

震災後の応急補強について

宮城 敏明*

*北斗設計株式会社（〒901-0153 那覇市宇栄原1丁目1番2号）

キーワード：RC 構造物，耐震補強，プレストレス，応急補強，損傷度

1. はじめに

地震は、弱い構造物ほど大きな損傷を与える。地震の規模によっては、倒壊・崩壊に至る構造物がある。ここでいう弱い構造物とは、耐震性能の低い構造物をいい、阪神大震災後、耐震性能を向上させるために、地震の発生する前に耐震補強（以下、震前補強）を実施している。しかしながら、耐震性能の低いすべての構造物が震前補強を施されているわけではない。その理由として、コスト面から補強対象構造物の優先順位を設定していること、施工が困難であること、または過去に地震の少ない地域では後回しにされていること等が挙げられる。特に一般住宅では、コスト面から震前補強が施されていない建築物が多いのが現状である。また、鉄筋コンクリート構造物（以下、RC構造物）における地震荷重に対する要求性能は、倒壊・崩壊に至らないことを第一とし、ある程度の損傷をゆるす構造となっている。つまり、地震により損傷するRC構造物は多く存在し、その場合、応急補強が必要となる。

阪神大震災における鉄道関連の復旧には表-1に示すようにかなりの日数および復旧費を要した。構造物の被害も多く、特にRC構造物のせん断破壊による構造物の倒壊・崩壊が多く発生した（図-1参照）。RC構造物の復旧には、ひび割れ部にエポキシ樹脂等を注入し、鋼板により巻き立てる工法が多く用いられた（図-2参照）。

道路や鉄道構造物は、事業者や利用者のコスト損失を極力小さくする必要があり、1日でも1時間でも早い開通や運転再開が求められる。一方、建築物においては、震災後の避難所生活をできるかぎり短縮し、また今後の対策を住み慣れた自宅で行うという面から応急復旧は重要であり、早急を実施することが求められる。このように、応急復旧では早急かつ簡便性が強く求められる。

そのような状況の中、山川らによって提案された横補強材にPC鋼棒を用いてプレストレスを導入する耐震補強法

は、重機を必要としないドライ補強法であるがゆえに、地震被災直後の応急補強に効果的であることが、耐震実験で明らかになった¹⁾。

本稿では、琉球大学工学部環境建設工学科山川研究室で行われている応急補強に関する研究を中心に報告する²⁾。



図 - 1 RC 構造物震災



図 - 2 RC 構造物耐震補強

表 - 1 復旧費用

企業体	運転載荷まで要した日数(全線開通)	復旧費(億円)
JR西日本	81	1200
阪急電鉄	147	660
阪神電鉄	161	700
ポートライナー	195	168
六甲ライナー	218	95

1995.2.15朝日新聞より

2. 実験概要

耐震実験は、図-3に示す載荷装置を用い、縮小試験体により行われるのが一般的である。加力は、地震荷重を対象とした正負繰り返し水平荷重および鉛直荷重を載荷する方法を用いる。

今回用いた柱試験体は250×250mmの正方形断面で、柱高さ500mm、せん断補強筋 $p_w=0.08\%$ 、主筋比 $p_g=1.36\%$ の脆性柱である。つまり、補強を施さないと地震荷重により脆性的なせん断破壊を起す試験体である。表-2に主筋、帯筋、PC鋼棒および鋼板の力学的材料定数を示す。実験は



図 - 3 加力装置 (琉球大学地域共同研究センター)

5体の柱試験体を対象に、補強前に損傷を与える加力実験 (以下、補強前の加力実験)、次いで損傷した柱試験体に応急補強した後の加力実験 (補強後の加力実験) の2段階の実験を行った。

今回の加力実験では、長期軸力比に相当する一定軸圧縮力比0.2のもとで正負繰り返し水平加力実験を行った。加力方法は部材角R=0.5%から0.5%の増分で3回ずつ繰り返し、3.0%まで強制変形を与え、それでも靱性能が期待できる場合にはR=4.0%と5.0%を1回ずつ正負繰り返した。補強前の加力実験により試験体柱に損傷を与えた後、鉛直荷重を载荷したまま水平力を零に戻し、残留変形を放置した。次に、損傷を与えた試験体に図 - 4に示す応急補強方法を施し、補強後の加力実験を行った。

特に今回の加力実験の特徴は、せん断破壊後の柱の残存軸耐力および補強後の修復軸耐力の確認を目的とした鉛直荷重実験を行ったことである。残存軸耐力の確認は、柱試験体がせん断破壊した後、水平力を零に戻し、残留水平変位が生じたまま軸力を増大させ、その後、軸力を0.2まで戻し、応急補強を行った。同様に、応急補強した損傷柱の修復軸耐力を鉛直荷重実験により測定した。最終的には、応急補強前の損傷直後の残存軸耐力、応急補強直後の修復軸耐力、そして水平加力実験終了後の残存軸耐力の確認、すなわち都

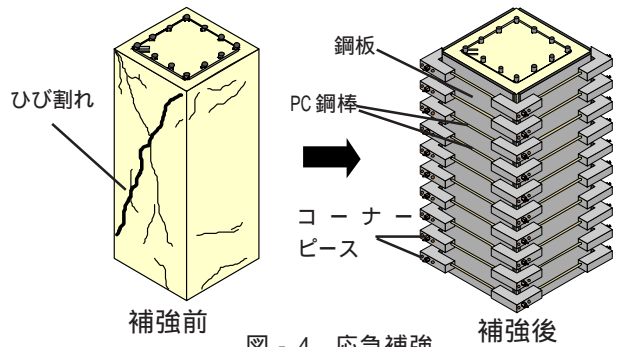


図 - 4 応急補強

表 - 2 材料諸元

Reinforcement		a(cm ²)	f _y (Mpa)	ε _y (%)	E _s (Gpa)
Rebar	D10	0.71	371	0.20	186
Hoop	3.7φ	0.11	391	0.19	205
PC bar	5.4φ	0.23	1202	0.61	200
Steel plate	3.2mm	0.76	255	0.15	211

Note:a=cross section area, f_y=yield strength of steel, ε_y=yield strain of steel, E_s=modulus of elasticity

合3回の鉛直荷重実験と、応急補強をはさみその前後で合計2回の正負繰り返し水平加力実験を行った。

本応急補強は、損傷した極脆性柱に4面とも鋼板 (幅240mm、高さ470mm、厚さ3.2mm)をあてた上でコーナースタンプを柱の四隅に配置し、PC鋼棒を架け渡し、プレストレスを導入することによって鋼板を圧着する方法である。つまり、4枚の鋼板を柱4面に単純にあてるだけで、鋼板同士および柱頭部、柱脚部における溶接やグラウトなどは一切不用である。

各試験体の補強方法を表 - 3に示す。試験体ER03S-P41SおよびER02S-P41S3の応急補強は、上記の補強方法である。試験体ER01S-P41の応急補強は、試験体ER03S-P41Sと同様な補強方法であるが、鋼板を設置していない。試験体ER03S-P41SNの応急補強は、試験体ER03S-P41Sと同様な補強方法であるが、PC鋼棒にプレストレスを導入していない。試験体ER02S-P41Eはひび割れの中にエポキシ樹脂を圧入して硬化した後、鋼板を設置しない。PC鋼棒によるプレストレス導入のみの応急補強法とした。なお、PC鋼棒

表 - 3 試験体一覧

	ER03S-P41S	ER03S-P41SN	ER01S-P41	ER02S-P41S3	ER02S-P41E
Specimen					
Unit : mm	Steel Plate ≒41	Steel Plate ≒41	≒41	Steel Plate ≒41	Epoxy resin ≒41
PC bar	5.4φ @41				
Prestress	490 MPa	Non		490 MPa	
Steel plate	t = 3.2 mm		Non	t = 3.2 mm	Non
σ _B	28.3 MPa	28.3 MPa	19.5 MPa	23.9 MPa	25.0 MPa
Common details	Specimen: M/(VD)=1.0, N/(bDσ _p)=0.2, Rebar: 12-D10 (SD295) (p _g =1.36%), Hoop: 3.7φ @105(p _g =0.08%)				

に導入するプレストレスはいずれの試験体も降伏点ひずみの約1/3強の2450 μ で、1本当たり11.3kNとした。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ状況

図-5に補強前(せん断破壊後)および補強後(載荷終了時)における各試験体のひび割れ状況およびせん断破壊時の損傷度を示す。損傷度は、日本建築防災協会「被災度判定基準」³⁾を適用し、3レベル(, ,)に設定した。図-5より、いずれの試験体も応急補強前の水平加力実験において、せん断破壊が生じていることがわかる。

プレストレスを導入した試験体(ER03S-P41SN以外)は、補強前のひび割れ幅よりも補強後のひび割れ幅が小さくなっている。特に試験体ER02S-P41S3は補強前のひび割れ幅が20.0mmと非常に大きなひび割れが、補強後は2.5mmとひび割れが閉じている。一方、プレストレスを導入していない試験体(ER03S-P41SN)は補強後のひび割れ幅が大きくなっている。以上のことより、プレストレスの導入は、ひび割れが閉じさせる効果があることが確認できる。

3.2 プレストレスの効果

図-6に補強前および応急補強後の荷重-部材角曲線(以下、V-R曲線)および平均圧縮ひずみ-部材角曲線(以下、 v -R曲線)を示す。ここでの荷重Vは、試験体の曲げ強度となる。また、図の破線はせん断破壊しない場合の健全なRC柱としての略算式による曲げ強度 R_0 (以下、曲げ強度略算値)である。

プレストレスを導入していない試験体ER03S-P41SNと導入した試験体ER03S-P41Sの実験結果から、PC鋼棒へのプレストレス導入の有無による補強効果について考察を行う。いずれの試験体もPC鋼棒を外帯筋状に配置することによってせん断破壊が防止され、かつ変形性能が改善されていることがわかる。ただし、プレストレスの導入有無による水平耐力の差異は明らかであり、試験体ER03S-P41Sの荷重Vは曲げ強度略算値を上回っている。しかも v -R曲線において、試験体ER03S-P41Sではシャープな引っ張りひずみが生じており、健全な弾塑性性状を確保していることがわかる。一方、試験体ER03S-P41SNの荷重Vは、曲げ強度略算値に到達していない。つまり、PC鋼棒にプレストレスを導入することにより、ひび割れがある程度閉じさせ、せん断補強効果と横拘束効果を生み出すからと考えられる。

3.3 鋼板の効果

試験体ER01S-P41は鋼板を配置していない試験体である。応急補強後の水平加力実験によるV-R曲線は、試験体ER01S-P41は、試験体ER03S-P41Sと同様、変形性能の向上が確認できる。しかしながら、試験体ER01S-P41は曲げ強度略算値に到達していない。一方、試験体ER03S-P41SはR=1.0%時に曲げ強度略算値より大きい値となっている。また v -R曲線においても、試験体ER03S-P41Sではシャープな引っ張りひずみが生じており、健全な弾塑性曲げ性状を確保していることがわかる。このことから、プレストレスを導入したPC鋼棒により鋼板を圧着する応急補強は、変形性能の向上のみならず曲げ強度の回復においても効果的であることがわ

ER03S-P41S		ER03S-P41SN		ER01S-P41		ER02S-P41S3		ER02S-P41E	
補強前	補強後	補強前	補強後	補強前	補強後	補強前	補強後	補強前	補強後
w=6.0mm	w=4.0mm	w=0.8mm	w=5.0mm	w=4.0mm	-	w=20.0mm	w=2.5mm	w=7.0mm	w=0.7mm
()	-	()	-	()	-	()	-	()	-

注 w:最大ひび割れ幅, ():損傷度

図-5 ひび割れ状況

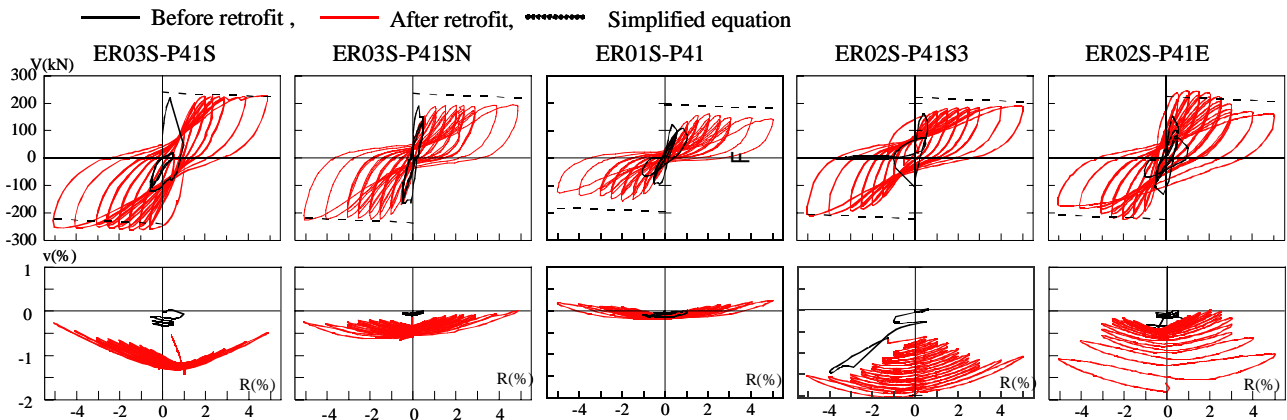


図-6 荷重V-部材角Rおよび平均軸ひずみ v -R関係(実験結果)

かる。

3.4 損傷度の違いと補強効果の評価

試験体ER02-P41S3は、補強前の加力実験において $R=0.2\%$ で初期せん断ひび割れが生じ、せん断破壊が $R=0.5\%$ 手前で発生した。その後 $R=0.5\%$ の1回目で、せん断ひび割れが4～5mmに拡大した。その後さらに載荷を継続した。その結果、せん断ひび割れが拡大し、加力実験の継続が危ぶまれる状況になった。最終的なひび割れ幅は20.0mmとなり、損傷度はと判定された。そこで、軸力を除荷し、応急補強を行った。応急補強後、軸力比を0.2に戻し、加力実験を行った。損傷した柱試験体の圧縮破壊防止と、応急補強後の正負繰り返し弾塑性挙動への影響を極力小さく抑えるため、正負繰り返しごとに耐力が次第に回復し、かつ曲げの弾塑性挙動を示し、健全な柱の曲げ強度略算値までほぼ到達し、平均軸ひずみも図-6に示すように大きく進展していないことが確認できる。以上の実験結果から、軸力を保持できない大きな損傷度においても、本応急補強を施すことにより、損傷前の曲げ強度までほぼ回復できることが確認できた。

これらのことより、少なくとも震災後において柱部材が軸力を保持できていれば、本応急補強を施すことによりせん断破壊を防止し、曲げ強度の回復および変形性能の向上が図れることがわかる。しかも、平均軸ひずみもほぼ0.5%以内にとどめることができると考えられる。

3.5 残存軸耐力および修復軸耐力

鉛直載荷実験は、損傷した柱試験体の圧縮破壊防止と、応急補強後の正負繰り返し弾塑性挙動への影響を極力小さく抑えるため最大応力度を確認する前に除荷した。したがって、実験で得られた応急補強前と後の各圧縮耐力は控えめな値になっている。そこで、Manderらの方法を用い、応力ひずみ曲線を仮定した。また、計測した実験値から、主筋が負担する軸力を差し引く必要があり、その算出においては平面保持が成り立つと仮定した。

その結果を表-4に示す。損傷度がの試験体ER03S-P41SNでは、 f'_{cc}/σ_B は0.35であり、損傷度がの試験体ER03S-P41Sでは、0.15である。このことから、損傷したコンクリート強度は損傷度からある程度推定できるものと考えられる。また、試験体ER03S-P41SNの補強後の f'_{cc}/σ_B が0.70程度であるのに比べ、試験体ER03S-P41Sは1.00となっている。すなわち、このことはPC鋼棒にプレストレスを導入することにより、損傷したコンクリート強度が大幅に回復し、損傷前のコンクリート強度まで回復していることを示している。

3.6 エポキシ樹脂注入補強

試験体ER02S-P41Eは、せん断破壊後に鋼板を用いず、エポキシ樹脂をひび割れの中に圧入した損傷度の試験体である。応急補強前の載荷では、 $R=0.5\%$ にいく途中でせん断破壊が生じ、耐力が低下したが、そのまま $R=0.5\%$ を正負3回繰り返し、 $R=1.0\%$ を1回の正負繰り返し加力を継続した。その結果、せん断ひび割れ幅が拡大し、 $R=-1.0\%$ では柱せい

表-4 残存軸耐力および修復軸耐力

Test specimen	ER03S-P41SN		ER03S-P41S	
Damage level				
Retrofit	Before	After	Before	After
Concrete strength	σ_B'	f'_{cc}	σ_B'	f'_{cc}
σ_B' or f'_{cc} (MPa)	9.9	19.8	4.2	28.4
f'_{cc}/σ_B	0.35	0.70	0.15	1.00

面に最大せん断ひび割れ幅が7mmまで拡大した。その後ただちに、ひび割れ面にエポキシ樹脂を圧入した。その間、軸力比は0.2を維持した。エポキシ樹脂圧入後、約44時間経過後にコーナーピースを介してPC鋼棒を配置し、プレストレスを導入した。それから4時間経過後、つまり最初の加力実験からちょうど48時間後に加力実験を再開した。部材角が小さい間は水平耐力や柱の伸縮ひずみに正負の部材角間で差が大きかったが、部材角が大きくなるにつれて正負の差異が次第に小さくなってきた。 $R=1.0\%$ で曲げ強度レベルに到達し、 $R=1.5\sim 2.0\%$ で最大耐力を記録し、それ以降耐力が部材角の増大と共に次第に低下してきた。 $R=5.0\%$ で最大耐力の20%低下した。しかし、履歴形状は図-6に示すように紡錘形状の大きなものであった。これはせん断ひび割れがエポキシ樹脂で閉じられ、コンクリートの一体化が形成されたためと思われる。しかし、この方法はエポキシ樹脂が硬化するまで時間を要するので、応急補強法に適切な工法とは言いがたい。

4. まとめ

- (1) PC鋼棒によるプレストレスの導入と鋼板を用いた補強は、せん断強度と靱性に富んだ曲げ耐力の向上を図ることができる。
- (2) 本応急復旧工法は、柱の損傷が限界と思われるレベルにおいても効果的であり、十分に利用できそうである。
- (3) エポキシ樹脂等を用いた補強法は損傷した柱の補強には効果的であるものの、時間を要するため応急時の補強法としては適切であるとは言いがたい。
- (4) 本応急復旧工法は重機を必要としない乾式工法であることから、早急かつ簡便な工法であり、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。

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) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999. 8.