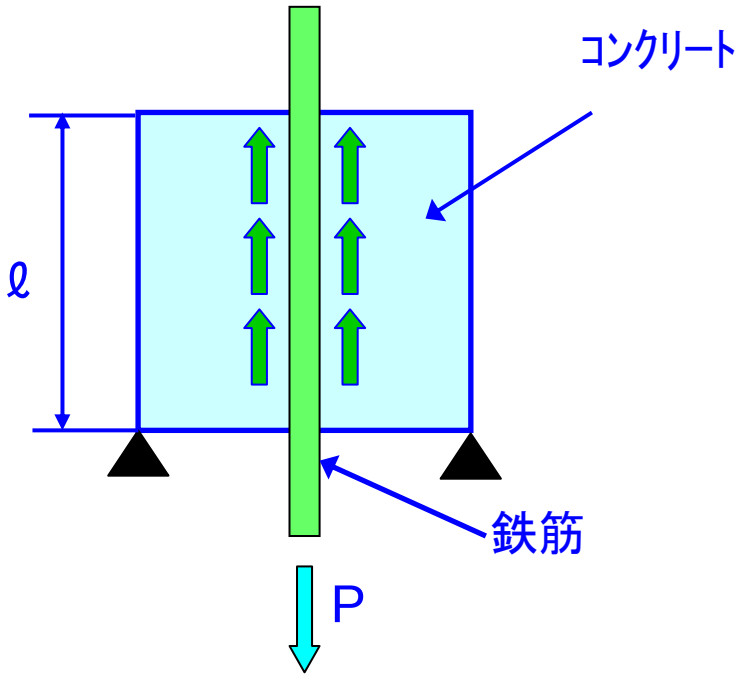
9. 硬化コンクリートの特性(2)

(4) 付着強度 bond strength

・コンクリート中に埋め込まれた鉄筋に引張力を与えて、コンクリートから引き抜くことは可能か？ → かなり大きな抵抗がある。これは鉄筋とコンクリートが「付着」しているからである。付着を確実にするため、鉄筋の表面にはリブとフシと呼ばれる凹凸がある。
→ 異形鉄筋(deformed bar)



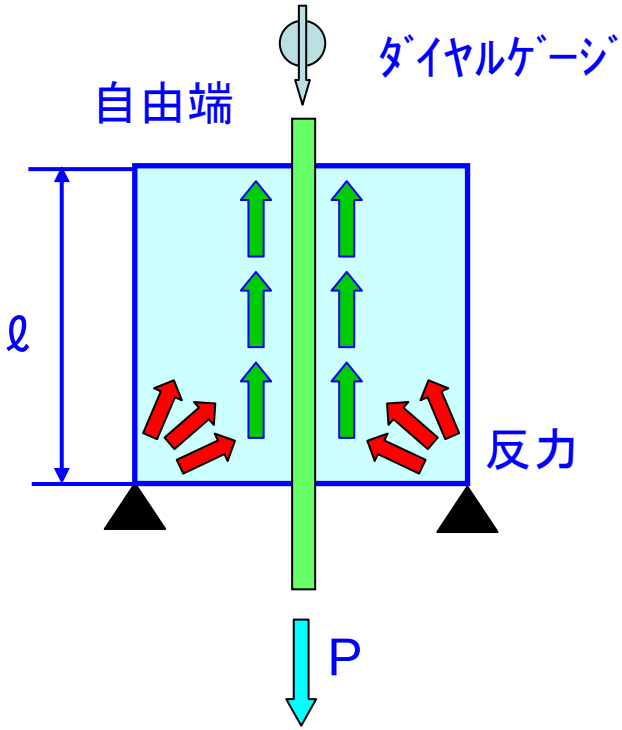
・コンクリートを固定して、埋め込まれた鉄筋に引張力Pを与えると、鉄筋とコンクリートの界面にはこの力に釣り合う抵抗力が生じる。これを「付着応力」という。

・付着応力は鉄筋に沿って分布し、一定ではないが、簡単のため、これを平均化して考えると付着応力は以下のように表現できる。

$$\tau = \frac{P}{U\ \ell}$$

ここに、τ は平均付着応力、Uは鉄筋の周長、ℓは埋込み長さ、Pは作用する引張力。
付着抵抗は、異形鉄筋の表面の形状に大きく依存する。

・引抜き試験と付着強度



コンクリートブロック中に鉄筋を埋込み、これに引張力Pを与えて、コンクリート中から引き抜く（引抜き試験）。この際に自由端でのすべり量（鉄筋の移動量）を測定し、所定のすべり量となった際の平均付着応力を以て、「付着強度」とする。

$$f_{bo} = \frac{P_{max}}{U\ell}$$

ここに、f_{bo}: 付着強度、P_{max}: 所定のすべり量に対応する引抜き力。

この手法は簡易であるので、付着強度の試験方法として多用されているが、実際の鉄筋コンクリート部材では、引張力を受ける鉄筋の周囲のコンクリートはやはり引張を受けている。しかし、引抜き試験では、コンクリートには圧縮力が作用しており、実際の構造部材中の応力状態を再現したものとはなっていない。試験方法が簡易で、コンクリートの品質や鉄筋の表面形状が付着強度に与える影響を評価できることがポイント。
引抜き試験よりも理想的な試験として、両引き試験や、はり試験がある。

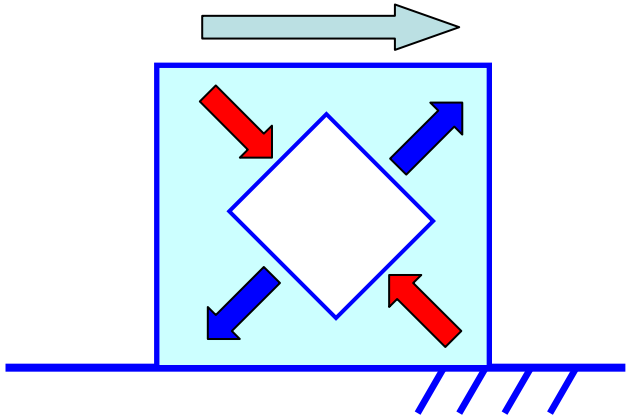
(5) 多軸強度　multi-axial strength

・一軸強度：　1方向からのみ主応力を与えて破壊させる際の強度。

・多軸強度：　2方向以上から主応力を与えて破壊させる際の強度。

・二軸強度：

鉄筋コンクリートで製作されたタンク構造物の壁、建物の床や壁、柱など、多くのコンクリート構造物は2方向以上の主応力を受けている。特に、壁に面内のせん断力が作用した際には、圧縮－引張の2軸応力を受けることになる。

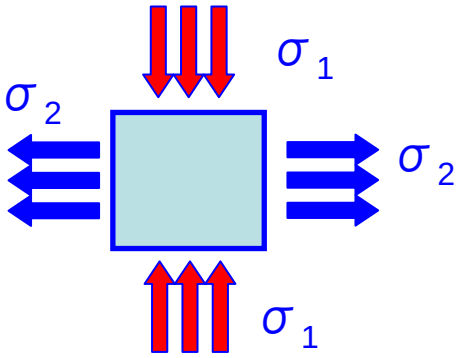


・2軸の圧縮－引張応力状態は、ほとんどの鉄筋コンクリート構造物において生じる応力状態であり、研究が進んでいる。

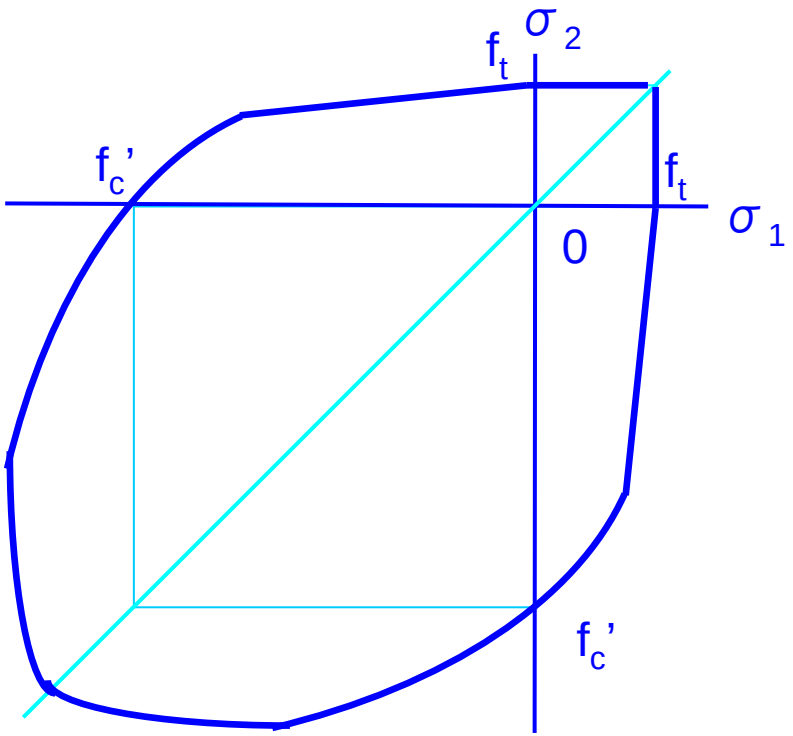
・引張応力によって、一旦ひび割れが発生すると、ひび割れが発生していない場合に比べて、圧縮強度が低下する。これを圧縮軟化 softening と呼んでいる。

・2軸応力を受けるコンクリートの破壊規準

ミュンヘン工科大のKupfer教授らの研究が有名。



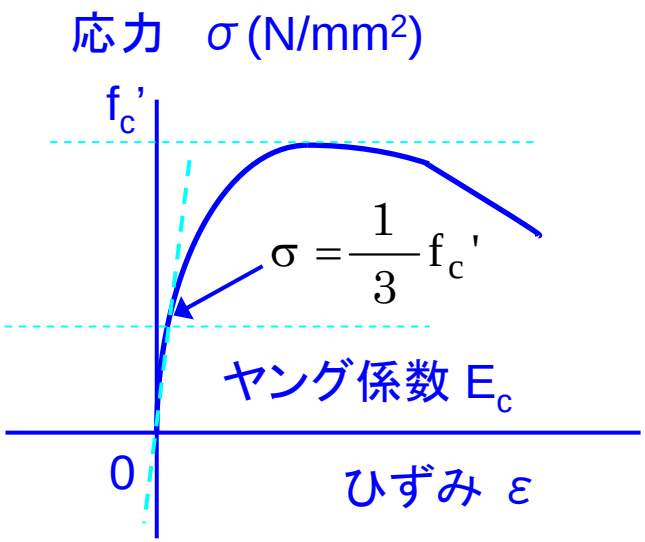
20×20×5cmのコンクリート板に2軸の主応力を加えた。独創的な点は、応力を加えるときに載荷板と供試体の間に摩擦が生じて、応力分布が一様にならない点に配慮し、支圧板の端面をブラシ状に加工している点（ヘアーブラシのイメージ）。



Kupferによる2軸の破壊包絡線

- 2軸引張強度は、1軸引張強度とほとんど変わらない。
- 2軸圧縮強度は、1軸圧縮強度に比較して増加する。
  $\sigma_1 = \sigma_2$の2軸等圧縮強度は1軸圧縮強度の1.2倍程度となる。
- 圧縮－引張応力状態（第2象限、第4象限）では、圧縮強度、引張強度とも、1軸強度よりも低下する。

(6) 硬化コンクリートの弾性と塑性



- 圧縮試験の際に、コンクリートにひずみゲージを貼付し、ひずみを測定すると、応力－ひずみ関係が測定できる。
- 応力のピークが（1軸）圧縮強度となる。圧縮強度の1/3程度までは、ほぼ直線的（弾性的）な挙動を示す。さらに応力が増加すると次第に接線剛性が低下し、ピークを迎えて、軟化していく。
- 圧縮強度の1/3の応力に相当する点と原点を結んだ勾配が弾性係数（ヤング係数）である

・コンクリートのクリープ　creep

コンクリートに一定の荷重を持続して載荷し続けると、応力は変化しないのに、ひずみが時間とともに増加していく現象が見られる。この現象をクリープ（creep）という。

・クリープの原因には諸説あるが、セメントペースト硬化体からの水の圧出によると考えると理解しやすい。なお、鋼材ではクリープはほとんど見られないが、一定のひずみの下で、作用している応力が次第に弛緩していく現象が見られる。これをレラクセーション（relaxation）という。

・クリープに関する基本法則

瞬間的な弾性変形にはフックの法則が成立する。応力をσ、ひずみをε、ヤング係数をE_cとすると、

$$\varepsilon = \sigma / E_c$$

・コンクリートに応力が持続して加わると、応力が増加しなくてもひずみが増加する。

$$\varepsilon \quad \Rightarrow \quad \varepsilon + \varepsilon_{cr}$$

・ここに、ε：弾性ひずみ、ε_{cr}：　クリープひずみ

・クリープひずみと弾性ひずみの比のことをクリープ係数（φ）と呼ぶ。

クリープ係数は、一般に1～3程度の値となる。

つまり、コンクリート構造物の変形全体は弾性変形の2～4倍となるということ。

・クリープに影響する要因：　載荷時の材齢が短いほど（コンクリートが若いほど）、載荷期間が長いほど、クリープは大きくなる。

・作用応力が大きいほど、水セメント比が大きいほど、クリープは大きくなる。

・クリープによる有利、不利：　クリープが生じれば、みかけのヤング係数が低下し、不静定構造に発生する応力を緩和する。プレストレスの効果が減じ、たわみも大きくなる。