

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 633

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Michal Štrba

Ocelové rozpěrné kotvy namáhané cyklickou tahovou silou

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

Ing. Michal Štrba

**OCELOVÉ ROZPĚRNÉ KOTVY NAMÁHANÉ
CYKlickOU TAHOVOU SILOU**

**STEEL EXPANSION ANCHORS UNDER
CYCLIC TENSILE LOADING**

Zkrácená verze PhD. Thesis

Obor: 3607V009 Konstrukce a dopravní stavby
Školitel: doc. Ing. Marcela Karmazínová, CSc.
Oponenti: prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.
prof. Ing. Ján Brodniansky, PhD.
doc. Ing. Vincent Kvočák, PhD.
Datum obhajoby: 23. 8. 2011

Klíčová slova: ocelové rozpěrné kotvy, cyklické tahové zatížení, experimentální ověřování, navrhování na základě zkoušek

Key words: steel expansion anchors, cyclic tensile loading, experimental verification, design assisted by testing

Sdělení: Tato práce byla zpracována s podporou výzkumného centra MŠMT CIDEAS č. 1M0579 "Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí" a také grantu GAČR reg. č. 103/06/1107 "Experimentální a teoretická analýza ocelových rozpěrných kotev při namáhání statickými a dynamickými účinky zatížení".

Originál disertační práce je uložen v archivu PVO Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

© Michal Štrba, 2011

ISBN 978-80-214-4341-9

ISSN 1213-4198

OBSAH:

1. ÚVOD	5
2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
2.1 DODATEČNĚ OSAZOVANÉ KOTVY DO BETONU	6
2.1.1 Chemické (lepené) kotvy	6
2.1.2 Mechanické kotvy	6
2.1.3 Rozpěrné (expanzní) kotvy	7
2.2 ZPŮSOBY PORUŠENÍ PŘI TAHOVÉM NAMÁHÁNÍ	8
2.3 PARAMETRY OCELOVÝCH ROZPĚRNÝCH KOTEV	8
2.4 ÚNOSNOST PŘI STATICKÉM TAHOVÉM ZATÍŽENÍ	9
2.4.1 Porušení oceli	9
2.4.2 Porušení betonu	10
2.5 NAMÁHÁNÍ KOTEV CYKlickOU TAHOVOU SILOU	11
3. CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	12
4. REALIZACE ZKOUŠEK	13
4.1 POPIS ZKUŠEBNÍCH TĚLES	14
4.1.1 Ocelové rozpěrné kotvy	14
4.1.2 Betonová tělesa pro zkoušení kotev	14
4.2 VLASTNÍ REALIZACE ZKOUŠEK KOTEV	16
4.2.1 Souhrnný popis získaných výsledků	17
4.2.2 Vliv vysunutí kotvy a šroubu při zatěžování	18
4.2.3 Měření a zpracování hodnot posunů	19
5. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	20
5.1 POUŽITÉ METODY ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	20
5.1.1 Běžně používané statistické metody	20
5.1.2 Metoda navrhování na základě zkoušek	20
5.2 STATICKÉ ÚNOSNOSTI PRO ZÁKL. ZPŮSOBY PORUŠENÍ	21
5.3 PODROBNĚJŠÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ	21
5.3.1 Únosnost při porušení oceli.....	22
5.3.2 Únosnost při porušení betonu.....	23
5.4 DEFINOVÁNÍ HRANICE MEZI ZPŮSOBY PORUŠENÍ	26
6. ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
CURRICULUM VITAE	31
ABSTRACT	32

Poznámka: v rámci této zkrácené verze disertační práce je zcela vynechána kapitola věnovaná ověřovacím materiálovým a doplňkovým statickým zkouškám kotev.

1 ÚVOD

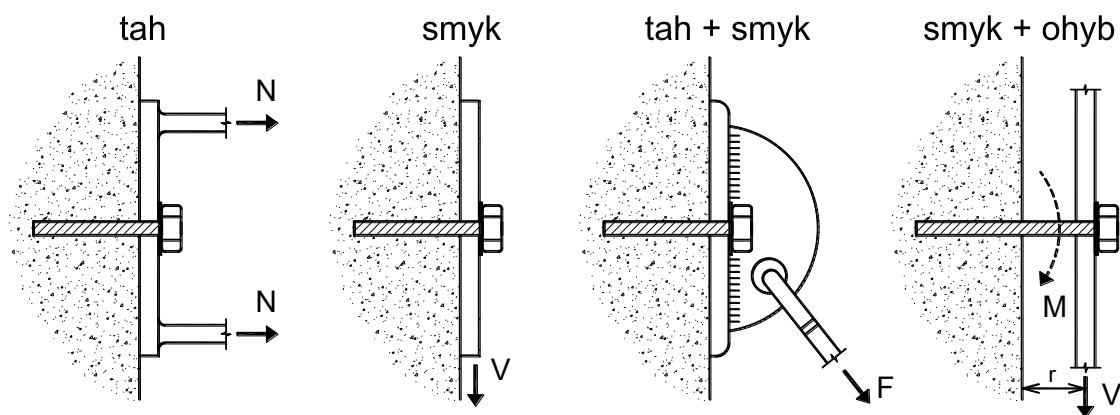
Problematika kotvení je velmi důležitou součástí návrhů a realizací napříč všemi obory stavitelství, od jednoduchých objektů pozemních staveb až po mostní konstrukce či výškové budovy. V dnešní době se používají především dva způsoby, a to s předem zabetonovanými a dodatečně osazovanými prvky.

Problematiku dodatečně osazovaných rozpěrných kotev do betonu zatížených tahovou silou lze na teoretické i experimentální úrovni nalézt v literatuře. Většina dostupných podkladů a materiálů k tomuto tématu je ale zaměřena na namáhání statickým zatížením. Oproti tomu oblast opakovaného zatížení těchto prvků není dosud podrobněji zpracována.

Jednou z možností pro určení mezních a návrhových hodnot únosností cyklicky namáhaných kotev je provedení experimentů s použitím opakované tahové síly a následné porovnání jejich výsledků se vztahy pro kotvy zatěžované staticky. Testy umožní získat lepší představu o chování kotev a lze na jejich základě hodnoty verifikovat s využitím normativních předpisů a metod matematické statistiky. Tato práce se tedy opírá především o experimentální část, přičemž částečně využívá i výsledky získané ze zkoušek provedených v dřívější době na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Z hlediska použití mají dodatečně osazované kotevní prvky velmi široké uplatnění díky možnosti montáže do již hotových konstrukcí. Mohou se použít pro kotvení konstrukcí nosných i pro uchycení těžkých strojů a zařízení na nosnou konstrukci či do základů. V neposlední řadě také pro nenosné stavební prvky. Z toho vyplývá, že tyto prvky bývají vystaveny nejen zatížení statickému od vlastní tíhy konstrukce nebo jiných neměnných zatížení, ale také zatížení cyklickému, jež mohou vyvolávat uchycená zařízení, nebo např. zatížení dopravou u mostních konstrukcí, přičemž s různou charakteristikou zatěžování se mění jejich chování. Rozčlenit zatížení lze i na základě způsobu namáhání kotevních prvků, viz *Obr. 2.01*.



Obr. 2.01 Způsoby namáhání kotevních prvků

2.1 DODATEČNĚ OSAZOVANÉ KOTVY DO BETONU

Zřejmě nejrozšířenějším typem dodatečně osazovaných kotevních prvků jsou ocelové kotvy do betonu, které se vyskytují hlavně ve dvou variantách, a to jako:

- chemické (lepené) kotvy,
- mechanické – nejčastěji rozpěrné (expanzní) kotvy.

System montáže je pro oba typy v počáteční fázi podobný. V obou případech se nejdříve do betonové konstrukce vyvrtá otvor odpovídajícího průměru pro zvolenou hodnotu únosnosti kotvy a otvor se vyčistí. Poté se do něj osadí kotevní prvek a dojde k aktivaci kotvy. Postup osazování samotného prvku se pak už ale liší, stejně jako princip aktivace a přenosu sil.

2.1.1 Chemické (lepené) kotvy

Chemické kotvy jsou v současné době nejpoužívanějšími dodatečně osazovanými kotevními prvky. Jedním z charakteristických znaků u nich je, že vyvrtaný otvor má větší průměr než kotva. Ta se osazuje až po vyplnění otvoru lepidlem (tmelem).

Velmi důležitým krokem je již vlastní čištění vyvrtaného otvoru (kvůli zabránění smíchání nečistot a prachu s lepidlem). Do vyčištěného otvoru se nejdříve „umístí“ lepicí hmota, poté se osadí kotevní prvek, který se buďto přímo zasune, nebo (v případě, že v otvoru jsou kapsle či sáčky) se do něho zavrtá – k tomuto účelu má upravený hrot, jež umožní porušení obalu s lepidlem a promísení jeho složek. Nejpoužívanějším a velmi jednoduchým typem lepené kotvy je závitová tyč [01].

2.1.2 Mechanické kotvy

Prvotním znakem je, že u mechanických kotev nevyvstává nutnost použití dalších podpůrných prostředků, jakými jsou lepicí hmoty v případě kotev chemických. K přenosu tahového zatížení se u nich tedy využívá pouze sil, které vznikají mezi působícím prvkem a základním materiálem.

Existuje mnoho typů mechanických kotev. Například jsou to kotvy zavrtávané, u nichž se cíleně vytváří otvor s průměrem dot o něco menším, než je průměr kotvy včetně závitu. Takový závit pak musí ale být odolnější (tj. jeho materiál musí mít vyšší tvrdost), aby mohl při zavrtávání snadněji proniknout betonem. K přenosu sil zde dochází po celé délce zavrtané části kotvy. Dalším příkladem jsou kotvy do otvorů s přídavným zářezem, kde je stávající otvor lokálně rozšířen v jeho spodní části, a kotevní prvek se po instalaci v zářezu zachytí.

V praxi nejpoužívanější jsou však kotvy rozpěrné neboli expanzní, jež využívají kónického tvaru jedné (nebo více) ze svých částí a jsou popsány v další kapitole.

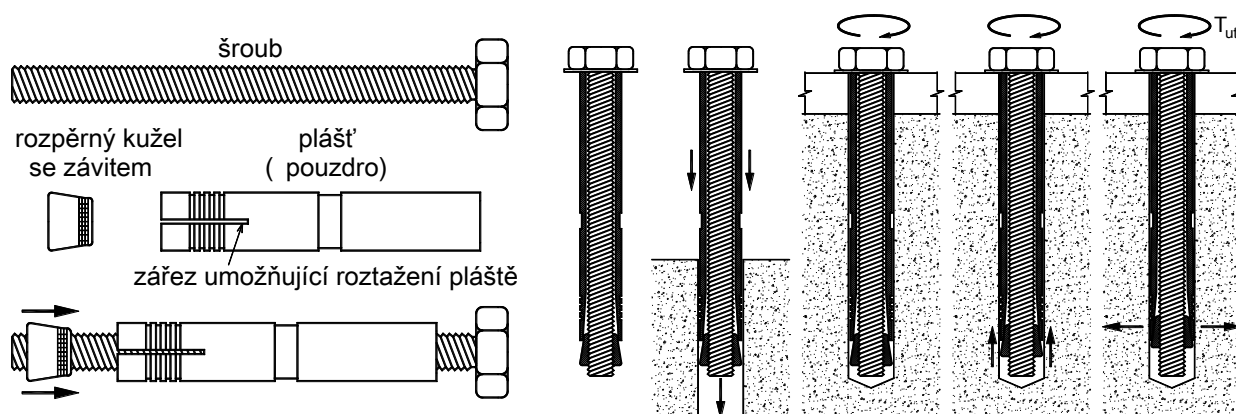
2.1.3 Rozpěrné (expanzní) kotvy

Jejich název je odvozen od sil vznikajících v místě dotyku kotvy se základním materiálem (betonem). Většinou se jedná o krátký úsek z celkové délky kotvy, který má díky kónickému tvaru nejmenší vzdálenost od stěny otvoru. Na tomto místě pak dochází k rozevření kotevního prvku, jeho těsnému přitlačení ke stěně a tím k působení expanzních sil. Jde o tzv. „aktivaci“. Podle způsobu vzniku rozpěrných sil lze uvažovat dvě skupiny, a sice:

- a) kotvy s řízeným (kontrolovaným) utahovacím momentem,
- b) kotvy s řízenou (kontrolovanou) deformací.

U prvního typu dochází k aktivaci dotažením matice předepsaným utahovacím momentem pomocí momentového klíče. Tento typ lze ještě dále rozdělit na dvě varianty podle toho, z jakých částí se kotvy skládají.

Pokud jde pouze o samostatný šroub (s nezbytnou úpravou, např. objímkou, zarážkou, apod.), jde o tzv. **šroubový typ**, jenž je vhodný spíše pro menší zatížení. Častěji je však kotva složena kromě šroubu také z pláště a rozpěrného kužele. V tom případě hovoříme o **pouzdrovém** (příp. plášťovém) **typu**, u kterého dotahováním matice vzniká ve šroubu předpínací síla, kterou je zasouván kužel do pláště a roztahuje ho. Tím vyvolá v okolním betonu tlakové napětí a dojde k aktivaci rozpěrných sil (viz *Obr. 2.02*). Pouzdrové typy jsou velmi rozšířenou variantou rozpěrných kotev a používají se pro menší i větší zatížení. Patří mezi ně výrobky značek FISCHER [21], WH-KOTE [23], HILTI [22], aj.



Obr. 2.02 Pouzdrový typ kotvy a způsob její aktivace

V případě další výše zmíněné varianty, kotev s kontrolovanou deformací, se jedná o umístění jedné části kotvy do vyvrtaného otvoru, ve kterém již je osazená jiná část. Buďto je osazen do otvoru plášť s kónickou spodní částí a do něj se zatlačí kuželek,

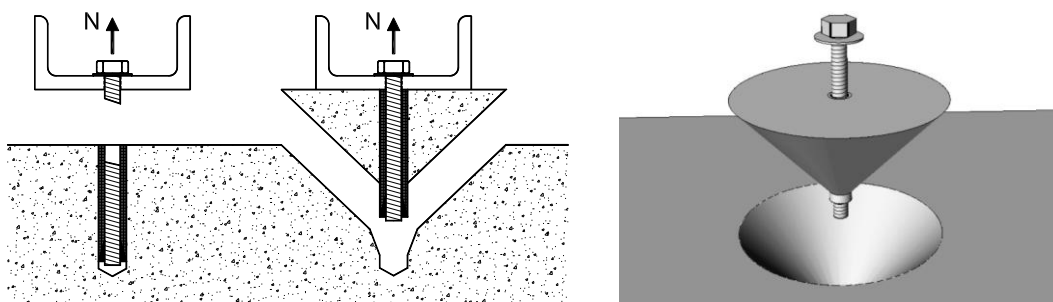
nebo je přímý válcový plášť tlačěn do otvoru, kde je již předem umístěn kužel. Kotvy s kontrolovanou deformací nejsou v praxi příliš rozšířeny a mají využití spíše pro upevňování menších konstrukčních částí (a tedy pro relativně malá namáhání).

2.2 ZPŮSOBY PORUŠENÍ PŘI TAHOVÉM NAMÁHÁNÍ

Existují dva základní a nejčastěji se vyskytující způsoby porušení při statickém tahovém namáhání ocelové rozpěrné kotvy v betonu, a to:

- přetržení šroubu kotvy v závitu a
- vytržení kužele betonu.

V prvním případě jde o poruchu nosného ocelového prvku, v druhém o kolaps materiálu tělesa, do něhož je kotva umístěna. Obě varianty naznačuje *Obr. 2.03*. O tom, ke kterému způsobu poruchy dojde, rozhodují geometrické a materiálové charakteristiky (viz níže).



Obr. 2.03 Přetržení šroubu kotvy v závitu a vytržení kužele betonu

Kromě již zmíněných základních dvou, dochází i k jiným alternativám poruch, jako jsou částečné povytažení kotvy doprovázené malým povrchovým kuželem, úplné vytažení kotvy včetně pouzdra z betonu, případně stržení závitu šroubu. Tyto způsoby jsou ale ojedinělé a bývají většinou spojeny se špatným návrhem parametrů kotevních prvků, vadou materiálu nebo nesprávným montážním postupem.

2.3 PARAMETRY OCELOVÝCH ROZPĚRNÝCH KOTEV V BETONU

Míru únosnosti kotvení ovlivňuje v rozličné míře řada parametrů, od rozměrů a geometrie umístění do betonového tělesa, přes vlastnosti použitých materiálů, až po kvalitu provedení montáže a osazení. Jednotlivé faktory lze rozdělit na:

- fyzikálně-mechanické vlastnosti,
- geometrické veličiny a
- ostatní vlivy.

Mezi fyzikálně-mechanické vlastnosti patří především **pevnost betonu v tahu** f_{ct} , která bývá odvozena od obecné pevnosti betonu v tlaku f_c , jež je určena jako válcová f_{ck} nebo krychelná $f_{ck,cube}$ (nebo jen f_{cc}). Dále je to **modul pružnosti betonu** v tahu a tlaku E_c a v případě šroubů **mez pevnosti oceli** f_{ub} (standardně výrobci kotev používají šrouby z oceli třídy 5.6 a 8.8, [06] [15]).

Geometrické parametry jsou **průměr dříku** d , **plocha jádra šroubu** A_s , případně **průměr pouzdra kotvy** D . Velmi důležitá je tzv. **efektivní hloubka kotvení** h_{ef} . Ta zcela zásadně ovlivňuje únosnost z hlediska porušení betonu. Jedná se o délku pláště kotvy, tj. vzdálenost okraje betonu od kuželem rozevřeného konce pouzdra.

Ostatní vlivy jsou např. kvalita montáže či skryté materiálové vady (souhrnně jsou zaneseny do výpočtů redukčními součiniteli).

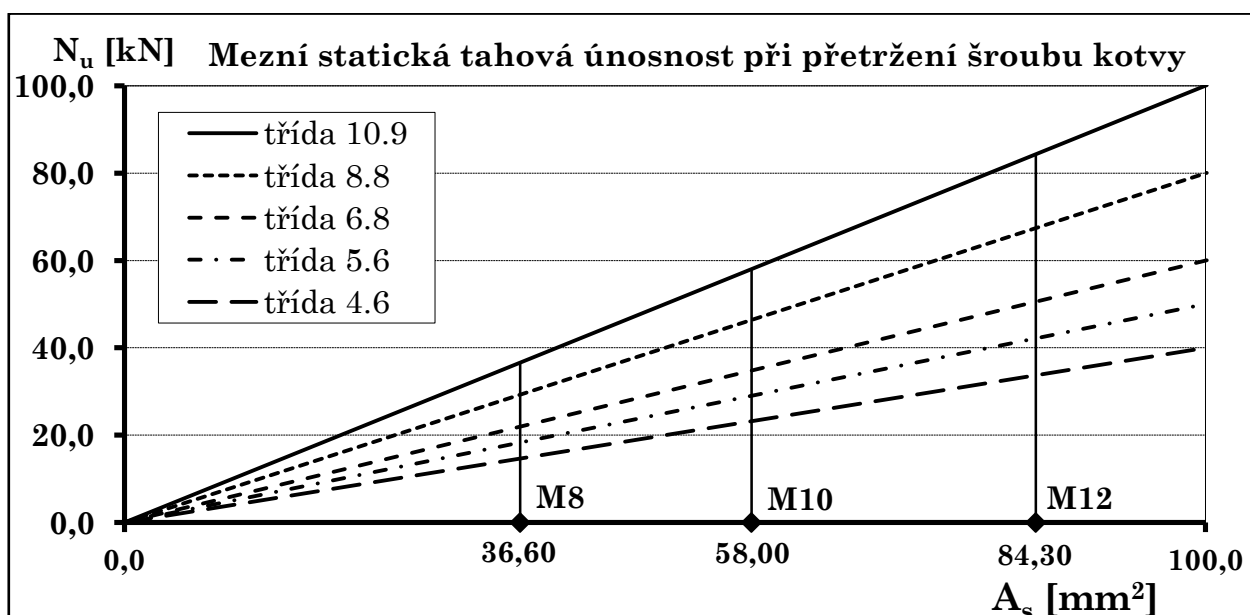
2.4 ÚNOSNOST PŘI STATICKÉM TAHOVÉM ZATÍŽENÍ

2.4.1 Porušení oceli

Při určování velikosti statické únosnosti $N_{u,stat}$ (dále jen N_u) v případě porušení oceli, tj. při přetržení šroubu kotvy v závitu (*Obr. 2.03*), se vychází z elementárního vztahu pro tahovou únosnost šroubu, tedy součinu plochy jádra A_s a jmenovité pevnosti oceli f_{ub} . Vztah má tvar:

$$N_u = A_s \cdot f_{ub} \Rightarrow N_u = k_s \cdot A_s \cdot f_{ub}, \quad (2.01)$$

viz *Obr. 2.04*, kde k_s je přídatný součinitel zahrnující vliv rozptylu vstupních veličin, jehož velikost se blíží hodnotě 1,0 (hlavně díky velké spolehlivosti oceli).



Obr. 2.04 Závislost mezní tahové únosnosti N_u na ploše jádra šroubu A_s

2.4.2 Porušení betonu

Při porušení betonu vytržením kužele (Obr. 2.03) je několik metod řešení mezní kapacity. Jejich společným základem je opět vztah pro tahovou únosnost, tj. prostý součin pevnosti v tahu f_{ct} (na základě převodních vztahů pak krychelné či válcové pevnosti v tlaku) a příslušné vzdorující plochy betonu A_c , tedy:

$$N_u = A_c \cdot f_{ct} . \quad (2.02)$$

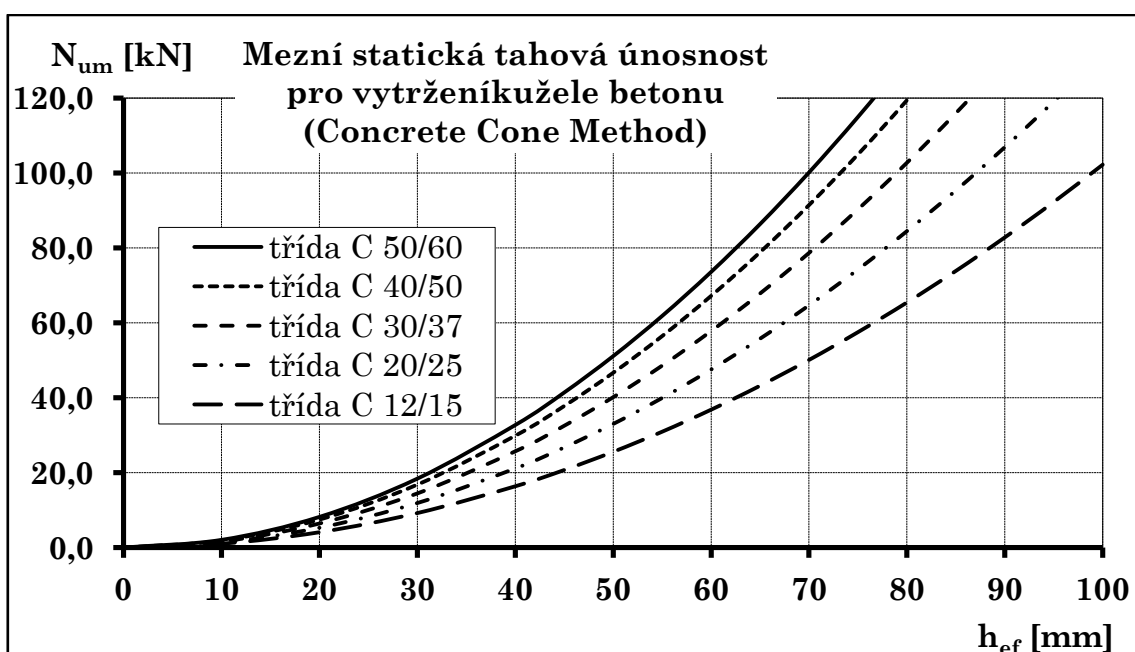
U všech používaných metod se projevuje kromě samotné pevnosti ještě jeden důležitý výše zmíněný parametr, a to efektivní hloubka kotvení h_{ef} , neboť je zřejmé, že od její velikosti se odvíjí i velikost vytrženého kužele (čím větší kotevní hloubka, tím větší vzdorující plocha betonu). Principiálně jde o obdobný případ jako předem zabetonovaný šroub s hlavou [09].

Jednotlivé způsoby řešení se liší podle idealizovaného tvaru vytrženého tělesa. Dle „*Concrete Cone Method*“ [02] je vytrženým tělesem kužel a vztah pro střední hodnotu statické únosnosti N_{um} (Obr. 2.05) je vyjádřen jako:

$$N_{um} = 0,84 \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot f_{cube150}^{0,5} . \quad (2.03)$$

Druhá používaná metoda, tzv. „*Concrete Capacity Method*“ [27], problematiku vytrženého tělesa redukuje ještě více a zavádí předpoklad, že výsledným tvarem je namísto kužele čtyřboký pravidelný jehlan a střední hodnota statické únosnosti je:

$$N_{um} = 13,2 \cdot h_{ef}^{1,5} \cdot f_{cube150}^{0,5} . \quad (2.04)$$



Obr. 2.05 Závislost N_{um} na hloubce h_{ef} (dle Concrete Cone Method)

2.5 NAMÁHÁNÍ KOTEV CYKlickOU TAHOVOU SILOU

Z hlediska mezní únosnosti se pro tento případ namáhání opět rozlišují stejné dva nejobvyklejší způsoby porušení, tedy přetržení šroubu kotvy v závitu a vytržení kužele betonu. Oproti statickému zatěžování se zde ale ve větší míře na výsledné únosnosti podepisuje materiál oceli, neboť častěji dochází k porušení šroubu. Velmi přitom záleží na konfiguraci a uspořádání příslušného přípoje, kdy lze porušení ocelové části zabránit vhodným návrhem parametrů kotvení.

V této práci jsou využity pouze základní charakteristiky únavového zatížení, jež se dají shrnout do následujících poznatků, např. dle [25] [31].

Pro každou zatěžovací amplitudu σ_a existuje určitý počet cyklů n do porušení materiálu. Z hlediska počtu n se únava dělí na nízkocyklovou a vysokocyklovou. Rovněž se rozlišuje zatěžovací cyklus na střídavý a pulzující podle toho, zda střední napětí σ_m je menší či větší, než amplituda. Celkový rozkmit $\Delta\sigma$ napětí je určený rozdílem mezi maximální σ_{max} a minimální σ_{min} hodnotou nebo jako dvojnásobek σ_a .

Pro zvolený způsob namáhání rozpěrných kotev tahovou cyklickou silou lze využít analogie s předchozím odstavcem. Mezní únosnosti pro opakované zatížení zřejmě nelze jednoznačně vyjádřit, neboť u nich vždy záleží na konkrétním počtu zatěžovacích cyklů (tj. proměnná veličina). Mezní únosnost cyklicky namáhaných rozpěrných kotev $N_{u,cykl}$ ale může být uvažována v závislosti na únosnosti při zatížení statickém $N_{u,stat}$. Pomocí experimentů lze stanovit rozsahy a zejména hranice velikostí sil pro oba hlavní způsoby porušení a ty poté zanést do vztahů pro únosnost statickou v závislosti na počtu cyklů. Vztah, jenž vyjadřuje tyto relace je možno zapsat v obecném tvaru rovnice sestupné přímky ($y = -k \cdot x + q$) s pomocí běžně užívaného převodu počtu cyklů do logaritmického měřítka, tj.:

$$N_{u,cykl} = (-k_{cykl} \cdot \log n_{cykl} + q_{cykl}) \cdot N_{u,stat} \cdot \quad (2.05)$$

Při tomto typu zatížení vykazují oba exponované materiály rozdílné chování. U oceli se jedná o známý vztah únosnosti v závislosti na příslušném počtu cyklů. U betonu je tento problém podstatně složitěji definovatelný, zejména v souvislosti s tím, zda se jedná o beton s trhlinami či bez nich.

Vzhledem k tomu a vzhledem k charakteru uvažovaného cyklického namáhání je zřejmé, že není tolik podstatné znát maximální tahovou cyklickou sílu při porušení, ale především rozkmit působícího zatížení. V takovém případě už lze nahlížet na oba materiály obdobně, a proto se zavádí definice mezní cyklické únosnosti $N_{u,cykl}$ jako rozkmitu působících tahových sil, tj. $N_{u,cykl} = \Delta N$. Přitom velikost ΔN je dána rozdílem mezi maximální N_{max} a minimální N_{min} hladinou cyklického zatěžování od začátku zatěžování až do porušení prvku.

3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Sortiment kotevních systémů je velmi rozsáhlý. Ve velké skupině pro tuto práci vybraného druhu ocelových dodatečně osazovaných prvků do betonu se na trhu vyskytuje nepřehledné množství ocelových mechanických rozpěrných kotev pouzdrového typu s řízeným utahovacím momentem.

Ačkoliv zde není žádná obecně platná metodika pro jejich navrhování (jednotliví výrobci mají své vlastní postupy a rozsahy návrhových hodnot), je únosnost těchto prvků (alespoň v případě jednoduchého monotónního tahového, popř. smykového namáhání) v literatuře dostatečně popsána a jsou známy postupy k jejímu určení.

Ověřování jednotlivých kotevních parametrů při statickém (nejen tahovém) a ve velmi malé míře i opakovaném zatěžování také v minulosti bylo a nadále je jedním z předmětů experimentálního výzkumu Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí, o který se tato práce částečně opírá, když přebírá některé jeho dosažené a publikované závěry či výsledky, zejména statické únosnosti [19] [24].

Dalším zdrojem informací pro stanovení spolehlivého návrhu mohou být i nabídkové katalogy firem, jež tyto upevňovací prostředky vyrábějí. Jejich deklarované únosnosti jsou do jisté míry srovnatelné, jelikož jsou ve velké většině nutně svázány jednotnými předpisy či normami pro jejich odzkoušení (tedy požadavky certifikace, akreditace, apod.). Pro praktické využití jsou stanovené návrhové parametry konzervativní, neboť zahrnují určitou rezervu, zejména z důvodu mnoha vstupujících proměnných veličin, včetně lidského faktoru.

Všechny výše zmíněné dostupné charakteristiky se ale týkají téměř výhradně tahového namáhání statického. Ve stavební praxi jsou ale kotvy často součástí konstrukcí z velké části namáhaných nerovnoměrně v čase a jsou tak vystaveny i opakovanému tahovému zatížení.

Hlavním cílem předkládané disertační práce je tedy ověření chování vybraného druhu ocelových rozpěrných kotev právě v případě cyklického tahového namáhání, tj. vysledování závislosti mezi intenzitou zatížení (rozkmitem sil) a porušením. Hlavní důraz je kladen zejména na nalezení alespoň přibližných teoretických rozmezí mezi popsányi dvěma nejčastějšími způsoby porušení tak, aby bylo možné na jejich základě provést co nejefektivnější návrh parametrů kotvení z hlediska využití obou stěžejních materiálů.

Současně se práce v jedné své části zaměřuje na ověřovací zkoušky s monotónní tahovou silou (pro případné upřesnění či doplnění převzatých vztahů u konkrétního zkoušeného typu kotev), a také jsou její součástí ověřovací zkoušky pevnostních parametrů použitých materiálů.

4 REALIZACE ZKOUŠEK

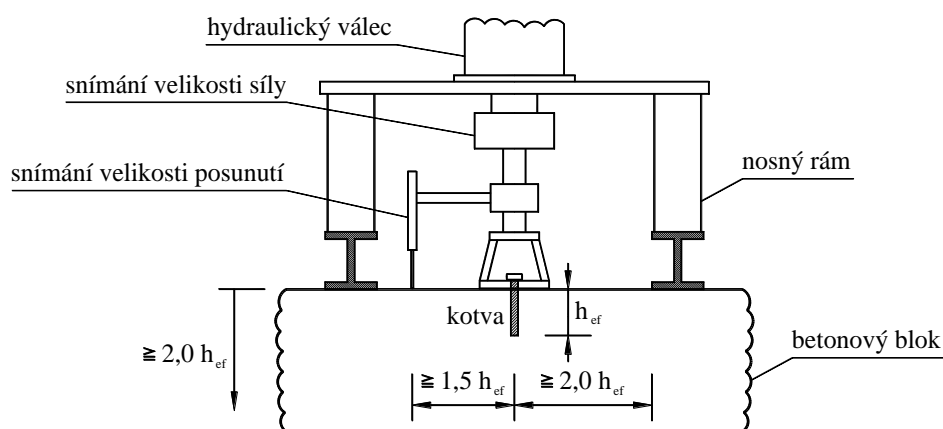
Vzhledem k hlavnímu vytýčenému cíli opírá se předkládaná práce o zde popsanou experimentální část, ve které byla s pomocí hydraulického zařízení vyvozována cyklická tahová síla ke zkoušení ocelových expanzních kotev v betonu za účelem zjištění jejich chování a únosnosti při tomto typu namáhání.

Zkoušky samotné se řídí specifickými předpisy, např. pokynem pro evropská technická schválení ETA [11]. V praxi se pak běžně provádí pro vybraný prvek daného výrobce řádově na desítkách či stovkách vzorků se stále stejnými vstupními parametry, kdy je následně možno statistickými metodami určit hledané veličiny.

V případě této práce ovšem nebyly takové možnosti a také samotné navržené experimenty nesměřovaly k určení zaručené únosnosti jednoho konkrétního prvku, ale spíše k hraničním hodnotám působících tahových sil, aby docházelo k porušení zkoušených vzorků o různých geometrických i materiálových parametrech. Experimenty tedy byly záměrně prováděny s extrémními velikostmi sil. Hlavní snahou provedených zkoušek bylo nalezení alespoň přibližných vztahů mezi dvěma hlavními způsoby porušení oceli a betonu, velikostmi mezních tahových sil při opakovaném namáhání a odpovídajícími počty zatěžovacích cyklů.

Při plánování zkoušek bylo potřebné zvolit vhodnou metodiku testování, včetně souvisejících geometrických parametrů zkušebních vzorků. Jednou z možností bylo vycházet z platných předpisů pro zkoušení kotevních prvků (předepsané minimální vzdálenosti kotev vůči okrajům zkušebních bloků a podpor zkušebního zařízení).

Pro zde řešenou experimentální úlohu tahového namáhání jediné samostatné kotvy v nevyztuženém betonu je platným předpisem směrnice ETAG 001 [11], jejíž nejpodstatnější omezující pravidla jsou shrnuta na *Obr. 4.01*.



Obr. 4.01 Požadované rozměry pro tahové zkoušky kotev dle ETAG [11]

4.1 POPIS ZKUŠEBNÍCH TĚLES

4.1.1 Ocelové rozpěrné kotvy

Ze širokého sortimentu rozpěrných kotev byla pro testování vybrána univerzální ocelová kotva pro střední a velká zatížení KOTE – HA výrobce WH – KOTE [23] (Obr. 4.02), se šrouby z oceli třídy 8.8 o průměrech $d = 8, 10, 12$ a 16 mm. Jejich kotevní hloubka se pohybovala v rozmezí $55 - 100$ mm, ale některé kotvy byly pro účely testování z hlediska h_{ef} modifikovány (vždy šlo o zkrácení).



Obr. 4.02 Testované kotvy (KOTE – HA) a betonová zkušební tělesa

4.1.2 Betonová tělesa pro zkoušení kotev

Geometrie betonových zkušebních těles byla zvolena v návaznosti na výše zmíněné požadavky (Obr. 4.01) pro jejich minimální vzdálenosti od okraje a mezi sebou tak, aby byl vždy dostatečný prostor pro případné porušení vytržením kužele. Dalšími faktorem ovlivňujícím rozměry byly možnosti zatěžovací soustavy, jednak z hlediska umístění vzorků pod hydraulickým válcem a zároveň dostatečného uchycení betonového tělesa k podkladu (aby nebyly namáhány ohybem).

Výsledná tělesa měla rozměry $600 \times 500 \times 300$ mm (viz Obr. 4.02) a při použití prostého betonu cca 2200 kg/m^3 byla jejich hmotnost asi 200 kg. Ruční manipulace tak byla velice omezená a bylo nutné vždy používat zvedacích mechanismů.

Vzhledem k tomu, že se dodatečně osazované rozpěrné kotvy umísťují buďto do ŽB prvků nezávisle na umístění výztuže a nebo přímo do konstrukcí z prostého betonu, byla z hlediska pevnostních charakteristik zkušebních těles snaha obsáhnout běžnou škálu používaného betonu ve stavební praxi, tj. C 12/15 ~ C 30/37.

Nejdříve byla vytvořena úvodní sada zkušebních těles (S1), u níž byla zjištěna střední hodnota krychelné pevnosti $27,6$ MPa. Po odzkoušení první sady bylo navrženo a vybetonováno dalších 5 sérií (S2 – S6) s odlišnými pevnostmi. Celkem

se jednalo o 64 bloků. Rovněž byla využita data získaná ze zatěžovacích zkoušek s cyklickou tahovou silou, jež byly provedeny v předchozím období na Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí formou tzv. „pilotních“ testů, viz např. [13] [17]. Výčet údajů pro celý soubor zkušebních těles je v *Tab. 4.01*.

Série zk. těles	Označení zk. těles	Datum betonáže	Krychelná pevnost $f_{c,cube}$ [MPa]	Počet zk. těles
S1	MK 25	18.08.2006	27,60	11
S2	MK 45	13.07.2007	47,63	18
S3	MK 20	11.06.2008	20,86	7
S4	MK 35	06.08.2008	36,90	10
S5	MK 30	07.11.2008	32,22	10
S6	MK 25	14.11.2008	26,95	9

Tab. 4.01 Přehled jednotlivých sérií betonových zkušebních těles

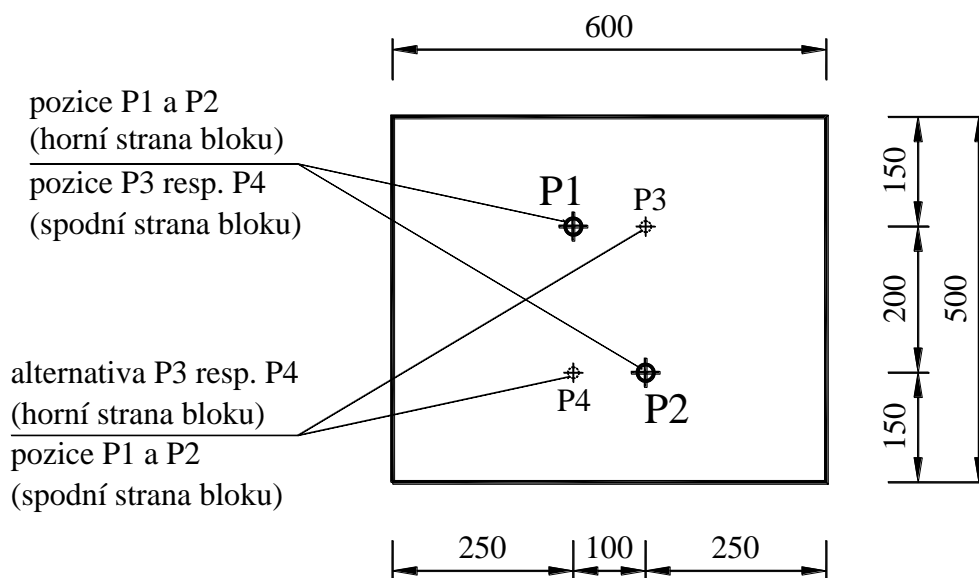
Vzhledem k tomu, že při cyklickém zatěžování se velikosti tahových sil odvíjely od předpokládaných statických únosností (viz dále), které jsou obecně vztaheny k hodnotám po 28 dnech, bylo nutné sjednotit hodnoty pevnostních charakteristik použitých betonů, neboť pevnost sérií S1 a S2 byla zjištěna později (až se začátkem samotných testů kotev). Proto byl proveden přepočítání na základě známé metodiky vlivu stáří betonu na pevnost, podle CEB-FIP [03], pro pevnost v čase t :

$$f_{cc}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cc,28}, \quad \text{kde} \quad \beta_{cc}(t) = \exp\left[0,25\left(1 - \frac{5,3}{\sqrt{t}}\right)\right] \quad (4.01)$$

Jelikož byly známy krychelné pevnosti v čase t , musel se provést pomocí vztahu (4.01) v podstatě obrácený přepočítání pro získání pevností po 28 dnech. Stejná metoda se poté mohla použít při konkrétním číselném zpracovávání dat v rámci jednotlivých sérií, kde bylo díky tomu možné uvažovat přibližnou pevnost těles v době zkoušky.

V závislosti na zmiňovaných předpisech pro zkoušení, vybraných geometrických parametrech kotev a rozměrech betonových těles pro jejich osazení, byla zvolena konfigurace rozmístění kotev tak, aby mohly být na každé straně tělesa odzkoušeny nezávisle na sobě dvě samostatné kotvy (na obrázku pozice P1 a P2). Na rubové straně tělesa byly pozice zvoleny obráceně (viz *Obr. 4.03* na další straně).

Pakliže byla některá ze stran tělesa po odzkoušení neporušená, tj. nedošlo zde k vytržení kužele betonu, nevznikly trhliny či praskliny bloku, apod., byla na této straně osazena další kotva, nebo i dvě (pozice P3, popř. P4 na obrázku).

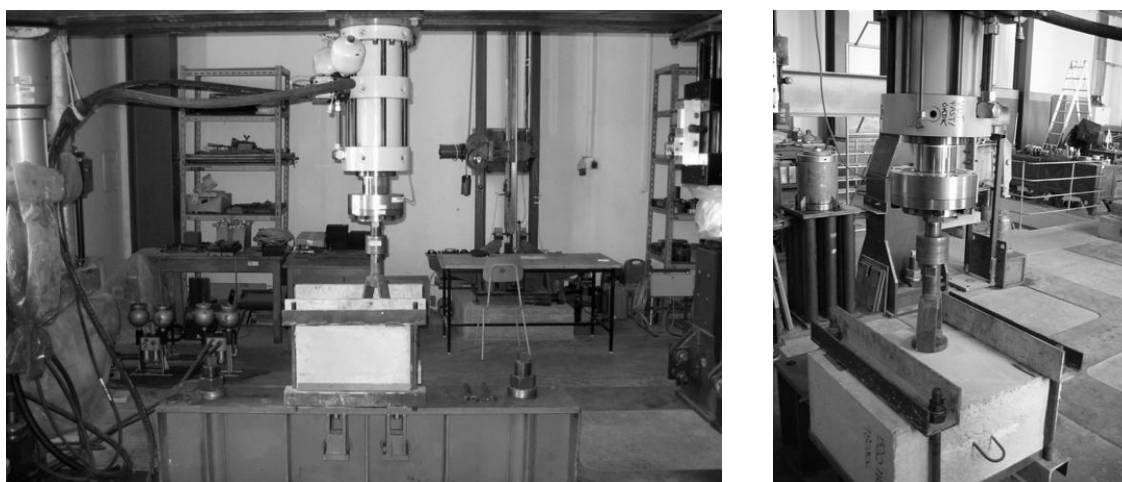


Obr. 4.03 Rozmístění kotev v betonovém tělese

Popsaná tělesa a rozmístění kotev byly použity i pro doplňkové testy se statickou tahovou silou, jejichž podrobnější popis je v samostatné části předkládané práce.

4.2 VLASTNÍ REALIZACE ZKOUŠEK KOTEV

K vyvození cyklické tahové síly byl využit hydraulický servoválec uchycený na zatěžovacím rámu. Pro měření tahových sil byl využit tenzometrický siloměr osazený přímo na píst válce. Vzájemné propojení celé soustavy s hydraulickým agregátem zajišťovala řídicí aparatura. Volba intenzity cyklických tahových sil byla zadávána pomocí PC s příslušným ovládacím softwarem, a zároveň byly tyto údaje, společně s případným měřením deformací, zaznamenávány měřicí ústřednou.



Obr. 4.04 Pohled na zatěžovací sestavu, včetně uchycení betonového bloku

Průběh (počáteční fáze) vnášení tahové síly bylo uskutečňováno tak, že síla nejprve narostla téměř lineárně v závislosti na čase až do nastavené výchozí „střední“ hodnoty N_m , ze které se rozbíhalo vlastní cyklování dle zvolené amplitudy.

Velikosti N_{min} a N_{max} se zadávaly na základě předpokládané střední hodnoty statické únosnosti konkrétního vzorku při porušení kuželem betonu. Minimum bylo uvažováno jako 10 ~ 15 % této hodnoty a maximum v rozmezí cca 40 ~ 90 %.

4.2.1 Souhrnný popis získaných výsledků

Celkově bylo pro vybraný typ ocelových rozpěrných kotev provedeno **255** zkoušek s cyklickou tahovou silou. Z tohoto počtu nastalo ve **156**ti případech přetržení šroubu kotvy, u **72** vzorků došlo k vytržení kužele betonu, včetně případů s částečným vytažením kotvy doprovázeným povrchovým kuželem. V **1** případě byla vytažena celá kotva a **1**krát vzorek zůstal neporušen. Zbylých **25** výsledků bylo nutné považovat za neplatné, neboť u nich došlo vždy téměř ihned k porušení.

Kotvy	Jmenovitá pevnost	$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$				
	Průměr šroubu	$d = 8, 10, 12 \text{ a } 16 \text{ mm}$				
	Efektivní délka kotvení	$h_{ef} = 45, 50, 55, 57, 60, 65, 70 \text{ a } 75 \text{ mm}$				
Beton	Krychelná pevnost	$f_{cc,28} = 20 \text{ až } 42 \text{ MPa}$				
Zatěžování	Frekvence	$f = 5 \text{ Hz}$				
Série testů	Počet testů	Způsoby porušení				Neplatné testy
		Porušení šroubu	Kužel betonu		Ostatní	
			plný	povrchový		
S1	59	42	9	3	-	5
S2	52	31	11	2	2	6
S3	35	17	12	1	-	6
S4	31	20	11	0	-	-
S5	39	16	17	0	-	6
S6	39	30	7	0	-	2
Celkem	255	156 (61,2 %)	72 (28,2 %)		2 (0,8 %)	25 (9,8 %)

Tab. 4.02 Rozpis parametrů a výsledků testů s cyklickou tahovou silou

Na Obr. 4.05 jsou dva příklady porušení vytržením kužele betonu, k nimž došlo během zkoušek. Nejčastějším způsobem porušení při experimentech však bylo podle předpokladů přetržení šroubu kotvy, které nelze tak dobře obrazově zaznamenat, a proto je do Obr. 4.05 vložen pouze snímek samotných porušených šroubů.



Obr. 4.05 Vytržené kužely betonu (vlevo) a přetržené šrouby

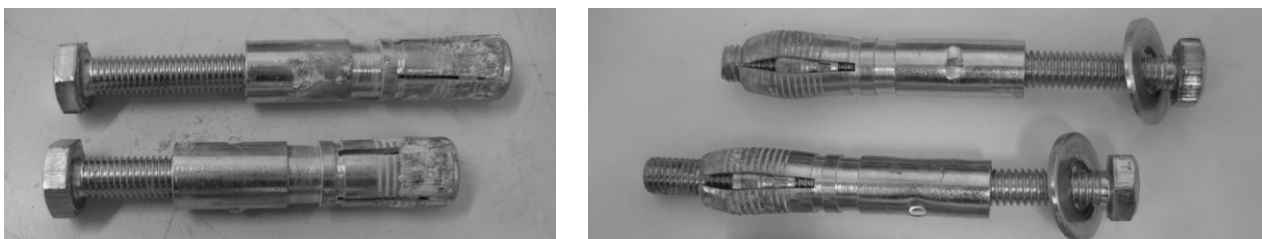
4.2.2 Vliv vysunutí kotvy a šroubu při zatěžování

Další hodnotou, jež se při experimentech s opakovaným zatěžováním kotev brala do úvahy, byla kromě počtů cyklů, rozkmitů tahových sil a způsobů porušení, také velikost vysunutí kotevního prvku vůči povrchu betonového tělesa.

Míra celkového posunu p se v tomto případě skládá ze dvou částí, jež mohou nastat každá samostatně, nebo i společně. Jednak se při zatěžování může vysouvat z bloku celá kotva p_k , druhou variantou je dodatečné „vtáhnutí“ rozpěrného kuželíku hlouběji do dolní části pláště, tj. posunutí vlastního šroubu p_s (a tedy $p = p_k + p_s$).

Zatímco první jmenovaný rozměr p_k zcela jednoznačně zkracuje efektivní hloubku kotvení h_{ef} , vliv hodnoty p_s není tak jednoznačný, protože po provedení instalace není zřejmé, v jaké poloze vzhledem k pouzdru kotvy se zastavil rozpěrný kuželík. Může tedy jít rovněž o zkrácení hloubky kotvení, ale není jisté, jak je velké.

Ve většině případů odzkoušených vzorků byl potvrzen základní předpoklad, že vliv hodnoty p_s je zanedbatelný, ojediněle došlo k nadměrnému zasunutí kuželíku do pláště (*Obr. 4.06*), zejména u kotev se šrouby menších průměrů. Tyto extrémní případy byly zaznamenány a příslušná kotevní hloubka upravena ve výpočtu.



Obr. 4.06 Správná (vlevo) a nesprávná poloha rozpěrného kuželíku

V praxi by se případné povytažení p_s řešilo opětovným dotažením šroubu. Korekce posunu celé kotvy p_k by byla ve skutečné konstrukci velmi obtížně proveditelná. Při prováděných zkouškách nebylo potřebné dělat jakákoliv opatření, neboť byl šroub neustále namáhán tahem a nemohlo dojít k deaktivaci.

4.2.3 Měření a zpracování hodnot posunů

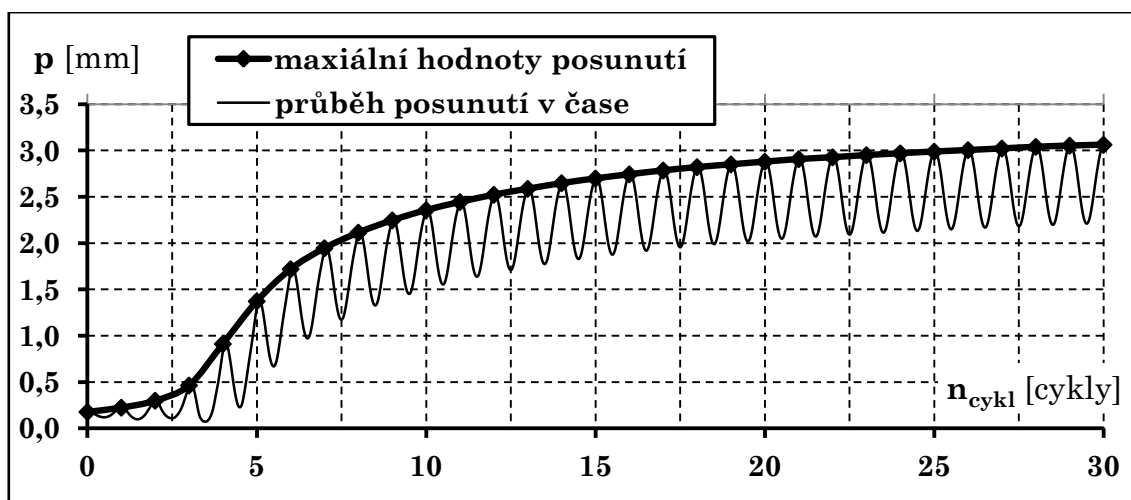
Celková hodnota posunu p se při všech experimentech ustálila během několika počátečních rozkmitů (maximálně šlo o desítky cyklů) zároveň s postupným navyšováním tahové síly pomocí hydraulického zařízení. Poté již nastával další nárůst jen velmi výjimečně a s velikostí do 1 mm, pročež byl jeho vliv při dalším vyhodnocování naměřených dat zanedbán. Výchylka v rámci jednotlivých cyklů taktéž nepřekračovala délku 1 mm.

Vlastní měření se provádělo u některých vzorků prostřednictvím indukčního snímače polohy HBM WA-T s rozsahem 50 mm a díky jeho propojení s měřicí ústřednou a PC bylo možno získat záznam průběhu posunů v čase. Soubor dat získaných z měřicí stanice byl velmi rozsáhlý, řádově se mnohdy jednalo o desítky až stovky tisíc záznamů z každé zkoušky (pokud ovšem nedošlo k porušení vzorku velmi brzy po začátku zatěžování). Takový výčet si vyžádal zpracování pomocí vhodného prostředku, a proto byl použit software MS EXCEL 2007 [29].

Vzhledem k tomu, že hledanou veličinou byla v podstatě pouze průběžně nejvyšší hodnota posunů, bylo nutné stanovit lokální maxima v celé množině získaných hodnot. Obecně lze zapsat řešení tohoto problému ve zjednodušeném tvaru:

$$y_i = y_{max} \Rightarrow y_i > y_{i-1} \wedge y_i > y_{i+1}, \quad (4.02)$$

kde y_i , y_{i-1} a y_{i+1} jsou hodnoty na řádcích i , $i-1$ a $i+1$ v záznamu. Tento vztah našel postupně všechny extrémy (tj. „vrcholy“ zatěžovacích cyklů). Množství dat si i přesto vyžadovalo velké nároky na strojový čas, proto bylo nakonec nutno ponechat pouze tyto maximální hodnoty a ostatní smazat. K tomu účelu bylo naprogramováno makro rovněž v rámci MS EXCEL 2007 [32]. Grafická podoba popsání řešení je na *Obr. 4.07*.



Obr. 4.07 Průběh počáteční fáze posunů při testu

5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

5.1 POUŽITÉ METODY ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

5.1.1 Běžně používané statistické metody

K primárnímu zpracování všech souborů výsledků z provedených experimentů, tedy pro získání jejich základních statistických charakteristik, jsou zde použity běžné statistické metody [08]. Průměrná hodnota jednotlivých výsledků x_i z celkového počtu n je dána vztahem (5.01). Pomocí průměru je vypočtena výběrová směrodatná odchylka s . Nakonec je možno určit variační koeficient v , jenž je definován jako podíl směrodatné odchylky a průměru:

$$v = s/\bar{x} \geq 0,1, \quad \text{kde} \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{a} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i. \quad (5.01)$$

Dále je zde použita (lineární) regresní analýza metodou nejmenších čtverců, a to pro porovnání výsledků zkoušek s odvozenými výpočetními modely odolnosti.

5.1.2 Metoda navrhování na základě zkoušek

Tato metodika byla dalším nástrojem pro zpracování získaných dat a také pro odvození vztahů statických a cyklických únosností v rámci celé *kap. 5*, dále také pro vyhodnocení ověřovacích zkoušek materiálových vlastností. Podrobný popis metody je v literatuře [04], resp. [14], v dalším textu uveden pouze stručný výtah.

Při výpočtu odolnosti materiálu (5 % kvantil) se použije aritmetický průměr \bar{x} , jeho směrodatná odchylka s a variační koeficient v . Charakteristická X_k nebo návrhová hodnota X_d se potom vypočítají pomocí koeficientů kvantilu k_n resp. $k_{d,n}$, jež jsou tabelizované pro v známý resp. neznámý v závislosti na počtu zkoušek n .

$$X_k = \bar{x} \cdot (1 - k_n \cdot v), \quad X_d = \bar{x} \cdot (1 - k_{d,n} \cdot v) \quad (5.02)$$

U druhého využívaného postupu, tj. při určování návrhových hodnot odolnosti konstrukčního prvku či soustavy na základě zkoušek, se nejdříve stanoví výstižná funkce g_{rt} modelu odolnosti r_{ti} , která zahrnuje všechny vstupní veličiny. Poté se s teoretickými hodnotami odolnosti r_{ti} porovnají naměřené hodnoty ze zkoušek r_{ei} . Jejich vzájemnou závislost lze nalézt lineární regresí metodou nejmenších čtverců, z níž se získá opravný součinitel b průměrných hodnot r_m , tedy:

$$r_e = b \cdot r_t, \quad \text{kde} \quad b = \frac{\sum r_e \cdot r_t}{\sum r_t^2}. \quad (5.03)$$

V další fázi se hledá odhad variačního koeficientu V_δ odchylky δ průměrné hodnoty r_m od skutečných naměřených veličin. Pomocí celkového variačního

koeficientu V_r se získají charakteristická (r_k) nebo návrhová (r_d) hodnota odolnosti. Celý postup viz [04]. Vztahy (5.04) a (5.05) jsou definovány pro omezený počet dat ($n < 100$). Postup byl využit v rámci doplňkových zkoušek kotev v *kap. 6* disertace.

$$r_k = b g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{\infty} \alpha_{rt} Q_{rt} - k_n \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2) \quad (5.04)$$

$$r_d = b g_{rt}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{rt} Q_{rt} - k_{d,n} \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2) \quad (5.05)$$

5.2 STATICKÉ ÚNOSNOSTI PRO ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY PORUŠENÍ

Jak již bylo zmíněno výše, cílem práce je zejména porovnání obdržných výsledků provedených zkoušek rozpěrných kotev zatížených opakovanou tahovou silou s únosností při statickém zatížení. Tato vyhodnocovací část práce se tedy při samotném porovnávání opírá o konkrétní již odvozené vztahy statických únosností pro oba základní způsoby porušení, které byly v uplynulém období získány v rámci výzkumné činnosti na autorově pracovišti, tj. Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí VUT v Brně, v této oblasti a publikovány např. v [20], [24], [30].

$$N_{s,m} = 1,024 \cdot A_s \cdot f_{ub}, \quad (5.06)$$

$$N_{c1,m} = 0,67 \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot f_{cc}^{0,5} \quad \text{dle Concrete Cone Method}, \quad (5.07)$$

$$N_{c2,m} = 15,6 \cdot h_{ef}^{1,5} \cdot f_{cc}^{0,5} \quad \text{dle Concrete Capacity Method}. \quad (5.08)$$

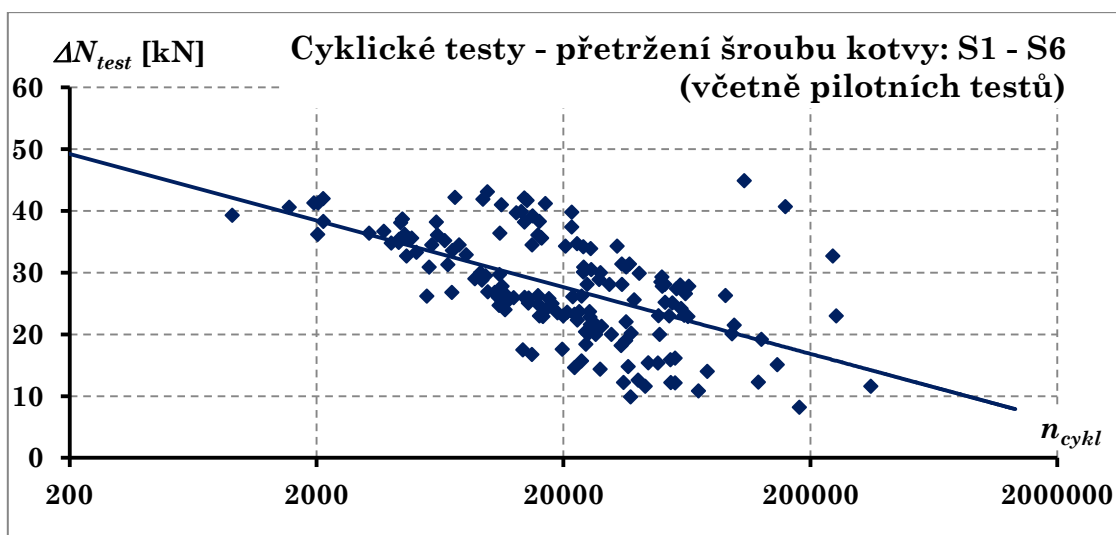
Z výsledků experimentů je patrné, že k přetržením šroubů kotev dochází tehdy, když jsou horní hranice cyklických tahových sil nastaveny na velikost 50 ~ 70 % statické únosnosti $N_{u,m}$. Oproti tomu pro dosažení porušení vytržením kužele betonu je nutno síly volit až k hranici 90 % (i více) teoretické statické únosnosti.

5.3 PODROBNĚJŠÍ ROZBOR VÝSLEDKŮ

Krychelná pevnost betonu zkušebních těles a mez pevnosti oceli byly ověřeny pomocí doplňkových ověřovacích zkoušek. Velikost průřezu dřívku byla zadávána přímo, experimentálně se neověřovala. Při zpracování metodou navrhování podle zkoušek se pak uvažovala vygenerovaná hodnota A_s se střední hodnotou podle tabulek, předpokladem normálního rozdělení a zvoleným variačním koeficientem velikosti $v = 0,05$ [15] [16]. Poslední používanou veličinou byla efektivní hloubka kotvení. Ta nebyla samostatně měřena, ale vycházela ze zvoleného návrhu kotevních parametrů a jako srovnání byla použita i korekce pomocí naměřených posunů, tj. zkrácení hloubky podle popisu v *kap. 4.2.3*. Kromě dat dosažených z testů v rámci sérií S1 – S6 (*kap. 5*) byly využity i výsledky pilotních testů [13] [17] [20].

5.3.1 Únosnost při porušení oceli

Podle předpokladů se jednalo o nejčastější případ selhání materiálu během cyklických testů (celkem 156 případů, viz *Tab. 4.02*). Vzhledem k převládajícímu počtu cyklů při porušení lze hovořit o nízkocyklové únavě (rozmezí pro tento případ bývá v literatuře udáváno $10^2 - 10^5$ cyklů) [31]. Souhrnný graf výsledků (včetně pilotních testů) je na *Obr. 5.01*.



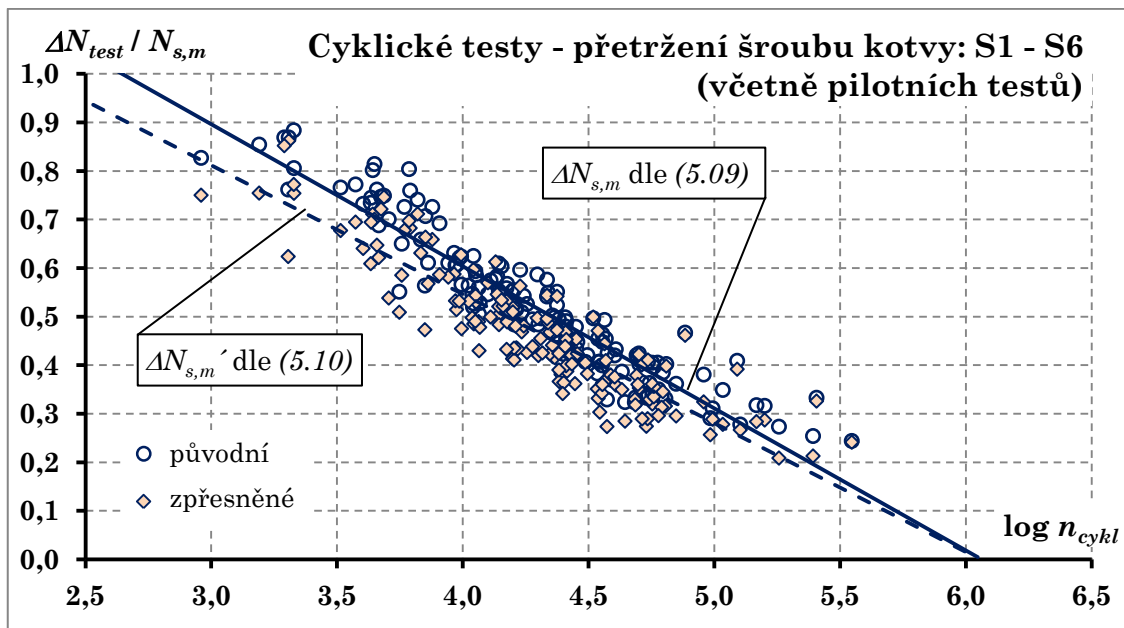
Obr. 5.01 Dosažené rozměry zatížení ΔN_{test} v případě porušení oceli

Graf zcela jednoznačně demonstruje tendenci zmenšující se odolnosti vůči rozměru zatížení při současném rostoucím počtu cyklů. Pro stanovení únosnosti při opakovaném tahovém namáhání je však potřeba výsledky cyklických zkoušek porovnat s mezní únosností. Proto také je v dalším grafu na *Obr. 5.02* vynesena závislost mezi poměry dosažených rozměrů a příslušných středních hodnot statických únosnosti $N_{s,m}$ dle (5.06) na počtech cyklů. Z tohoto souboru dat lze opět metodou nejmenších čtverců nalézt vztah pro střední hodnotu cyklické tahové únosnosti pro porušení únavovým lomem šroubu $\Delta N_{s,m}$.

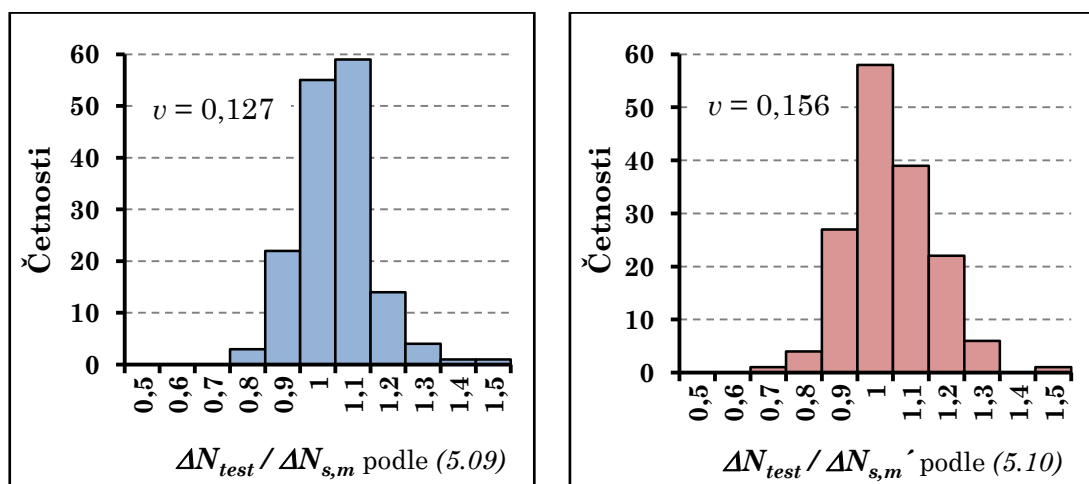
V grafu jsou přítomny rozlišeny 2 případy. Jeden představuje řešení za předpokladu dosažení jmenovitých hodnot pevnosti oceli f_{ub} a průřezu jádra A_s , viz (5.09). Ve druhém případě je zahrnut i vliv doplňkových zkoušek a veličiny A_s a f_{ub} jsou generovány dle normálního rozdělení, jak bylo popsáno v úvodu *kap. 5.3* (jde tedy o variantu, která se více přibližuje skutečnému stavu), viz (5.10). Výsledné vztahy pro střední hodnotu ve smyslu obecného zápisu (2.05) jsou potom:

$$\Delta N_{s,m} = (-0,2927 \cdot \log n_{cykl} + 1,7745)N_{s,m} \quad (5.09)$$

$$\Delta N_{s,m}' = (-0,2655 \cdot \log n_{cykl} + 1,6079)N_{s,m} \quad (5.10)$$



Obr. 5.02 Dosažené rozkmity zatížení ΔN_{test} v případě porušení oceli



Obr. 5.03 Histogramy ze získaných dat při přetržení šroubu kotvy

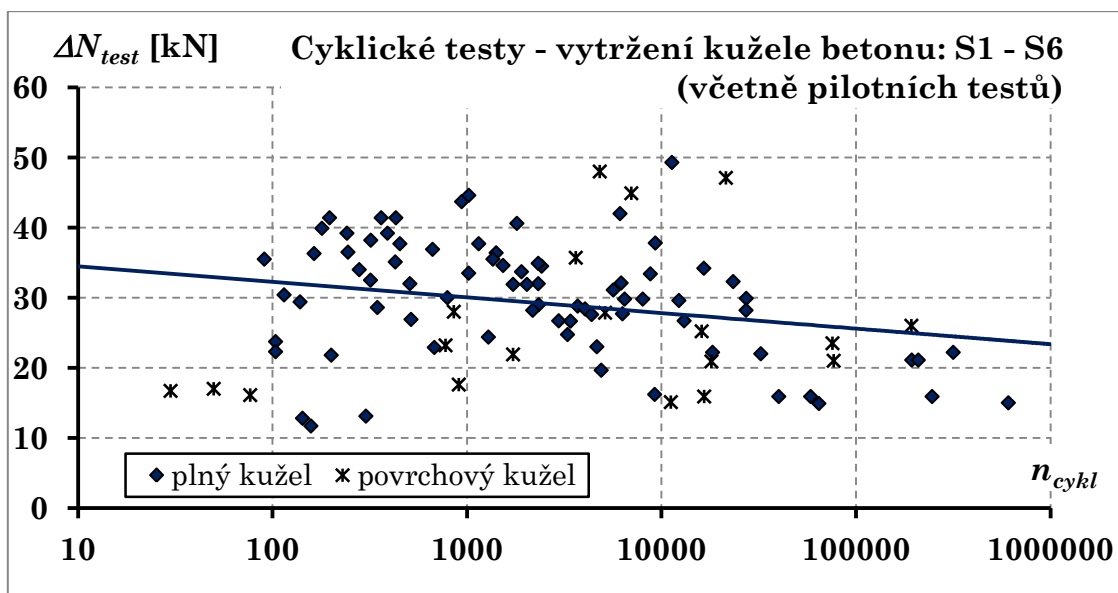
Nakonec byla na základě metody navrhování podle zkoušek z hodnot určených vztahem (5.10) za předpokladu normálního rozdělení stanovena návrhová únosnost při cyklickém namáhání pro případ porušení oceli $\Delta N_{s,d}$ ve tvaru:

$$\Delta N_{s,d} = 0,530 \cdot \Delta N_{s,m'} \quad (5.11)$$

5.3.2 Únosnost při porušení betonu

Tento případ je u opakovaného namáhání oproti monotónnímu méně častý. Celkově nastalo porušení kuželem 72krát, viz Tab. 4.02. Počty cyklů při porušení byly však nižší, než v případě přetržení šroubu.

Díky naměřeným posunům (*kap. 4.2.3*), které se zohlednily korekcí kotevní hloubky, a také díky shodnému principu chování, byly při zpracování dat použity zároveň obě alternativy porušení kuželem (tj. plné i malé povrchové, které nastávají po částečném vytažení pouzdra kotvy z betonu). Všechna data z experimentů v závislosti na počtu cyklů jsou na následujícím *Obr. 5.04*.



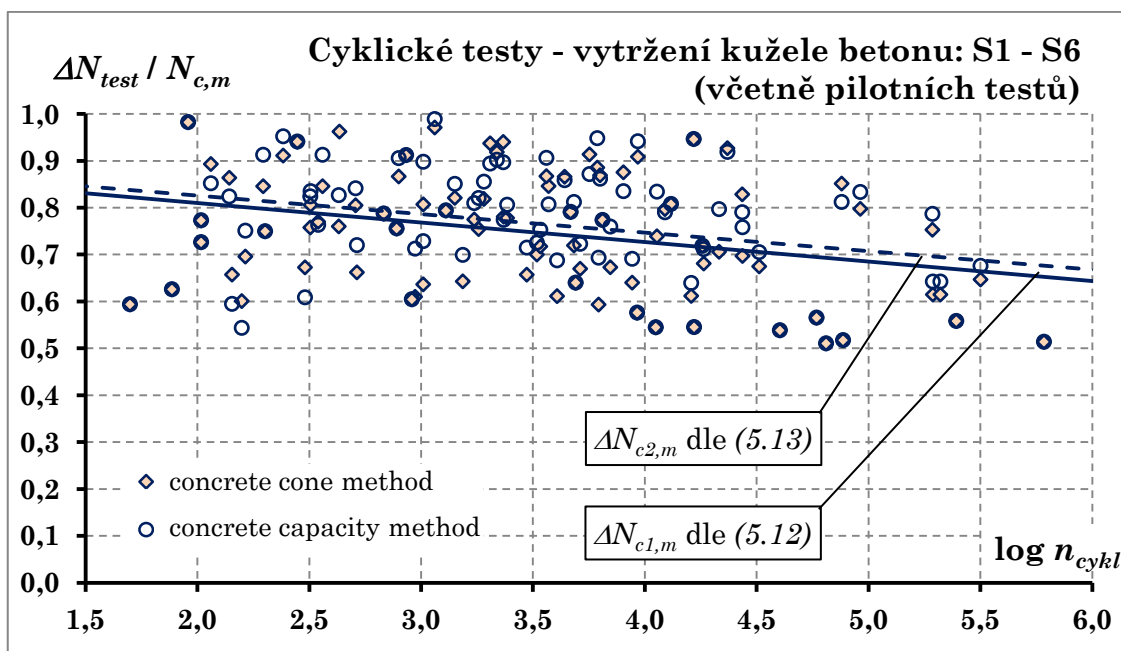
Obr. 5.04 Dosažené rozkmity zatížení ΔN_{test} v případě porušení betonu

Z grafu je na první pohled patrné, že skutečně není potřeba rozdělovat případy plných a povrchových kuželů. Rovněž je v grafu doplněna výslednice, která ukazuje, že s rostoucím počtem cyklů klesá dosažený rozkmit, avšak výrazně méně, nežli v případě přetržení šroubu (viz *Obr. 5.01*). Vyskytují se zde případy, kdy k porušení došlo při velmi malém počtu cyklů (tzn. $n_{cykl} < 1000$), což je z hlediska materiálu oblast kvazistatického únavového porušení [31]. Také je z grafu jasně patrné, že při tomto způsobu porušení výsledky vykazují mnohem větší rozptyl (oproti oceli).

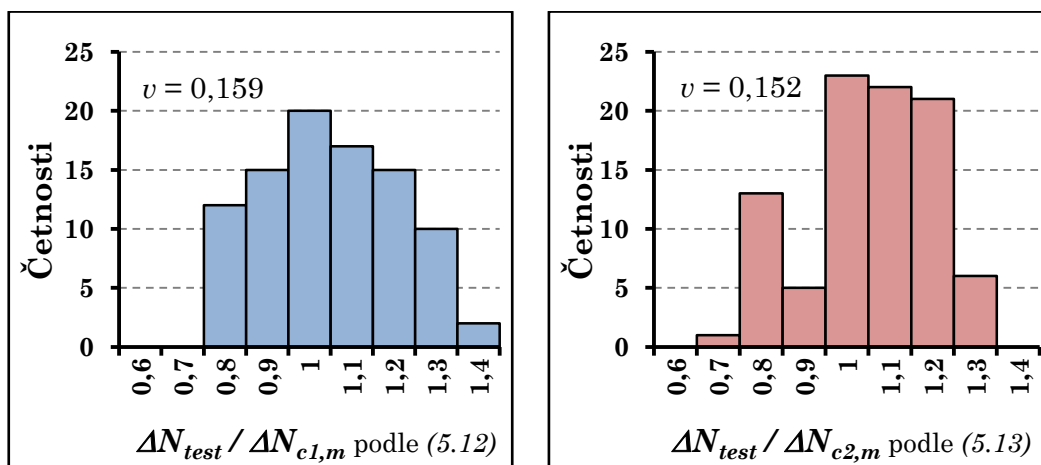
Pro odvození hodnot únosností při opakovaném namáhání je nutné, stejně jako v předešlé kapitole, získané výsledky dát do poměru se statickou hodnotou odolnosti při porušení betonu, což je provedeno na *Obr. 5.05*, kde jsou vyneseny dosažené rozkmity v závislosti na počtu cyklů, a pomocí metody nejmenších čtverců je vypočtena výslednice určující střední hodnotu cyklické únosnosti. Opět jsou zde rozlišeny dva druhy dat dle metody určování únosnosti (viz *kap. 2.4.2*). Výsledné střední hodnoty mají tvar:

$$\Delta N_{c1,m} = (-0,0416 \cdot \log n_{cykl} + 0,8932)N_{c1,m} \quad \text{Cone Method}, \quad (5.12)$$

resp.
$$\Delta N_{c2,m} = (-0,0395 \cdot \log n_{cykl} + 0,9048)N_{c2,m} \quad \text{Capacity Method}. \quad (5.13)$$



Obr. 5.05 Dosažené rozkmity zatížení ΔN_{test} v případě porušení betonu



Obr. 5.06 Histogramy ze získaných dat při vytržení kužele betonu

Návrhové hodnoty únosností při opakovaném tahovém zatěžování pro oba řešené přístupy porušení kužele jsou určeny pomocí metody navrhování na základě zkoušek a zapsány ve vztazích (5.14) a (5.15):

$$\Delta N_{c1,d} = 0,521 \cdot \Delta N_{c1,m} \quad \text{dle Concrete Cone Method} \quad (5.14)$$

a
$$\Delta N_{c2,d} = 0,535 \cdot \Delta N_{c2,m} \quad \text{dle Concrete Capacity Method.} \quad (5.15)$$

Velikost variačních koeficientů je relativně nízká (stejně, jako v případě porušení oceli, viz Obr. 5.03), nicméně zde u porušení betonu pro nižší počet testů (tj. 98) potvrzují větší rozptyl výsledných hodnot.

5.4 DEFINOVÁNÍ HRANICE MEZI ZPŮSOBY PORUŠENÍ

K získání teoretické hranice mezi oběma způsoby porušení materiálů při cyklickém namáhání je nutné sloučení odvozených vztahů pro návrhové únosnosti (5.11) a (5.14), resp. (5.15), tzn.:

$$\Delta N_{s,d} = \Delta N_{c1,d} \Rightarrow 0,530 \cdot \Delta N_{s,m'} = 0,52 \cdot \Delta N_{c1,m} , \quad (5.16)$$

resp.

$$\Delta N_{s,d} = \Delta N_{c2,d} \Rightarrow 0,530 \cdot \Delta N_{s,m'} = 0,535 \cdot \Delta N_{c2,m} . \quad (5.17)$$

Dosazením výše odvozených středních hodnot únosností do (5.16) a (5.17) lze vyjádřit závislost mezi plochou jádra šroubu A_s a účinnou hloubkou kotvení h_{ef} na základě zvoleného počtu zatěžovacích cyklů n_{cykl} pro obě metody výpočtu odolnosti vytržením kužele jako:

$$A_s = \frac{0,521 \cdot (-0,0416 \cdot \log n_{cykl} + 0,8932) \cdot 0,67 \cdot \pi \cdot h_{ef}^2 \cdot f_{cc}^{0,5}}{0,530 \cdot (-0,2655 \cdot \log n_{cykl} + 1,6079) \cdot 1,024 \cdot f_{ub}} \quad \text{dle Cone Method,} \quad (5.18)$$

resp.

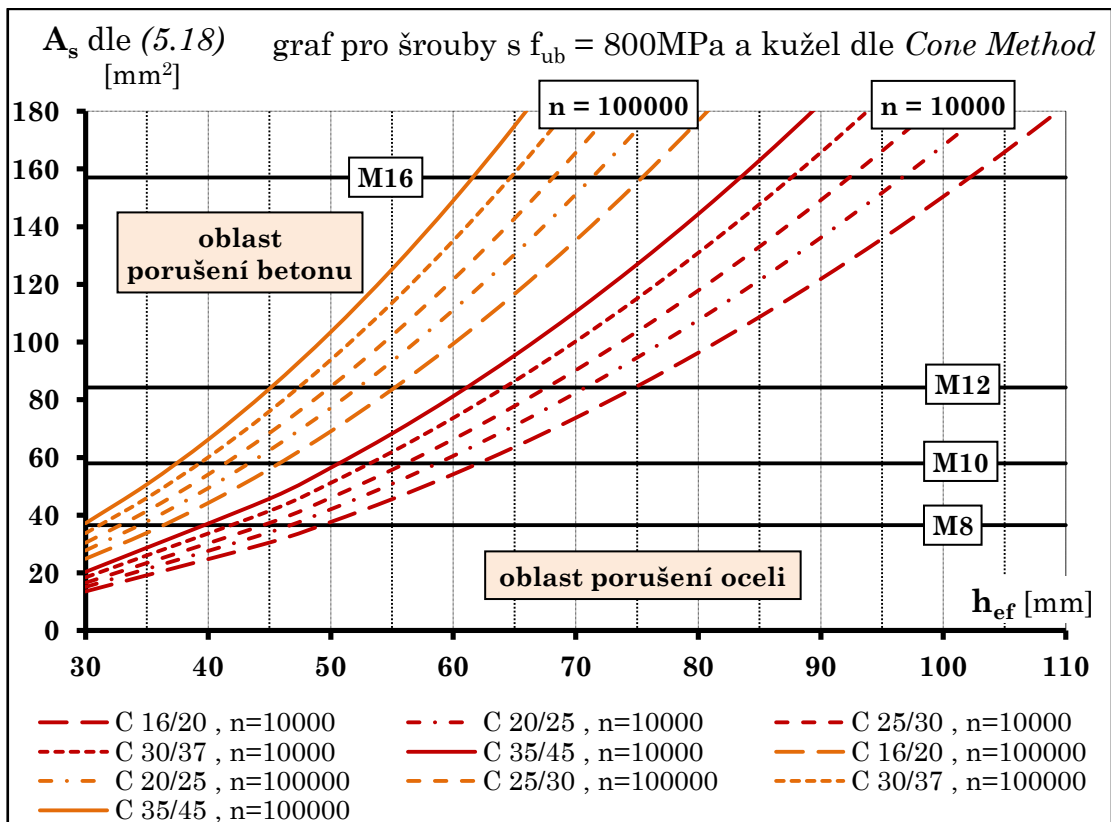
$$A_s = \frac{0,535 \cdot (-0,0395 \cdot \log n_{cykl} + 0,9048) \cdot 15,6 \cdot h_{ef}^{1,5} \cdot f_{cc}^{0,5}}{0,530 \cdot (-0,2655 \cdot \log n_{cykl} + 1,6079) \cdot 1,024 \cdot f_{ub}} \quad \text{dle Capacity Method.} \quad (5.19)$$

Konečné vztahy (5.18) a (5.19) jsou však pouze přibližné, především část, jež je odvozena z výsledků porušeného betonu, ve kterých je znatelný větší rozptyl získaných hodnot.

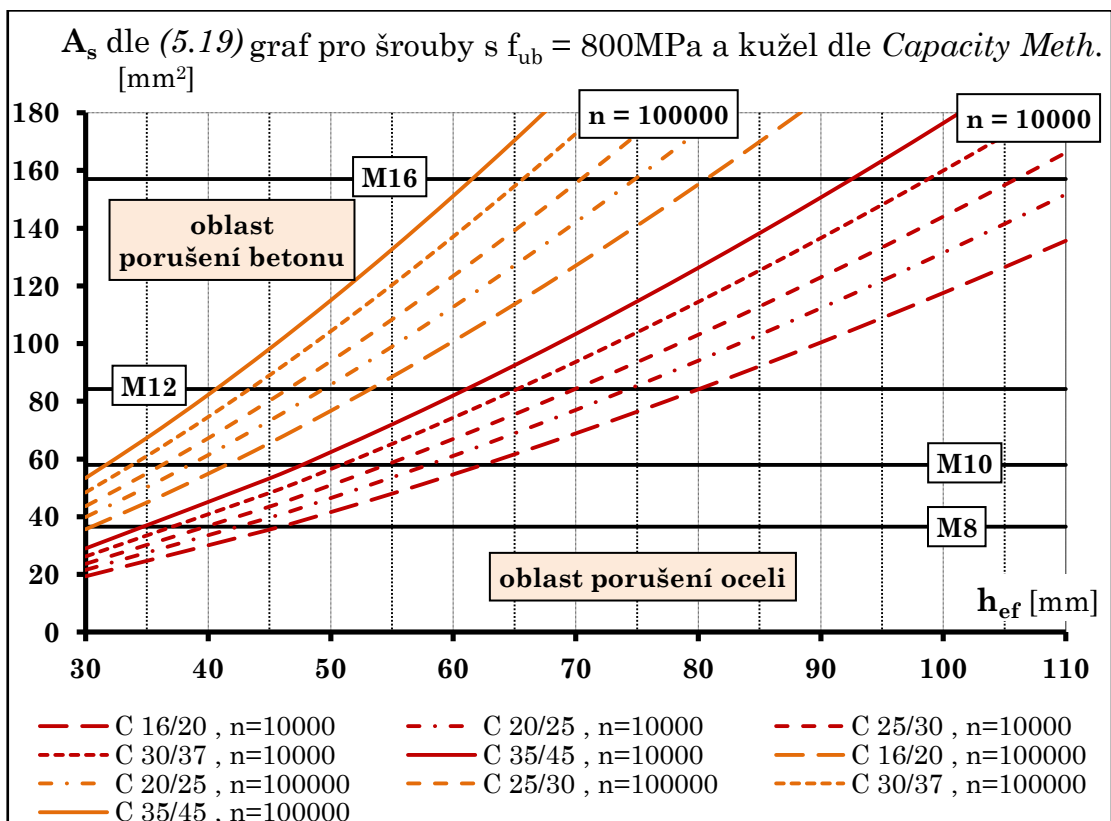
Na dalších grafech (Obr. 5.07 a 5.08) jsou závislosti znázorněny pro použitou pevnostní třídu šroubů 8.8 a běžné třídy betonu, přičemž počty cyklů jsou pro názornost zvoleny 10000 a 100000. Grafy korespondují s rozsahem zkušebních vzorků v rámci experimentů, tj. platí pro rozsah šroubů s průměry M8 – M16. (V legendě je u nich namísto plného označení „ n_{cykl} “ použito pouze zkráceného zápisu „ n “.)

Uvedené grafy lze použít pro konkrétní návrh ocelových rozpěrných kotev za předpokladu obdobných geometrických a pevnostních parametrů obou materiálů, jaké měla testovaná zkušební tělesa.

Pro jiné průměry šroubů, kompletní škálu tříd betonu a zejména pro větší zpřesnění odvozených vztahů by bylo nutné provést mnohem větší počet experimentů pro jednotlivé alternativy vstupních parametrů.



Obr. 5.07 Hranice způsobů porušení při cyklickém namáhání dle (5.18)



Obr. 5.08 Hranice způsobů porušení při cyklickém namáhání dle (5.19)

6 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

Všeobecně se má za to, že expanzní kotvy, na rozdíl od chemických, nejsou příliš vhodné pro jiný charakter tahového namáhání, nežli statický. Cílem předkládané práce tedy bylo ověřit chování těchto prvků při cyklickém tahovém zatížení a nalézt pro tento způsob hranice mezi základními způsoby porušení obou použitých materiálů tak, aby bylo možné navrhnout co nejefektivnější parametry kotvení.

K tomuto účelu byly provedeny testy (celkem 255) vybraného typu pouzdrových kotev s řízeným utahovacím momentem o různých průměrech šroubů a efektivních hloubkách, a to na 6 sériích betonových zkušebních těles s odlišnou krychelnou pevností, zatížených opakovanou silou. Navíc se použily i výsledky pilotních testů, které byly k dispozici z dřívějšího výzkumu v této oblasti.

Na základě výsledků těchto experimentů a jejich porovnání se statickou únosností byly získány odolnosti pro přetržení šroubu kotvy a vytržení kužele betonu při cyklickém namáhání. Z jejich vzájemných relací byly potom odvozeny výsledné vztahy (5.18), resp. (5.19) v kap. 5.4, které umožňují určit vhodný poměr mezi geometrickými a pevnostními charakteristikami kotvení. Příklady grafické podoby těchto závislostí jsou Obr. 5.07 a 5.08, z nichž plyne, jaký průměr šroubu kotvy je nutný pro příslušnou kotevní hloubku při dané konfiguraci materiálových vlastností a počtu cyklů. Dále lze na základě hraničních křivek odhadnout, nebo přímo nastavit parametry kotvení tak, aby došlo ke konkrétnímu způsobu porušení (v grafech jsou vyznačeny oblasti přetrženého šroubu a vytržení kužele betonu), což může být v vhodné zejména pro možnost případné opravy.

Výrobci vždy uvádí únosnosti pro různé alternativy z hlediska charakteru namáhání betonu, do kterého jsou kotvy osazeny (tlačená oblast, tažená, apod.). V rámci této práce lze uvažovat, že beton není namáhaný (je zajištěno vhodnou konfigurací zkušebních těles dle [11]), a tedy v případě tlačeného betonu by byly návrhové únosnosti příznivější a naopak je nelze použít pro tažený beton.

Výsledné vztahy lze považovat pouze za přibližné, neboť výsledky testů vykazují velký rozptyl, což jistě ovlivnilo jejich zpracování i vyhodnocení. Důvodem je nepochybně přítomnost nehomogenního materiálu (betonu) i velikost použitých tahových sil u cyklických zkoušek. Ty byly voleny (tak vysoké) za účelem nalezení hranic způsobů porušení (viz kap. 4) a nikoliv v relaci s provozním zatížením. Dalším důvodem je i relativně nízký počet testů pro jednotlivé konfigurace.

Aby se mohla provést parametrická nebo citlivostní studie a zároveň zobecnit získané vztahy, bylo by nutné odzkoušet vždy několik vzorků se stejnou konfigurací výchozích parametrů a pro shodně nastavené rozkmity cyklického zatěžování. To by ovšem vyžadovalo mnohem více testů i zkušebních vzorků.

LITERATURA

- [01] BARNAT, J., BAJER, M., ŠTRBA, M.: Analýza lepených kotev vystavených působení dynamického rázu, *Zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie 70 rokov SvF STU*, Slovenská technická univerzita, Bratislava, Slovensko, 4. – 5. 12. 2008, ISBN 978-80-227-2979-6.
- [02] BREEN, J. E., EICHINGER, E.-M., FUCHS, W.: Anchoring to concrete: the new ACI approach, In *Proceedings of the conference Connections between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, RILEM, 2001, pp. 31 – 44, ISBN 2-912143-25-X.
- [03] CEB-FIP *Model Code 1990*, Bulletins d'Information, Thomas Telford Services Ltd., for the Comité Euro-International du Béton, EPF Lausanne, Switzerland, 1991, ISBN 0-7277-1696-4.
- [04] ČSN EN 1990 *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*, ČNI Praha, 2004.
- [05] ČSN EN 1992-1-1 *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI Praha, 2006.
- [06] ČSN EN 1993-1-1 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI Praha, 2006.
- [07] ČSN P ENV 1992-1-1 *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1.1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČNI Praha, 1994.
- [08] DALÍK, J.: *Numerické metody*, VUT v Brně, Fakulta stavební, CERM Brno, 1997, ISBN 80-214-0646-1.
- [09] ELIGEHAUSEN, R., MALLÉE, R., SILVA, J. F.: *Anchorage in Concrete Construction*, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2006, ISBN 978-3-433-01143-0.
- [10] ELIGEHAUSEN, R., OŽBOLT, J.: Size effect in Anchorage Behavior, In *Proceedings of the 8th European Conference on Fracture - Fracture Behavior and Design of Materials and Structures*, Torino, 1990, 2671-2677.
- [11] ETAG 001 *Směrnice pro evropské technické schválení kovových kotev pro použití v betonu*, EOTA (European Organisation for Technical Approvals), Brusel, 2006.
- [12] FALTUS, F.: *Ocelové konstrukce pozemního stavitelství*, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1960, DT 624.014.2.
- [13] FRANC, D., KARMAZÍNOVÁ, M., VESELÝ, J.: Experimentální ověření skutečného působení ocelových rozpěrných kotev do betonu při opakovaném zatížení tahovou silou, *Sborník československé konference Experiment 04*, VUT v Brně, Fakulta Stavební, 2004, s. 87 – 92, ISBN 80-7204-354-4.
- [14] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J.: *Zásady navrhování konstrukcí (Příručka k ČSN EN 1990)*, ČKAIT Praha, 2007, ISBN 978-80-87093-27-6.
- [15] HOŘEJŠÍ, J., ŠAFKA, J.: *Statické tabulky*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1987, 04-705-88.
- [16] KALA, Z., PUKLICKÝ, L., OMISHORE, A., KARMAZÍNOVÁ, M., MELCHER, J.: Stability Problems of Steel-Concrete Members Composed of High Strength Materials, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, ISSN 1392-3730.

- [17] KARMAZÍNOVÁ, M.: Resistance of the fastening to concrete under repeated loading, *Proceedings of the 4-th European Conference on Steel and Composite Structures EUROSTEEL 2005*, Maastricht, 2005, Vol. C, pp. 4.10-33-40, ISBN 3-86130-812-6.
- [18] KARMAZÍNOVÁ, M., MELCHER, J.: Navrhování na základě testů: Stanovení návrhových hodnot s využitím výsledků experimentů, *Sborník česko-slovenské konference Experiment 04*, VUT v Brně, Fakulta Stavební, Brno, 2004, s. 171-176, ISBN 80-7204-354-4.
- [19] KARMAZÍNOVÁ, M., MELCHER, J.: Fastening systems load-carrying capacity based on the reliability approach applied for the test results evaluation, In *Proceedings of the International Conference*, VSU Sofia, 2006, Vol. II, pp. 188-193. ISBN 954-331-003-3.
- [20] KARMAZÍNOVÁ, M., MELCHER, J., ŠTRBA, M.: Fastening of steel structural members to concrete using post-installed mechanical fasteners, In *Proceedings of ASCCS 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures*, Leeds, UK, 8-10 July 2009, pp. 549 – 554, ISBN 978-981-08-3068-7.
- [21] Katalog Fischer International s.r.o., *Upevňovací systémy pro těžké zátěže*, Ocelové kotvy, Praha, 2008.
- [22] Katalog HILTI, *Katalog aplikací, produktů a služeb 2007/2008*, Kotevní technika, Marketing Hilti ČR & Slovakia, Praha, 2007.
- [23] Katalog WH-KOTE, *Kotevní technika 2005/2006*, WH-KOTE spol. s.r.o., Praha, 2005.
- [24] MELCHER, J., KARMAZÍNOVÁ, M.: The analysis of fastener strength using the limit state approach, In *Proceedings of the International Symposium "Connections between Steel and Concrete"*, University of Stuttgart, Germany, 2001, pp. 212-219, ISBN 2-912143-25-X.
- [25] PECHAR, J., BUREŠ, J., STUDNIČKA, J., ŠAFKA, J.: *Prvky kovových konstrukcí*, SNTL Praha, 1984, 04-710-84.
- [26] ŘOUTIL, L.; ŠTANCL, P.: Skutečná lomová energie z numerických simulací zkoušek, *příspěvek na konferenci JUNIORSTAV 2006*, 8. oborová konference doktorského studia, VUT v Brně, Brno, 2006, ISBN 80-214-3110-5.
- [27] SHIRVANI, M., KLINGNER, R. E., GRAVES, H. L.: Behaviour of tensile anchors in concrete: Statistical analysis and design recommendation, In *Proceedings of the conference Connections between Steel and Concrete*, University of Stuttgart, RILEM 2001, pp. 261 – 271, ISBN 2-912143-25-X.
- [28] SCHMID, P.: *Základy zkušebnictví*, VUT v Brně, Fakulta stavební, CERM Brno, 2001, ISBN 80-214-1816-8.
- [29] STINSON, C., DODGE, M.: *Microsoft Office Excel 2003 Inside Out*, Microsoft Press, Washington, 2004, ISBN 0-7356-1511-X.
- [30] ŠTRBA, M.: Stanovení únosnosti rozpěrných kotev v betonu na základě výsledků experimentálního ověřování, časopis *Konstrukce*, č. 2/2008, strany přílohy 17 – 20, Ostrava, 2008, ISSN 1213-8762.
- [31] TEBLÝ, B., NOVÁK, D.: *Spolehlivost stavebních konstrukcí*, VUT v Brně, Fakulta stavební, CERM Brno, 1999, ISBN 80-214-1149-X.
- [32] WEBER, M., BREDEN, M.: *Excel VBA – Velká kniha řešení*, Computer Press, a.s., Brno, 2007, ISBN 978-80-251-1453-7.

CURRICULUM VITAE

Ing. Michal Štrba

Osobní informace:

Narozen: 11. září 1978 v Třinci

Adresa: Habrová 399, 739 61 Třinec

Vzdělání:

1993 – 1997 Střední průmyslová škola stavební, Havířov

1997 – 2002 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Studijní program: M3607 – Stavební inženýrství

Zaměření: Konstrukce a dopravní stavby

Pracovní zkušenosti:

2003 – 2003 INTERPALAN – CZ, s.r.o., Brno

projektování, statika staveb

2005 – dosud VUT v Brně, Fakulta stavební,

Ústav kovových a dřevěných konstrukcí

akademický pracovník – asistent

ABSTRACT

This thesis are focused on the experimental research in the field of behaviour and ultimate capacity determination for one of the most used types of anchorage elements, it means steel mechanical expansion anchors to concrete exposed to cyclic tensile loading. These parts of structures are already sufficiently described in the event of their failure modes and also in the event of their bearing capacities for static (monotonic) tensile load. But for the cyclic (repeated) tension force they aren't known any formulas in normative codes or in technical literature. Only some catalogues from anchor producers show some specifications and capacities for this type of loading. But they are usually quite conservative (just like static bearing capacities).

One of the alternatives how to obtain the bearing capacity for the cyclic loading they are the experiments of these anchorage elements with using of repeated tensile force. During them there is a possibility to observe their behaviour and resistances for adequate failure modes and after that to compare them with static carrying-capacity values. On the base of this comparison they can be found their relations and also it can be defined cyclic capacities depending on static values.

The thesis is divided into several parts. Its first part describes the basic information about the anchoring systems and usually used anchorage elements, especially the steel expansion anchors to concrete. It brings also information about the principles of their behaviour during the static tensile loading (modes of failure and bearing capacity of them).

The next part is focused on the experiments with anchors of selected geometrical parameters, which were done on several series of specimens with different strength of concrete. During these experiments the cyclic tensile load with given total amplitude between minimal and maximal force was used and they were modes of failure and counts of cycles recorded.

The last part processes the obtained results of experiments with cyclic forces, evaluates them and produces of their relations between them and derived theoretical static tension load-carrying capacities.

Next it deals with an idea and possibility of useful and economics design of anchorage during cyclic loading on the base of chosen geometrical and strength parameters, which depend on the most effective utilization of quality of used materials, steel and concrete. Both of them have their specific importance for the failure modes and the parameters give the imaginary border between them. Due to these borders it can be the design more effective.