

論文 制震ダンパー付き鋼製間柱 - R C 梁接合部の構造性能

植松 工^{*1}・倉本 洋^{*2}・中村 博志^{*3}・所 健^{*4}

要旨：本研究では，制震ダンパー付き鋼製間柱による制震補強工法の開発を念頭に置いて，RC 梁と間柱との接合部の構造性能を把握するための要素実験を行った。対象とする接合部の特色は接着系アンカーによる機械的接合とエポキシ樹脂注入による接着接合を併用している点である。本論文では，実験結果に基づいて当該接合方法が鋼製間柱による制震補強工法に適用可能であることを明らかにした。

キーワード：制震補強，接着系アンカー，接着接合，制震ダンパー

1. はじめに

阪神・淡路大震災後，学校建物等の一部の公共建物では耐震改修が進んでいるが，意匠上の問題や居ながら補強を要するという問題から集合住宅等の建物では進んでいないのが現状である。一方，近年意匠上の問題を低減できる工法として，間柱型のダンパーによる補強検討がなされ，実施例もある。しかし，その多くは図 - 1 に示すように梁に貫通孔を明け，P C 鋼棒を用いて緊結するものである。この工法では，貫通孔を明ける際に主筋を切断する可能性があり，また作業が上下階で行う必要がある等の問題があった。そこで筆者らは上下階作業を必要としない図 - 2 に示すアンカーによる機械的接合とエポキシ樹脂による接着接合を併用した固定方法を考案した。アンカーによる機械的接合と接着接合を併用した方法は小宮ら¹⁾のものがあるが，純せん断力を負担させるものであり，本研究のような曲げとせん断を負担させるものでは前例がない。本研究では，間柱型ダンパーの固定工法への適用を目的として，その耐力と剛性に及ぼす影響を構造実験により確かめ，その有用性を検討するものである。本論では，構造実験の概要および固定部の耐力と剛性の評価方法に関する検討結果を述べる。

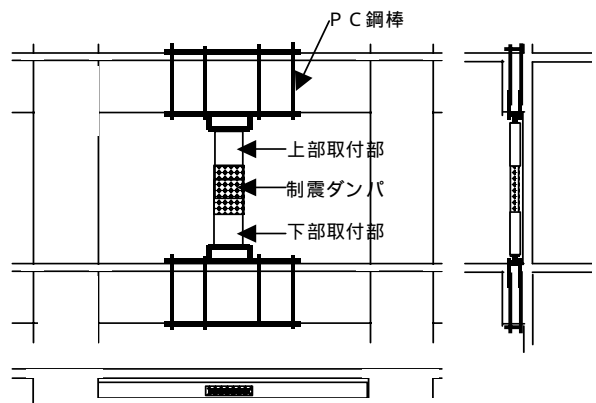


図 - 1 従来の間柱型ダンパー

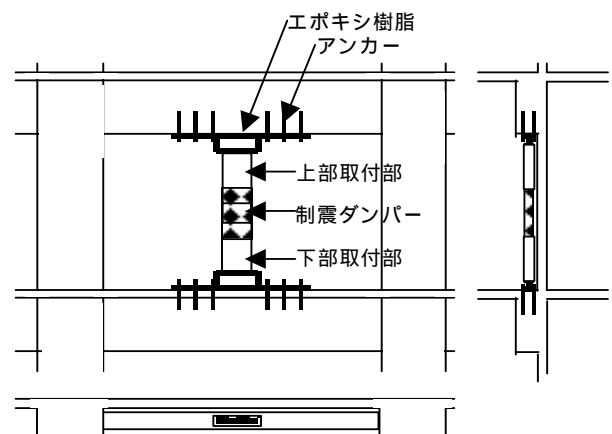


図 - 2 アンカーと樹脂を用いた間柱型ダンパー

2. 実験概要

2.1 試験体種類と形状

試験体は表 - 1 に示すパラメーターをアンカー径とアンカー本数とした 3 種類である。形状

*1 ショーボンド建設株式会社 東京建築支店 技術課長 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系 助教授 工博 (正会員)

*3 新日本製鐵株式会社 建築事業部 工博

*4 住友スリーエム株式会社 グラフィック・コンストラクション技術サービス部

は図 - 3 に示すように、ダンパーが内法高さ中央にある実物大の鋼製間柱部分をコンクリート部に接着系アンカーとエポキシ樹脂注入で取り付けした形状とし、載荷位置がダンパーの中央の位置となるように計画した。なお、コンクリート部は固定スタブの上にせん断補強筋量の少ない ($P_w=0.2\%$) 梁型を設けている。また、施工性を考慮して図 - 4 に示すようにアンカー筋が通る鋼材 (ベースプレート) の孔はルーズホールとし、間隙には樹脂を充填している。

2.2 使用材料

各材料試験結果を表 - 2 ~ 表 - 4 に示す。鋼製間柱と RC 梁の接合部には、カプセル型の接着系アンカーを用いず、エポキシ樹脂を孔部に注入してその後アンカー筋を挿入する方法を採った。また、鋼材とコンクリートの接着は、鋼材をコンクリートの上に 10 mm の隙間をあけて設置し、エポキシ系パテ材でシールし、その硬化後にエポキシ樹脂を注入した。なお、アンカーの有効穿孔深さは $10d_a$ (d_a : アンカー筋径) とした。

表 - 1 試験体一覧

| 試験体 | 鉄筋径 | アンカー筋 | | 接着面積 (mm^2) |
|--------|-----|-------|-------------------|---------------------------|
| | | (本数) | (mm^2) | |
| D22-5W | D22 | 10 | 3870.0 | 305000 |
| D16-5W | D16 | 14 | 2780.4 | 305000 |
| D16-7W | D16 | 10 | 1986.0 | 305000 |

表 - 2 コンクリート材料試験結果

| 試験体 | 圧縮強度 N/ mm^2 | 引張強度 N/ mm^2 | 弾性係数 N/ mm^2 |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 5WD16 | 26.1 | — | 27200 |
| 7WD16 | 25.7 | 2.51 | 27500 |
| 5WD22 | 27.4 | 2.45 | 26500 |

表 - 3 鉄筋および鋼材材料試験結果

| | | 降伏強度 N/ mm^2 | 引張強さ N/ mm^2 | |
|----|-------|--------------------------|--------------------------|-----|
| 鉄筋 | 梁鉄筋 | D10 | 344 | 487 |
| | | D19 | 390 | 549 |
| | アンカー筋 | D16 | 359 | 512 |
| | | D22 | 381 | 563 |
| 鋼材 | 12mm | 312 | 433 | |
| | 16mm | 279 | 418 | |
| | 22mm | 275 | 420 | |

表 - 4 エポキシ樹脂試験結果

| | | |
|---------|------------------|------|
| 圧縮降伏強さ | N/ mm^2 | 69.8 |
| 圧縮弾性係数 | N/ mm^2 | 2119 |
| 引張強さ | N/ mm^2 | 53.3 |
| 引張せん断強さ | N/ mm^2 | 17.4 |

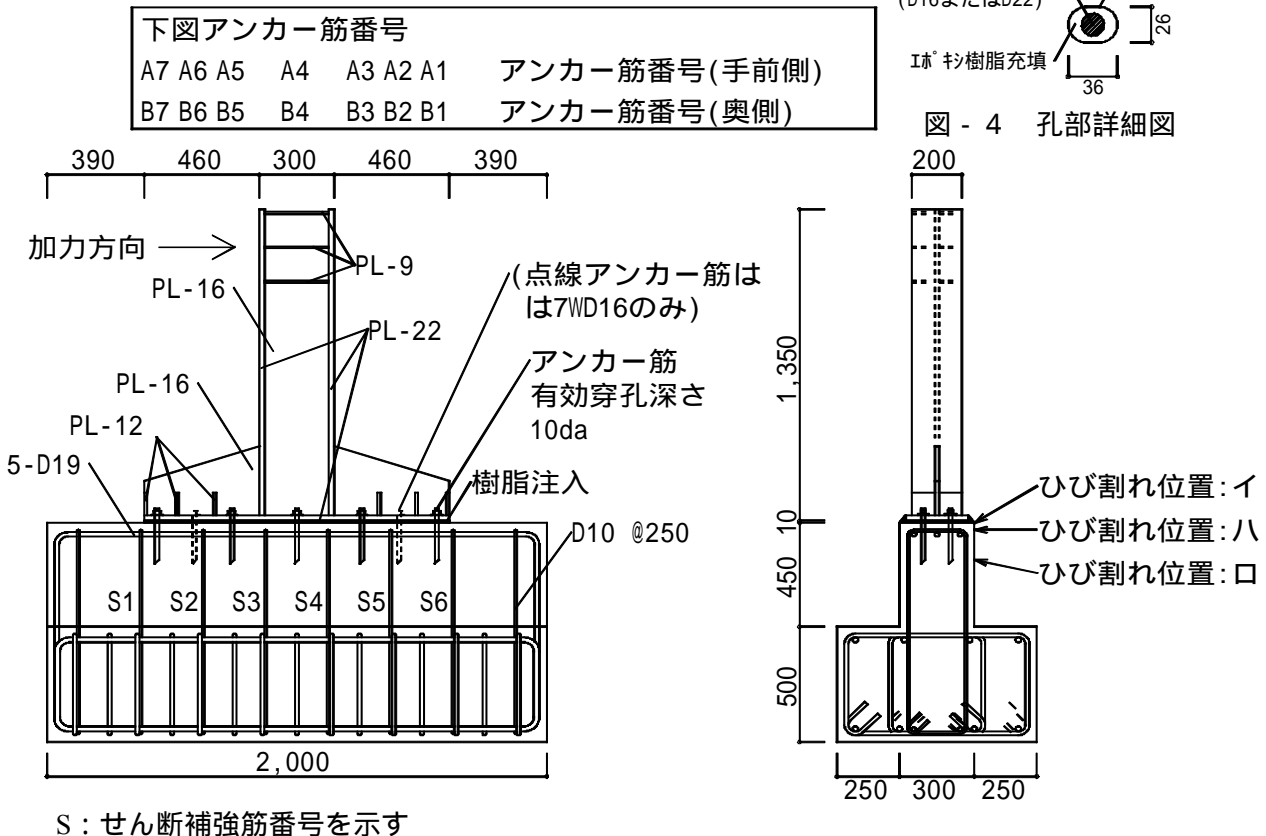


図 - 3 試験体形状 (寸法単位 mm)

2.3 加力方法

図 - 5 に加力装置の概要を示す。水平加力は正負交番载荷とし、それぞれ 49kN で 3 回、98kN で 3 回ずつ繰り返す、最初の 98kN 時のサイクルにおける加力点の水平変位を（表 - 5 参照）として、1.5、2、3 で各 3 回正負繰り返した後、破壊まで加力を行った。

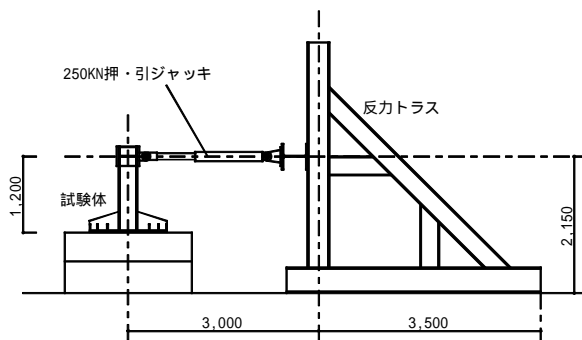


図 - 5 加力装置概要（寸法単位：mm）

3. 実験結果

3.1 破壊経過と荷重 - 変形関係

荷重 - 変形包絡線を図 - 6 に示す。各試験体共に梁側面にひび割れ発生まではほぼ同じ荷重 - 変形関係を示した。また、最大耐力後の耐力低下の程度は試験体によって異なるが、破壊経過にほとんど差異はなく、水平変位 $\delta = 0.2 \sim 1.2\text{mm}$ でアンカーボルトの歪みが急増し、 $\delta = 1.5 \sim 1.7\text{mm}$ でコンクリートとエポキシ樹脂界面が剥離した（図 - 3 ひび割れ位置イ）。 $\delta = 2.5 \sim 3.0\text{mm}$ で引張側端部ボルト底部付近から梁側

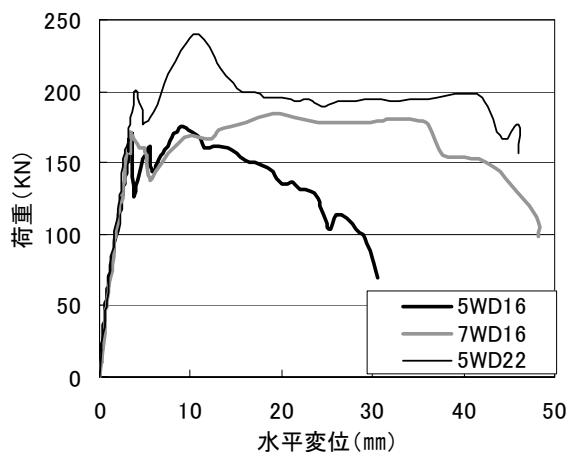
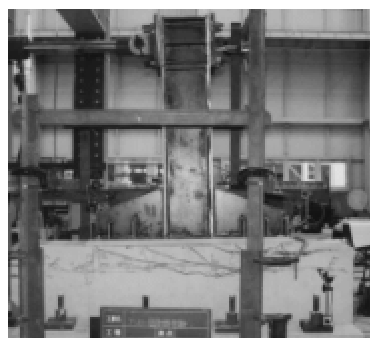


図 - 6 荷重変形包絡線

表 - 5 各試験体履歴現象一覧

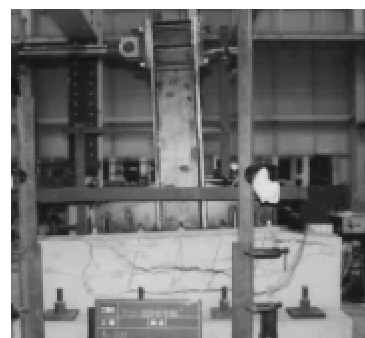
| 状態 | 5WD16 | | | | | | 7WD16 | | | | | | 5WD22 | | | | | |
|-----------------|-------|----|---------|------------|---------|-------|-------|----|---------|------------|---------|---------------|-------|----|---------|------------|---------|-------|
| | サイクル | 正負 | 変位 (mm) | 層間変形角 | 荷重 (kN) | 位置 | サイクル | 正負 | 変位 (mm) | 層間変形角 | 荷重 (kN) | 位置 | サイクル | 正負 | 変位 (mm) | 層間変形角 | 荷重 (kN) | 位置 |
| 98kN時の δ | 4 | 正 | 1.86 | 1.55/1000 | 98 | | 4 | 正 | 1.74 | 1.45/1000 | 98 | | 4 | 正 | 1.66 | 1.38/1000 | 98 | |
| アンカー筋の急激な歪 | 4 | 正 | 1.20 | 1.00/1000 | 78 | A5,B5 | 4 | 正 | 1.00 | 0.83/1000 | 59 | A5,B5 | 4 | 正 | 0.20 | 0.16/1000 | 59 | A5,B5 |
| 接着接合部の剥離 | 4 | 正 | 1.60 | 1.33/1000 | 93 | 引張側端部 | 4 | 負 | 1.56 | 1.30/1000 | 98 | 引張側端部 | 4 | 正 | 1.72 | 1.43/1000 | 78 | 引張側端部 |
| 梁側面のひび割れ | 10 | 負 | -3.53 | -2.94/1000 | -181 | 引張側端部 | 13 | 正 | 3.47 | 2.89/1000 | 172 | 引張側端部 | 12 | 負 | -3.20 | -2.66/1000 | -166 | 引張側端部 |
| せん断補強筋の急激な歪み増加 | 10 | 負 | -3.62 | -3.01/1000 | -171 | S4,S5 | 13 | 正 | 3.47 | 2.89/1000 | 172 | S1,S3 S2降伏 | 10 | 負 | -3.15 | -2.62/1000 | -172 | S4,S5 |
| 最大耐力(正側) | 16 | 正 | 9.03 | 7.52/1000 | 175 | | 16 | 正 | 19.04 | 15.86/1000 | 184 | | 16 | 正 | 11.04 | 9.20/1000 | 240 | |
| 最大耐力(負側) | 10 | 負 | -3.61 | -3.00/1000 | -183 | | 12 | 負 | -2.98 | -2.48/1000 | -177 | | 13 | 負 | -4.86 | -4.05/1000 | -196 | |
| 破壊 | 16 | 正 | 30.50 | 25.41/1000 | 69 | | 16 | 正 | 48.28 | 40.23/1000 | 98 | | 16 | 正 | 46.00 | 38.33/1000 | 176 | |



(a) 5WD16



(b) 7WD16



(c) 5WD22

写真 - 1 実験終了後の状況

面へのひび割れが発生し(図 - 3 ひび割れ位置口), 概ね $\approx 9.0 \sim 19.0\text{mm}$ で最大耐力に至った。その後, 試験体 5WD16 では $\approx 30.5\text{mm}$ で, 試験体 7WD16 では $\approx 40.2\text{mm}$ で, および試験体 5WD22 では $\approx 46.0\text{mm}$ で, それぞれコンクリート梁部の破壊を生じた。また, 全ての試験体で鋼材の降伏は認められなかった。なお, 図 - 3 に示されるように, アンカー有効穿孔深さを全て $10d_a$ としたが, 本数の少ない試験体 5WD16 では, 梁部の破壊面が梁上端筋位置付近に生じたため(図 - 3 ひび割れ位置ハ), せん断補強筋による応力再配分が良好でなく, 他の試験体と比べて最大耐力以後の変形能力が小さい結果となっている。各試験体の履歴現象一覧を表 - 5 に示すと共に写真 - 1 に実験終了時の破壊状態を示す。なお, 表 - 5 中のアンカー筋番号およびせん断補強筋番号は図 - 3 によるものとする。

3.2 線形性と剛性

想定しているダンパーの最大荷重 98kN まで(1 ~ 6 サイクル)の各試験体の荷重 - 変形曲線を図 - 7 に示す。この図からわかるように全ての試験体とも概ね 0 点を回帰する線形的な挙動を示した。また, 試験体の違いによる剛性の差は顕著には認められなかった。

3.3 変形とボルト歪み

正加力時の引張側外端(A7)と柱引張フランジの外側(A5)のアンカーボルトの歪みと水平荷重の関係(アンカーボルト歪み 100μ まで)を図 - 8 に示す。いずれの試験体も鋼材ベースプレート部の剛性が, 柱本体の剛性より低いため, まず柱フランジに近いA5ボルトの歪みが増大し, その後すぐに外端のA7ボルトの歪みが増大していることが認められる。また, ボルト歪みが急激に増大した直後(約 50kN)からエポキシ樹脂とコンクリートの界面が剥離している。

4. 接合部としての検討結果

4.1 耐力

荷重 - 変形包絡線および破壊経過から, 今回

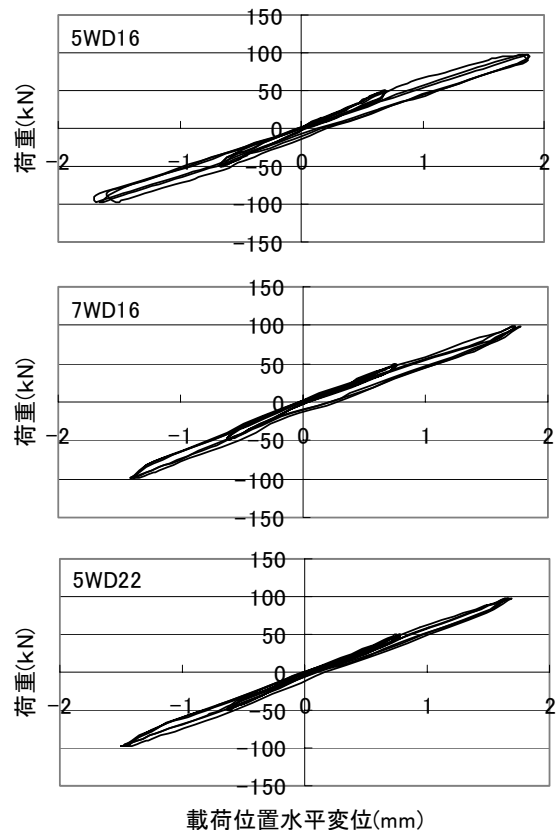


図 - 7 1 ~ 6 サイクルの荷重 - 変形曲線

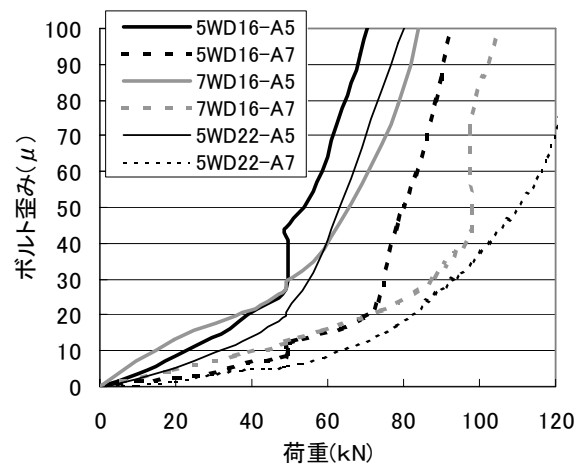


図 - 8 アンカーボルト歪み - 荷重曲線

行った実験では, コンクリートとエポキシ樹脂界面の剥離では最大耐力は決定せず, アンカーの引き抜き耐力で決定している。また, 最大耐力まで剛性は大きく低下していない。したがって, 間柱型ダンパーの接合部として, アンカーによって決まる耐力を評価して問題ないと考え検討を行った。

ところで、毛井²⁾らは耐震補強用の鉄骨ブレースの接合部として樹脂による接着接合について検討を行っているが、その接合部は剥離耐力がコンクリートの引張強度と接着面積により決定し、剥離後に支圧力があれば摩擦によって抵抗すると仮定して接合部耐力式を提案している。今回の実験においても、図 - 9 に示すように剥離後、引張側は最も外側に配置したアンカー筋による引張力 N_{an} により抵抗し、その反力として圧縮力 N_v が発生すると共に摩擦力 Q_{jf} も発生するものと考えられる。したがって、接合部の最大耐力 Q_{jfmax} は文献 2) に準じて式(1)に示すように算出できるものと仮定する。

$$Q_{jfmax} = \min(cQ_{jf}, tQ_{jf}) \quad (1)$$

$$cQ_{jf} = N_v \cdot \mu (= N_{an} \cdot \mu)$$

$$tQ_{jf} = N_{an} \cdot L_o / H_o$$

ここに、 N_v ：接合部圧縮側反力

N_{an} ：最も外側に配置した引張側アンカー筋 1 本の接合耐力

μ ：摩擦係数 ($\mu = 1.0$)

なお、引張側アンカー筋 1 本の接合耐力は文献 3) に示された耐力式により算定する。表 - 6 に示す計算結果と実験値の比較から式(1)は安全側に最大耐力を評価できることがわかる。

4.2 FEM 解析結果と剛性

(1) 解析モデル

今回の実験では、図 - 8 に示したように間柱近くのアンカーボルトの歪みが先に増大したことから、間柱フランジ部分の力が拡幅された固定部ベースプレートにうまく伝達されていないことが懸念される。そこで、ベースプレートの剛性が接合部の挙動に及ぼす影響を把握することを目的とした FEM 解析を行った。

解析では図 - 10 に示すように、剛体の上にエポキシ樹脂とベースプレートを 20 節点立体要素とし、その上の鋼材を 8 節点シェル要素とし、そして載荷点に剛体の立体要素を用いてモデル化した。また、樹脂と剛体間には接着接合部の剥離荷重としてコンクリートの引張強度 ($0.31 B = 1.55 N/mm^2$) を設定し、剥離後は鉛直方

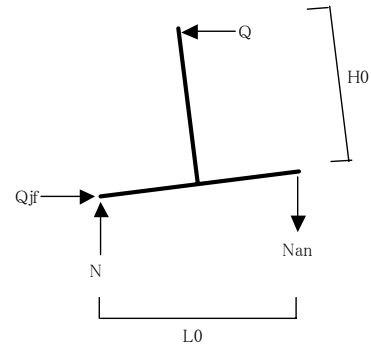


図 - 9 摩擦移行後の抵抗モデル

表 - 6 実験結果と計算値

| 試験体 | 接合部 摩擦抵抗耐力 Q_{jf} kN | 梁側面ひび割れ発生荷重 実験値 kN | 最大耐力 実験値 kN |
|-------|---------------------------------|--------------------------|-------------------|
| 5WD16 | 103.1 | 181.0 | 175.0 |
| 7WD16 | 103.1 | 172.0 | 184.0 |
| 5WD22 | 145.1 | 166.0 | 240.0 |

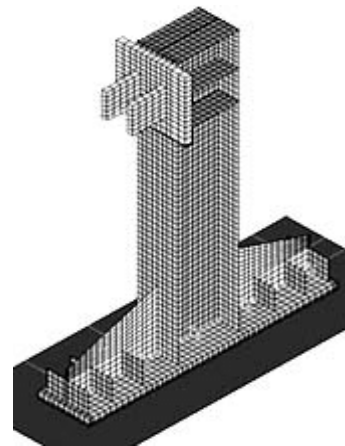


図 - 10 FEM 解析モデル

向も水平方向も力を伝達しないものとした。アンカーボルトはエポキシ樹脂を無視し弾性係数と径と長さ $10d_a$ に見合うバネを入れたモデルとした。各材料の弾性係数は材料試験結果を用い、弾性体として解析した。比較のため鋼材下端を剛としたものも解析を行った。なお、解析プログラムには汎用性有限要素解析コード (MARC) を使用した。

(2) 解析結果と剛性

図 - 11 にベースプレートと RC 梁の接合部を完全固定とした場合の解析結果 (細実線) および試験体 5WD16 に対する解析結果 (点線) と実験結果 (太実線) をそれぞれ示す。解析結果

より、接着接合部が剥離するまでは完全固定モデルとほぼ同じ挙動を示し、20kN から剥離し始め引張側となる部分は 30kN までに全て剥離し、その後また弾性的な挙動を示す結果となった。ダンパー最大荷重時における変位に着目すると、完全固定では1.2mm、5WD16では1.75mmであり、46%変形が増加しており、実際の制震補強設計時には考慮する必要がある。

なお、FEM 解析結果と実験結果がほぼ一致することから、ここで仮定したモデルによって、アンカーによる機械的接合とエポキシ樹脂による接着接合を併用した固定方法に対する解析が可能であると考えられる。

4.3 繰り返しの影響

図 - 1 2 に各荷重サイクルの正加力 98kN 時の剛性を示す。実験では同じ変形で3回繰り返す交番载荷を行ったが、図からもわかるように同じ変形の時には最大耐力に達するまでは剛性の変化は少ない。したがって、ダンパーの想定最大荷重以上に接合部の耐力設計を行えば、剛性低下の危険は少ないと考えられる。

5. まとめ

制震ダンパー付間柱の接合部に適用することを念頭に置いて、アンカーと接着を併用した接合部の構造実験を実施した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 当該接合部は、コンクリートと樹脂との界面が剥離した後も水平力に抵抗する。
- (2) 接合部の耐力は式(1)で算定できる。
- (3) 当該接合部の初期剛性は、樹脂を考慮した FEM 解析によって算定できる。
- (4) 最大耐力達するまでは剛性に及ぼす繰り返し载荷の影響は少ない。

<謝辞>

本研究を行うにあたり、東京工業大学・和田章教授および笠井和彦教授にご助言、ご指導を頂きました。また、ショーボンド建設(株)補修工

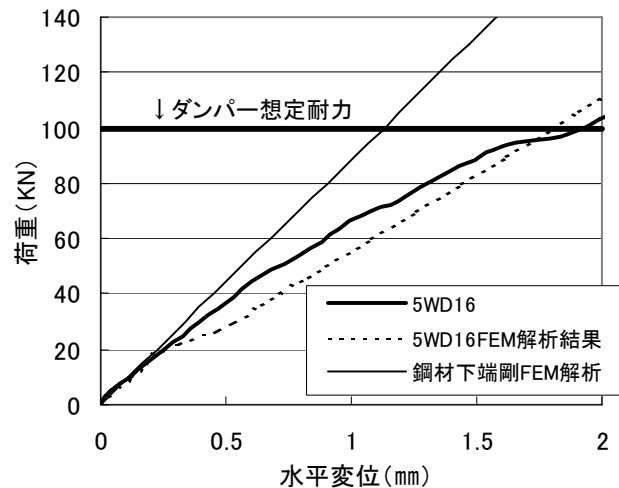


図 - 1 1 FEM 解析結果と実験結果の荷重 - 変形関係

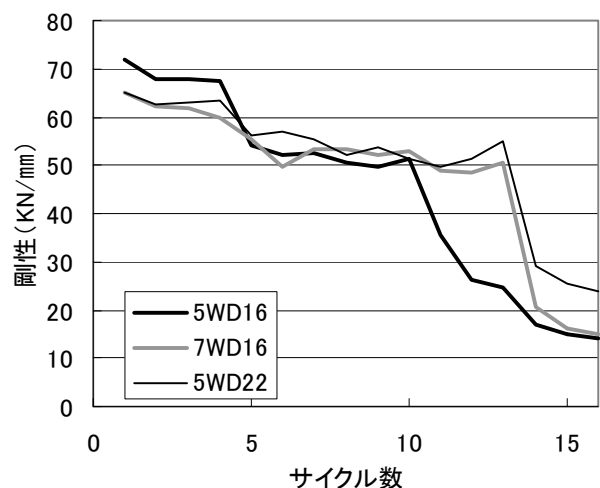


図 - 1 2 98kN 時の各载荷サイクルの剛性

学研究所、安東祐樹氏には F E M 解析で協力していただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小宮敏明, 益尾潔: 鉄骨増設ブレース補強用の接着接合部および間接接合部の終局耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, 2000年7月
- 2) 毛井 崇博, 宮内靖昌: 接着接合された鉄骨ブレース補強骨組の力学特性, 日本建築学会構造論文集, No.539, 2001年1月
- 3) 日本建築防災協会: 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