

The effectiveness of the proposed retrofit technique is experimentally investigated and analytically evaluated simultaneously. Proposal of emergency retrofit technique utilizing pre-tensioned high strength steel bars (PC bars) and steel plates.

1 . はじめに

兵庫県南部地震などのような大地震に備えるためには、地震発生に対して被害を極力小さくし、かつ地震被害による建物損傷に、迅速に対応できるような対策を立てておくことが必要不可欠である。すなわち、震前と震後の地震対策が必要である。阪神大震災以降、大地震に対して崩壊・倒壊の恐れのある既設の構造物は、公共施設を中心に耐震補強が行われてきている。一方、地震により被災した構造物に対して迅速に対応すること、すなわち簡便で迅速に対応できる応急復旧は必要となる。特に、応急復旧を施すことにより、余震対策として構造物の崩壊・倒壊を補償することで被災者の避難所生活の回避、構造物を極力取り壊さない、取り壊し時のアスベスト等の危険物飛散の防止に役立つことが考えられる。

そこで、鉄筋コンクリート（以後、RC）柱を対象に震災後に迅速に対応でき、かつ簡便な応急補強法の研究を行った。研究対象となる応急補強法は、外付けPC鋼棒により緊張力を導入することによる能動的拘束力およびPC鋼棒や鋼板による受動的拘束効果により耐震性能を向上させる方法である。ここでは、RC柱を対象に耐震補強・応急補強の考え方、耐震性能評価、地震被害・復旧事例および提案する応急補強について記述する。

2 . RC柱の破壊形式

地震等により繰り返し荷重を受けるRC柱の破壊形式は、Table 1に示すように、せん断破壊、曲げせん断破壊及び曲げ破壊に分類される。主筋降伏前のせん断破壊が構造物の脆性的な崩壊・倒壊に至る。地震の繰り返し荷重により、RC部材のせん断強度は変形とともに低下するため、曲げ降伏が先行したにもかかわらず、その後せん断破壊することがある。つまり、RC柱部材の計算上の最大曲げ耐力発生前の曲げせん断破壊はせん断破壊と同様大きな斜めひび割れが急激に進展し、脆性的な破壊となる。ポストピークではコンクリートの圧壊および主筋の座屈等により損傷が塑性ヒンジ区間に集中することにより、水平荷重が徐々に低下することで脆性的な破壊とはならない。このように、最大耐力前後のどの点において終局となるか評価することは耐震性能照査上で重要である。なお、同表の写真はRC柱の耐震性能評価を目的として一般的に用いられる水平交番載荷による破壊状況である。

また、設計上ではせん断耐力 / 曲げ耐力が1.0以下の場合、せん断破壊先行となる。曲げ耐力は精度良く算定できるが、せん断耐力は地震による繰り返しによるコンクリート強度の劣化、せん断スパン比等の影響を受けることから曲げ耐力に比べ精度は低い。耐震補強は、せん断破壊先行のRC柱を対象に行われている。すなわち、大地震時に曲げ降伏後にせん断破壊するRC構造物は多く存在することが考えられる。

3 . RC柱の耐震補強

RC柱の耐震性能を向上させる補強方法には、強度向上型、じん性向上型及び強度・

Table 1 破壊形式とひび割れ状況（水平交番載荷実験結果）

Shear failure	Shear failure after flexure yielding (before V_{max})	Shear failure after flexure yielding (after V_{max})	Flexure failure

V_y = yield shear force, V_{max} = maximum shear force,
 δ_y = yield displacement, δ_{max} = displacement on V_{max} , δ_u = ultimate displacement.

じん性向上型がある。強度向上型では柱主筋を増設し、主筋をフーチング等に定着させる方法が用いられている。じん性向上型では鋼板巻立て工法、RC巻立て工法、炭素繊維・アラミド繊維巻立て工法等がある。

一方、震災後におけるRC柱の復旧補強においては、支保工による仮受け後、コンクリートのひび割れにエポキシ樹脂等を注入し、上記に示すじん性向上型補強が用いられている。これらの方法は、樹脂の硬化に時間を要すること、また恒久的な工法であることにより、復旧に作用する際に、詳細な診断と慎重な判断が必要となることにより、対策を施すまでに時間が必要となる。

4. 地震被害・復旧事例

ここでは、最近10年間に発生した地震で、RC構造物に被害をもたらした兵庫県南部地震、鹿児島県北西部地震、第2鹿児島県北西部地震及び三陸南地震 (Table 2 参照) による土木構造物 (道路橋脚)、土木構造物 (鉄道高架橋) 及びRC造建築物における被害および復旧状況について示す。

(1) 土木構造物 (道路橋脚)

Fig. 1は兵庫県南部地震によりせん断破壊した阪神高速3号神戸線におけるRC橋脚である。

Table 2 最近発生した M6 以上地震

震名	発生時刻	震源	マグニチュード	最大震度
兵庫県南部地震	1995年1月17日 5時46分	兵庫県北淡町 深さ16km	7.3	震度7
鹿児島県北西部地震	1997年03月26日 17時31分	鹿児島県川内市 深さ7km	6.5	震度5強
第2鹿児島県北西部地震	1997年05月13日 14時38分	鹿児島県川内市 深さ8km	6.3	震度6弱
三陸南地震	2003年5月26日 18時24分	宮城県沖 深さ71km	7.0	震度6弱
新潟県中越地震	2004年10月23日 17時56分	新潟県中部 深さ約13km	6.8	震度7
福岡県西方沖地震	2005年3月20日 10時53分	福岡県西方沖 深さ9km	7.0	震度6弱

せん断破壊した橋脚では、柱の軸ずれが発生していた。道路橋脚ではこのようなせん断破壊後、図のように倒壊・崩壊した橋脚が多く見られ、また多くの構造物が解体された。Fig. 2 は支保工による仮受け状況である。阪神高速3号神戸線では、東灘高架橋が635mにわたって倒壊し、橋脚のほぼ半数が損傷を受け橋桁の落下が4箇所が発生した。震災直後より2次災害防止のための応急対策工事が行われた。平成7年5月には本格的な復旧工事が始まり、平成8年9月30日（被災から約1年半後）には全線の復旧開通となった。このように復旧に時間を要した理由として、一部区間（武庫川～摩耶間、京橋～月見山間）において、損傷を受けた橋脚を撤去し、再構築したことによる。

(2) 土木構造物（鉄道高架橋）

Fig. 3は三陸南地震による東北新幹線ラーメン高架橋柱の被災状況である。三陸南地震は兵庫県南部地震に比べ規模の小さい地震であったが、このように地震により高架橋柱はせん断破壊となった。復旧は図に示すように、エポキシ樹脂をコンクリートのひび割れに注入後、鋼板巻き立て補強により行われた。被災した高架橋は、宮城県沖地震（1978年6月）以前に設計された高架橋であり、現在の規準よりもせん断補強筋量の少ない構造であることから、せん断破壊となったと考えられる。このように、鉄道高架橋において大地震によりせん断破壊する構造物は多く存在する。なお、鉄道の復旧には損傷箇所（柱22本が被災）が少ないことから3日間を要しただけであった。

(3) RC造建築物

Fig. 4,5（図の左側）は鹿児島県北西部地震により被災した建築物である。Fig. 4は損傷は小さく、ひび割れ幅も小さい。一方、Fig. 5は柱および壁ともせん断破壊と損傷は大きい。鹿児島県北西部地震の発生から48日後に、ほぼ同規模のマグニチュードの第2鹿児島県北西部地震が発生した。Fig. 4は1回目の地震後に損傷も小さいことから、補強を施していない場合であり、2回目の地震により落階した状況である（図の右側）。Fig. 5は2回目の地震では、被害の増大は見られたが、応急補強が施されていたことから、落階には至らなかった事例である。



Fig. 1 道路 RC 橋脚のせん断破壊/崩壊取り壊し状況（兵庫県南部地震）



Fig. 2 道路 RC 橋脚のせん断破壊 / 応急復旧状況（兵庫県南部地震）



Fig. 3 鉄道高架橋 RC 柱の復旧状況/エポキシ樹脂注入工法（三陸南地震）



Fig. 4 鹿児島県北西部地震、第 2 鹿児島県北西部地震（応急補強無）



Fig. 5 鹿児島県北西部地震、第 2 鹿児島県北西部地震（応急補強有）

5 . 応急補強に関する研究

5.1 研究概要

RC柱を対象に震災後に迅速に対応でき、かつ簡便な応急補強法の開発を目的とした研究を行った。提案する応急補強法は、外付けPC鋼棒により緊張力を導入することによりひび割れを閉じさせることなどにより曲げ耐力の回復及び変形性能等の耐震性能向上させる方法である (Fig.6 参照)。なお、鋼板は単に柱4面に4枚の板状の鋼板をあてているだけで溶接は行っていないのが特徴である。

応急補強工法の適用にあたっては、下記に関する項目を確認する必要があり、耐震実験及び解析の両面から検討した。

- (1) 応急補強後の耐震性能 (曲げ耐力、変形性能等)
- (2) PC鋼棒に導入した緊張力及び鋼板の効果
- (3) 損傷後の残存軸耐力及び応急補強後の修復軸耐力
- (4) 損傷度と修復可能性
- (5) 応急補強後の水平剛性

応急補強実験では、帯筋量の少ないRC試験体を用いて一定軸圧縮力下の交番載荷実験を行い、一度せん断破壊させ、その損傷した試験体に応急補強を施し、再度交番載荷実験を行った。同時に、損傷した柱試験体及び応急復旧を施した柱試験体の残存軸力の確認を目的とした鉛直載荷実験を行った。実験に用いた試験体の寸法は、250mm × 250mm 矩形断面で、主筋量 (1.36%)、帯筋量 (0.08%) の極脆性柱である。応急補強実験のパラメータは、下記のとおりである。

- (1) PC鋼棒への緊張力導入の有無及びPC鋼棒間隔
- (2) 鋼板設置の有無
- (3) せん断実験後 (補強前) の損傷度
- (4) エポキシ樹脂による補修を実施した場合

一方、解析においては、これらの実験結果を基に曲げ強度やせん断強度の評価及び効果的な導入緊張量やPC鋼棒間隔に関する解析的検討を試みた。特に、柱の損傷度とコンクリート強度との関係に着目することにより、補強効果の評価を行った。具体的には、拘束効果を考慮したコンクリートの応力 - ひずみ関係を用いたファイバーモデルによる曲げ解析を行い、応急補強後におけるRC柱の耐震性能の評価を行った。

5.2 実験結果および解析結果

応急補強実験から以下のことが確認できた (Fig.7 参照)。

- (1) 軸耐力の回復、曲げ破壊への移行、変形性能の向上が大幅に図れる。
- (2) 緊張力を導入した PC鋼棒及び鋼板を用いた組合せが最も効果的である。
- (3) 損傷前のコンクリートと同様な曲げ強度までほぼ回復でき、かつ圧縮軸ひずみの進展も防止できる。
- (4) ただし、水平剛性においては損傷前の水平剛性には回復せず、またエポキシ樹脂により補修した試験体に比べ小さいことがわかった。

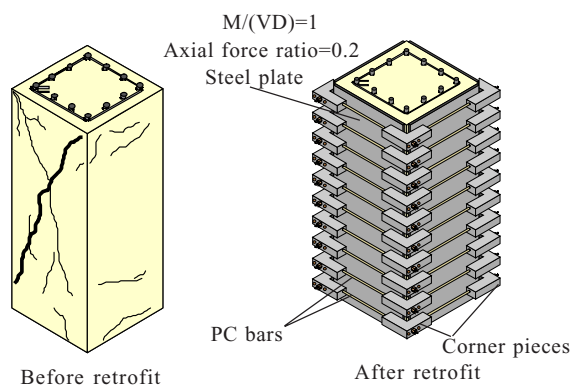


Fig. 6 Emergency retrofit for extreme short RC columns by PC bars and steel plates

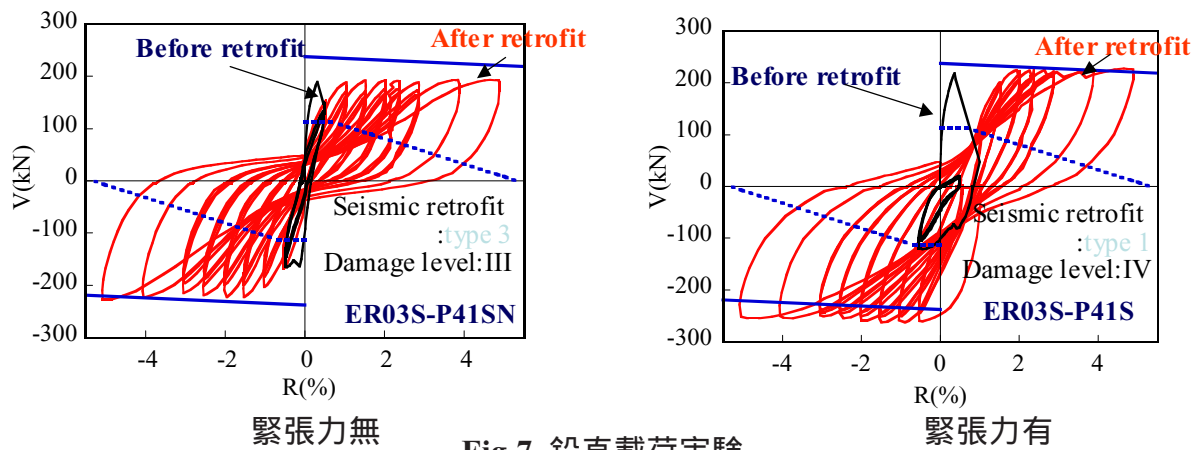


Fig.7 鉛直載荷実験

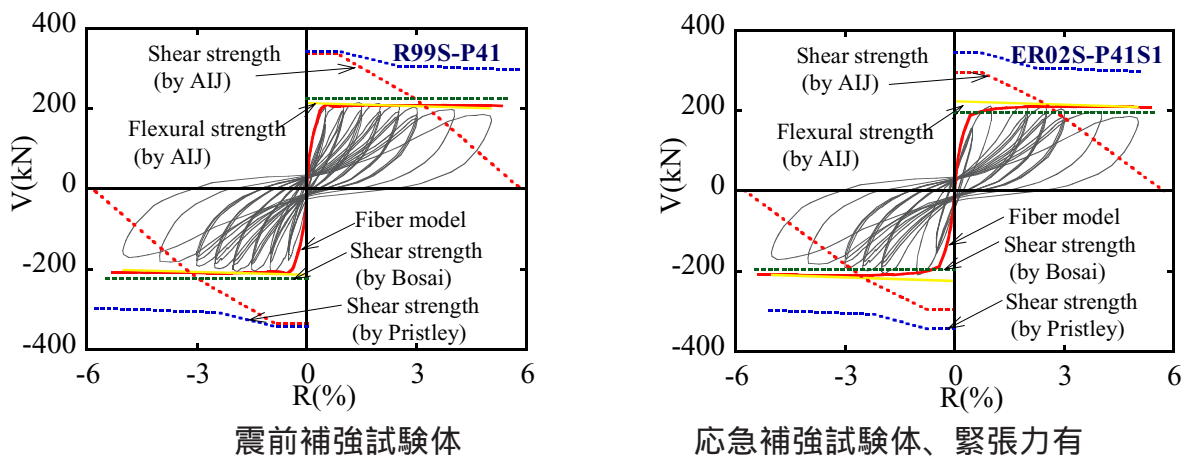


Fig.8 実験および解析結果

一方、解析結果においては、拘束効果を考慮したファイバーモデル解析により、コンクリートせん断強度及び曲げ強度を精度よく算出することが確認できた (Fig. 8 参照)。

6. おわりに

研究結果、せん断破壊したRC柱に応急補強法を施すことにより、水平剛性の全面的回復を除いて軸耐力の回復および曲げ破壊への移行と変形性能の向上が大幅に期待できる。しかも、健全なコンクリートと同様な曲げ強度までほぼ回復でき、かつ圧縮軸ひずみの進展も防止可能であることが確認できた。以上のことに加えて、本応急補強法は重機を必要としない乾式工法であることから、地震被災直後の余震対策などに効果的であると考えられる。本研究が地震により被災した建造物の復旧に役立てるよう、さらに研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 山川哲雄, 李文聰, 倉重正義: PC鋼棒によりプレストレスを導入した極短柱の応急補強法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No. 2, pp. 1219-1224, 2002. 6.
- 2) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入したPC鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷RC柱の応急補強法, 日本建築学会構造系論文集, 第586号, 2004. 12.
- 3) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針 (鉄筋コンクリート造編), pp. 1-37, 1995. 3.
- 4) 土木学会・地盤工学会合同宮城県沖の地震調査団: 2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震被害調査報告, pp. 4-7, 2003. 10. 31.
- 5) 日本コンクリート工学九州支部: 九州・沖縄における既存RC建築物の耐震性と耐震補強法開発, pp. 13-18, 2004. 2.