

# 孔あき鋼板ジベルの引抜き耐力に関する実験的研究

## An Experimental Study on the Ultimate Capacity of Perfobond Strips under Pull-out State

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI  
 三上 浩 HIROSHII MIKAMI  
 中島 規道 NORIMICHI NAKAJIMA  
 川上 健太郎 KENTAROU KAWAKAMI

孔あき鋼板に鉄筋を貫通させるだけの簡易な構造で比較的大きなせん断抵抗を得られる孔あき鋼板ジベルを、合成・混合構造接合部などで引張力が作用する部位に適用することを目的に、基礎的な引抜き実験を行った。その結果、孔あき鋼板ジベルの埋込み深さによって破壊挙動と引抜き耐力が大きく変化すること、また、近接して複数配置した場合、引抜き耐力は配置列数に比例しなくなること、などを明らかにした。

キーワード：孔あき鋼板ジベル、引抜き耐力

Perfobond strip is a simple shear connector between concrete and steel plate having drilled holes penetrated with re-bars. In order to apply the perfobond strip to joint of mixed structure, a number of pull-out tests were conducted to clarify the ultimate capacity of perfobond strips. The results showed that the loading behavior and ultimate strength are extremely influenced by the depth of holes. And the ultimate strength was not in proportion to the number of holes in case that strips are placed closely.

**Key Words:** Perfobond Strip, Pull-out State Capacity

### 1. はじめに

孔あき鋼板ジベル（以下、ジベルと呼ぶ）は、鋼板に孔をあけ、鉄筋を貫通させるだけで比較的大きなせん断抵抗が得られるため、波形鋼板ウエブ橋や合成桁橋などのずれ止めとして、近年多く用いられるようになっていいる。著者らは、合成・混合構造接合部などで引抜き力が作用する部位にジベルを適用することを目的として、基礎的な検討を行っている。合成・混合構造の接合部としては、例えば、合成構造橋脚基部における鋼材のフーチングへの定着や、橋梁上部工における鋼主桁と RC や PC 部材との接合部などが想定される。

ジベルをずれ止めとして用いる場合の耐力評価については、主に図-1 に示すような押抜き試験を用いた保坂等の研究<sup>1), 2)</sup>が良く知られている。押抜き試験は荷重方向に複数個のジベルがある場合、各ジベルに均等にせん断力が作用するため、ジベル 1 個当たりの耐力は、荷重荷重をジベルの個数で除して求めることができる。また、終局時には孔中のコンクリートがせん断破壊しており、保坂らは耐力に影響する要因として、孔径とコンクリートおよび貫通鉄筋の径と強度を考慮している。

複合構造物の性能照査指針（案）<sup>3)</sup>は、保坂らの研究を基に設計せん断耐力および構造細目を定めており、設計せん断耐力を式(1)で評価している。構造細目については、孔の中心間隔を孔直径の 2.25 倍以上、ジベルの並列配置間隔をジベル鋼板の高さの 3 倍程度以上としている。

引抜き力が作用する接合部にジベルを用いる場合、力の作用方向に複数個のジベルを配置すると、各ジベルのせん断負担が不均等になり、それとともに破壊形態が変化することが予想される。また、力の作用方向と直交

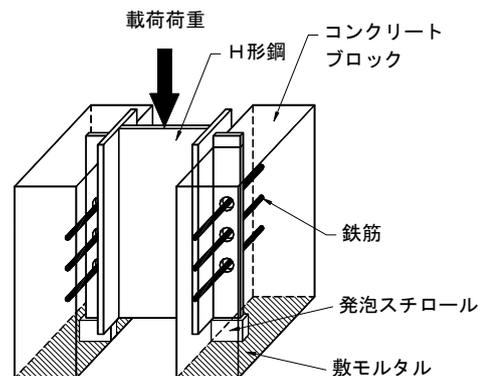


図-1 押抜き試験概念図

する方向にジベルを複数配置した場合には、その配置間隔によっては列数分の耐力が確保できないことも考えられる。本研究では、ジベルの深さ、個数、配置列数を変えた引抜き試験を実施し、その破壊性状および耐力について考察を行った。

## 2. 実験の概要

引抜き試験の模式図を図-2 に示す。1,000×1,000×400mm の大きさのコンクリートブロックにジベル鋼板を埋め込み、2箇所配置した油圧ジャッキにより引抜き力を与える。2つのジャッキは1つの油圧ポンプに並列に接続し、2箇所で同じ荷重が作用するようにした。

ジベル鋼板からジャッキまでの距離  $L$  は、想定した引抜き破壊（最も深いジベル位置からのコーン状の破壊）面の形成が阻害されないよう十分離れた。

ジベルの形状寸法および試験ケースを図-3 に示す。ジベルの孔径は、比較が容易になるよう文献<sup>1)</sup>で用いているジベルと同じ 35mm とした。貫通鉄筋は D10 とした。貫通鉄筋は、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の引張鉄筋の基本定着長を求める式で計算される値  $20\phi$  ( $\phi$  は鉄筋の直径) に  $10\phi$  の余裕を見て  $30\phi$  を片側の長さとした。全長は  $60\phi$  である。鋼板の厚さは、式(1)の1個当たりのジベルのせん断耐力から想定される引抜き力に対して、ジベル数の最も多い C3-2 試験体において鋼板が降伏することのないよう 12mm とし、すべての試験体で同じ厚さとした。

試験は、孔の位置および数を変えた4ケースであり、ジベルが複数個配置されている場合の孔の中心間隔は縦・横とも 70mm (孔直径の2倍) とした。

載荷方法は、コンクリート面からの鋼板の抜出し変位が 0.1mm に達するまで荷重制御による単調載荷を、その後は変位制御により、0.1mm ずつ変位を増加させるごとに荷重をゼロに戻す漸増繰返し載荷を行った。繰返し回数は 1 回である。抜出し変位は、図-2 の鋼材抜出し変位計測点 A の値からジャッキ位置における鉛直変位 (B1,B2) の平均値を差し引いて求めた。これらの変位は、コンクリートブロックの外側に別途設置した不動点から計測した。また、ばらつきを考慮して、鋼材の表側と裏側でそれぞれ計測した値の平均値を抜出し量として採用した。

試験時のコンクリートと鋼材の材料特性値を表-1 および表-2 に示す。

載荷試験時は、引抜き荷重（両側ジャッキの荷重の合計）と鋼板の引抜き方向のひずみ（図-3）および貫通鉄筋のひずみ（図-4）を計測した。なお、コンクリ

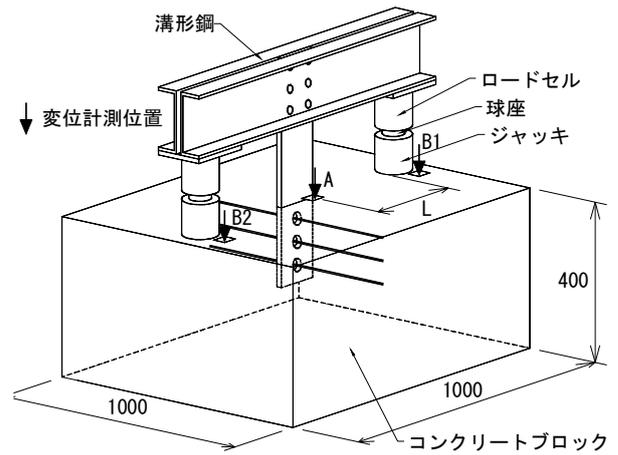


図-2 引抜き試験の模式図

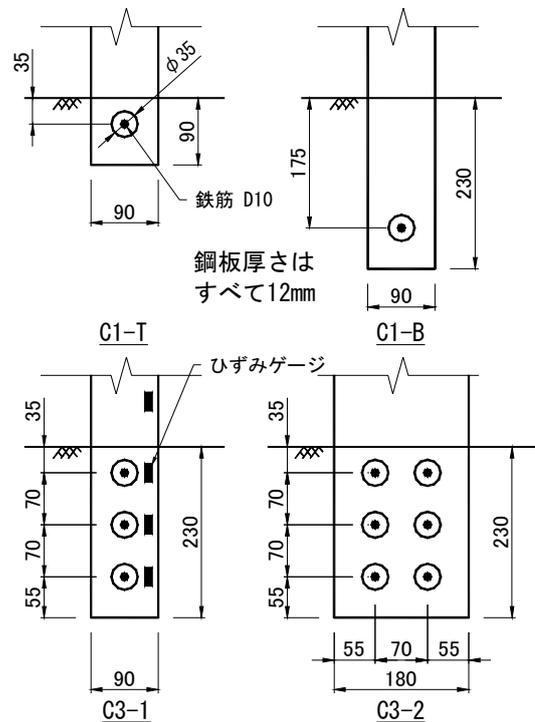


図-3 試験ケース

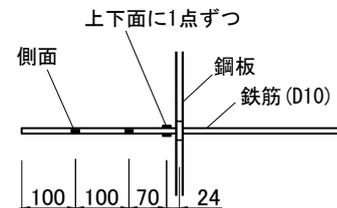


図-4 貫通鉄筋のひずみ計測位置

表-1 コンクリートの材料特性値

試験体	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
C1-B C1-B	41.4	3.15	30,800
C1-T C3-2	41.4	3.10	31,600

ートブロックには、鉄筋 (D13) を約 120mm ピッチで格子状に配置し、引抜き力によりブロックが破壊しないようにした。コンクリート表面に最も近いジベルの貫通鉄筋は、補強鉄筋を流用することを考慮して、その被り (35mm) を補強鉄筋と同じとし、また、平行する補強鉄筋との距離を 120mm とした。

### 3. 実験結果

#### (1) ジベル深さの影響

図-5 に C1-T および C1-B 試験体の引抜き荷重と拔出量の関係を示す。

C1-T 試験体は、拔出量 0.4mm, 最大荷重 44kN に達したあと、荷重は徐々に低下した。拔出量が 1.7mm に達したところでジベル付近のコンクリートが広い範囲で浮き上がり、拔出量の増加とともに荷重が低下し破壊した。写真-1 に示すとおり C1-T 試験体の破壊形態はコンクリートのコーン破壊であった。一方、ジベルの位置が深い C1-B 試験体は、拔出量 0.7mm, 荷重 104kN まで増加したあと、拔出量の増加が著しくなるものの荷重が徐々に増加し、拔出量 16mm, 荷重 141kN で貫通鉄筋が破断して破壊した。コンクリート表面の浮き上がりはなく、目立ったひび割れも発生しなかった。

図-5 中の計算値①, ②は保坂らが提案している以下の式(1)で計算したジベルのせん断耐力である。

$$Q_u = 1.45 \left[ (d^2 - \phi^2) \cdot f_{cu} + \phi^2 \cdot f_{st} \right] - 26100 \quad (1)$$

ここに、 $Q_u$  : ジベルのせん断耐力、 $d$  : ジベルの孔径、 $\phi$  : 貫通鉄筋の径、 $f_{cu}$  : コンクリートの圧縮強度、 $f_{st}$  : 貫通鉄筋の引張強度

計算値①は、提案式のとおりに貫通鉄筋の引張強度を用いて計算した値、計算値②は降伏強度を用いて計算した値である。また、計算値③はコンクリートのコーン破壊を想定した Werner 等<sup>5)</sup>によるアンカーボルトの引抜き耐力で、式(2)により計算した。

$$N_{n0} = 17.5 \times \sqrt{f_{cu}} \times h_{ef}^{1.5} \quad (2)$$

ここに、 $N_{n0}$  : アンカーボルトのコーン破壊耐力、 $h_{ef}$  : アンカーボルト埋込み深さ、であり、C1-T 試験体の場合の埋込み深さとして、ジベル中心位置のコンクリート表面からの深さとした。

表-2 鋼材の材料特性値

試験体	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
鋼板 (SM490Y)	512	640	207,100
鉄筋 (SD345)	386	546	195,500

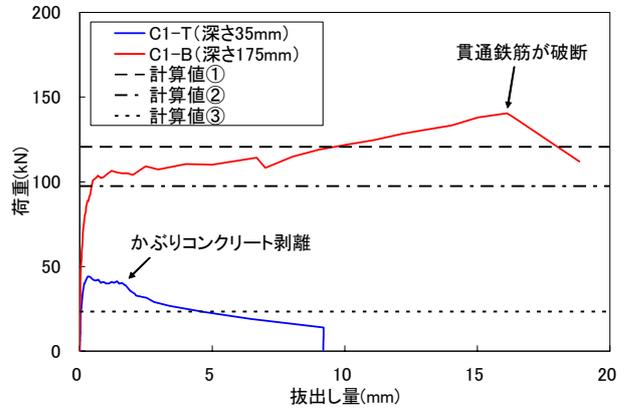


図-5 ジベル深さの影響



写真-1 破壊状況 (C1-T)

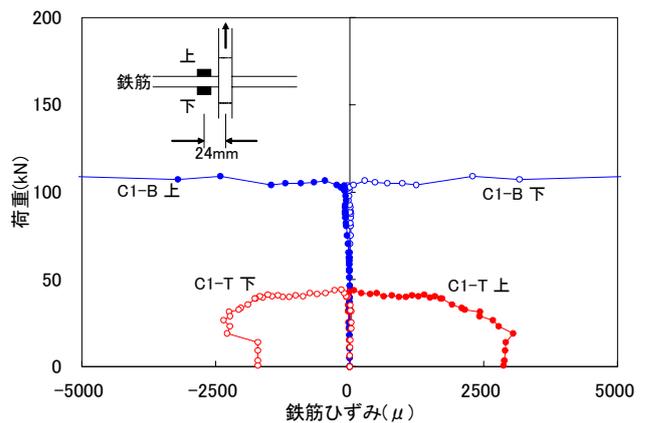


図-6 貫通鉄筋のひずみ

図-5 から、計算値②は C1-B 試験体で拔出量の増加が著しくなる荷重とほぼ一致している。また、C1-B 試験体の最大荷重は、計算値①に近い値となっており、ジベルの埋込み深さが大きくコンクリートがコーン破壊しない場合は、式(1)で引抜き耐力の評価が可能であるこ

とが分かった。一方、コーン破壊した C1-T 試験体では、最大荷重 44kN に対して計算値③は 23kN であり、耐力を過小に評価する傾向が見られた。C1-T 試験体は極端に埋込み深さが小さく、貫通鉄筋の影響によりコーン破壊面の角度が式(2)で想定している 45° よりもかなり大きい(写真-1)ことが過小評価の要因と思われる。

ジベルの耐荷挙動を考察するため、貫通鉄筋のジベル近傍におけるひずみ値を調べた。図-6 にジベルから 24mm 離れた位置の鉄筋のひずみと荷重の関係を示した。いずれの試験体も、図-5 でグラフの勾配が大きく変化する荷重付近から急激に鉄筋のひずみが増加しており、この段階でジベル付近のコンクリートの損傷が著しくなっていると考えられる。

C1-T 試験体では、鉄筋の上側で引張りひずみ、下側で圧縮ひずみ(引抜き方向に凸の曲げ)が増加しているが、C1-B 試験体はそれと全く逆の方向のひずみが増加している。このことから、C1-T 試験体では、コンクリートが大きく塑性化する前に、ジベルが付近のコンクリートとともに拔出していることが分かる。C1-B 試験体は付近のコンクリートの拘束が大きく、コンクリートが塑性化する領域が小さいため、貫通鉄筋が局所的に変形し、ひずみ計測位置では鉄筋の下側が引張りとなる曲げが生じたと考えられる。

(2) ジベル配置数の影響

図-7、図-8 に C3-1 および C3-2 試験体の引抜き荷重と拔出し量の関係および破壊の様式図を示す。また、写真-2 に C3-2 試験体の破壊後の状況を示す。図-7 中の計算値は、(3) 引抜き耐力の考察、で示す方法で計算した値である。

C3-1 試験体は、拔出し量 1.6mm で 213kN の最大荷重を示したあと、ほぼ一定の荷重を保持し、拔出し量 14mm で貫通鉄筋が破断するとともにジベル付近のコンクリートが広い範囲で浮き上がり破壊した。最大荷重を示した後の荷重の低下は、ひび割れの状況からジベル付近の比較的小さい領域でかぶりコンクリートの剥離が生じたためと考えられる(図-8)。

一方、ジベルを 2 列に配置した C3-2 試験体は、拔出し量 2.5mm で 334kN の最大荷重を示した後、拔出し量 5.0mm でコンクリートの浮きが比較的広い範囲で生じて荷重が一時的に減少した。しかし、その後荷重が徐々に増加し、拔出し量 15.5mm で貫通鉄筋が破断して荷重が大きく低下したため試験を終了した。コンクリートの浮きが生じた後も荷重が増加した要因は、写真-2 に示すように、コーン破壊面の内側にコンクリートブロック補強用の鉄筋(D13)があり、引抜き力に抵抗したこと

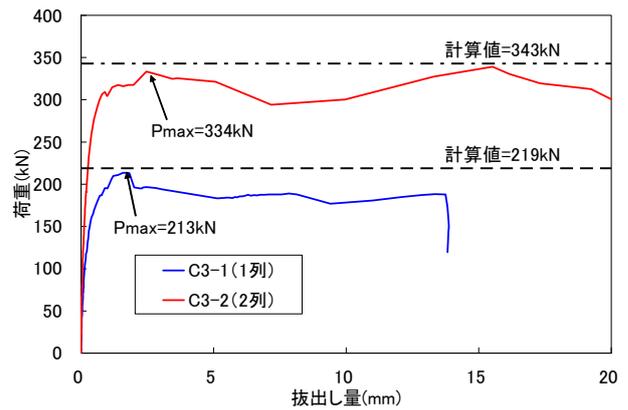


図-7 ジベル配置数の影響



写真-2 破壊後の状況 (C3-2)

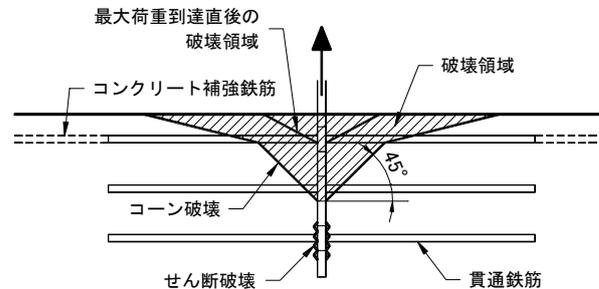


図-8 C3-1, C3-2 試験体の破壊様式図

が考えられる。C3-2 試験体の引抜き耐力は、貫通鉄筋が破断した時点で最大となっているが、このような要因から、これは考慮せず 334kN を最大荷重とした。

C3-2 試験体はジベルの数が C3-1 試験体の 2 倍であるが、最大荷重は 1.57 倍でありジベルの列数に比例して耐力が上昇するわけではないことが分かった。深いジベルの破壊は局所的にコンクリートがせん断破壊するため、隣接するジベルの影響はないと考えられるが、浅いジベルのコーン破壊では、隣のコーン破壊面と重なることによって見かけの耐力が低下することが予想される。これが、耐力がジベルの列数に比例しない一つの要因と考えられる。

破壊後の観察から、C3-1, C3-2 試験体のコーン破壊面はいずれも上から2段目のジベル位置から水平面に対して約 45° の角度で生じていた。そのひび割れが貫通鉄筋位置（上面から 35mm）に達するとその角度が小さくなり、比較的広い範囲にかぶりコンクリートの剥離が及ぶことが分かった（図-8）。上から2段目のジベル位置から下方のコンクリートは、ジベルの近傍でも健全であり、ジベルのせん断破壊が局所的に発生していることを裏付けている。

(3) 引き抜き耐力の検討

本試験により、引抜き破壊は図-8 に示すように上から2段目のジベルがコーン破壊、3段目のジベルがせん断破壊していることが分かった。コーン破壊に対しては式(2)を、せん断破壊に対しては式(1)を適用して、引き抜き耐力の検討を行うこととする。

ジベル深さと破壊モードの関係を示すと図-9 のようになる。式(1)と式(2)のラインが交わる 100mm 前後のジベル深さで破壊モードが変化することが分かる。2段目のジベル中心深さは 105mm であり、ほぼその境界付近に位置していることが分かる。

今回の試験では、図-5 の結果から式(1)において貫通鉄筋の引張強度ではなく降伏強度を用いたほうが、載荷初期に現れる最大荷重をよく表現していることから、以下の検討は貫通鉄筋の降伏強度を用いて行った。また、ジベルを2列にした影響については、Wernerら<sup>5)</sup>の論文を基に式(3)で評価することとした。

$$N_n = \frac{A_N}{A_{N0}} \times \psi_2 \times N_{n0} \quad (3)$$

ここに、 $A_N$ ：隣接するアンカーを考慮したコーン破壊面の投影面積で図-10 中の式により求める、 $A_{N0}$ ：アンカー1本ときのコーン破壊面の投影面積、 $\psi_2$ ：アンカー中心からコンクリートブロック端までの距離を考慮するための係数で本試験では十分な距離があるので1.0とする、である。

ジベルの引抜き耐力は、浅いジベルのコーン破壊耐力と、深いジベルのせん断破壊耐力の和として計算した。このとき、式(2)および式(3)によるコーン破壊耐力は、形成されるコーン破壊面の面積で決まる。すなわち、C3-1, C3-2 試験体のコーン破壊面は2段目のジベルで形成されるため、1段目のジベルは引抜き耐力に寄与してないこととなる。また、3段目のジベルは孔内のコンクリートが局所的にせん断破壊していて、コンクリート

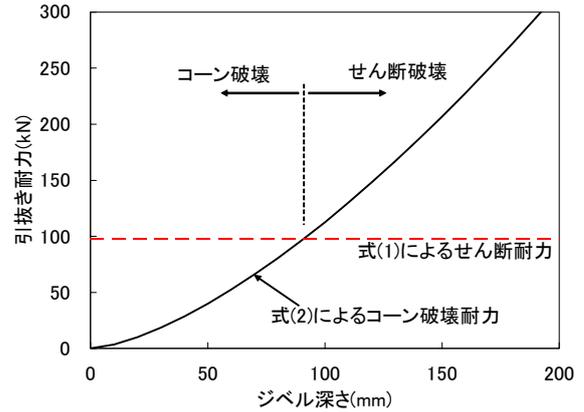


図-9 ジベル深さと破壊モードの関係

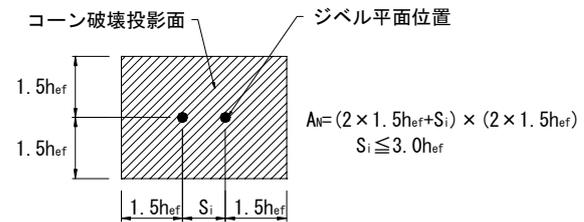


図-10 コーン破壊面の投影面積

表-3 引抜き耐力の比較

項目		C3-1	C3-2
計算値(kN)	コーン破壊分	121	148
	せん断破壊分	97.5	195
	合計	219	343
実験値(kN)		213	334

の損傷がジベル近傍の比較的狭い領域に集中していることから、C3-2 試験体のように、隣接する位置にジベルがあってもお互いに影響することはないものと仮定し、1個のジベルのせん断耐力×孔の数をその耐力とした。計算結果を図-7 および表-3 に示す。

いずれの試験体も計算値は実験値とよく一致しており、本方法で耐力を評価できることが分かった。

4. まとめ

孔あき鋼板ジベルの引抜き試験を、ジベルの深さと配置個数を変えて行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①ジベルが浅い位置にある場合の引抜き耐力はコンクリートのコーン破壊で決まる。ジベルが深い場合はコンクリートがジベル近傍でせん断破壊し、最終的に貫通鉄筋が破断する。
- ②ジベルが浅い場合の引抜き耐力は Werner らの式で、ジベルが深い場合の引抜き耐力は保坂らの式で評価

が可能である。

- ③ジベルを複数配置した場合の引抜き耐力は、浅い位置のコーン破壊耐力と深い位置のせん断破壊耐力の和で評価できる。列が複数ある場合は、コーン破壊において、隣接するジベルの破壊面を考慮することで評価が可能である。

#### 参考文献

- 1) 保坂ら：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A pp.1593-1604，2000
- 2) 保坂ら：孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究，構造工学論文集，Vol.48A pp.1265-1272，2002
- 3) 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），構造工学シリーズ 11，2002
- 4) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 5) Werner F. , Rolf E., John E. Breen, Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, ACI Structural Journal. Vol.92, No.1, pp.73-94, 1995