

(34) 縁端距離の小さい場合の付着型アンカーボルトの引き抜き耐力

Pull out strength of bond type anchor bolt near a free edge

小畑 誠* 井上 道雄** 柳原 伸裕*** 後藤 芳顕****

by Makoto OBATA, Michio INOUE, Nobuhiro YANAGIHARA and Yoshiaki GOTO

A bond type anchor bolt has been used as a post-installed type anchors. Recent development of construction technology has led to the wide use of this type of anchors and even in a new construction. Since this type of anchor exhibits a complex failure mode involving cone and bone failure, its design method is still to be investigated in depth. Among the various conditions to be considered, we experimentally study the effect of a free edge on the pull-out strength. The results show that the existence of a free edge not only reduced the pull-out strength but affects the location of cone failure. The reduction of the strength is much larger than expected by the analysis previously proposed by the authors.

1. はじめに

付着型アンカーボルトは棒鋼表面の付着力により定着するタイプのアンカーである。このタイプのものは従来は主として補修等のいわゆる post installed 形式のものに用いられてきたが、最近では最初から施工される例もでてきており今後は積極的な利用が見込まれている。また定着板などの大きな定着構造を必要としないことから鋼製橋脚の定着部に適用する試みもなされている¹⁾。この付着型アンカーボルトは底部に定着板等を持つ物とは異なり引き抜き力に対して棒鋼表面での付着力で抵抗することから、付着破壊と引張り破壊であるコーン破壊とが混在する複雑な破壊形式を示す。(図1)このような場合の引き抜き耐力について著者らはこれまでに簡単な解析法を提案し比較的単純な場合にはその妥当性を実証してきた¹⁾。実構造への積極的な適用を考える場合には様々な厳しい使用条件を想定する必要があるが、中でもボルトの配置の制限からくる自由表面への縁端距離は重要なもののひとつである。縁端距離が小さい場合の影響については主としてかぶりのコンクリートが小さいことからくる拘束圧の減少によるものと、コーン破壊面の欠落、つまりせん断抵抗面の減少によるものとが考えられる。これらうち既に示した解析法でもアンカーボルトに加わる拘束圧の影響を考慮することはでき、その意味で縁端の影響を含めることが可能であるが、この場合の解析法の精度についてはまだ十分には確認されていない。一方、コーン破壊に対して縁端距離の影響をどのように考慮するかについても、簡単なせん断抵抗面の計算で強度を評価する考え方も含めてまだ十分に検証されているとはいいがたい。実際、定着板付きアンカーに対するものではあるが例えば文献2,3)ではコーン破壊面でのつりあい考えた破壊という考え方自体を退けているために実験式を与えているにすぎない。力学モデルとして簡単なコーン破壊面での力のつりあい考え方をを用いているACIのコード⁴⁾も付着破壊とコーン破

*Ph.D. 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科、 **名古屋工業大学大学院生 同、 ***東急建設、 ****
工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科

壊が混在する場合における精度のみならず、その考えが適用可能かどうかについては自明ではない。そこで本研究では基本となる単一のアンカーボルトの引き抜き耐力に及ぼす縁端距離の影響について実験的に考察することを目的とする。

2. 縁端距離が小さい場合の引き抜き耐力の推定

まずここでは、図2のように縁端距離 c の位置にある付着型アンカーボルトに対し力のつりあいにもとづいた考え方をを用い次の仮定のもとに引き抜き耐力を推定する。1) コーン破壊による耐力の算定には有効コーン投影面積の考え方をを用いる。2) 縁端距離による拘束圧の減少の影響は無視し付着応力分布は一樣である。これらの仮定で 1) は現在設計指針等^{4,5,6)}に示されている簡単な力学モデルにもとづいており、また 2) の仮定のうち一樣付着応力分布のものはボルト表面と周囲のコンクリートとの付着が線形弾性で表される場合にはそれほど悪くなく合理的な近似である。⁷⁾

破壊コーンの頂角は $\phi = 45^\circ$ 、深さ x_c でコーン破壊が生じるとすると深さ x_c より上の部分でコーン破壊強度と付着強度のつりあいを考えることにより次式が成立する。

$$P_c(x_c) = P_b(x_c) ; \quad \left. \frac{dP_c}{dx} \right|_{x=x_c} = \left. \frac{dP_b}{dx} \right|_{x=x_c} \quad (1a-b)$$

ただし $P_c(x)$ と $P_b(x)$ はそれぞれ x の深さまでのコーン破壊強度と付着力である。縁端距離の少ない場合を考えると $P_c(x)$ は図2にあるように

$$P_c(x) = \begin{cases} \sigma_{cone} \pi \left\{ \left(x + \frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right\} & u \leq x \leq c - \frac{D}{2} \\ \sigma_{cone} \left\{ \left(x + \frac{D}{2} \right)^2 (\pi - \theta) + c \left(x + \frac{D}{2} \right) \sin \theta - \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right\} & c - \frac{D}{2} \leq x \leq \ell + u \end{cases}$$

$$\cos \theta = \frac{c}{x + D/2} \quad c - \frac{D}{2} \leq x \leq \ell + u \quad (2a-c)$$

で与えられることになる。また $P_b(x)$ は付着応力が一定であるから

$$P_b(x) = P \frac{x-u}{\ell} \quad u \leq x \leq \ell + u \quad (3)$$

となる。ここに P は引き抜き力、 σ_{cone} はコンクリートのコーン破壊強度である。縁端距離 c が定着長 ℓ に対して十分に大きいとすると式(1a-b),(2a),(3)から

$$x_c = u + \sqrt{u^2 + Du} \quad (4)$$

となり、この深さで最初のコーン破壊をおこすことになる。そしてそのときの荷重は

$$P = 2\sigma_{cone} \ell \pi \left(x_c + \frac{D}{2} \right) \quad (5)$$

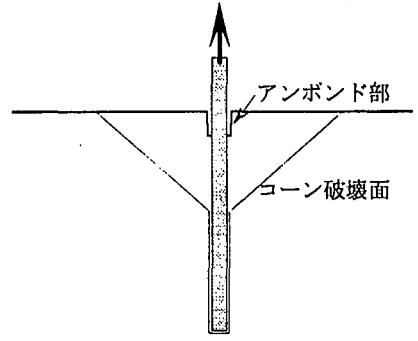


図1 コーン破壊と付着破壊の連成破壊

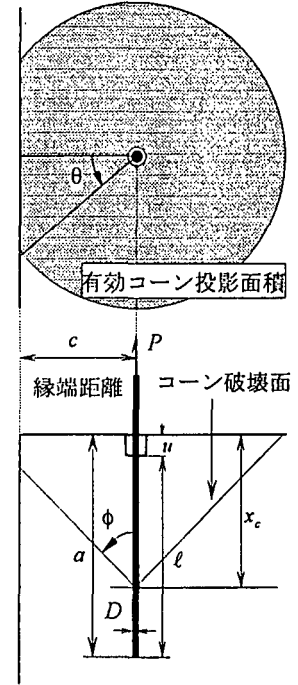


図2 縁端の影響を受けるアンカーボルト

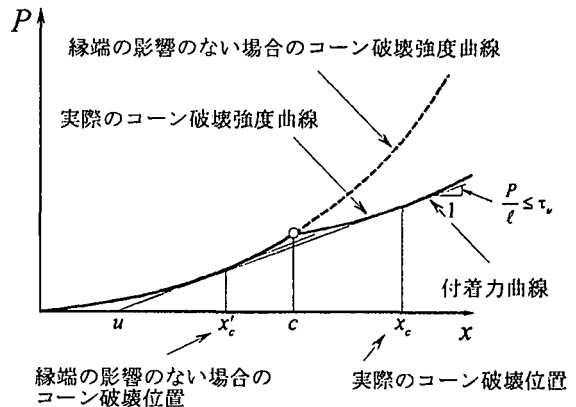


図3 縁端距離の影響

で与えられる。式(4)からわかるように最初にコーン破壊を起こす深さはアンボンド長 u と棒鋼径 D だけで決定される。ただしこのときの平均付着応力がアンカーボルトの最大付着強度を上回るときには、言い換えれば

$$P > P_{bu} = \pi D \ell \tau_{\max} \quad (6)$$

のときにはより低い引き抜き力 P_{bu} で付着破壊が生じることになる。以上から定着板付きアンカーの場合と同様に考えれば式(2b)から縁端距離 c が $x_c + D/2$ より小さいときにはその影響がでることが予想される。しかしながらコーン破壊と付着破壊が混在する付着型アンカーボルトにおいては図3に示すように最大付着強度にも依存するが縁端距離の影響は実際には $c > x_c + D/2$ のときにも現れるうる。しかもコーン破壊を起こす深さ x_c は縁端距離の変化に対して不連続に変化しうることになる。そしてこれらの定量的な評価は、用いる力学モデルに敏感に依存する点が通常の定着板付きアンカーの引き抜き耐力評価とは異なる。例えば、コーン破壊の強度曲線の形状により縁端距離の影響も大きく変化することは図3から容易に理解できる。このために付着型アンカーの引き抜き耐力の評価にはコーン破壊と付着破壊の両方の的確な力学モデルの設定が重要である。

具体的な例として今回の実験に即して $a/D = 5.57$, $u/D = 1.00$, $\tau_{\max}/\sigma_{\text{cone}} = 6.92$ の場合について解析を行

引き抜き耐力: $P/\sigma_{\text{cone}}\pi D^2$

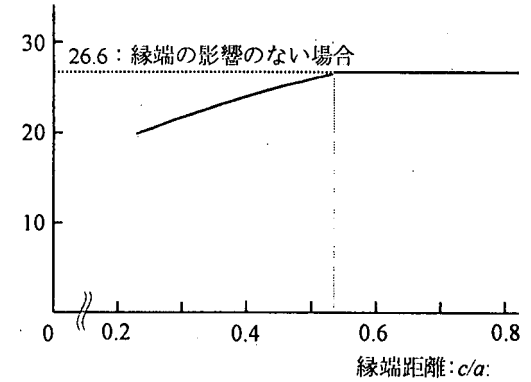


図4 縁端距離と引き抜き耐力

コーン破壊発生深さ: x/D

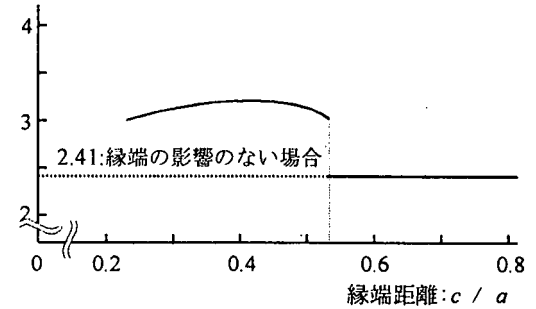


図5 縁端距離とコーン破壊発生深さ

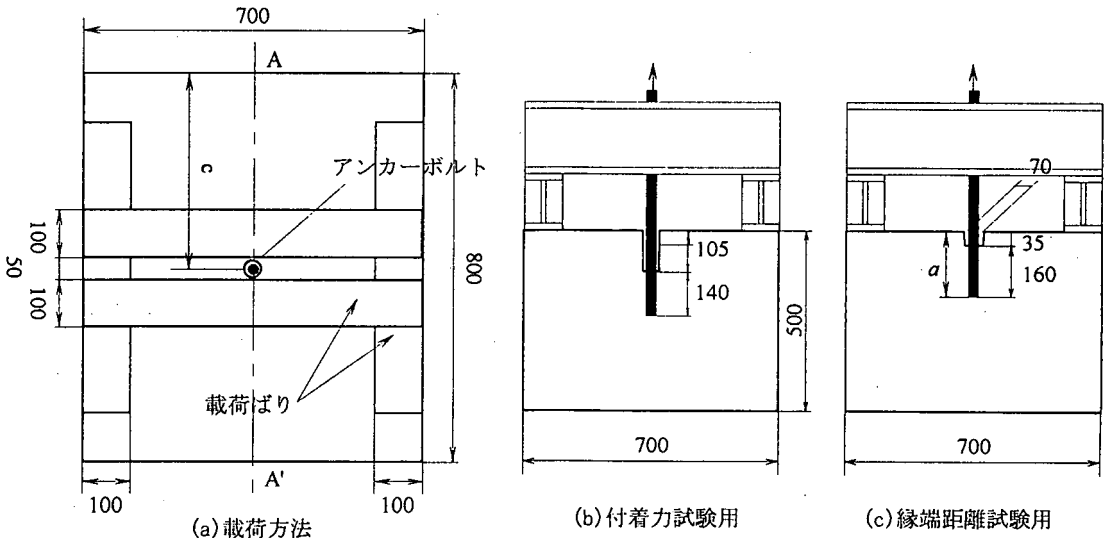


図6 供試体と載荷方法

い引き抜き耐力の推定を行った。結果は図 4,5 にまとめて示す。ここに示すように、縁端距離の影響のない場合には引き抜き力 P が 0 から増加していくとき $P/\sigma_{\text{con}}\pi D^2=26.6$ 、 $x_c/D=2.41$ で最初のコーン破壊が生じそのときの引き抜き力が最大となる。そして縁端の影響は $c/a<0.54$ のときに現れ、縁端距離 c とともに引き抜き耐力 P_u は連続的に減少していく。図 5 には縁端距離 c とコーン破壊の発生深さ x_c の関係を示したが、図 3 から予想されるように縁端距離の影響は $c/a=0.54$ において x_c が不連続的に変化していることがわかる。

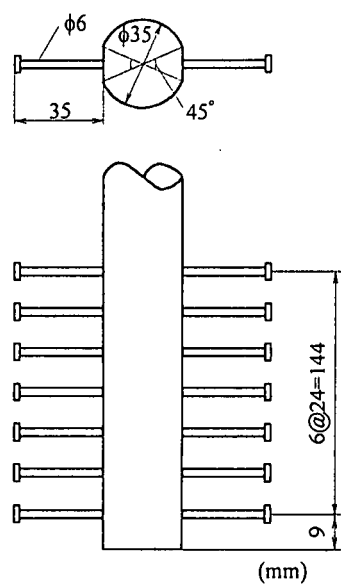


図 7 アンカーボルトの詳細

3. 付着型アンカーボルトの引き抜き試験

前節の考察の結果を考慮して縁端距離の引き抜き耐力と破壊性状への影響を検証するための実験を行う。供試体には著者らがこれまでにやってきた一連の実験¹⁾を参考に図 6,7 に示すものを用いた。引き抜き耐力と破壊性状への影響をさけるためにコンクリートは無筋とし、載荷ばりの配置はアンカーボルト下端から $\phi=45^\circ$ の角度でコーン破壊が生じてても影響の無いように配置した。アンカーボルトは異形棒鋼 D35 (SD295)

に付着力を増加させる目的で図 7 のように 24m m 間隔で長さ 35mm の頭付きスタッドを溶接したものを使用した。なおスタッドの向きは図 5 (a) の AA' 方向に直角になるように配置した。これらの材料特性は表 1 にまとめて示す。

表 1 材料表

材料	特性
コンクリート	$\sigma_c = 24.6\text{MPa}$ (28 日) $\sigma_c = 28.9\text{MPa}$ (28 日)
アンカーボルト D35	SD295, $\sigma_f = 368\text{MPa}$
スタッド $\phi 6 \cdot 35$	SS400

引き抜き試験はアンカーボルトの付着強度を求めるために図 5(b) の供試体を使うもの(①)と、図 5(c) の供試体を用いて縁端距離 c (図 5(a)) の影響を見るもの(②)の 2 種類について行った。②については表 2 にまとめるように埋め込み長を a (図 2) として $c/a=0.5\sim 2.0$ の 5 種類の縁端距離を考えた。このうち $c/a=2.0$ は供試体の中央部に位置するものであり、縁端距離の影響の無い場合を想定したものである。

表 2 縁短距離測定用供試体

供試体名	埋め込み長(a) (mm)	縁短距離(c) (mm)	c/a
FC	195	400	2.0
F1.2	195	234	1.2
F1.0	195	195	1.0
F0.7	195	137	0.7
F0.5	195	98	0.5

定着板付きアンカーボルトのように下端部からコーン破壊が発生すると仮定すると、縁端距離の影響が出るのは ACI のコードによれば $c/a<1$ である。2 節での解析の結果、第 1 回目のコーン破壊の発生深さは 8.54cm ($x_c/D=2.41$) であるが図 5 に示されているように縁端距離の減少によりコーン破壊発生位置が深くなると考えられるので縁端距離は ACI で予想されるより大きくとり今回の実験では表 2 のような選択にした。

引張り試験は①、②ともにセンターホールジャッキでアンカーボルトに静的な荷重を加えることによって行い、引き抜き荷重およびアンカーボルト引き抜き端供試体表面付近での変位を測定した。載荷時のひびわれの発生については目視で観察した。また一部の供試体については実験終了後ひび割れにインクを注入し内部ひびわれも観察した。

4. 実験結果と考察

供試体のコンクリート圧縮強度は表 1 のよう 24.6MPa(F0.5,F0.7, F1.0,F2.0), 28.9MPa(F1.2,付着強度用)になっているので以下の結果は $\sigma_{cone}, \tau_{max} \propto \sqrt{\sigma'_c}$ をもとに圧縮強度を 24.6MPa に換算して表して議論する。引き抜き試験①において得られた最大付着強度は 12.8MPa であった。表 3 に引き抜き試験②の耐力と図 7 にひび割れ状況を示す。ここで F1.2 の供試体のみはコンクリートの強度が他とは異なり $\sigma'_c = 28.9\text{MPa}$ であったので $\sigma_{cone} \propto \sqrt{\sigma'_c}$ をもとに補正した結果を示している。式(6)より $P_{bu} = 230\text{kN}$ であるから試験②ではいずれも付着破壊は支配的ではなかったことがわかる。実際にいずれの縁端距離でもすべてコーン状ひびわれを含む破壊形式を示し、図 7 に示すコーン状ひび割れが発生した時点で最大引き抜き力が得られた。F1.2 の供試体に対し引き抜き試験後にひびわれにそってインクを注入し内部のひび割れを観察したところ、ひび割れはボルト下端部から発生しており発生角度は縁端面に向かってはほぼ水平を向いていることあきらかになった。また図 7(b)を見てわかるように縁端距離の小さい方向に対してはひび割れはほぼ水平に発生していることが観察されるのに対しその反対の方向にはほぼコーン状にひび割れが上方に向かって発生している。一方、アンカーボルトを中央に配置した FC では両方ともに浅い角度でひび割れが伸展している。全体に観察されたひび割れの様子は 2 節で仮定している 45° のコーンよりも大きい角度で発生していると考えられる。これは定着板付きアンカーボルトの定着板から発生するひび割れにも同様のことが観察されている²⁾。

図 8 に 2 節で示した解析法により推定された引き抜き耐力との比較を示す。ここで解析に用いた値は

$$\sigma_{cone} = \sqrt{\sigma'_c} = 15.8\text{kgf/cm}^2 (1.56\text{MPa}), \tau_{max} = 12.8\text{MPa}$$

である。コーン破壊強度の推定式には文献 1) のものを用いた。縁端距離の影響が最も少ない場合の FC については予想耐力とほぼ一致した値が得られている。しかし他の供試体についてはいずれも予想耐力を大きく下回っている。またそれと同時に縁端距離の影響は 2 節の解析により予想される距離($c/a < 0.54$)よりもはるかに大きな所で現れていることが分かる。少なくともこの実験結果から判断するかぎり 2 節の解析における仮定に何らかの問題があると考えられる。縁端距離が大きくその影響が小さいと思われる場合には解析値とほぼ一致していることから、この主たる理由としては縁端距離の影響の考慮の方法にあると考えることが妥当であろう。ひとつはひびわれの観察からあきらかになったように、図 2 に示すコーン破壊の発生角度 ϕ は 45° よりもかなり大きいことが挙げられる。コーン破壊の発生角度が大きければそれにしたがって図 2 に示す自由縁端による有効コーン破壊面の欠落が起きやすい。ただし同じコーン破壊発生深さに対し有効コーン破壊面積は半径の 2 乗に比例して大きくなるので、場合によっては極端に低減したコーン破壊強度 σ_{cone} を用いないと実験結果との整合性がとれなくなる。つまり、せん断破壊面を仮定して一様の引張り応力

表 3 引き抜き耐力

供試体	c/a	引き抜き耐力(kN)
FC	2.0	172
F1.2	1.2	136
F1.0	1.0	136
F0.7	0.7	115
F0.5	0.5	102

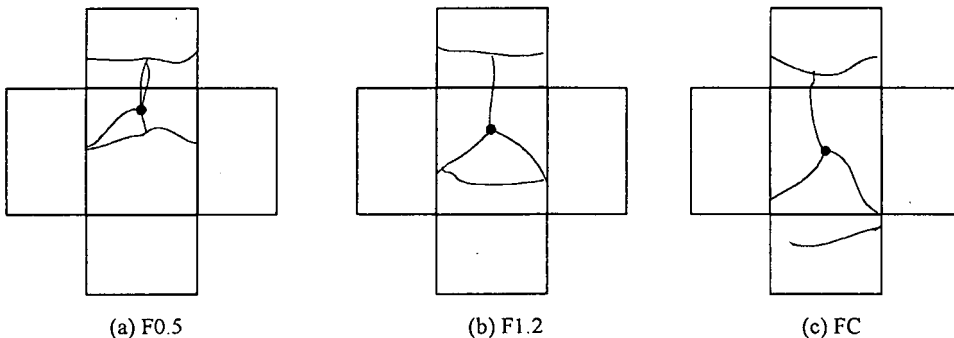


図 7 破壊時のひびわれ

で破壊を生じると考える定着板付きアンカーボルト設計式を用いる限り今回の縁端距離の実験結果を合理的に説明することは難しいことになる。有効コーン破壊面積の考え方ではコーン破壊強度はコーン破壊発生深さ x_c の2乗に比例して増加することになるが、これは x_c が大きいときには実験事実に反することが示されている^{2,3)}。定着板付きアンカーで観察されているように引き抜き力がコンクリートの圧縮強度だけでなく、配合でも10~20%程度変動すること⁸⁾、またコーン破壊がき裂の発生と伸展を含む破壊であることから、自由表面まで達する破壊面で力の

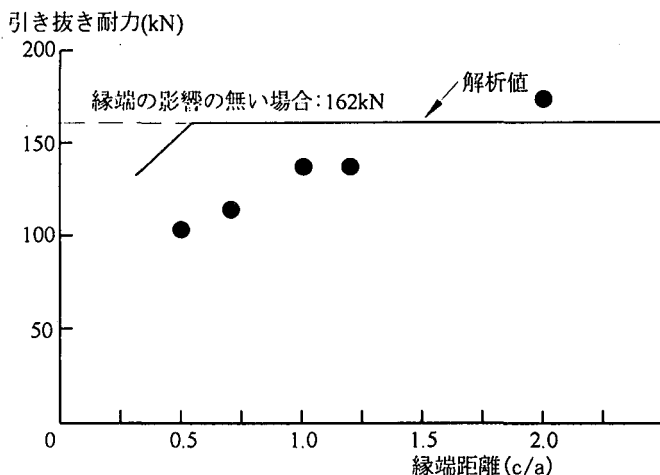


図8 縁端距離と引き抜き耐力

つりあいを考え耐力の算定をすることにはやや無理があることは予想される。2の解析に示したとおり付着型アンカーボルトの引き抜き耐力を考える上では、これらの事実は定着板付きアンカーよりも厳密に考察する必要がある、この点については今後検討していく予定である。

4.まとめ

自由縁端への距離が付着型アンカーボルトの引き抜き耐力に及ぼす影響を見るために簡単な実験をおこなった。有効コーン破壊面積とそれに対する一様応力分布を仮定する解析により縁端距離の影響は引き抜き耐力に対し連続的に減少させるようにはたらし、コーン破壊発生位置に関しては不連続的に変化することが示された。また、自由縁端の影響がでる距離は第1回目のコーン破壊発生深さから単純に45°の破壊面を仮定して推定されるものよりも大きくなりうることが理論的に示された。しかしながら実験においては引き抜き耐力は、解析による予想よりもはるかに大きな縁短距離においても影響を受け、引き抜き耐力の低下が生じることがあきらかになった。またこのときのコーン破壊発生位置も予想とは大きく異なるものであった。これらのことは従来の付着破壊とコーン破壊が連成する付着型アンカーボルトの解析法で評価することは困難であることを示している。これらの事実を説明するにはコーン破壊発生がき裂の発生と伸展を含む破壊であることを考慮する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 前野裕文、後藤芳顯、小畑誠、松浦聖、土木学会論文報告集、No.441/I-18,(1992)
- 2) Eligehausen, R., Fuchs, W., Mayer, B., Bearing behavior of anchor fastenings under tension, Betonwerk + Fertigteil-Technik. pp.826-832(1987), pp.29-35(1988)
- 3) Rehm, G., Eligehausen, R. Mallee, R., Befestigungstechnik. in Betonkalender, Vol. 2, pp.564-663, Berlin, 1988
- 4) ACI, Code requirements for nuclear safety related structures(1985)
- 5) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、pp191-217,(1985)
- 6) (社)日本電気協会 電気技術基準調査委員会；電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版) ,pp.185-186 (1991)
- 7) Cook, R.A., Behavior of chemically bonded anchors, J. Struct.Engineering, Vol. 119, pp.2744-2762
- 8) CEB, Fastenings to reinforced concrete and masonry structures, Part I,II, (1991)