

無機系接着剤のディスク型シヤキーへの適用性

ADAPTABILITY OF CEMENT-BASED ADHESIVE TO DISK TYPE SHEAR-KEY

阿部隆英*¹, 高瀬裕也*², 安藤重裕*³,
坂本啓太*⁴, 田村 努*⁵, 兼吉孝征*⁶Takahide ABE, Yuya TAKASE, Sigehiro ANDO,
Keita SAKAMOTO, Tsutomu TAMURA and Takayuki KANEYOSHI

In the structure joints, disk-type shear keys are used to connect retrofitting members to existing members, and they are strengthened by applying an epoxy adhesive. The authors investigated the adaptability of a cement-based adhesive to disk-type shear keys by conducting tests and by a two-dimensional FEM analysis. As a result of experimental tests, the bond strength of the cement-based adhesive was lower. Moreover, the vertical displacement of the anchor bolt was larger in the analysis. However, the maximum shear forces exceeded the calculated values for most specimens. Finally, it was concluded that a cement-based adhesive was able to be applied.

Keywords: Seismic retrofitting, Adhesives, Cement-based Adhesive, Joint, Disk type shear-key
耐震補強, 接着剤, 無機系接着剤, 接合部, ディスク型シヤキー

1. はじめに

旧耐震規準で設計された既存建築物の耐震補強¹⁾は、規模の大きな地震が多く発生するわが国において、極めて重要な課題である。一般的な耐震補強では、既存躯体と補強部材の接合にあと施工アンカーやディスク型シヤキー^{2,3)}が使用され、これらを既存コンクリートに定着するために接着剤が用いられる。接着剤の成分として、基本的には有機系のもが多く採用されているが、2010年の各種合成構造設計指針⁴⁾の改定により、制約はあるものの無機系接着剤の使用が認められ、近年、この研究開発^{例え5)}が広く行われている。無機系接着剤には揮発性の有機化合物が使用されていないことや、長期荷重が作用する部位への適用性から、普及への期待が高まっている。無機系接着剤を対象としたあと施工アンカーの付着実験は多く行われているが、せん断実験について検証された研究例は著者らが知る限り少なく、付着特性の違いが力学性能に及ぼす影響については未解明に近い。そこで本研究では、あと施工アンカーよりも高いせん断耐力を発揮するディスク型シヤキーを対象に、有機系と無機系の接着剤をそれぞれ用いた場合のせん断抵抗性能を検証する。

Fig.1にディスク型シヤキーの概念図を示す。ディスク型シヤキーは、ディスク(Steel disk)、アンカーボルト(Anchor bolt)、高ナット(Nut)および接続ボルト(Connecting bolt)から構成され、ディスクとアンカーボルトが注入型の接着剤によって既存コンクリートに定着される。ここでアンカーボルトの定着について、Fig.1に示す通りボルトの先端に芯棒打ち込み式の金属拡張部(以下、拡張部と記述する)を有している。しかしこの拡張部は、施工時の仮固定のために用いられているものであり、アンカーボルトの穿孔径は、接着系アンカー

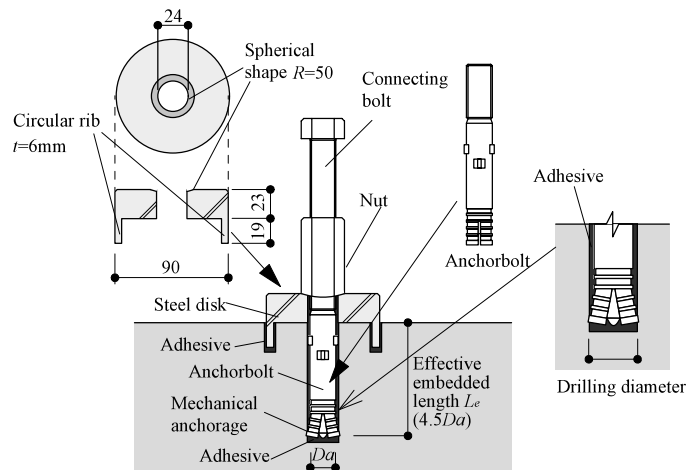


Fig.1 Image of Disk type shear-key

用の広めのサイズ(径20mmのボルトに対し、穿孔径24mm)が採用されている。したがって、この拡張部が有する構造的な抵抗性能は非常に小さく、基本的には接着剤の付着によって、アンカーボルトがコンクリートに定着される²⁾。

そこで本論文では、はじめに両接着剤の付着特性を把握するための付着実験を行う。次いで正負交番繰り返し加力を与えるせん断載荷実験を実施し、接着剤の違いがせん断抵抗性能に与える影響について検証する。続いて、付着実験の両接着剤の付着特性をモデル化して、これを用いた2次元有限要素解析を行い、せん断載荷実験の再現性について検証するとともに、接着剤の付着特性がせん断抵抗性能に及ぼす影響について考察することで、無機系接着剤のディス

*¹ 飛鳥建設耐震ソリューション部 主任*² 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域
准教授・博士(工学)*³ 住友大阪セメントセメント・コンクリート研究所
課長・博士(工学)*⁴ 飛鳥建設耐震ソリューション部 主任・修士(工学)*⁵ 住友大阪セメントセメント・コンクリート研究所 係長*⁶ 住友大阪セメント建材部 課長

Chief, Seismic solution department, TOBISHIMA Corporation

Assoc. Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Ph.D.

Manager, Concrete research laboratory, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd., Dr.Eng.

Chief, Seismic solution department, TOBISHIMA Corporation, M.Eng.

Subsection chief, Concrete research laboratory, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd.

Manager, Cement-related products division, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd.

ク型シャキーへの適用性について検討する。なお本論文では、有機系接着剤と無機系接着剤の硬化後に得られる力学的な付着特性に着眼する。

2. 本実験の概要

本論文では付着実験とせん断載荷実験の2タイプの実験を実施する。本論文で用いる接着剤について、有機系は広く市販されているエポキシ系接着剤であり、無機系については既往の文献⁵⁾で用いられているものをベースとし、流動性が高くなるように、成分を一部変更したものである。以下に、両実験の概要をそれぞれ記述する。

2.1 接着剤の付着特性を把握するための付着実験

2.1.1 試験体パラメータ

Table1 に試験体パラメータを示す。Table2 および Table3 に、アンカー筋の機械的性質とコンクリートの材料特性をそれぞれ示す。本実験では全9パラメータの試験体の載荷実験を行う。試験体パラメータは、1) 接着剤の種類、2) アンカー筋の種類、3) コンクリート圧縮強度 σ_B である。アンカー筋の種類としては、全ネジボルトと丸鋼の2種類を対象とする。全ネジボルトを用いた理由は、本実験で用いる無機系接着剤の一般的な付着特性を把握するためである。またディスク型シャキーで用いられるアンカーボルトやディスクは、異形鉄筋と異なり、丸鋼のような滑らかな表面を持つことから、このような界面での付着特性を把握するために丸鋼を用いる。アンカー筋の降伏で最大引抜き荷重が決まらないよう、アンカー筋には高強度の素材を用いることとし、全ネジボルトは SNB-7、丸鋼は S45C とする。アンカーボルト径 ϕ は、本論文で扱うディスク型シャキーと同じ、

Table 1 Specimen parameters for pull-out test

Specimen name	Adhesive	Anchor - bolt	F_c (N/mm ²)	L_{eng} (mm)
BC09-M20	Cement- based	M20	9	101.8
BC18-M20			18	101.8
BC30-M20			30	101.1
BE09- ϕ 20	Epoxy	ϕ 20	9	91.74
BE18- ϕ 20			18	91.85
BE30- ϕ 20			30	90.76
BC09- ϕ 20	Cement- based	ϕ 20	9	90.47
BC18- ϕ 20			18	90.88
BC30- ϕ 20			30	90.62

F_c : Design compressive strength of concrete, L_{eng} : Measured average embedded length of anchor bolt

Table 2 Material properties of concrete for pull-out test

F_c (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)
9	8.34	13.4
18	21.6	26.4
30	30.7	29.0

σ_B : Concrete compressive strength, E_c : Young's modulus

Table 3 Material properties of anchor bolts

Anchor - bolt	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	δ (%)
M20	726	965	178	6.04
ϕ 20	607	771	204	10.9

σ_y : 0.2% yield strength, σ_u : Ultimate strength, E_s : Young's modulus of anchor bolt, δ : Elongation after fracture

$\phi=20\text{mm}$ とする。 σ_B については一般的な耐震補強を想定して、目標強度を $10\sim 30\text{N/mm}^2$ とし、 $F_c=9, 18, 30\text{N/mm}^2$ とする。アンカー筋の有効埋め込み深さは、全ネジボルトを用いる試験体で 5ϕ 、丸鋼を用いる試験体ではディスク型シャキーと同じ 4.5ϕ とすることで、アンカー筋の降伏前に、付着破壊するように配慮する。

2.1.2 試験体形状

Fig.2 に付着実験で用いる試験体の諸元寸法を示す。付着実験では、 $1700 \times 800 \times 400\text{mm}$ の無筋コンクリートブロックの試験体を用い、その上面に、試験体パラメータに則して 160mm 間隔でアンカー筋を定着する。各パラメータで5本ずつ試験体を用意する。

2.1.3 載荷方法および計測方法

Fig.3 に加力装置図と計測方法を示す。コンクリートのコーン状破壊を防ぐため、Fig.3 に示す反力板 (Reaction plate) をアンカー筋の周囲に設置する。反力板の上に、溝型鋼を組み合わせて加力フレームを構成し、アンカー筋の頂部にセンターホールジャッキを設置し、このジャッキにより引抜き荷重 T を与える。載荷履歴は単調載荷とする。アンカー筋のコンクリート表面から 20mm の位置に計測用のプレートを取り付け、このコンクリート表面からの浮き上がりを左右2点計測して、これらの平均値を引抜き変位とする。

2.2 接着剤を違えたディスク型シャキーのせん断載荷実験

2.2.1 試験体パラメータ

Table4 に試験体パラメータを示す。せん断載荷実験のパラメータは、接着剤の種類およびコンクリート圧縮強度 σ_B である。接着剤の種類は付着実験と同様に有機系と無機系の2タイプ、 σ_B については付着実験と同様に3種類とした計6体の載荷実験を行う。アンカーボルトの有効埋め込み深さは全て $4.5Da$ (Da はアンカーボルトの軸径) である。また $F_c=9, 18\text{N/mm}^2$ とした試験体では、軸応力 σ_N を 0.5

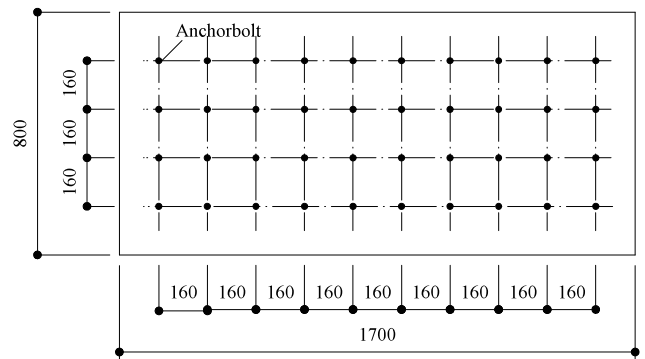


Fig.2 Test specimen for pull-out test

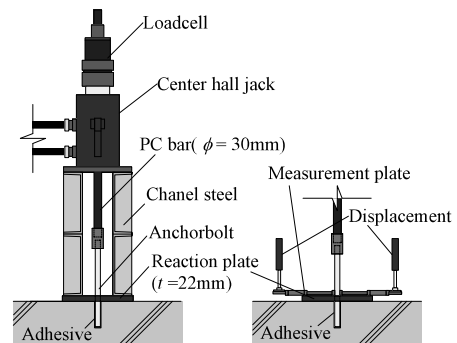


Fig.3 Loading set-up and measurement of pull-out test

N/mm^2 , $F_c=30N/mm^2$ では $\sigma_N=0.75N/mm^2$ とし、軸力として、 σ_N に接合面の面積(540mm×200mm)を乗じた値を与える。

2.2.2 試験体形状

Fig.4に試験体の諸元寸法を、Table5にグラウトおよび無機系接着剤の材料特性を示す。本試験体は、耐震補強部材を既存架構の内側に取り付ける、いわゆる「内付け耐震補強」の既存躯体から接合部までの一部を模擬したものである。既存躯体に相当するコンクリート部分は、幅400mm、長さ580mm、高さ200mmである。接合部に相当する増設側は、幅200mm、長さ540mm、高さ200mmである。コンクリート部分にディスク型シヤキーを定着した後に、接合面に

Table 4 Specimen list for shear loading test

Specimen name	Adhesive	σ_B (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
E09-50	Epoxy	11.1	15.5	1.03
C09-50	Cement-based			
E18-50	Epoxy	15.2	22.3	1.71
C18-50	Cement-based			
E30-75	Epoxy	34.8	30.7	2.76
C30-75	Cement-based			

σ_B : Concrete compressive strength, E_s : Young's modulus of concrete, σ_t : Concrete split strength

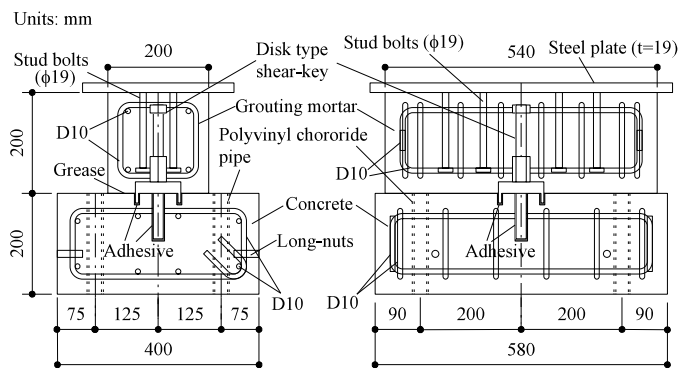


Fig.4 Details of specimens for shear loading test

Table 5 Material properties of concrete and grouting mortal

	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
Grouting mortal	67.9	21.9	3.2
Cement-based adhesive	53.2	18.5	3.0

σ_B : compressive strength, E_c : Young's modulus, σ_t : splitting strength

余分な摩擦抵抗を少なくするためにグリスを塗布し、2-φ19のスタッドを溶接した鋼板と鉄筋籠を設置して、接合面と鋼板の間にグラウトを圧入する。

2.2.3 加力方法

Fig.5に本実験の加力装置を示す。加力装置には、せん断荷用に2本、軸力荷用に1本の計3本の500kN油圧ジャッキを用いる。軸力荷用のジャッキの先端にロードセルを取り付け、これをガイドレールを介してコの字型加力ビームに固定する。またコの字型加力ビームを、平行クランクを用いて加力フレームに固定することで、せん断荷時に出来るだけ平行に変位するように配慮する。

試験体のコンクリート側は、コンクリートに埋め込んである塩ビ管に高強度ボルトを通して、加力フレームにナット締めし、せん断荷による回転に対する反力を得る。また、加力フレームに反力用の鋼製道具を取り付け、せん断荷重に対する反力とする。

2.2.4 計測方法

Fig.6に本実験の計測方法を示す。試験体の既存側コンクリートの高さ中央の位置に、インサートを2箇所埋め込み、これに50mm×50mmの角度鋼を固定する。ここにマグネットスタンドを用いて高感度変位計を固定し、グラウトに設置したターゲットの相対水平変位と相対鉛直変位を2箇所づつ計測し、それぞれの平均値をずれ変形 δ と目開量 ω とする。せん断荷重は水平方向の油圧ジャッキに取り付けたロードセルの値とする。荷重サイクルは正負交番の繰り返し荷重とし、 $\pm 0.25mm$, $\pm 0.5mm$ を1回、 $\pm 1mm$, $\pm 2mm$, $\pm 3mm$, $\pm 4mm$ を2回、 $\pm 6mm$ を1回の強制変位を与える。

3. 本解析の概要

本論文では、汎用有限要素解析ソフトDiana10.1を用いて、せん断荷重実験を対象に解析する。以下に、本解析の概要を述べる。

3.1 要素分割

Fig.7に本解析モデルを示す。(a)に要素分割図を、(b)に界面要素の位置と各界面要素のせん断応力-すべり曲線(以下 τ - S 曲線と記す)の概念図をそれぞれ示す。本研究では、まずは基礎的な解析を

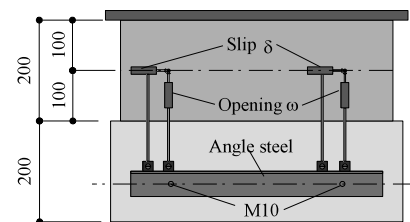


Fig.6 Details of measurements

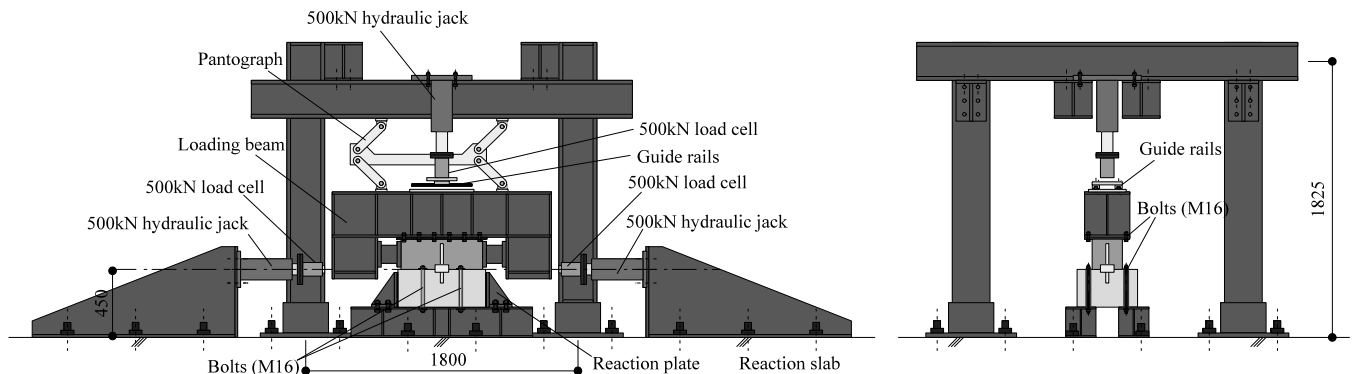
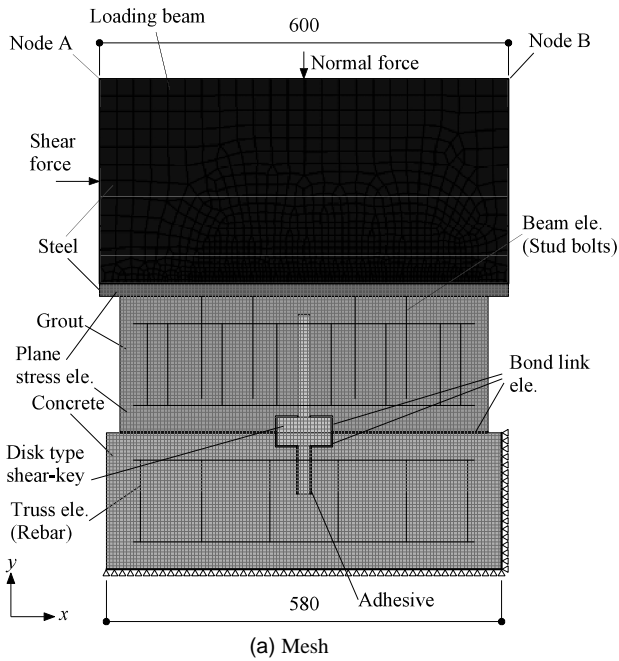


Fig.5 Loading equipment of shear loading test



(b) Joint elements and images of τ - s curves in shear direction

Fig.7 Modelling for FEM analysis

行うため、2次元有限要素解析を実施する。本解析モデルのサイズは、せん断載荷用試験体と同一であり、試験体から加力フレームの一部までをモデル化する。コンクリート、グラウト、加力フレーム、鋼板およびディスク型シヤキーのディスクとアンカーボルトには、平面応力要素を適用する。スタッドボルトは梁要素、補強鉄筋はトラス要素とした埋め込み鉄筋要素を用いる。

ここで上記の通り、基本的にはせん断載荷用試験体の寸法と同一になるように解析モデルの寸法を決定しているが、コンクリート要素の厚さは、試験体の400mmに対し、本解析では135mmとしている。この理由は、既往の論文³⁾で述べられているように、ディスク型シヤキーがせん断力を受けると、ディスク径 R_d ($R_d=90\text{mm}$)のおよそ1.5倍の範囲で既存コンクリートが大きく損傷するが、平面応力要素を用いて解析すると、奥行き方向の全断面が均一に応力を負担するため、要素厚さを400mmとすると、ディスク周囲に生じるコンクリートのひずみに対し、応力が過小に算出される。そこで、実際の破壊領域を考慮して、コンクリートの厚さを $1.5R_d$ とした。この設定値の妥当性については、解析結果と実験結果の比較から検証する。

また本解析モデルでは、1) グラウトとディスク、2) グラウトと接続ボルト、3) グラウトとコンクリート、4) コンクリートとディスクおよびアンカーボルトの4つの界面要素（ボンドリンク要素）を適

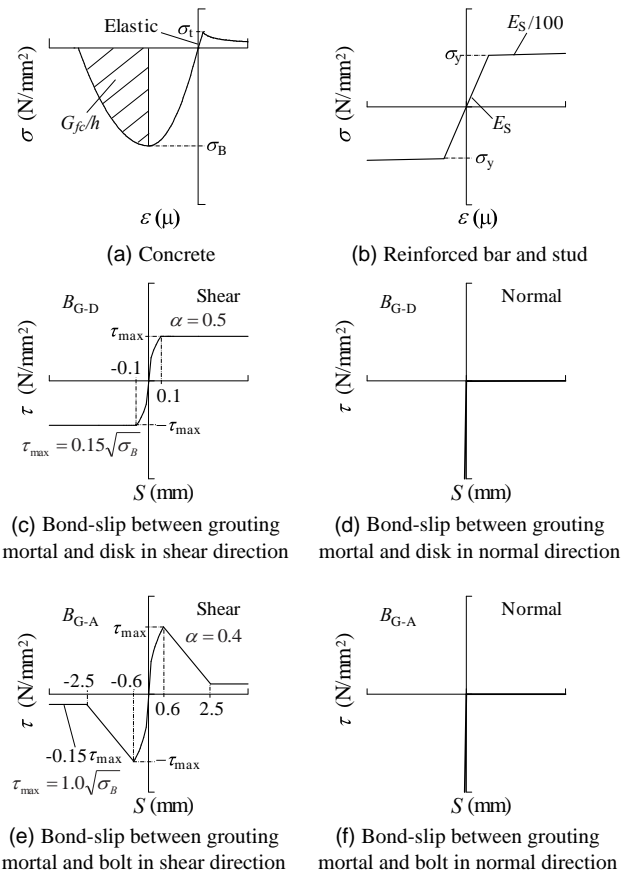


Fig.8 Constitutive laws

用し、それぞれ B_{G-D} 、 B_{G-A} 、 B_{G-C} 、 B_{C-D} と呼称する。グラウトとアンカーボルトについては、実験では接続ボルトの頂部に定着用のナットが取り付けられていることから、グラウトと接続ボルトの頂部の節点のみ完全付着とする。また、ディスク型シヤキーで使用されるアンカーボルトは、表面のほとんどが凹凸の無い滑らかな曲面であることから、 B_{C-D} と同じ界面要素を適用する。同様に、ディスクの下面も、ディスク側面と同じ表面を持つことから、 B_{C-D} を適用する。

3.2 材料構成則

Fig.8に材料構成則を示す。コンクリートとグラウトの構成則は回転ひび割れモデルを用いる。Fig.8(a)に示すように、等価一軸特性として圧縮側は破壊エネルギー G_{fc} を考慮した放物線モデル、引張側にも引張破壊エネルギー G_{ft} を考慮したHordijk Model⁷⁾を用いる。これらの破壊エネルギーは、既往の文献^{例えば6)}から次式により算出する。

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

$$G_{ft} = G_{fc}/250 \quad (2)$$

Fig.8(b)より鉄筋とスタッドはバイリニアモデルとする。加力フレーム、鋼板およびディスクはヤング率 205kN/mm^2 の弾性体とする。

次に、界面要素について記述する。 B_{G-D} のせん断方向（界面要素におけるせん断方向は、要素の接線方向を、垂直方向は法線方向を意味する）には、CEB-FIP(1990)⁸⁾モデルコードから鉄筋とコンクリートの付着-すべりモデルを適用する。グラウトとディスク表面では、高い付着強度を期待できないと考えられることから、同モデルで使用する各係数には、smooth barsのhot rolled barsにおけるAll other

bond conditions の値を適用する。界面垂直方向は Fig.8(d) に示すよう、引張に対しては十分に低い剛性、圧縮に対しては逆に十分に高い剛性を持つ弾性モデルとする。また、 $B_{G,A}$ のせん断方向も CEB-FIP モデルとし、接続ボルトにはねじ山があることから、この係数として unconfined concrete の All other bond conditions を適用する。 $B_{G,A}$ の界面垂直方向は $B_{G,D}$ と同一とする。

$B_{G,C}$ について、実験ではこの界面にグリスを塗布して付着を十分小さくしていることから、せん断方向は十分に低い剛性の弾性モデルとし、垂直方向は Fig.8(d) と同様とする。 $B_{C,D}$ についても、界面垂直方向は Fig.8(d) と同様とするが、せん断方向には付着実験の結果からモデル化することとし、この詳細は次章で述べる。

3.3 荷重条件および支持条件

前掲の Fig.7 に、加力点および支持点を示している。加力点は、本実験と同様に、せん断力を加力ビームの上下の中央位置に、軸力を左右中央の上縁に導入し、さらに鋼板が平行に移動するように、Fig.7 に示す節点 B の y 方向の変位が節点 A と同一になるように拘束する。支持方法についても本実験と類似するよう、コンクリートの右側側面で x 方向を固定し、コンクリート底辺で y 方向を固定する。

4. 付着実験およびせん断載荷実験の結果

4.1 付着実験の結果

Fig.9(a)～(i) に、付着実験の結果として各試験体の付着応力度-滑り (τ - S) 曲線を示す。また Table6 に実験結果の一覧を示す。この Table 6 の実験結果は、各パラメータにおいて付着応力度が最大値と最小値のものを除いた 3 体の試験体を対象としている。

以下の式⁴⁾を用いて、付着応力度 τ を算出する。

$$\tau = T / (\psi \times l_e) \quad (3)$$

ここに、 ψ はアンカー筋軸部の周長 (全ネジボルトについては公称径を用いて算出する)、 l_e は有効埋め込み深さ (実測値) である。

また、各種合成構造設計指針⁴⁾に基づいて、次式から基本付着強度 τ_{bavg} を算出する。

$$\tau_{bavg} = 10 \sqrt{\sigma_B / 21} \quad (4)$$

全ネジボルトを用いた試験体は、接着剤が大きく破壊しており、丸鋼を用いた試験体は、一部の試験体で表層コンクリートの破壊を伴いながら、基本的には接着剤とアンカーボルトの界面で破壊した。

Fig.9(a)～(c) には全ネジボルトおよび無機系接着剤を用いた付着実験の τ - S 曲線を示している。これらの図より、本実験で用いる無機系接着剤の最大付着応力度は τ_{bavg} を上回わり、Table6 に示しているように、これらの試験体の安全率 α は 2 前後の値を示している。文献⁴⁾によれば、付着耐力の安全率はおよそ 2 となると記述されていることから、本実験で用いた無機系接着剤は、一般に使用される有機系接着剤を用いた場合とほぼ同程度の付着耐力を発揮している。したがって、付着特性の観点からは、本無機系接着剤は十分な付着性能を有していると判断される。

次に丸鋼を用いたケースを観察する。Fig.9(d)～(f) より、有機系接着剤を用いると、付着強度を超える場合もあれば、下回る場合もあり、さらに標準偏差 σ が大きく最大耐力は不安定になる。この理由として、丸鋼は異形鉄筋や全ネジボルトと異なり、接着剤による鋼材表面の機械的抵抗を期待することができず、また注入型の接着剤を用

いていることから、接着剤とアンカー筋の間に僅かな空隙がある場合には、局所的に大きな応力が生じ、そこから破壊が進展するために、極端に付着応力が小さくなるケースが生じる可能性があるのではないかと考えられる。

最後に、Fig.9(g)～(i) に示す無機系接着剤を適用した方は、安全率がおおよそ 0.2~0.3 とかなり小さく、付着すべり特性も、最大耐力後、アンカー筋が抜け出すような挙動を呈する。この要因としても、前記の通り丸鋼には、アンカーボルトと接着剤の界面に、機械的な噛み合い作用をほとんど期待できないことに起因するためと考えられる。したがって、一般的な設計指針においても、丸鋼を用いた接着系アンカーの使用は認められていない。

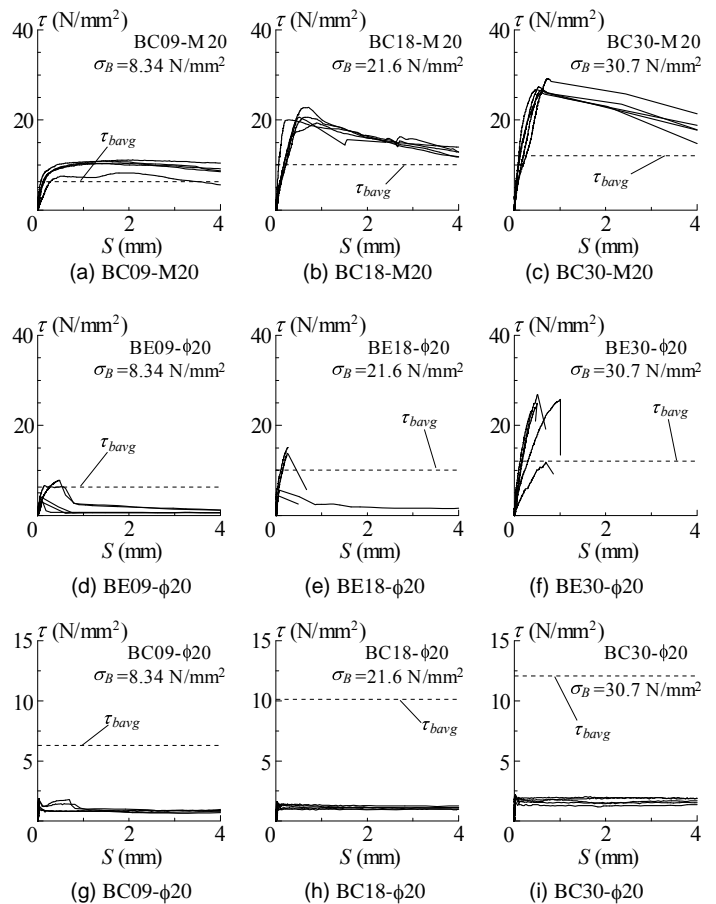


Fig.9 τ - S relations of pull-out test

Table 6 Results of pull-out test results

Specimen name	τ_{max} (N/mm ²)	S_{max} (mm)	τ_{bavg} (N/mm ²)	α	σ (N/mm ²)
BC09-M20	12.10	1.42	6.30	1.92	0.25
BC18-M20	23.43	0.49	10.13	2.31	0.39
BC30-M20	26.96	0.53	12.08	2.23	0.37
BE09-φ20	5.90	0.22	6.30	0.94	0.77
BE18-φ20	10.20	0.12	10.13	1.01	4.98
BE30-φ20	30.97	0.62	12.08	2.56	1.75
BC09-φ20	2.11	0.02	6.30	0.33	0.25
BC18-φ20	2.02	0.02	10.13	0.20	0.12
BC30-φ20	2.38	0.02	12.08	0.20	0.07

τ_{max} : Maximum bond stress, S_{max} : Slip when maximum bond stress, α : τ_{max}/τ_{bavg} , σ : Standard deviation

4.2 せん断載荷実験の結果

4.2.1 目開き量の推移による軸応力の妥当性

Fig.10(a)~(c)に、各試験体の目開き量 ω -ずれ変形 δ 曲線を示す。はじめに、既往のディスク型シャキーのせん断載荷実験³⁾では、鉄骨ブレースを既存RCフレームに取り付けた架構実験の結果に基づいて、下記の式によって目開きとずれ変形が制御されている。

$$\omega_t = 0.5 \times |\delta| \quad (5)$$

ω_t は目標目開き量である。本実験でもこの変位の条件を再現しなかったが、本せん断載荷装置の鉛直方向の制御が手動の油圧ポンプであることから、厳密に ω を制御することが困難であったため、軸応力一定制御とした。せん断耐力の評価では、 $\delta=2\text{mm}$ までに発揮する最大耐力を用いて、せん断耐力式が構築されており、この変位までの鉛直変位の挙動が重要である。Fig.10には、式(5)による ω_t も併記している。Fig.10(a)および(b)にそれぞれ示す $F_c=9\text{N/mm}^2$ および 18N/mm^2 の試験体について観察する。Fig.10(a)の両試験体の正側、

(b)のE18-50の正負両側、およびC18-50の負側においては、 $\delta=2\text{mm}$ までは ω の推移が ω_t にほぼ一致しているが、 $\delta=2\text{mm}$ 以降は ω が ω_t を下回る。これはコンクリートの損傷の影響やディスクの傾き具合など、僅かな実験状況の変化で ω が左右され、 ω と σ_N が単純な関係ではないことを示唆している。

続いて、 $F_c=30$ とした試験体について検証する。本実験の予備実験として、 $F_c=30$ の試験体も $\sigma_N=0.5$ で載荷したが、その結果 ω が ω_t よりも大きくなり、せん断荷重も想定より小さくなった。そこで、 $F_c=30$ の試験体については $\sigma_N=0.75\text{N/mm}^2$ として載荷することとした。Fig.10(c)より、C30-75の負側で ω の挙動が ω_t よりもやや大きめの推移となるが、全体的には ω の挙動と ω_t が一致している。

以上から、適切な軸応力の設定値、延いては接合部における変位挙動の評価については、課題が残されているが、本実験で設定した軸応力とすることで、既往の部材実験とほぼ同条件で実験結果を評価することができると思われる。

4.2.2 せん断荷重-ずれ変形関係

Fig.11(a)~(c)に、せん断載荷実験のせん断荷重 Q -ずれ変形 δ 曲線を示す。Table7に実験結果の一覧を示す。

ディスク型シャキーのせん断設計耐力^{3),9)}は下式で表される。

$$q_{jd} = 0.8 \times 0.235 A_B \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \sqrt{\sigma_B \times E_C} \quad (6)$$

$$A_B = \pi \cdot R_d \cdot h_d / 4 \quad (7)$$

$$K_1 = \begin{cases} e/e_e & (e < e_e) \\ 1.0 & (e_e \leq e) \end{cases} \quad (8)$$

$$K_2 = \begin{cases} L_e/4.5D_a & (3.0D_a \leq L_e < 4.5D_a) \\ 1.0 & (4.5D_a \leq L_e) \end{cases} \quad (9)$$

$$K_3 = \begin{cases} 1.0 & (\text{普通コンクリート}) \\ 0.9 & (\text{軽量コンクリート}) \end{cases} \quad (10)$$

ここに R_d はディスクの直径、 h_d はディスクの既存コンクリートへの埋め込み深さ($h_d=19\text{mm}$)である。 K_1 、 K_2 、 K_3 は補正係数であ

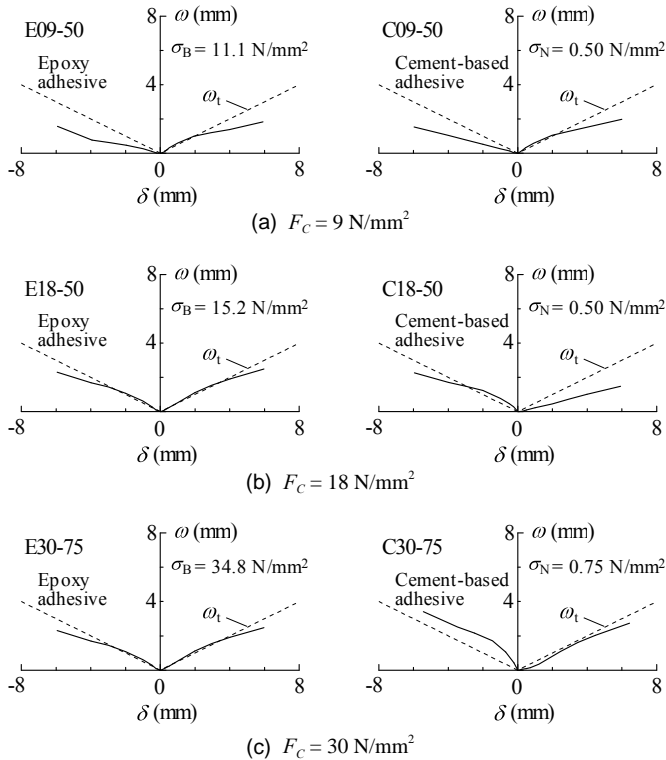


Fig.10 $\omega - \delta_s$ relations

Table 7 Results of shear loading test

Specimen name	q_{jd} (kN)	q_{max} (kN)		$\alpha=q_{max}/q_{jd}$	
		(+)	(-)	(+)	(-)
E09-50	106.7	139.3	-128.1	1.31	1.20
C09-50		128.9	-117.7	1.21	1.10
E18-50	150.2	183.9	-171.1	1.22	1.14
C18-50		169.0	-165.6	1.10	1.08
E30-75	266.2	296.6	-268.8	1.11	1.01
C30-75		268.2	-263.9	1.01	0.99

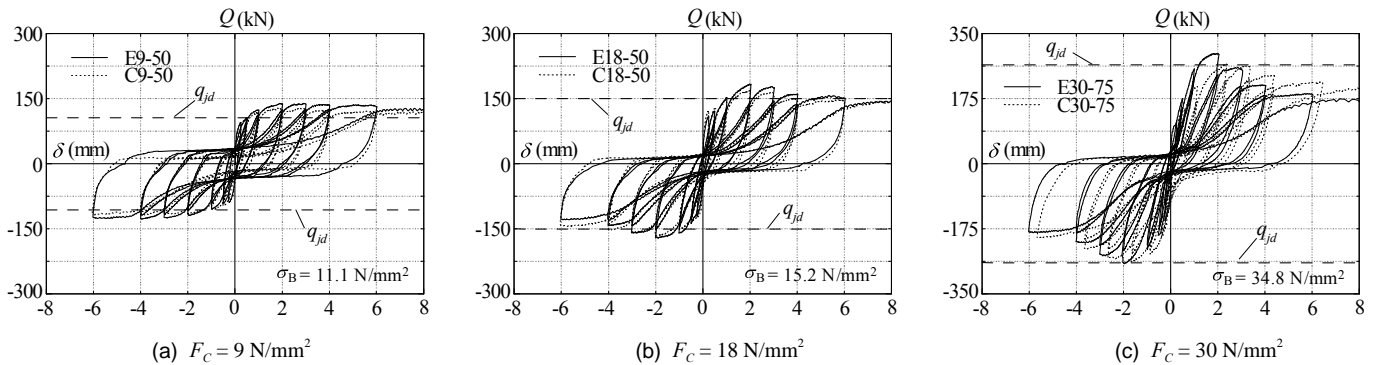
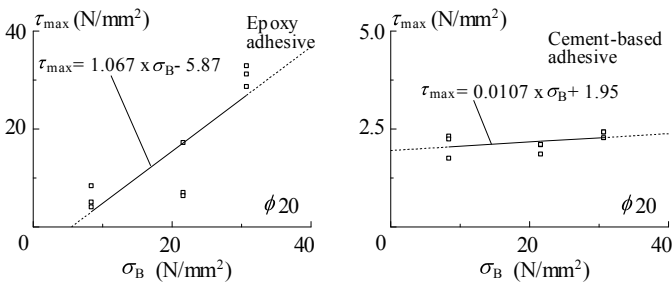


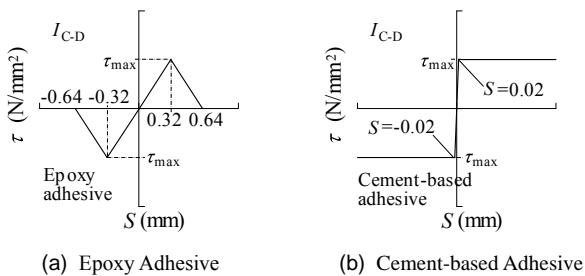
Fig.11 $Q - \delta$ curves

り、 K_1 の e はへりあき（ディスクの中心からへりまでの距離）、 e_c は $2.0R_d$ である。本実験では、普通コンクリートに対し、へりあきが200mm、有効埋め込み深さが $4.5D_a$ と、一般的な条件で使用していることから全て1となる。

Fig.11およびTable 7より、 Q_{max} と式(6)による設計耐力を比較すると、C30-75の負側で安全率が0.99であるが、これを除くと有機系接着剤を用いた試験体で1.0～1.3、無機系接着剤を用いた試験体で1.0～1.2の範囲となっている。また全ての試験体において、 $\delta=1\sim 2\text{mm}$ の範囲で設計荷重に達しており、有機系接着剤を用いた場



(a) Epoxy Adhesive (b) Cement-based Adhesive
Fig.12 Bond - Slip modelling of adhesives



(a) Epoxy Adhesive (b) Cement-based Adhesive
Fig.13 Bond - Slip modelling of adhesives

Table 8 Analysis case

Case	Analytical Case	F_c (N/mm ²)	Normal stress (N/mm ²)	τ_{max} (N/mm ²)	Anchorage type
Case-E	A-E09	9	0.5	5.98	Epoxy
	A-E18	18	0.5	10.35	
	A-E30	30	0.75	31.27	
Case-C	A-C09	9	0.5	2.07	Cement
	A-C18	18	0.5	2.12	
	A-C30	30	0.75	2.33	
Case-N	A-N09	9	0.5	0	Non
	A-N18	18	0.5	0	
	A-N30	30	0.75	0	

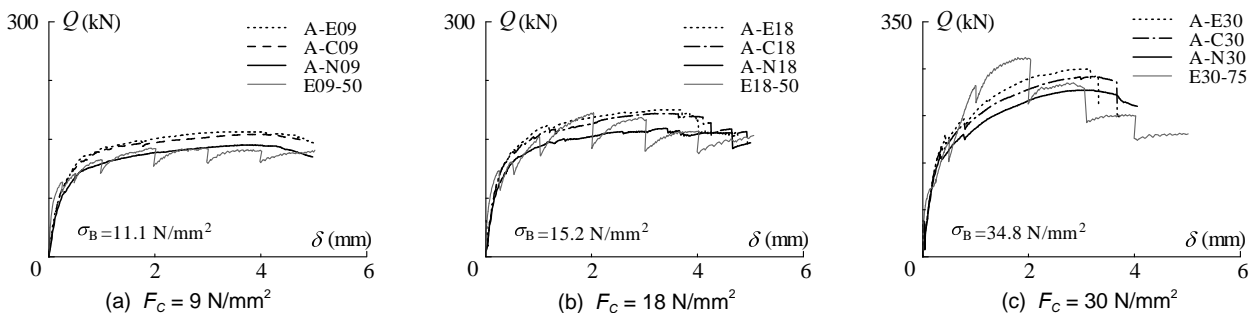


Fig.14 Analytical results and envelope curves

合³⁾と同様に、無機系接着剤を用いても十分に高い剛性を有していると判断される。なお、同じ σ_B の試験体どうしを比較すると、有機系接着剤を用いた試験体の方が、無機系接着剤を使用した場合よりも、正側の最大荷重 Q_{max} が1割程度大きい。また、前4.2.1項で触れた目開きの推移を改めて観察すると、無機系接着剤を用いた試験体の ω は、有機系接着剤を用いた試験体と比べ、同等かやや小さい値を呈している。一般に、目開きが大きいとせん断抵抗性能が低下するように思われるが、一方でせん断力が大きくなると目開き易くなるとも考えられる。そのため本実験では、同一の F_c の試験体で軸応力を同条件としていることから、ここで無機系接着剤の試験体のせん断耐力が低下した理由としては、接着剤の付着特性の違いによるものと考えるのが妥当である。

5. 2次元有限要素解析の結果

5.1 付着一滑り (τ - S) 関係のモデル化

Fig.12(a)および(b)に、付着実験における τ_{max} - σ_B 関係を示す。同図には回帰直線も示している。

本解析を実施する目的の一つは、接着剤の違い、延いては付着特性の違いがディスク型シャキーのせん断抵抗性能に及ぼす影響を検証することである。そのため、接着剤のモデル化は非常に重要である。ここでは、前章で観察した、丸鋼を用いた付着実験の結果に基づいて、解析に用いる付着-すべりモデルを構築する。

Fig.13(a)および(b)に有機系接着剤と無機系接着剤の付着-すべりモデルをそれぞれ示す。前掲のFig.9より有機系接着剤と無機系接着剤に分けてモデル化する。Fig.12に示す回帰式を使って最大付着強度を算出する。また、最大応力時のすべり量は、前掲のTable6に掲げている S_{max} より、有機系接着剤では3種類のコンクリート強度の平均値として $S=0.32\text{mm}$ 、無機系接着剤では $S=0.02\text{mm}$ とする。

ピーク後の挙動も、両接着剤で大きく異なることから、有機系接着剤では、最大応力後、応力が零になるように、無機系接着剤ではピーク応力を維持するようにモデル化する。ただし、非線形解析における収束性の問題から、有機系接着剤では最大応力の割線剛性と同じ勾配で $\tau=0$ になるように応力軟化させ、無機系接着剤については、割線剛性の1/100の剛性でひずみ硬化するモデルとした。

5.2 せん断荷重一ずれ変形関係の実験値との比較

Table 8に解析ケースを示す。Fig.14の(a)、(b)および(c)に、それぞれ $F_c=9$ 、18および 30N/mm^2 の解析結果と実験結果の包絡曲線の比較を示す。解析ケースとして、本せん断実験を模擬した6ケースに加え、接着剤の付着の影響を検証するために、敢えて付着特性をアンボンドとしたケースを加えた、計9ケースの解析を実施する。

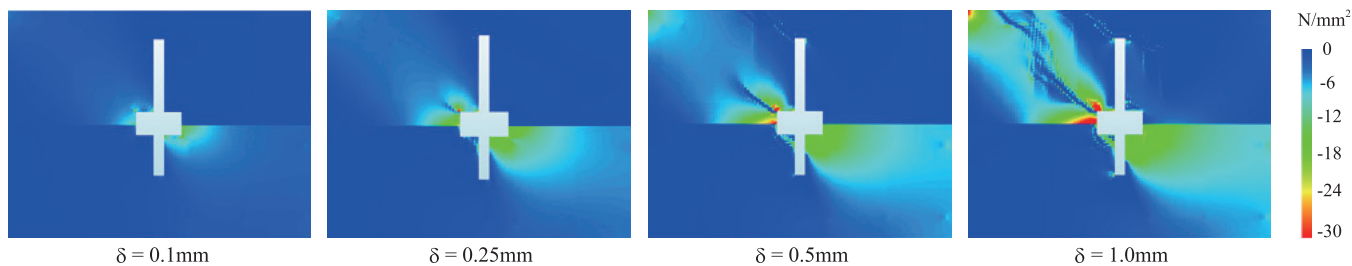


Fig.15 Minimum principle stress of concrete and grout in A-E09

付着特性を有機系接着剤、無機系接着剤、およびアンボンドとした解析ケースを、それぞれ Case-E, Case-C, Case-N と呼称する。

Fig.14(a) から A-E09 と E09-50 を比較すると、実験値である E09-50 よりも解析値の A-E09 の方が、Fig.14(c) では A-E30 よりも実験値である E30-75 の方が、それぞれやや大きめの値を示している。これに対し、Fig.14(b) では本解析 (A-E18) により概ね実験結果 (E18-50) を再現できている。本論文では解析的検討の初期段階であることから 2次元有限要素解析を行っており、コンクリートの厚さとして平面的な破壊状況からディスク径の 1.5 倍の数値を用いたが、この厚さを用いることで、概ね良好に実験結果を再現できそうである。

次に Fig.14 の各解析ケースを比較する。Case-E と Case-N を比較すると、(a)~(c) の全てにおいて、ずれ変形的全領域で Case-N の方がせん断力が 1 割近く小さくなる。また Case-C については、(a) では Case-E より僅かに小さい挙動を示し、(b) と (c) については Case-E と Case-A の中間を推移する。つまり、いずれにしても接着剤の付着特性が低い方が、せん断断荷実験と同様に、 Q - δ 曲線のせん断力も小さくなる傾向となった。したがって、接着剤の付着特性が、少なからずディスク型シャキーのせん断特性に影響を与えるものと推量される。

5.3 最小主応力分布および支圧抵抗領域

Fig.15 に $\delta=0.1\sim 1.0\text{mm}$ のコンクリートおよびグラウトの最小主応力分布を、Fig.16 にディスクの変位と支圧抵抗領域の関係を示す。Fig.15 の $\delta=0.1$ の最小主応力分布に着目すると、せん断断荷方向のディスク側面とディスク底面側に、応力が集中して生じていることが理解できる。すなわち、Fig.16 に示すように、ディスク型シャキーにせん断力が作用すると、アンカーボルトが抜け出しながら、ディスクが傾き、その結果、ディスク右側の側面のせん断断荷方向から、下面方向に圧縮 (支圧) 応力が生じ、さらにこのディスク下面方向への圧縮応力の増大に伴って、ディスクと既存側コンクリート間に摩擦応力が生じることで、増設側から既存側にせん断力が伝達すると推測される。

そこで、この応力の様相をより詳細に考察するために、アンカーボルトの左下隅の節点 (Fig.16 の Node-a) の鉛直変位 δ_y とディスクの右下隅の節点 (Fig.16 の Node-d) の鉛直変位 δ_y の推移を、それぞれ Fig.17 および Fig.18 に示す。本解析ではディスクを弾性体としているため、ディスクが変形することはほとんど無い。この Fig.17 と Fig.18 のグラフで、縦軸が正の値は、上方向に変位したことを意味する。また、設計せん断力に達する $\delta=2\text{mm}$ までの挙動を表示する。

Fig.17 より、 F_c に関わらず全体的に Case-N が最も鉛直変位が大きい。また Case-E と Case-C を比べると、Fig.17(a) および (b) では、両者とも同様の推移を示す。Fig.17(c) では $\delta=1\text{mm}$ までは、両者とも同

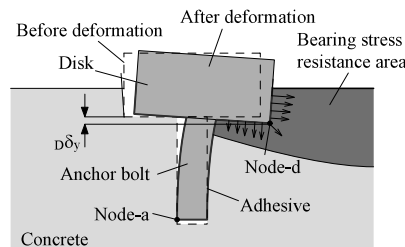


Fig.16 Relation between bearing resistance and displacement of Disk

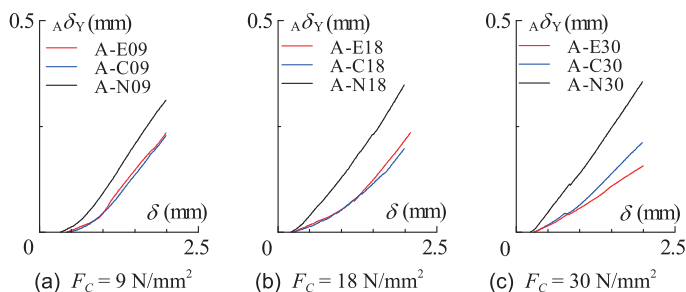


Fig.17 Vertical displacement of Node-a

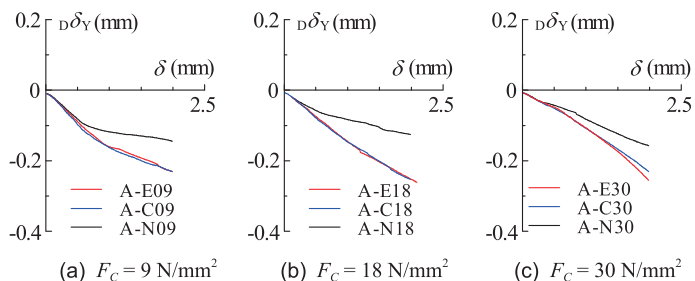


Fig.18 Vertical displacement of Node-d

様の挙動となるが、これ以降は Case-E の鉛直変位が小さくなる。続いて Fig.18 より、ディスクの右下端の鉛直変位に着目すると、大小の傾向は Fig.17 と同様である。さらに、これらの関係は Fig.14 に示した Q - δ 曲線の大小関係の傾向ともほぼ一致する。前掲の Fig.15 に示したように、ディスクの右下側の最小主応力が、 δ の進展とともに大きくなっていることから、アンカーボルトの付着性能が高くなると、アンカーボルトの抜け出しが小さくなり、ディスクが既存側コンクリートに接する面積が大きくなる。これにより、ディスク側面での支圧面積や、ディスク下方向への圧縮ひずみも大きくなるなど、様々な現象が複合することで、結果的にせん断力が大きくなったと推察される。

以上に述べた本論文全体の考察を総括すると、せん断断荷実験における Q - δ 曲線の特性や、例外はあるが最大耐力が設計せん断力を

ほぼ上回ったことから、無機系接着剤をディスク型シヤキーに適用しても、大きな問題はないと判断される。また接着剤の付着特性が、せん断抵抗性能に及ぼす影響について、有限要素解析により定性的な傾向を把握することができた。しかしながら、この定量的な評価までには至らず、さらに有機系接着剤と無機系接着剤の違いによる、せん断抵抗性能の差異を、解析で正確に再現することは出来なかった。今後、解析精度の向上や、さらには付着特性の違いを考慮した力学モデルおよび設計法を構築していきたいと考えている。

6. 結論

本論文では、無機系接着剤をディスク型シヤキーに適用できるか検証することを主たる目的として、接着剤の付着実験、ディスク型シヤキーのせん断載荷実験および2次元有限要素解析を実施した。以下に、本論文で得られた知見を列記する。

- 1) 本論文で用いたエポキシ系の有機接着剤を丸鋼に適用して付着実験を行った結果、最大強度は付着強度 τ_{bavg} に対し安全率が1を超える場合も、超えない場合もあり、どの F_c のケースでも標準偏差が大きく不安定であった。
- 2) 本論文で用いたセメント系の無機系接着剤を、全ネジボルトに適用して付着実験を実施した結果、有機系接着剤と大きな違いは見られなかった。しかしながら、丸鋼を用いた場合は付着強度 τ_{bavg} に対する安全率が0.2~0.3と非常に小さく、また最大荷重後に、丸鋼が滑り出し、荷重一定のまま引抜変位が進展した。
- 3) 主成分が大きく異なる有機系と無機系の2種類の接着剤を用いて、接合部を模擬したせん断載荷実験を行った結果、無機系接着剤を用いた場合の方が、1割程度せん断耐力が低下したが、設計せん断耐力式に対する安全率は、 $F_c=30N/mm^2$ のケースの負側で0.99となった以外は1を超えた。
- 4) 付着実験で得られた接着剤の付着すべり特性をモデル化し、せん断載荷実験を再現する2次元有限要素解析を実施した。平面応力要素を用いることから、要素厚さを支圧破壊領域に準じて $1.5R_d^{(3)}$ とすることで、実験結果を概ね再現できることが分かった。ただし、有機系接着剤と無機系接着剤の付着特性の違いが、せん断抵抗性能の違いに与える影響を正確に、解析で再現することは出来なかった。
- 5) 本解析の結果、付着特性をアンボンドとした解析ケースでは、接着剤の付着特性を考慮した場合に比べ、せん断力が小さくなった。この要因として、付着強度が小さくなると、アンカーボルトの抜け出しが大きくなり、これに伴ってディスク側面と底面での支圧抵抗や摩擦抵抗が小さくなったためと推測される。
- 6) 本論文で用いた無機系接着剤をディスク型シヤキーに適用して、せん断載荷実験および2次元有限要素解析を行った結果、現行の設計せん断耐力を超え、最大耐力時のずれも有機系接着剤を用いた場合と大きな差異はなく、十分に適用可能であると判断できる。無機系接着剤を用いた本せん断載荷実験の結果では、設計耐力に対する安全率がやや1を超える程度であったことから、実際の設計で用いる際には、十分余裕を持って安全側に設計する必要がある。また本検討結果は、無機系接着剤をディスク型シヤキーに適用した場合に適用できるものであり、一般的なあと施工アンカーに適用する場合には、改めて検証する必要がある。

謝辞

本研究に際し、室蘭工業大学平成28年度卒論生・岩崎稜君、サンコーテクノ・八木沢康衛氏、佐藤貴志氏には、多大なるご協力を賜りました。ここに、深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) The Japan Building Disaster Prevention Association: Seismic evaluation and retrofit, 2001.9 (in Japanese)
日本建築防災協会：2001年改定版 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，2001.9
- 2) Takase, Y., Sato, T., Imai, K., Onaka, A., Abe, T., Ikeda T. and Kubota M.: Basic investigation of new joint element having high shear strength and stiffness for earthquake retrofitting of concrete structures - Study on shear-key consisted of steel disk and anchor bolt for earthquake retrofitting-, Journal of Structural Construction Engineering(Transactions of AIJ), Vol. 77, No.681, pp.1727-1736, 2012.11 (in Japanese)
高瀬裕也他6名：コンクリート系構造物の耐震補強に用いる高いせん断耐力と剛性を持つ新たな接合要素のせん断抵抗性能の基礎的検証・鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震補強用シヤキーに関する研究・，日本建築学会構造系論文集，Vol.77, No.681, pp.1727~1736, 2012.11
- 3) Takase, Y., Abe, T., Itadani, H., Sato, T., Onaka, A., Kubota M. and Ikeda T.: Estimation method of horizontal capacity of joint fracture for retrofitted frame using disk shear-key - Study on shear-key consisted of steel disk and anchor bolt for earthquake retrofitting-, Journal of Structural Construction Engineering(Transactions of AIJ), Vol. 79, No.698, pp.507-515, 2014.4 (in Japanese)
高瀬裕也他6名：ディスク型シヤキーを用いた内付け補強架構の接合部破壊時の保有水平耐力の評価手法・鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震補強用シヤキーに関する研究・，日本建築学会構造系論文集，Vol.79, No.698, pp.507~515, 2014.4
- 4) Architectural Institute of Japan: Design recommendations for composite constructions, 2010 (in Japanese)
日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010
- 5) Ando, S., Nakano, K., Watanabe, K., Nakagawa, H., Tanuma, T., Yahata, S., Sakakibara, H. and Akasaka, T.: Average bond strength of post-installed rapid hardening cement bonded anchor, Summaries of Technical Papers of Annual meeting, Architectural Institute of Japan, Struct. IV, pp.201-202, 2012.9 (in Japanese)
安藤重裕ら他7名：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV, pp.201~202, 2012.9
- 6) Architectural Institute of Japan: Analytical models of concrete structures and their applications for design, 2008.3 (in Japanese)
日本建築学会：コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用，2008.3
- 7) Hordijk, D., A.: Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete: Experiments, modelling and analysis, Heron, Vol. 37, No.1, pp.35-39, 1992
- 8) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, pp.83, 1990
- 9) Sato, T., Yagisawa, Y., Ikeda T., Imai, K., Takase, Y., Onaka, A., Abe, T., Itadani, H. and Kubota, M.: Development of joint member using steel disk and anchor bolt for earthquake retrofit -Pt.6 Application of light-weight concrete-, Summaries of Technical Papers of Annual meeting, Architectural Institute of Japan, Struct. IV, pp.205~206, 2012.9 (in Japanese)
佐藤貴志ら他8名：鋼製ディスクとアンカーボルトを併用した耐震改修用接合部材の開発 その6 軽量コンクリートへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV, pp.205~206, 2012.9

ADAPTABILITY OF CEMENT-BASED ADHESIVE TO DISK TYPE SHEAR-KEY

Takahide ABE^{*1}, *Yuya TAKASE*^{*2}, *Sigehiro ANDO*^{*3},
Keita SAKAMOTO^{*4}, *Tsutomu TAMURA*^{*5} and *Takayuki KANEYOSHI*^{*6}

^{*1} Chief, Seismic solution department, TOBISHIMA Corporation

^{*2} Assoc. Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Ph.D.

^{*3} Manager, Concrete research laboratory, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd., Dr.Eng.

^{*4} Chief, Seismic solution department, TOBISHIMA Corporation, M.Eng.

^{*5} Subsection chief, Concrete research laboratory, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd.

^{*6} Manager, Cement-related products division, SUMITOMO OSAKA CEMENT Co., Ltd.

Seismic retrofitting has recently become crucial for buildings designed under old seismic codes. Post-installed anchors or disk-type shear keys are generally applied to joints of seismic retrofitting structures, which are further anchored to the existing members by applying epoxy adhesives. Although epoxy adhesives have been studied extensively, few studies exist on cement-based adhesives. Therefore, we conducted a pull-out test, a shear loading test, and a two-dimensional (2D) FEM analysis to investigate the adaptability of cement-based adhesives to disk-type shear keys.

In Chapter 2, the test plans for the pull-out and shear loading tests are detailed. Nine specimens were prepared for each test. The parameters of the pull-out test include the concrete compressive strength σ_B (10–30 N/mm²), adhesive type (epoxy or cement-based adhesive), and anchor bolt type (fully threaded bolt or round steel bar). The parameters of the shear loading test are σ_B and adhesive type.

In Chapter 3, the FEM analysis is outlined. In this analysis, the concrete and the steel are considered as a plane stress element, the stud bolts as a beam element, and reinforced bars as a truss element. A concrete thickness of 135 mm ($=1.5R_d$, where R_d is the diameter of the steel disk) is considered as the damage area of the disk-type shear key. The analytical parameters are the concrete compressive strength σ_B and the adhesive type. In adhesive type, the case of “unbonded” is also added as a parameter.

Chapter 4 describes the test results. According to the results of the pull-out test, use of the cement-based adhesive with a fully threaded bar resulted in the same maximum bond stress as with epoxy adhesives. However, the maximum bond strength was 0.2–0.3 times the bond strength in case of a round steel bar. The shear loading test results indicated that the shear forces of the cement-based adhesive were slightly smaller than those when the epoxy adhesive was used.

Chapter 5 describes the analytical results. First, the bond–slip behavior of adhesives was modeled from the results of the pull-out test. The analytical outcomes of the nine cases were calculated. The $Q - \delta$ curves obtained from the analysis and the experiment were similar. Moreover, the shear forces in the unbonded case were smaller than those in case of epoxy and cement-based adhesives because the bearing resistance area was smaller because of the pulling out of the anchor bolt.

Chapter 6 presents the conclusions of the study, which are summarized as follows:

- 1) The results of the pull-out test using an epoxy adhesive and a round steel bar show a safety ratio exceeding 1.0, but with a higher standard deviation.
- 2) The pull-out test results indicate that the combination of a cement-based adhesive and a fully threaded bar resulted in the maximum bond stress same as that in case the when an epoxy adhesive was used. However, a round steel bar exhibited the maximum bond strength that was 0.2–0.3 times the bond strength.
- 3) The shear loading test results show that the maximum shear force of the specimens using cement-based adhesives was approximately 10% smaller than that of the specimens using epoxy adhesives. These maximum shear forces were, however, higher than the calculated shear strength in most specimens.
- 4) The shear behavior could be reproduced by the 2D FEM analysis by setting the concrete element thickness to $1.5 R_d$.
- 5) The bond strength and the vertical displacement of the anchor bolt obtained by the analysis were smaller and larger, respectively, compared with the experimental results.
- 6) From these investigations, it was concluded that cement-based adhesives can be applied to disk type shear keys.

(2017年7月10日原稿受理, 2018年2月19日採用決定)