

令和 元年 6 月 15 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06567

研究課題名(和文)低強度コンクリートに後施工したアンカーのせん断試験装置の開発と伝達せん断力の評価

研究課題名(英文)Development of shear test equipment for post-installed anchor constructed on low strength concrete and evaluation of transferred shear force

研究代表者

小林 克巳(Kobayashi, Katsumi)

福井大学・学術研究院工学系部門・特命教授

研究者番号：40150297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：凸部品と凹部品を平行にスライドするように組み合わせた装置に、試験アンカー筋を密着させて取り付けただけで、コンクリート境界面に施工されたアンカー筋の状態を再現できる原位置で使用可能なせん断試験装置を開発し、一面せん断実験結果と比較することにより、試験装置としての特性を把握した。せん断試験装置をコンクリート面からアンカー筋径に応じて一定量浮かせて試験を実施することにより、一面せん断実験結果とよく対応する。

さらに、加水により製作した低強度コンクリートを用いてせん断試験を実施し、せん断力・水平変形関係を求めて合理的な耐震補強設計に資するデータを提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現場で利用できるせん断試験機が無かったために、耐震補強対象建物ごとのあと施工アンカー設計のためのデータ取得、品質・施工管理上のせん断試験が行われていない。これに対して、現場で簡便に使用でき、実際の状態をよく再現できるせん断試験機を開発した。耐震補強に限らず、あと施工アンカー一般の原位置せん断試験が可能となり、設計の信頼性の向上、施工・品質管理に役立つと期待される。

実験室内でも簡便に多数の実験を実施できることは言うまでもなく、あと施工アンカー工法の研究・開発にも使用できる。

研究成果の概要(英文)：Compact shear test equipment was developed combining convex parts and concave parts so as to slide in parallel. It can reproduce the condition of post-installed anchor constructed on a concrete interface simply by closely fixing the test anchor bars with the equipment. The characteristics as test equipment were investigated by comparing with the other shear-off test result. The test results well respond to that of the other shear-off test by setting up with some floating distance from the concrete surface according to the anchor bar size.

Furthermore, shear tests were conducted using low strength concrete made by adding water, and the relationship between shear force and horizontal deformation was obtained to present data that would contribute to a rational seismic strengthening design.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート 低強度コンクリート あと施工アンカー せん断試験装置 せん断剛性 原位置試験 品質管理 施工管理

1. 研究開始当初の背景

既存建物に耐震補強部材を取り付けて、せん断力を伝達する手段としてあと施工アンカーが多用される。せん断剛性に応じて、補強部材がどれだけ耐力増に寄与できるか(強度寄与率)を適切に把握しなければ、安全で合理的な耐震補強設計ができないことは明らかである。特に低強度コンクリートに対しては、せん断剛性に応じてあと施工アンカーが伝達できるせん断力が決まることを解っていないながらも、データ不足もあり強度安全率だけの考えで設計が行われているのが実態である。合理的な設計には補強対象建物ごとに変形の適合条件を考慮した伝達せん断力の評価が必要であり、施工品質管理には原位置せん断試験が必要となる。しかし、原位置で使用可能なせん断試験機はなく、補強対象建物ごとにあと施工アンカーのせん断試験データを得ることは行われていないし、施工品質管理上のせん断試験も行われていない。

2. 研究の目的

耐震改修指針^(引用文献①)では、コンクリート強度 13.5N/mm^2 未満を対象としていないが、現実には 10N/mm^2 程度でも耐震補強の要求が多い。その際、あと施工アンカーの有効せん断強度については評価方法が無く、梁のせん断強度と同程度の強度低下率等を適用して設計を行っているのが実情である。しかし、補強対象建物ごとにあと施工アンカーの変形と伝達せん断力の関係を適切に把握して有効せん断強度を評価できれば、過剰・過小設計を無くして設計の信頼性を高めることができる。本研究では、まず原位置で簡便に使用できる小型せん断試験機を開発する。実験室内で使用しても、簡便に多数の実験が可能となる試験機の開発を目指す。次に、低強度コンクリートを対象としたあと施工アンカーのせん断力・変形関係を求めて設計に資するデータを提示し、耐震補強設計の合理化と建築構造の安全性の向上に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) コンクリート境界面に施工されたアンカー筋がせん断力を受ける場合の状態を再現できるメカニズムを考案し、アンカー筋が回転拘束されている状態、試験後の点对称形の変形状態、試験機に生じる理論上の応力などを確認する実験を行った。

(2) 精密機械加工によってせん断試験機を試作し、その性能確認を行った。

(3) コンクリート境界面に施工したあと施工アンカーの一面せん断実験を実施し、試作機の動作特性把握のための比較データとした。

(4) 試作機による試験結果を既往のせん断試験方法による結果と比較し、両者の対応を検討した。

(5) 圧縮強度 $\sigma_B=28\sim 11\text{N/mm}^2$ の低強度コンクリートを製作し、あと施工アンカーを施工して試作機によるせん断試験を行った。せん断試験結果および材料試験結果を用いて、低強度コンクリートを対象としたせん断力・水平変形関係を定式化した。

(6) 耐震補強外付け工法を想定し、あと施工アンカーの伝達せん断力・変形関係を予め知ることができれば、既存フレームと補強部分の水平力分担を精度良く知ることができることを確認する実験を実施した。

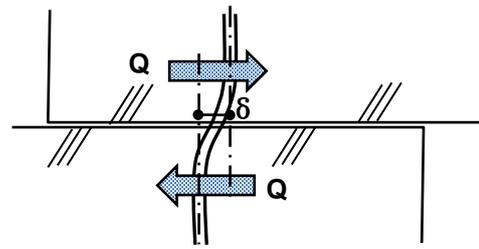


図1 コンクリート境界面のアンカー筋の変形

4. 研究成果

(1) 試験機設計の基本的考え方

コンクリート境界面のアンカー筋が、せん断力(Q)を受けて図1のように変形する状態を再現できる装置とする。図1の上部コンクリートを試験機で置き替える。図2のように2本のアンカー筋に互いに反力をとって、油圧ジャッキで水平力(P)を加えると、 $P(H+h)$ のモーメントによってアンカー筋は回転変形してしまうので、 R_1 および R_2 ($R_1=R_2$) の力で曲げ戻せばよい。凸部品と凹部品を組み合わせるスライドするようにすれば、凸部品と凹部品の R_1 (および R_2) が互いに作用・反作用力となるので、曲げ戻す力を確保できる。

まず、凸部品および凹部品を切出し、溶接構造にて試験機を試作した。凸部品と凹部品を組み合わせるスライドさせることにより、アンカー筋が回転拘束されながらせん断力が加わること、試験後にアンカー筋が図1の変形状態になっていること、凸部品の凸部付け根に理論上の応力が発生することを確認した。

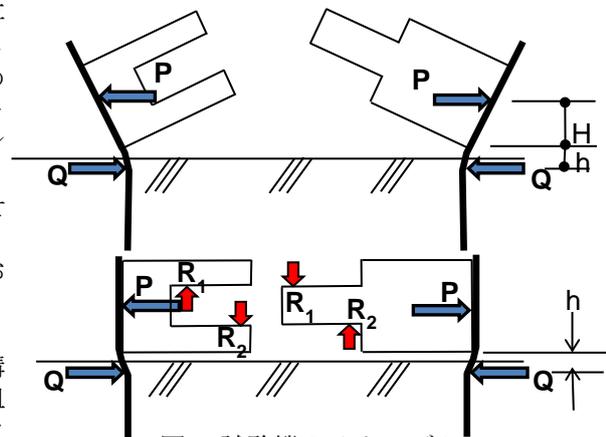


図2 試験機のメカニズム

図1の変形状態になっていること、凸部品の凸部付け根に理論上の応力が発生することを確認した。

(2) 精密機械加工による試作機とその性能

① 小型せん断試験機の試作

図 3 に示すように、試験アンカー筋間隔約 300mm 間にセットし、試験アンカー筋をボルトで締め付けて固定するだけの構造とした。後からセットする油圧ジャッキを除く重量 25kg 程度の小型とし、人力で扱えるものとした。予め変位計を取り付けたゲージホルダーは測定基準点を合わせて置くだけの構造とし、試験準備にかかる時間も含めて短時間で試験を終了できるようにした。

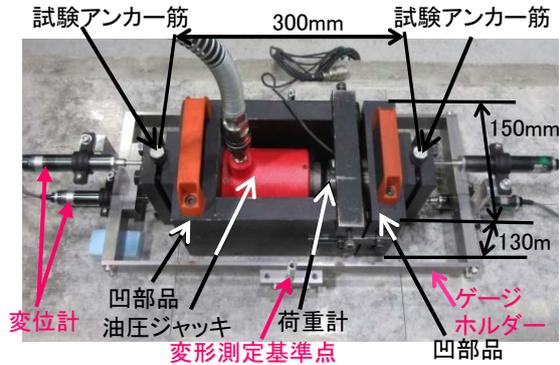


図 3 小型せん断試験機

② スライド部の摩擦係数

アンカー筋を曲げ戻すために、凸部品と凹部品が互いに反力を取合いながらスライドするため、接触面に摩擦が発生する。接触面にはテフロン加工を施した。図 4 のように試験機の両端に固定した鋼製ブロックの脚部を丸棒で繋ぎ、歪ゲージを用いて引張力(T)を測定し、摩擦力(P-T)を求めた。荷重計の出力(P)に対しておよそ 4%が摩擦力となり、96%がせん断力(Q)となることが分かった(図 5)。

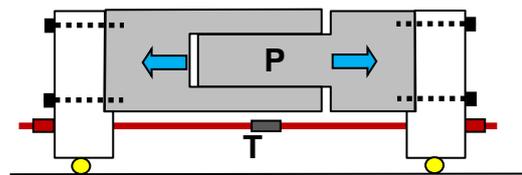


図 4 摩擦力の測定装置

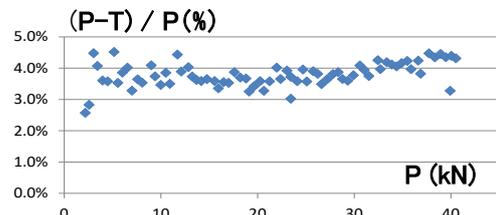


図 5 摩擦力の測定結果

③ アンカー筋の回転拘束

図 3 の上下 2 台の変位計による水平変位の差を変位計間隔 100mm で除して回転変位を求めた。図 6 はアンカー筋を D19 ($\sigma_y=388\text{N/mm}^2$, $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$, 埋込長さ $7d_b$)とした一例である。荷重が小さい段階で、 $1.5\sim 2/1000\text{rad}$ 回転しているが、スライド部のクリアランス $0.2\sim 0.3\text{mm}$ とスライド部長さ約 150mm に起因する曲げ戻し力が作用するまでの回転量である。その後、荷重の増加と共に増大するのは、試験機からのアンカー筋の滑り、アンカー筋の節の変形、試験機への密着具合等によると考えられるが、絶対値は小さく実用上無視できると判断した。本試験機では、アンカー筋を固定する時に台直しが起こらないことが大切であり、施工時に 2 本のアンカー筋を鉛直かつ平行に保持する治具を用いている。

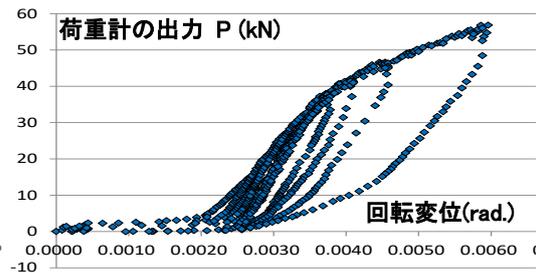


図 6 アンカー筋の回転変位測定例

④ コンクリート面からの浮かせ高さ

本試験機は、コンクリート面から浮かせて設置でき、コンクリート表面の不陸に対応できる特長がある。浮かせ高さが大きいほど、初めから周囲にコンクリートがなくアンカー筋だけが変形する領域が大きくなるので、初期剛性と耐力が小さくなる。一面せん断試験と対応させるためには、適切な浮かせ高さを決めてせん断試験を行う必要がある。図 7 はアンカー筋に D19 ($\sigma_y=388\text{N/mm}^2$, $\sigma_B=33\text{N/mm}^2$, 埋込長さ $7d_b$)を用い、浮かせ高さ 8mm とした例である。

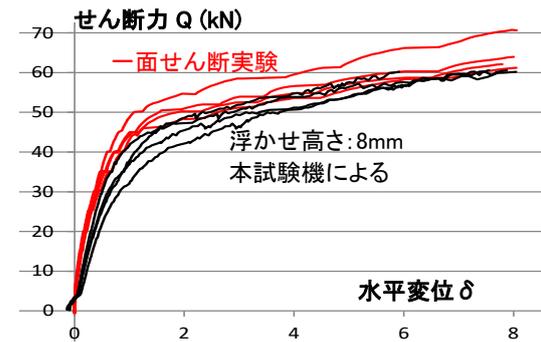


図 7 せん断力(Q)と水平変位(delta)の関係 (D19)

(3) コンクリート境界面に施工されたあと施工アンカーの一面せん断実験結果との比較

一面せん断実験(図 8)では、グリースを塗布した 0.5mm 厚硬質塩ビ板 2 枚をコンクリート境界面に挟んだ上に、床から僅かに浮いた状態で加力しており、コンクリート境界面が接触することによる摩擦力の影響は入らない。アンカー筋 D19 ($\sigma_y=388\text{N/mm}^2$, 埋込長さ $7d_b$)、下部コンクリート $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ 、上部コンクリート $\sigma_B=29\text{N/mm}^2$ について、アンカー筋 1 本当たりのせん断力(Q)と上下ブロック間の相対ずれ(delta)関係を図 7 中に表示。本試験機による浮かせ高さ 8mm とした結果は、初期剛性はやや小さいが二次剛性と耐力は一面せん断実験結果とよく対応している。二次剛性

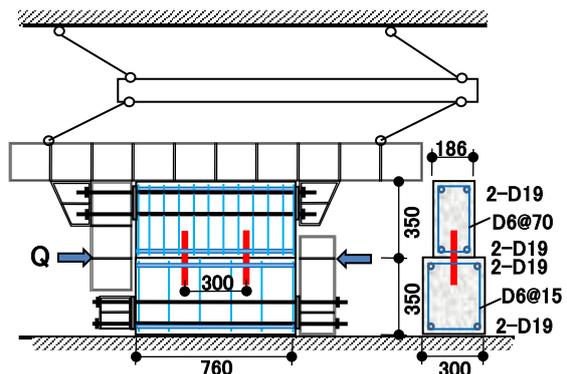


図 8 一面せん断実験

はアンカー筋が降伏した後であり、浮かせ高さの影響は大きくない。初期剛性を一面せん断実験結果と対応させるためには、アンカー筋の本試験機への取り付け方法を工夫する必要がある。アンカー筋をモルタルで掴み、それを本試験機に取付ける方法も考えられるが試験準備は煩雑になる。

図9にD16 ($\sigma_y=377 \text{ N/mm}^2$ 、埋込長さ $7d_b$) の一面せん断実験結果 (下部 $\sigma_B=28\text{N/mm}^2$ 、上部 $\sigma_B=31\text{N/mm}^2$) と浮かせ高さ 4mm とした本試験機による結果 ($\sigma_B=33\text{N/mm}^2$) を示す。本試験機による結果の初期剛性がやや小さいのはD19の場合と同様であるが、両試験結果の二次剛性と耐力はよく対応している。

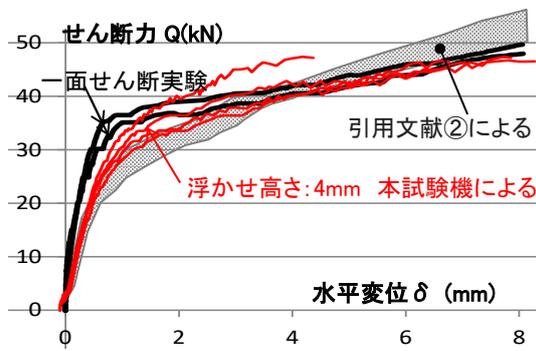


図9 せん断力(Q)と水平変位(δ)の関係 (D16)

(4) 既往のせん断試験方法(引用文献③)との対応

引用文献③に示されているせん断試験装置図(例)に倣っていると判断される装置にて行ったせん断試験結果が引用文献②に紹介されている。JCAA 製品認証実験データの引用であり、SD295A またはSD345と思われるアンカー筋 D16 ($\sigma_B=32.2\text{N/mm}^2$ 、埋込長さ $7d_b$) 5本の結果を読み取って図9の影を付けた部分に示す。本試験機による結果とは、初期剛性はほぼ対応しているが、二次剛性と耐力は対応していない。ただし、既往のせん断試験方法による結果は、初期剛性、二次剛性、耐力ともに一面せん断実験結果とは対応が良くない。

(5) 低強度コンクリートに施工したあと施工アンカーのせん断力(Q)・水平変位(δ)関係

① 低強度コンクリートの製作

ベースコンクリートに水セメント比で120%までの加水を行い、分離状態がなくなるまで繰り返して型枠に打設した。加水後の水セメント比にほぼ比例して、圧縮強度 $\sigma_B=28\sim 11\text{N/mm}^2$ を得た。図10に水セメント比120%まで加水した場合の σ - ϵ 曲線を示す。強度は小さいが、大きな靱性を示している。ヤング係数は圧縮強度に比例している(図11)。

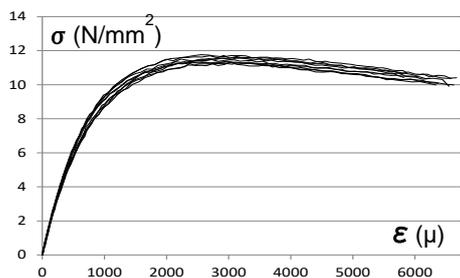


図10 低強度コンクリートの σ - ϵ 曲線

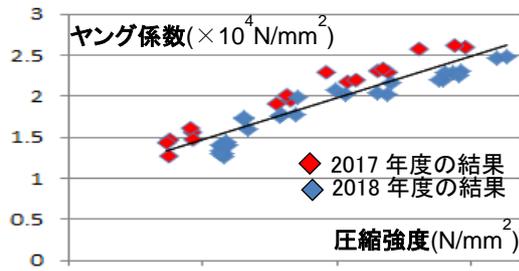


図11 低強度コンクリートのヤング係数

② コンクリート強度に依存するあと施工アンカーのせん断力(Q)・水平変位(δ)関係

図12は本試験機で低強度コンクリートに施工したD16のあと施工アンカーを浮かせ高さ 4mm で試験した結果である。コンクリート強度が小さいほど初期剛性と耐力は小さいが、二次剛性はコンクリート強度にそれほど敏感ではない。また、 $\sigma_B=16\text{N/mm}^2$ 以下になると、せん断力・水平変位関係はコンクリート強度に敏感でなくなっている。この傾向はD19でも同様であった。

図13はD10のあと施工アンカーを浮かせ高さ 1mm で試験した結果である。細径になるとよりコンクリート強度に敏感でなくなるが、 $\sigma_B=11\text{N/mm}^2$ まで小さくなると急に初期剛性と耐力がはっきりと低下してくる。なお、 $\sigma_B=11\text{N/mm}^2$ の結果は、一面せん断実験結果と初期剛性、二次剛性、耐力ともによく対応している。この傾向は浮かせ高さ 2mm としたD13でも同様であった。

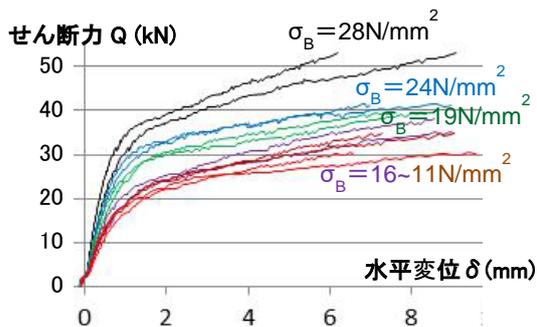


図12 せん断力(Q)と水平変位(δ)の関係(D16)

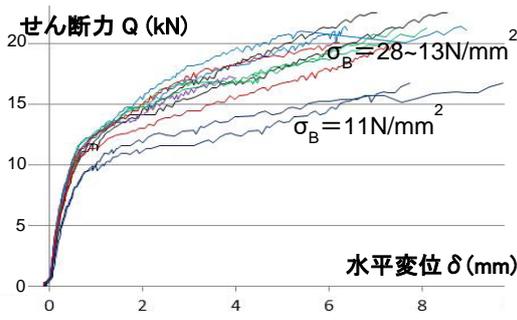


図13 せん断力(Q)と水平変位(δ)の関係(D10)

③ せん断力(Q)・水平変位(δ)モデル

図14に概念図を示す。 $\delta=0.5\text{mm}$ における割線と $\delta=3\sim 8\text{mm}$ における Q - δ 曲線にフィットさせた直線の交点の変位を δ_1 とする。 $\delta=0.5\text{mm}$ における割線を求めたのは、この辺りから剛

性が大きく変化することによる。

Q_1 は、アンカー筋の塑性化開始点と仮定し、

$$M_y = \sigma_y \cdot Z \quad \text{----- (1)}$$

$$Q_1 = M_y/h \quad \text{----- (2)}$$

として、 h をアンカー筋径 (d_b)、ヤング率 (コンクリート強度 σ_B に比例しているので σ_B に置き替える) と関連付け、実験結果の δ_1 に対する Q_1 から h を求める。D10、D13 と D16、D19 では、コンクリート強度への依存度が大きく違っている。細径ではアンカー筋の曲げ剛性が小さいので、アンカー筋の剛性で決まる部分が大きく、D16、D19 になって曲げ剛性が大きくなると、コンクリート強度の影響が大きく現れてくると考えられる。D10、D13 および D16、D19 では、

$$\frac{h}{d_b} = -0.002\sigma_B + 0.375 \quad \text{(D10、D13 の場合)} \quad \text{----- (3-1)}$$

$$\frac{h}{d_b} = -0.0121\sigma_B + 0.6955 \quad \text{(D16、D19 の場合)} \quad \text{----- (3-2)}$$

降伏点剛性 ($K_y = Q_1/\delta_1$) は、主に d_b^4/h^3 に依存するはずである。実験結果の降伏点剛性 (K_y) と d_b^4/h^3 の比を求めると、コンクリート強度の影響も現れている。D10、D13 および D16、D19 では、

$$\frac{K_y}{\left(\frac{d_b^4}{h^3}\right)} = -0.0011\sigma_B + 0.093 \quad \text{(D10、D13 の場合)} \quad \text{----- (4-1)}$$

$$\frac{K_y}{\left(\frac{d_b^4}{h^3}\right)} = -0.0067\sigma_B + 0.2877 \quad \text{(D16、D19 の場合)} \quad \text{----- (4-2)}$$

モデルでは、(3)式からアンカー筋径とコンクリート強度に応じた h が求まり、(2)式から Q_1 が求まる。(4)式から降伏点剛性 ($K_y = Q_1/\delta_1$) が求まり、 Q_1 から δ_1 が求まる。

降伏点までを 2 本の折れ線で表すこととし、

$$Q_0 = \frac{2}{3}Q_1 \quad \text{----- (5)}$$

とする。実験結果から、 Q_0 に対応する変位 (δ_0) を求め、 $K_0 = Q_0/\delta_0$ を初期剛性とする。実験結果から降伏点剛性低下率 ($\alpha_y = K_y/K_0$) を求めると、ばらつきはあるがアンカー筋ごとにほぼ一定値を示す。

$$\alpha_y = 0.0173d_b + 0.5187 \quad \text{----- (6)}$$

モデルでは、(4)式の K_y と (6)式から初期剛性 K_0 が求まり、(2)式と (5)式から求まる Q_0 に対応した変位 δ_0 が求まる。

(Q_2, δ_2) はある程度、アンカー筋の塑性化が進んだ点と考え、

$$\delta_2 = 3\delta_1 \quad \text{----- (7)}$$

として Q_2 を求める。ここで $\delta_2 = 3\delta_1$ としたのは、 δ_2 が通常あと施工アンカーの設計耐力評価に用いる 2mm 前後の値となることによる。 Q_1 に対する耐力上昇率 (Q_2/Q_1) は、アンカー筋径 (d_b) およびコンクリート強度 σ_B との相関は大きくなく、1.22~1.52 の間に分布しており、平均値を求めて一定値とする。

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 1.34 \quad \text{----- (8)}$$

モデルでは、(7)式および(8)式により、(Q_1, δ_1) から (Q_2, δ_2) が定まることになる。

$\delta = 3 \sim 8\text{mm}$ における $Q-\delta$ 曲線にフィットさせた直線の傾き (K_2) を求めると、ばらつきが大きくコンクリート強度との相関は見られない。支圧破壊範囲がどのような広がりや深さを持っているかでばらつきが大きいと思われる。ここでは、平均値を求めて、

$$\frac{K_2}{K_y} = 0.06 \quad \text{----- (9)}$$

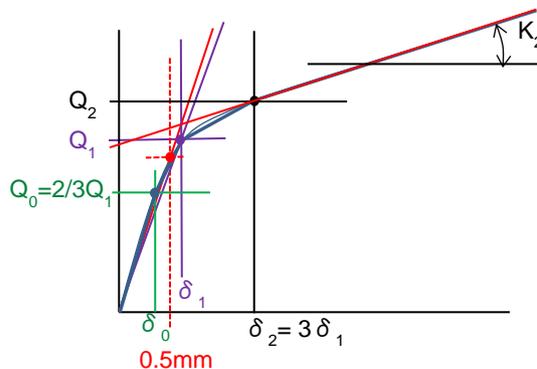


図 14 せん断力・水平変位モデルの概念図

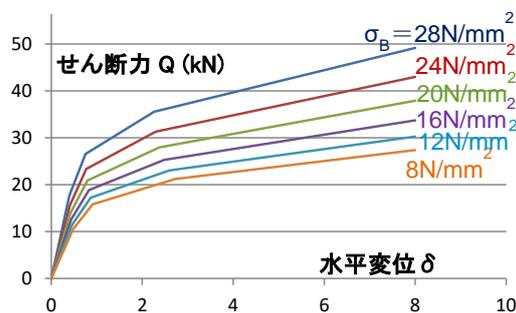


図 15 せん断力(Q)・水平変位(delta)モデル(D16)

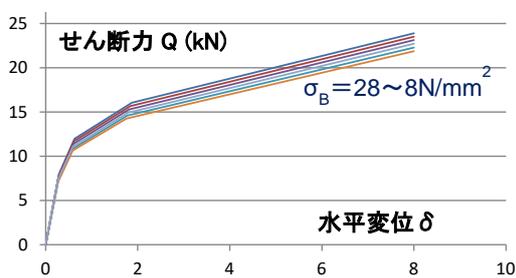


図 16 せん断力(Q)・水平変位(delta)モデル(D10)

せん断力(Q)・水平変位(δ)モデルによる計算結果を図 15 と図 16 に示す。実験結果の傾向を表すモデル化はできているが、特にアンカー筋 D10 のように、圧縮強度が 11N/mm²まで小さくなると、急に初期剛性と耐力が低下することはモデル化できていない。アンカー筋径およびコンクリートのヤング係数(圧縮強度)だけでなく、別の要因があると思われる。圧縮強度 13.5N/mm²未満となるような低強度コンクリートに対しては、原位置での試験データを得て設計に反映させるよりほかはないと思われ、原位置で使用可能な本試験機の開発意義がここにある。

(6) コンクリート強度に依存する耐震補強における既存フレームと補強部分の水平力分担

図 8 の実験装置に、既存フレームに相当する 2-φ12 を取り付け、載荷水平力(P)が 2-φ12 の負担水平力(Q₁)とあと施工アンカーを介して補強部分に伝わる水平力(Q₂)に分かれる実験(図 17)を行った。あと施工アンカーは 5-D10 または 4-D13 とし、上部コンクリート強度は 31N/mm²、下部コンクリート強度は 28N/mm² または 11N/mm² とした。

あと施工アンカーが 5-D10 の場合、既存フレーム相当部分とアンカー筋の水平変位との関係は、コンクリート強度 28N/mm² または 11N/mm² によらず、ほぼ同じであった(図 18)。あと施工アンカーを 4-D13 とした場合も同様であった。このことは、あと施工アンカーのせん断剛性だけで補強部分の分担水平力の大きさが決まることを意味している。図 12 および図 13 の結果より、低強度コンクリートになれば、あと施工アンカーのせん断剛性が小さくなり伝達せん断力は小さくなるが、極端な低強度コンクリートにならない限り、コンクリート強度の影響が少ない細径のアンカー筋を使用したほうが有利になることがわかる。

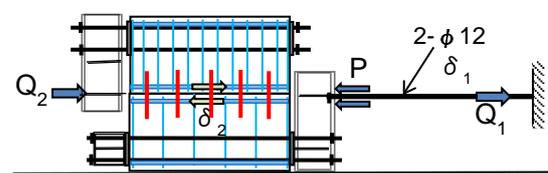


図 17 載荷水平力(P)が既存フレーム相当部分と補強部分に分かれて伝達する実験

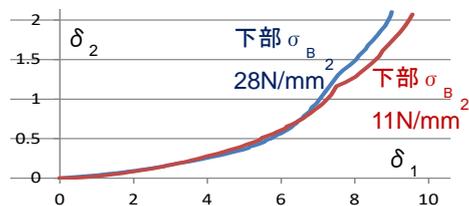


図 18 既存フレーム相当部分とアンカー筋の水平変位

(7) まとめ

原位置で簡便に使用できるせん断試験機を開発し、その動作特性を明らかにした。コンクリート面から離して使用できる特長があり、D10~D19 に対してそれぞれ 1~8mm 離すことにより、コンクリート境界面に施工したあと施工アンカーの挙動と良く対応する結果が得られる。

低強度コンクリートに対して、せん断剛性と耐力が低下する様子を定式化して示した。細径のアンカー筋では、極端な低強度でない限り、コンクリート強度の影響は少なくなる。

耐震補強では、コンクリート強度によらず、あと施工アンカーに、既存フレームの水平変位に対して一定の水平変位が生じると予想される。つまり、主にコンクリート強度に応じたあと施工アンカーのせん断剛性だけで補強部分の分担水平力が決まると思われる。

本研究で開発した小型せん断試験機が現場で使用されるようになり、設計の合理化、施工品質管理などに役立つことを願っている。

<引用文献>

- ① 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説、日本建築防災協会、2001
- ② 低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書、JCI中国支部、2009.2
- ③ あと施工アンカー試験方法、(一社)日本建築あと施工アンカー協会(JCAA)、第2版、2015.4

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 小李克巳、谷口博司、河辺弘三、寺崎慎一、あと施工アンカーの原位置せん断試験装置の開発 その 2 試作機の動作特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2018、145-146
- ② 小李克巳、谷口博司、河辺弘三、寺崎慎一、あと施工アンカーの原位置せん断試験装置の開発 その 1 試験装置設計の基本的考え方、日本建築学会大会学術講演梗概集、査読無、C-2、2017、365-366

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：せん断力試験装置

発明者：小李克巳、谷口博司、河辺弘三

権利者：福井大学、株式会社トラスト

種類：特許

番号：特願 2017-166282

出願年：平成 30 年

国内外の別：国内