

3.3 Výsledky experimentu

Vzorek s vodorovnými drážkami (obr. 29 b)) vzdoruje zatížení jak třecími silami, tak „zámkem“ v rozhraní, ve vzorku se svislými drážkami (obr. 29 c)) v rozhraní „zámek“ nevzniká, síly se přenáší pouze třením v rozhraní, ve vzorku (obr. 29 d)), který má drážky v úhlu 45° , se přenáší síly hlavně třením,

„zámek“ v rozhraní vzniká také, ale v menší míře, než u vzorku s drážkami vodorovnými.

Průběh porušení 1. tělesa, zatěžováno lisem, znázorněný na snímcích z videa o 120 snímcích za vteřinu (FPS).



OBR. 35 PORUŠENÍ TĚLESA S DIAGONÁLNÍMI DRÁŽKAMI V ROZHRAŇÍ

Od vytvoření trhliny po porušení uběhlo zhruba 0,25 sekundy, tedy k prokluzu prakticky nedošlo. Průběh porušení byl správný vzhledem k metodě - k porušení došlo u obou rozhraní zároveň.

Průběh porušení 2. tělesa znázorněný na snímcích z videa:

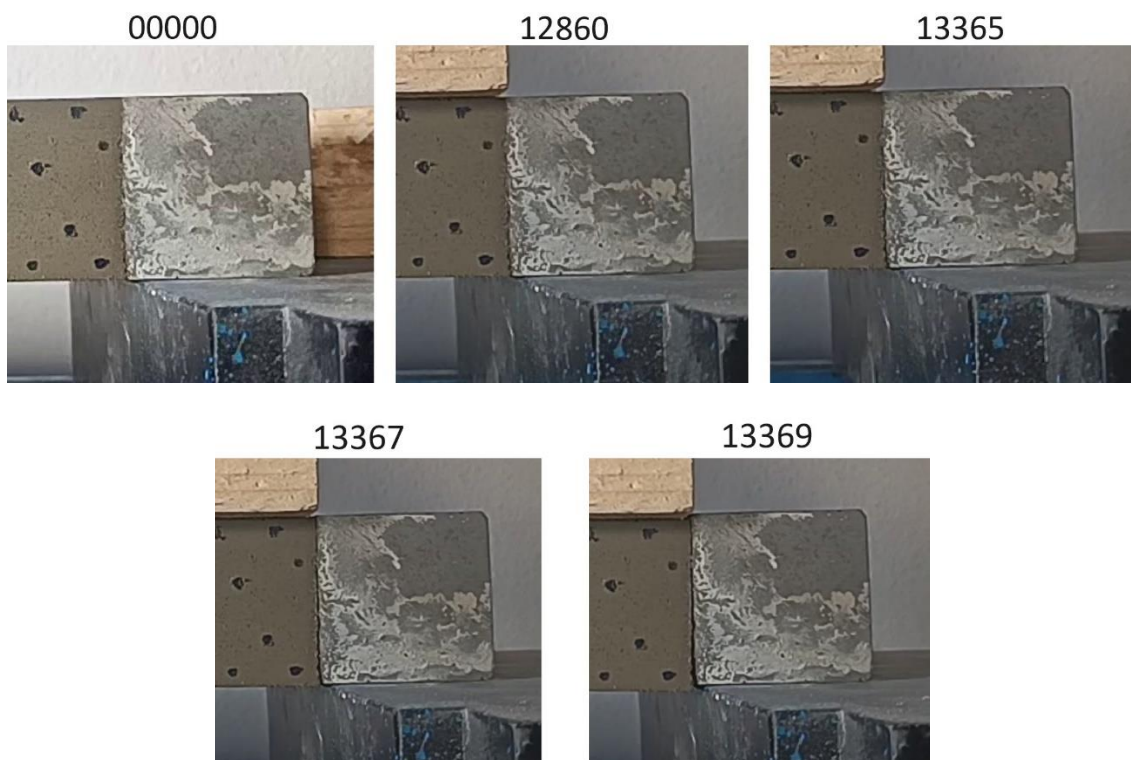




OBR. 36 PORUŠENÍ TĚLESA S VODOROVNÝMI DRÁŽKAMI V ROZHRANÍ

Porušení bylo náhlé, bez znatelného prokluzu- celkově od trhliny k porušení uběhlo zhruba 0,03 sekundy. Porušení nebylo zcela správné, protože se trhlina tvořila od dolního povrchu směrem vzhůru, jak je schematicky znázorněno na obr. 38, pravděpodobně od menšího momentu.

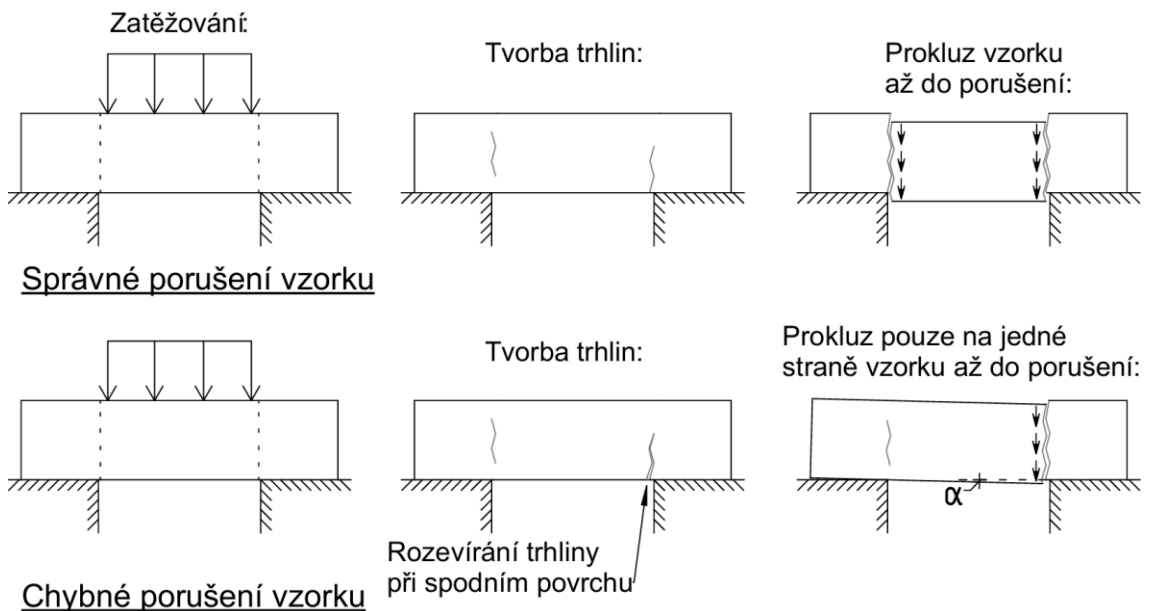
Obdobně jsem zatěžoval i 3. těleso. Průběh porušení je znázorněný na snímcích z videa:



OBR. 37 PORUŠENÍ TĚLESA SE SVISLÝMI DRÁŽKAMI V ROZHRANÍ

U třetího tělesa došlo k vytvoření trhliny při spodním okraji, jako reakce na poslední přidané těleso, a po zhruba 4 sekundách došlo opět k rychlému

porušení. Porušení bylo obdobné jako u druhého vzorku, tedy ne zcela správné, protože se trhlinka tvořila od dolního povrchu směrem vzhůru, jak je schematicky znázorněno na obr. 38, pravděpodobně od menšího momentu. Chybné porušení bylo zapříčiněno zatěžovací metodou pomocí přidávání těles, protože strany nejsou zatěžovány zcela rovnoměrně.



OBR. 38 POROVNÁNÍ SPRÁVNÉHO A CHYBNÉHO PORUŠENÍ VZORKU

Vzorek:	1		2		3	
Drážky v rozhraní pod úhlem:	45°		0°		90°	
Rozhraní [mm]:	39,2	39	39,7	39,2	39,5	39,5
Max. zatížení [kg]	-		6,731		6,265	
Výsledné napětí [MPa]	-		0,022		0,020	

TABULKA 2 VÝSLEDKY ZE ZATĚŽOVÁNÍ VZORKŮ

Vzorek 2, s vodorovnými drážkami, unesl větší zatížení, podle očekávání, vzhledem k vytvoření „zámku“ v rozhraní. Lze usoudit, vzhledem ke způsobu porušení vzorků, že u takto malých drsností v rozhraní k prokluzu nedochází a soudržnost je definovaná pouze maximálním napětím v rozhraní.

- **Obrazová analýza**

Obrazová analýza, image processing, je proces, který se zabývá analýzou digitálních obrázků. Cílem je získat určité informace z obrázků, zlepšit jejich kvalitu a provádět grafické úpravy pro konkrétní účely nástroji dostupnými v programovacím prostředí. Běžně dostupnými nástroji pro obrazovou analýzu jsou například filtry pro odstranění šumu, zvýraznění hran, změnu velikosti, změnu kontrastu, rozpoznávání vzorů, rozpoznávání obličejů, segmentaci (rozdělení obrázku na jednotlivé části) a podobně.

V experimentální části bylo zamýšleno využití obrazové analýzy pro změření prokluzu v rozhraní. V mém případě sice žádný prokluz nebyl měřitelný, protože porušení u prvního vzorku bylo náhlé a u zbylých dvou docházelo pouze k rozevírání trhlin při spodním povrchu, nikoli k prokluzu. Byla ale prokázána použitelnost metody pro navržený experiment.

Zjednodušený postup pro stanovení deformací obrazovou analýzou:

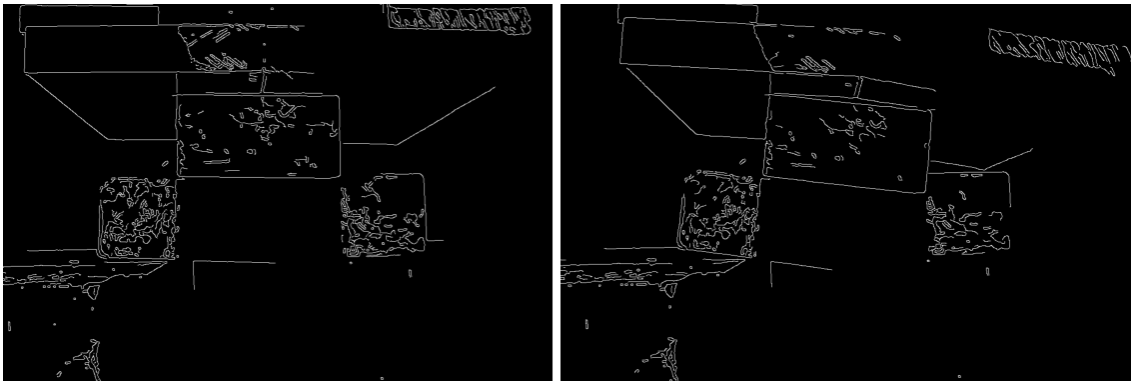
Vzorek je nutné snímat kamerou co nejbližší a kolmo na vzorek. Pro snazší operace se snímky ze záznamu je nutné mít vzorek vhodně osvětlen a nakreslit na něj libovolný vzor. Je důležité i kvalita videa- snímky za sekundu, rozlišení videa a vzdálenost od vzorku přímo určují přesnost metody. V samotném procesu se využívá programovací jazyk, který zvládne zpracovat větší množství obrázků automaticky.

Kamerový záznam se rozloží na jednotlivé snímky, pokud mají snímky dostatečnou kvalitu (osvětlení, ostrost) může se rovnou přejít k převedení obrázků na 3D matici (3 matice pro různé základní barvy). Tuto 3D matici převedeme na běžnou matici, skrze převedení do černobílé. Každý člen matice nyní reprezentuje jeden pixel. Je znázorněn jedním číslem od 0 do 255, podle stupně šedi.

Dále převedeme obraz na binární formu (černou a bílou) tím, že nastavíme práh hodnoty pixelů, podle kterého se pixely rozdělí. Pixely s hodnotou nižší, než práh, jsou považovány za černé, zatímco pixely s hodnotou vyšší

jsou považovány za bílé. Tato technika se nazývá prahování. S takto upraveným obrázkem lze přejít k detekci hran.

K dalšímu postupu úpravy obrázku bude sloužit konvoluční matice, pomocí které obrázek lze dále upravovat podle potřeb. V našem případě použijeme konvoluční matici k detekci hran. Z jednotlivých obrázků jde postupně měnit se hrana (případně pixel) převést do grafu. Pokud je známý rozměr vzorku na fotce, posunutí o pixel si pak lze přepočítat na vzdálenost.



OBR. 39 DETEKCE HRAN ZE SNÍMKŮ ZE ZÁZNAMU ZKOUŠENÍ

- **Návrh vylepšení experimentu**

U vzorků s méně tvarovaným rozhraním, až hladkým, nedochází k prokluzu. Pro porovnání prokluzu by bylo vhodné zkusit vzorky s větší drsností v rozhraní. Při větších drsnostech podkladu by mohl být prokluz před porušením znatelný v důsledku více mechanismů, které se podílí na soudržnosti v rozhraní.

Je třeba zajistit, aby vzorky byly zatěžovány rovnoměrně, při případné deformaci na jedné straně vzorku. Toho lze docílit v lisu, jak bylo ukázáno na prvním vzorku. Pro zatěžování v lisu je třeba použít lis s větší citlivostí, aby byla síla měřitelná nebo vzorky větších rozměrů, na které je třeba vyvinout větší sílu pro porušení, případně zajistit větší soudržnost v rozhraní vzorků.

Při zatěžování tělesy je třeba zajistit, aby vzorek zatěžovali rovnoměrně a při případném prokluzu na jedné straně nezačali stranu zatěžovat více.

4 Závěr

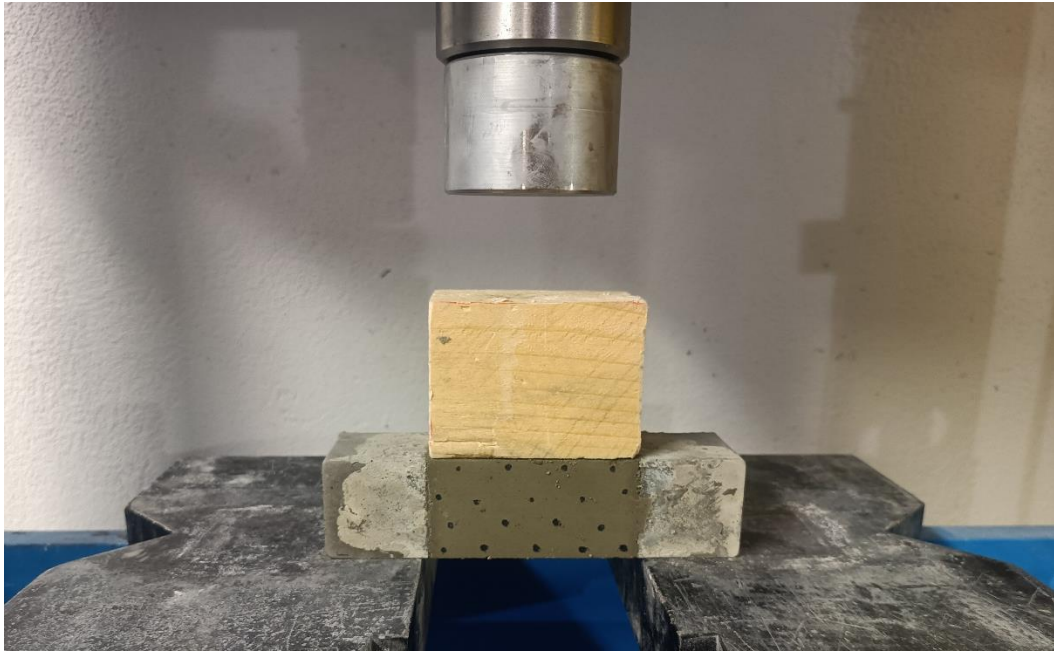
Cílem bakalářské práce bylo zkoumání soudržnosti rozhraní betonových vrstev různého stáří a různých pevností, porovnávání metod měření a faktorů ovlivňující soudržnost betonových vrstev.

V rámci teoretické části práce jsem si rozšířil znalosti z oblasti soudržnosti betonových vrstev jak z hlediska mikrostruktury betonu, tak z hlediska možnosti ovlivnění soudržnosti složením betonu nebo úpravami povrchu. Také jsem se pokusil vytvořit si ucelený přehled možností, jak zkoušet rozhraní betonových vrstev různého stáří.

V experimentální části jsem navrhl experiment, pro zjišťování smykových únosností v rozhraní betonových vrstev. Vyrobil jsem vzorky, které byly z různě starých betonových vrstev s danou úpravou rozhraní a ověřil je na mnou navržené zkoušce. I přes omezené vybavení laboratoře, hodnotím provedenou zkoušku pozitivně. Na vzorcích se přes počáteční komplikace během zatěžování úspěšně změřila únosnost, na snímcích je deformace zřetelná, ovšem náhlá, k prokluzu nedošlo ani u jednoho vzorku. Správně jsem zvolil poměr kvality videa mezi snímky za sekundu a rozlišení záznamu pro vyhodnocení deformace, protože i přes náhlé porušení, je průběh zaznamenán. Lze usoudit, vzhledem ke způsobu porušení vzorků, že u takto malých drsností v rozhraní k prokluzu nedochází a soudržnost je definovaná pouze maximálním napětím v rozhraní. Vhodnou úpravou by bylo zvolit vzorky s větší drsností povrchu a větších rozměrů, aby vzorky bylo možné zatěžovat v lisu, který by vzorky zatěžoval rovnoměrně a zároveň by vzorky měly prostor na progresivní porušování vlivem narůstajícího zatížení.

Ze smykové zkoušky v rozhraní lze zjistit soudržnost vrstev ve smyku a deformaci, prokluz, pokud nějaký je. Z těchto dvou hodnot lze vytvořit pracovní diagram soudržnosti více vrstevých stěn, který lze implementovat do software pro komplexnější analýzu lokálního rozsahu nebo globální analýzu celého objektu. Provedená zkouška je vhodná, protože se vzorek namáhá hlavně smykovým napětím a vzorky výrobou představují konstrukci třívrstvé prefamonolitické stěny.

Návrh zkoušení soudržnosti betonových vrstev je náročný i s nadstandardním vybavením, natož pak s omezenými prostředky menší laboratoře. Práce může sloužit pro zorientování v problému různě starých betonů, případně jako výchozí bod pro další výzkum problematiky soudržnosti různě starých betonových vrstev.



OBR. 40 FOTOGRAFIE PŘED ZATĚŽOVÁNÍM VZORKU

Seznam použité literatury

- [1] „5 Ways Concrete Can Fail & How to Avoid Concrete Failure,” BASE CONCRETE, Zář 2023. [Online]. Available: <https://www.baseconcrete.co.uk/5-ways-concrete-can-fail-how-to-avoid-concrete-failure/>. [Přístup získán 9. Květen 2024].
- [2] „Problem of cracks in RC columns,” Eng-Tips engineering forums, 1. Květen 2017. [Online]. Available: <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=424485>. [Přístup získán 9. Květen 2024].
- [3] H. Xie, G. Li a G. Xiong, „Microstructure Model of the Interfacial Zone Between Fresh and Old Concrete,” *Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science Edition*, pp. 1-5, Prosinec 2002.
- [4] P. Kumar Mehta a P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th Edition, New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [5] A. D. Espeche a J. León, „Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test,” *Construction and Building Materials*, sv. 25, pp. 1222-1235, Březen 2011.
- [6] J. Silfwerbrand, „Improving concrete bond in repaired bridge decks,” *Concrete International*, pp. 61-65, Zář 1990.
- [7] Anon, „Compaction of concrete,” *Cement Concrete and Aggregates Australia*, Mascot, 2006.
- [8] G. Li, H. Xie a G. Xiong, „Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders,” *Cement and Concrete Composites*, pp. 381-387, Leden 2001.
- [9] M. Gombeda, P. Trasborg a Naito, C. et al., „Simplified model for partially-composite precast concrete insulated wall panels subjected to lateral loading,” *Engineering Structures*, pp. 367-380, 2017.
- [10] K. Trtík, *Technologie betonu*, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009.
- [11] P. Chen, X. Fu a D. Chung, „Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete,” *Cement and Concrete Research*, pp. 491-496, Duben 1995.

- [12] P. K. Mehta a P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th Edition, McGraw-Hill, 2014.
- [13] R. Hela, „Příměs do betonu,“ *Beton TKS: Technologie a materiály*, pp. 4-10, Únor 2015.
- [14] S. Austin, P. Robins a Y. Pan, „Tensile bond testing of concrete repairs,“ *Materials and Structures*, pp. 249-259, Červen 1995.
- [15] E. N. Julio, F. A. Branco a V. D. Silva, „Concrete-to-concrete bond strength,“ *Construction and Building Materials*, pp. 675-681, 17 Červen 2004.
- [16] „surface preparation in an underpass: uniform concrete removal with the falch surface worker 250!“, falch gmbh, 11. Zář 2020. [Online]. Available: <https://www.falch.com/en/news/project-reports/uniform-concrete-removal-with-the-falch-surface-worker-250>. [Přístup získán 17. Duben 2024].
- [17] Bodnarova L., Sitek L., Foldyna J. et al., „Application of water jet technology for concrete repair,“ *MM Science Journal*, pp. 2385-2389, Červen 2018.
- [18] L. Courard, B. Bissonnette a N. Belair, „Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: Comparison of jack-hammering and water jetting,“ v *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Kapské Město, Taylor & Francis, 2006, pp. 383-386.
- [19] M. G. Alexander, H. Beushausen, F. Dehn a P. Moyo, „Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial,“ *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, pp. 383-386, 2006.
- [20] R. W. Gillette, „A 10-Year Report on Performance of Bonded Concrete Resurfacings,“ *Highway Research Record*, pp. 61-76, 1965.
- [21] J. Silfwerbrand, „Shear bond strength in repaired concrete structures,“ *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, sv. 36, pp. 419-424, 2003.
- [22] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*, pp. 8-13, Listopad 2023.
- [23] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 12615. *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení pevnosti v šikmém smyku*, Květen 2000.

- [24] S. Austin, P. Robins a Y. Pan, „Shear bond testing of concrete repairs," *Cement and Concrete Research* , pp. 1067-1076, 1999.
- [25] M. Naderi, D. Cleland a A. Long, „Bond strength of patch repair mortars for concrete," *RILEM Symposium on Adhesion between Polymers and Concrete*, p. 235–244, 1986.
- [26] A. M. Vaysburd a J. E. McDonald, An Evaluation of Equipment and Procedures for Tensile Bond Testing of Concrete Repairs, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1999.
- [27] K. M. Pufal, G. Savaris a S. L. G. Garcia, „Evaluation of direct shear strength of self-consolidating and conventional concretes," *Revista Materia*, pp. 1-10, Říjen 2021.
- [28] X. Wu a X. Zhang, „Investigation of short-term interfacial bond behavior between existing concrete and precast ultra-high performance concrete layer," *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, 2018.
- [29] . Y. Han, J. Wang a E. Zhang , „Experimental Study of Interfacial Bond Properties between CGM and Existing Concrete," *Applied Sciences*, pp. 1-14, 2022.

Seznam obrázků

Obr. 1 a)-degradovaná železobetonová stěna [1], b)-přetížený žb. sloup [2].....	8
Obr. 2 Schéma tranzitní zóny kameniva v betonu-stěnový efekt	9
Obr. 3 a) makropohled přechodové zóny, b) mikropohled přechodové zóny [5].....	10
Obr. 4 Schéma faktorů ovlivňující soudržnost vrstev	10
Obr. 5 Ztráta pevnosti v důsledku nedokonalého zhutnění [7]	11
Obr. 6 Úprava povrchu broušením [15]	14
Obr. 7 Úprava povrchu sbíjecím kladivem [15]	14
Obr. 8 Úprava povrchu pískováním [15]	15
Obr. 9 Úprava vysokotlakým vodním paprskem [16] [17]	15
Obr. 10 Výsledky tahové zkoušky [6]	16
Obr. 11 Tabulka s porovnáním únosnosti a vlhkosti [14]	17
Obr. 12 Hlavní typy zkoušení soudržnosti v rozhraní	18
Obr. 13 Schématické příklady používaných zkoušek	18
Obr. 14 Možné typy porušení vzorků	19
Obr. 15 Vzorky pro zkoušku v příčném tahu [22]	20
Obr. 16 Schématické znázornění „strut and tie“ modelu ve vzorku [5]	20
Obr. 17 Rozměry a tvar zkušební tělesa dle ČSN [23]	21
Obr. 18 Závislost poměru σ_0/c na úhlu styku vzorků α [24]	23
Obr. 19 Napětí ve zkoušce v šikmém smyku a zobrazení v mohrově kružnici	23
Obr. 20 Obálka únosnosti v závislosti na přítomnosti trhlin ve spojení [5]	24
Obr. 21 Schéma napětí v prvku zatíženým kroucením	26
Obr. 22 Mohrova kružnice s hlavními napětími	27
Obr. 23 Schéma zatěžování in-situ	28
Obr. 24 Vznik smykové síly v rozhraní- Hoyerův efekt	28
Obr. 25 Schéma zatížení na vzorek	29
Obr. 26 Příklad zkoušení vzorku [27]	29
Obr. 27 Schéma a rozměry vzorků [29]	30
Obr. 28 Schéma zatěžování vzorků	32
Obr. 29 Tvorba tvaru rozhraní ve vzorcích	33
Obr. 30 Příprava forem na první betonáž	33
Obr. 31 Boční strany vzorků	34
Obr. 32 Vzorky před zatěžováním	35
Obr. 33 referenční vzorek pro určení doby zatěžování od betonáže	35
Obr. 34 Zatěžování v hydraulickém lisu	36
Obr. 35 Porušení tělesa s diagonálními drážkami v rozhraní	37
Obr. 36 Porušení tělesa s vodorovnými drážkami v rozhraní	38
Obr. 37 Porušení tělesa se svislými drážkami v rozhraní	38
Obr. 38 Porovnání správného a chybného porušení vzorku	39
Obr. 39 Detekce hran ze snímků ze záznamu zkoušení	41
Obr. 40 Fotografie před zatěžováním vzorku	43