

論文 耐震補強のためのダンパーブレースの躯体定着方法に関する実験

野口 隆^{*1}・北嶋圭二^{*2}・上田英明^{*1}・安達 洋^{*3}

要旨：既存建物の耐震補強方法として、摩擦ダンパーを組み込んだ外部ブレースを建物外部に取り付ける方法を開発している。本論文は、外部ブレースを躯体に取り付ける定着部に関するもので、定着方法として、外部躯体にあと施工アンカーを打ち込み定着台の底面に溶接したスタッドとグラウトで一体化する方法と、PC鋼棒で定着台を躯体に締め付ける方法、の2種類の方法について実験を行い、耐力および変形性能について検討したものである。

キーワード：耐震補強、ダンパー、定着、PC鋼棒、あと施工アンカー

1. はじめに

筆者らは、既存鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建物の耐震補強法として、エネルギー吸収性能が明確なダンパーを既存建物に設置し建物の耐震性能を向上させる補強法の検討を行いその効果を確認してきた[1]。ダンパーを既存建物に設置する補強法は、地震時に建物に入力される地震エネルギーを、ダンパーで吸収することで既存建物への地震エネルギーの入力を低減し、建物の損傷を少なくすることができる。ダンパーの躯体への取付方法は、図1に示すように、鋼製ブレースの軸心に剛塑性型の履歴性状を有する摩擦ダンパーを組み込んだダンパーブレースを、定着台を介して建物外部に取り付ける方式を想定している。このようなダンパー補強における取り付け部は、十分な剛性を有し、ダンパーブレースから作用する繰り返し荷重に対してずれが生じないことが要求される。本論では、定着台の既存建物への定着方式を検討し、その耐力および変形性能を把握し、設計荷重の検討を行った。

2. 試験体

2.1 試験体の計画

表1に試験体および実験結果の一覧を、図2に定着方式の概要を、図3に試験体の形状および寸法を示す。試験体の大きさは実物大とし、ダンパーの摩擦荷重は196kN程度を想定している。

試験体の実験変数は、定着台の既存躯体への定着方法、既存躯体のコンクリート圧縮強度 σ_B 、定着台への加力の向きおよび定着台の長さとし、全部で7体製作した。

定着台の既存躯体への定着方法はあと施工アンカー式とPC鋼棒式の2種類とした。あと施工アンカー式は、枠付き鉄骨ブレース補強に用いられる鉄骨枠とコンクリートの間接接合を応用した方法で、既存躯体に接着系あと施工アンカーを打ち込み、このあと施工アンカーと頭付きスタッドを底面に溶接

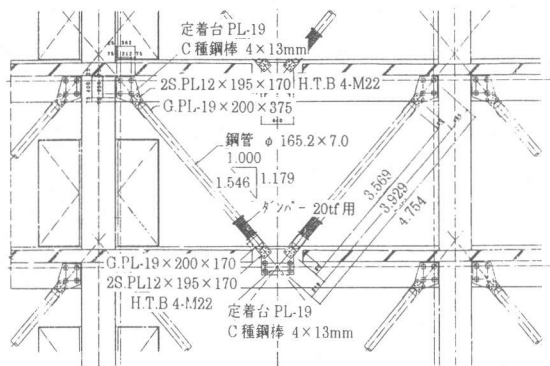


図1 ダンパー補強設計例

*1 (株)青木建設研究所 (正会員)

*2 (株)青木建設研究所、工博 (正会員)

*3 日本大学海洋建築工学科教授、工博 (正会員)

表1 試験体および実験結果一覧

試験体名	定着台の 躯体への 定着方式	アンカーの 本数 (段×列)	定着台に 対する加 力の向き	定着台の大きさ		コンクリート 圧縮強度 (MPa)	コンクリート 引張強度 (MPa)	グラウト 圧縮強度 (MPa)	肌別れ荷重実験値 (kN) *1			肌別れ荷重 計算値 *2		最大荷重実験値 (kN)		最大荷重時 相対変位 δ u (mm)
				幅 B (cm)	せい D (cm)				目視 eQc1	変形 eQc2	ひずみ eQc3	cQc 計算値	押し eQu	引き eQu		
AN-18-3	あと施工 アンカー式	2×3	-	35	50	17.7	1.78	36.8	245	98	153	162	-384	292	-0.524	
AN-18-4		2×4		35	65	15.8	1.40	32.7	294	98	248	216	-490	449	0.852	
AN-18-7		2×7		35	110	12.0	1.13	28.5	588	294	301	618	-683	685	-0.122	
AN-12-7									392	294	286	498	-586	488	-0.195	
AN-24-7									24.6	2.46	28.7	392	392	277	882	-782
PC-18-0	PC鋼棒式	-	0度	35	55	17.5	1.79	34.4	392	392	-	-	-790	759	-0.952	
PC-18-90			90度	55	35	-	-	294	294	-	-	-489	511	4.827		

試験体名

- AN-18-3
- アンカーの列数 (あと施工アンカー式) または定着台に対する加力の向き (PC鋼棒式)
- コンクリート圧縮強度 (12: 12MPa級, 18: 18MPa級, 24: 24MPa級)
- 定着方式 (AN: あと施工アンカー式, PC: PC鋼棒式)

*1 肌別れ荷重実験値

- 目視 eQc1: 実験中に肌別れが確認できた荷重
- 変形 eQc2: 荷重と定着台の浮き上がり量、荷重と定着台の水平変位の関係より繰り返してはほとんど変形が進展しないと考えられる荷重
- ひずみ eQc3: 最も引張側になるアンカーの応力が、コンクリートの引張強度とコンクリートとグラウトの接着強度(2MPa)のどちらか小さい方を超えたときの荷重

*2 肌別れ荷重計算値

$$cQc = \sigma_0 \cdot Z / h$$

$$\sigma_0 = \min(\sigma_1, \sigma_2)$$

σ_0 : コンクリートとグラウトの接着強度 (2MPa)

σ_1 : コンクリートの引張強度

$$Z = BD^2/6$$

h : 躯体と定着台のあき (グラウトの厚さ 16cm)

した定着台を、グラウトで一体化する方法である[2]。なお、グラウト内には収縮ひび割れを分散させるためにはしご筋を配筋した。PC 鋼棒式は、既存躯体に貫通孔を設けて定着台を PC 鋼棒で締め付け取り付ける方式である。定着台の底面には荷重の作用方向に直交して異径鉄筋 D10 を溶接したシアキーを設け、躯体と定着台の間隔を 20mm 程度としこれにグラウトを充填し、硬化後 PC 鋼棒に緊張力を導入した。本方式は、宮城県沖地震における東北工業大学 5 号館の補強方法として用いられており[3]、これによれば水平最大荷重を PC 緊張力で割った摩擦係数は、定着台の軸方向に加力した場合で 1.6~2.0、直角方向に加力した場合で 1.1 であったと報告されている。そこで本実験では、ダンパーの摩擦荷重などを考慮して、定着台の締め付けによる圧縮応力が約 2.0MPa になるような緊張力を与えた。なお、どちらの方式でも既存躯体の表面には、深さ 5mm 程度の目荒らしを設けた。

既存躯体の σ_B は、18MPa 級を標準に 12MPa 級、24MPa 級の 3 種類、あと施工アンカー式定着台の長さは、あと施工アンカーの列が 3、4、7 列の 3 種類になるように、PC 鋼棒式定着台に対する加力の向きは、軸方向とこれに直交する方向の 2 種類とした。

2.2 使用材料

既存躯体部分のコンクリートは、普通コンクリートを使用し、スランプは 18cm、粗骨材の最大寸法は 20mm とした。グラウト材は、無収縮性を有し、圧縮強度 30MPa 以上、コンクリートとの接着強度 2.0MPa 以上の性質を持つものとした。定着台は SS400 の CT 鋼を使用し、あと施工アンカーは接着系で SD345 の D19、頭付き

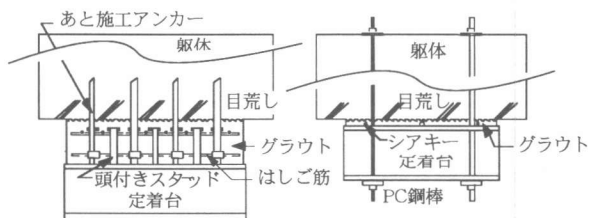


図2 定着方式の概要

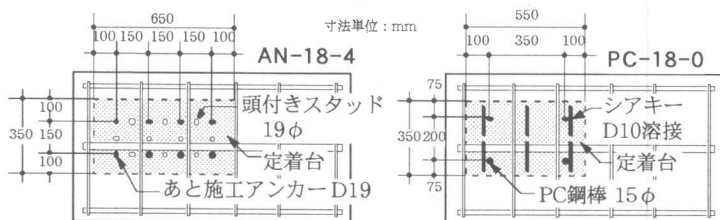


図3 試験体の形状および寸法

スタッドは SS400 相当のシリコンギルド鋼の 19 φ、PC 鋼棒は B 種 1 号の 15 φ を使用した。

3. 実験方法

図 4 に加力方法および変位測定位置を、図 5 に载荷スケジュールを示す。加力は±1.96MN のアクチュエータで、荷重による漸増正負繰り返し加力を行った。測定は荷重、変位およびひずみについて行い、変位は躯体に対する定着台の相対的な水平変形量と鉛直方向の浮き上がり量を測定し、ひずみはあと施工アンカーとスタッドにそれぞれひずみゲージを貼付し測定した。

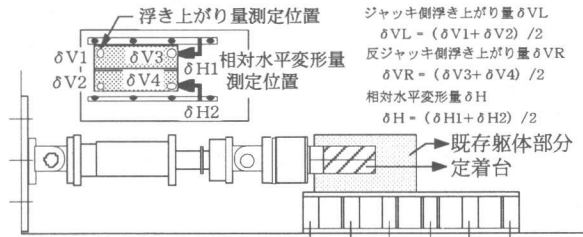


図 4 加力方法および変位測定位置

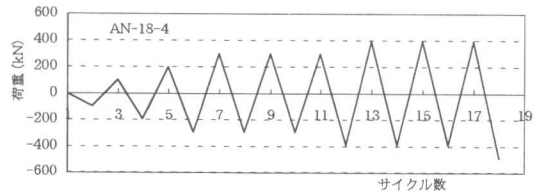


図 5 载荷スケジュール

4. 実験結果

4.1 試験体の破壊状況

図 6 に荷重と水平変位の関係を、図 7 に荷重と定着台の浮き上がり量の関係を示す。

あと施工アンカー式定着台の破壊状況は、どの試験体も大差は無く、初めにグラウトと躯体の境界部に肌別れによるひび割れが生じ、さらに荷重を大きくしていくに従い同一荷重の繰り返しでも変形が徐々に大きくなり、最後は最も引張側になるアンカーのコーン破壊が引き金になり、躯体のカバーコンクリート部分がめくり上がって破壊し、急激に荷重低下を起こした。なお、破壊時においてもグラウト部のひび割れは、ほとんどみられなかった。

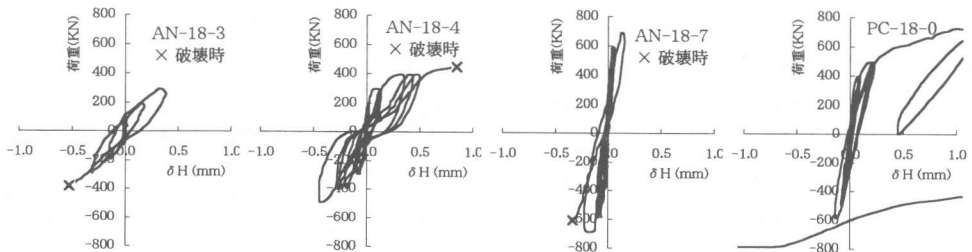


図 6 荷重と相対水平変形量の関係

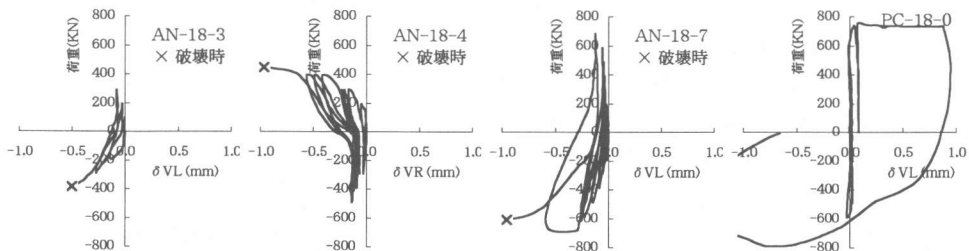


図 7 荷重と定着台の浮き上がり量の関係

PC 鋼棒式定着台の破壊状況は、初めにグラウトと躯体の境界部にすべりによるひび割れが生じ、さらに荷重を大きくしていくに従いグラウトと定着台の境界部にもすべりによるひび割れが生じた。その後、変形を増大させても荷重の低下はほとんど無く安定した挙動を示した。実験後定着台を取り外しグラウト部の破壊状況を確認したところ、軸方向に加力した（シアキーは加力方向に直角）PC-18-0 はグラウトと躯体のすべりが大きく、グラウトと定着台のすべりは生じていなかった。また、軸方向に直交して加力した（シアキーは加力方向に平行）PC-18-90 では、グラウトと躯体のすべりはほとんど生じておらずグラウトと定着台のすべりが大きかった。これらの結果より、シアキーが有効に作用していたことが分かった。

4.2 あと施工アンカーのひずみ

図 8、図 9 に、あと施工アンカー式定着台のピーク時のアンカーのひずみを示す。なお、アンカーのひずみは、脚部から 20mm の位置で測定している。

アンカーのひずみから試験体長さの比較的短い AN-18-3 と AN-18-4 は、グラウト部の平面保持がほぼ成り立っているが、試験体長さの長い AN-18-7、AN-12-7、AN-24-7 では、平面保持が成り立っておらず約半分程度のアンカーしか荷重を負担しておらず、その傾向はコンクリート強度が高くなるほど顕著であった。

図 10 に、最大荷重時における最引張側のアンカー引張力と σ_B の関係を示す。アンカー引張力は、脚部のひずみより求めた。図中の実線は、アンカーのコーン破壊で決定される引張耐力式である[2]。引張耐力式におけるコーン有効水平投影面積 A_c は、群体配置を考慮して隣の 2 列目までのアンカーの影響を考えた。図より σ_B が高くなるに従い負担引張力が大きくなる傾向がみられる。実線の引張耐力式との比較では、実験結果の方が若干小さくなっており、特に σ_B が 12MPa 級では約 1/2 である。

5. 設計許容荷重の検討

5.1 あと施工アンカー式定着台

図 11、図 12 に各荷重のピーク時の水平変位および定着台の浮き上がり量を示す。図中の破線は、同一荷重で繰り返しても変形がほとんど進展しなかった範囲を示している。さらに、図 12 には、最引張側のアンカーの応力

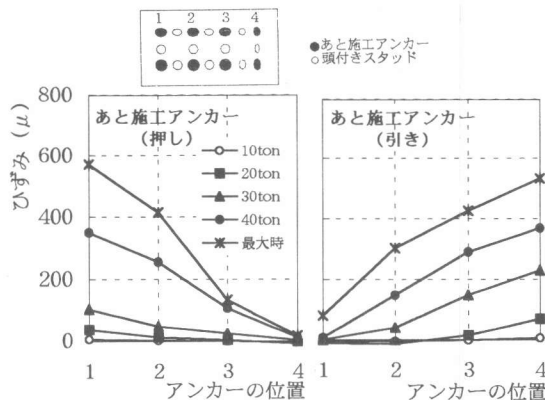


図 8 AN-18-4 のアンカーのひずみ

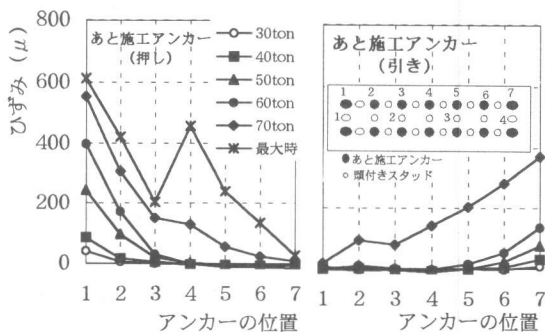


図 9 AN-18-7 のアンカーのひずみ

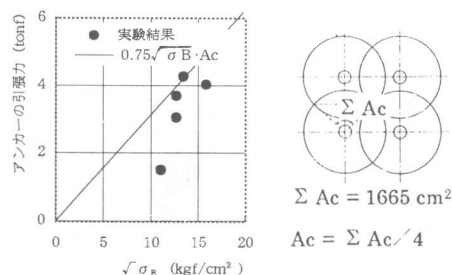


図 10 コンクリート圧縮強度と最大時アンカー引張力の関係

がコンクリートの引張強度とコンクリートとグラウトの接着強度のどちらか小さい方を越えたときの荷重を、ひずみより判断して実線で示した。これらの図より、繰り返しても変形がほとんど進展しない荷重範囲は、アンカーのひずみより肌別れが生じていないと考えられる荷重範囲とほぼ一致している。これは、肌別れが生じていない荷重範囲ではコンクリートとグラウトの付着が健全で、定着台はほぼ弾性的な挙動を示しているからであると考えられ、設計許容荷重はこの荷重範囲とした。

5.2 PC鋼棒式定着台

図11、図12の破線は、あと施工アンカー式と同様に、同一荷重で繰り返しても変形がほとんど進展しなかった範囲を示している。また、図12の実線は、目視でグラウトと躯体の境界にひび割れが確認できた荷重を示している。これらの図より、同一荷重で繰り返しても変形がほとんど進展しない荷重範囲は、グラウトと躯体のすべりが生じていない荷重範囲とほぼ一致しており、設計許容荷重はこの荷重範囲とした。また、この時の設計許容荷重の摩擦係数は、軸方向加力で1.0、軸方向直交加力で0.75である。

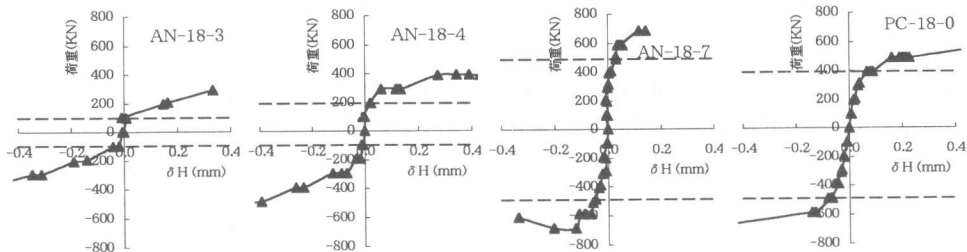


図11 ピーク時の荷重と水平相対変形量の関係

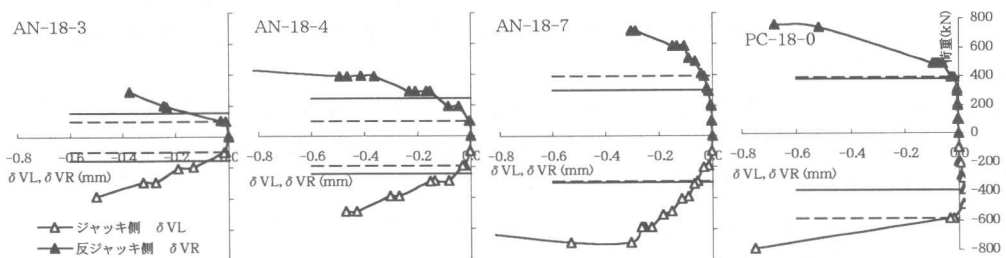


図12 ピーク時の荷重と定着台浮き上がり量の関係

6. 最大荷重の検討

6.1 あと施工アンカー式定着台

あと施工アンカー式定着台の最大荷重は、全ての試験体でアンカーのコーン破壊による曲げ破壊によって決定されている。従って、最大荷重は最引張側のアンカーが引張耐力に達したときの曲げモーメントを平面保持を仮定して求め、図13で実験結果と比較した。定着台の長さが比較的短いAN-18-3とAN-18-4は実験値を安全側に評価しているが、長さの長いAN-18-7、AN-12-7、AN-24-7では前述したように、半分程度のアンカーしか荷重を負担しておらず平面保持が成り立っていないこと、最引張側のアンカーの引張力が引張耐力に比べて若干低かったことから、計算値に比べて実験値は低くなっている。

6.2 PC鋼棒式定着台

図14にPC鋼棒の緊張力による圧縮応力と平均せん断応力の関係を、文献[3]の実験結果を含めて示

す。文献[3]の実験における緊張力による圧縮応力は3.92MPaで、今回の実験のほぼ倍となっている。最大荷重時の摩擦係数は、圧縮応力が大きくなるに従い小さくなる傾向があるが、軸方向に加力（シアキーは加力方向に直角）した場合で1.7~2.0、軸方向に直交して加力（シアキーは加力方向に平行）した場合で1.1~1.3となり、5mm程度の人為的凹凸面を境界条件とするコンクリートとコンクリートの摩擦係数1.2 [4] より大きな値となった。また、設計許容荷重の最大荷重に対する安全率は1.7~2.0である。

7. まとめ

(1) あと施工アンカー式定着台では、グラウトと躯体の肌剥れが生じない荷重範囲で、同一荷重で繰り返しても水平変形および定着台の浮き上がりが進展せず、この荷重範囲を設計許容荷重とした。

(2) PC 鋼棒式定着台では、グラウトと躯体のすべりが生じない荷重範囲で、同一荷重で繰り返しても水平変形および定着台の浮き上がりが進展せず、この荷重範囲を設計許容荷重とした。そのときの摩擦係数は、軸方向に加力（シアキーは加力方向に直角）した場合で1.0、軸方向に直交して加力（シアキーは加力方向に平行）した場合で0.75であった。

(3) 破壊形式は、あと施工アンカー式定着台が躯体部の破壊によって急激に荷重低下を起こす脆性的な破壊を示したのに対し、PC 鋼棒式定着台は、グラウト部の破壊後も安定した挙動を示し、躯体部の損傷はほとんど無かった。

(4) あと施工アンカー式定着台の最大荷重は、アンカーのコーン破壊による曲げ破壊によって決定され、 σ_B が高くなるに従いアンカーの引張耐力が大きくなり、最大荷重も大きくなる傾向があった。

(5) PC 鋼棒式定着台の最大荷重時の摩擦係数は、軸方向に加力（シアキーは加力方向に直角）した場合で1.7~2.0、軸方向に直交して加力（シアキーは加力方向に平行）した場合で1.1~1.3となり、設計許容荷重に対する安全率は1.7~2.0である。

謝辞

本研究は、日本大学と青木建設の共同研究「損傷低減のための耐震補強技術に関する研究」の研究成果の一部であり、関係各位に感謝の意を表します。また、本実験のあと施工アンカー式定着台の計画および製作には、片桐太一氏（日本ドライブイット）のご助言と材料のご提供を頂きました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 北嶋圭二、野口隆、上田英明、松尾洋三、築井英昭、鈴木信治：「ダンパーを用いた既存RC造建物の耐震補強法に関する研究(その1)~(その5)」、日本建築学会大会（近畿）梗概集C-2、pp.271~280、1996.9
- [2] (財)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」、1990.12
- [3] 川股重也：「東北工大5号館の震災修復」、建築技術No.346、pp.83~95、1980.6
- [4] 塩原等：「コンクリートとコンクリートの接合」、コンクリート工学解説、pp.14~24、1996.6

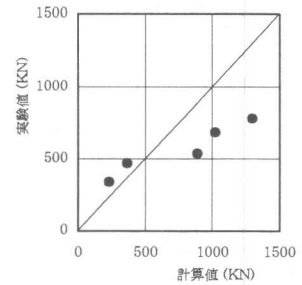


図13 あと施工アンカー式定着台の最大荷重の検討

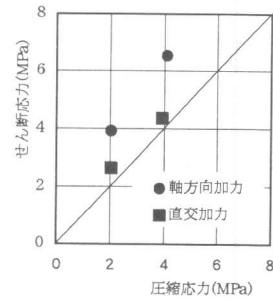


図14 PC鋼棒式定着台の最大荷重の検討