

論文 アングル材と緊張PC鋼棒を用いた極脆性柱の耐震加力実験

下濱 光太郎^{*1}・山川 哲雄^{*2}・李文聰^{*3}・中田 幸造^{*4}

要旨：PC鋼棒に緊張応力を導入し，柱四隅に配置したコーナブロックを介し，外帯筋状にRC柱を高横補強することによって靱性が向上することを，これまでの実験によって明らかにしている。しかし，コーナブロックは一般的に入手し難い上に，柱隅角部に配置できない偏心袖壁付き柱等の補強には，上記の方法を利用することが出来ない。そこで，緊張PC鋼棒を固着するための簡易デバイスとしてアングル鋼材を用いた極脆性柱の水平加力実験を行い，緊張PC鋼棒とアングル鋼材を外部横補強材として使用した極脆性柱の耐震補強性能を，横拘束効果とせん断補強効果の観点から検証した。

キーワード：耐震補強，アングル鋼材，PC鋼棒，プレストレス，極脆性柱，横補強

1. はじめに

山川らはこれまでの研究により，簡便な方法としてPC鋼棒に緊張力を導入し，柱四隅に配置したコーナブロックを介して外帯筋状にRC柱を高横補強することによって，靱性が向上することを明らかにしている¹⁾。しかし，コーナブロックは一般的に入手し難い上に，偏心袖壁付き柱等の補強には利用できない。偏心袖壁付き柱のPC鋼棒と帯鋼板を利用した実験によれば，変形が進むに連れて，柱と袖壁に沿ったスリットが形成され，その結果袖壁無し柱のみの履歴曲線を描く事がすでに確認されている²⁾。そこで，柱部分のみに注目し，緊張PC鋼棒を固着するための簡易デバイスとしてコーナブロックに代わり，入手しやすいアングル鋼材と緊張PC鋼棒を用いた水平加力実験を行った。本研究の目的は，柱にプレストレスを導入することのできるPC鋼棒と，面外曲げ剛性の高いアングル鋼材を用いることによって，極脆性柱の耐震補強性能を，横拘束効果とせん断補強効果の観点から検証することである。

2. 実験計画

使用材料の力学的特性を Table 1 に示す。PC鋼

棒はネジ部の断面積が小さく，ネジ部で破断するため，破断強度のみを採用した。

試験体一覧を Table 2 に示す。試験体は 250mm × 250mm の正方形断面で，柱高さ 500mm，せん断スパン比 $M/(VD)$ が 1.0 の 6 体である。これらの試験体は，主筋比が $p_g=1.36\%$ ，帯筋比が $p_w=0.08\%$ と横補強筋が非常に少ない極脆性柱であり，耐震補強を施さなければ既存 RC 柱として，極脆性的なせん断破壊を容易に起こす試験体である。

本試験体にはアングル鋼材，またはコーナブロックを 65mm 間隔に配置し，PC鋼棒の緊張力は全て 2450μ (約 500MPa) 相当の緊張力を導入した。アングル鋼材は L-50 × 50 × 6 ($l=300\text{mm}$)，鋼板は幅 240 × 高さ 470 × 厚さ 3.2mm の材料を使用した。アングル鋼材はコーナブロックに代わるものであり，外部横補強材の役割も兼ねている。これら

Table 1 Properties of steel materials

| Reinforcement | | Thickness or section area | σ_y (MPa) | E (GPa) | σ_u (MPa) |
|---------------|------|---------------------------|------------------|---------|------------------|
| Rebar | D10 | 71 mm ² | 400 | 172 | 568 |
| Hoop | 3.7φ | 11 mm ² | 558 | 190 | 606 |
| PC bar | 5.4φ | 23 mm ² | - | 206 | 1102 |
| Steel plate | - | 3.2 mm | 277 | 206 | 337 |

Notes : σ_y = yeild strength, E = modulus of elasticity, σ_u = ultimate strength

* 1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

* 2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

* 3 琉球大学大学院 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修 (正会員)

* 4 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 工修 (正会員)

Table 2 Details of column specimens

| Specimen | R04S-P65AD | R04S-P65AW | R04S-P65AD1 | R04S-P65AW1 | R04S-P65 | R04S-P65S |
|---------------------|--|------------|-------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| Elevation (mm) | | | | | | |
| Cross Section (mm) | | | | | | |
| Steel angle / plate | Steel angle (L-50 × 50 × 6-@65) | | | | Steel plate (240 × 470 × 3.2) | |
| Prestress | 500MPa (2450μ) | | | | | |
| σ_B | 24MPa | | | | 26MPa | |
| Common details | Longitudinal reinforcement : 12-D10 ($p_g = 1.36\%$), Transverse reinforcement : $3.7\phi\text{-@}105$ ($p_w = 0.08\%$) PC bar : $5.4\phi\text{-@}65$, $M/(VD) = 1.0$, $N/(bD\sigma_B) = 0.2$ | | | | | |

は、柱の両面か片面のいずれかに取り付ける。詳細はTable 2を参照されたい。また、Fig. 1にR04S-P65AW1の耐震補強の詳細を示す。なお実験は2台のサーボアクチュエーターにより、加力ビームをテストヘッドに対して常に平行に維持する加力装置(原理的には建研式加力装置に同じ)を用いて、一定軸力(軸力比0.2)下の正負繰り返し水平加力実験を行った。部材角を0.5%ずつ増分させながら、同一振幅で3サイクルずつ正負繰り返し3%まで行った後、4,5%を目標に1サイクルずつ実験を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 2にせん断力と部材角の関係であるV-R曲線と、柱中心軸上の平均伸縮ひずみと部材角の関係である ϵ_v -Rを示す。柱の平均伸縮ひずみは、柱の鉛直変位を柱高さで除した値である。なお、V-R曲線中の点線は横拘束効果を無視し、P- δ 効果を考慮した多段配筋柱の曲げ強度略算値³⁾である。Fig. 3に各試験体の最終ひび割れ図を示す。R04S-P65AD1の柱せい面の最大ひび割れ幅はアングル面が0.4mm、PC鋼棒面が0.7mmと差異があり、その理由として、アングル鋼材の圧着に起因する摩擦の影響が考えられる。

せん断面である柱せい側に緊張PC鋼棒を配置した方が耐震性能が高まることが実験結果より理

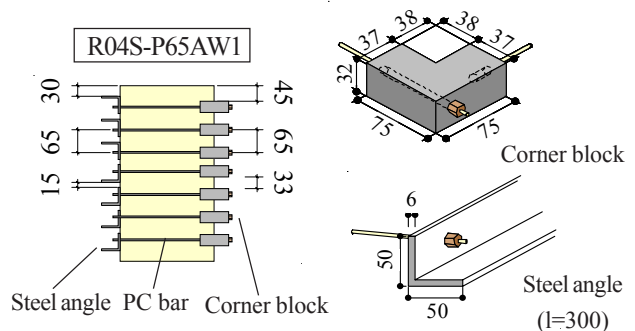


Fig. 1 illustration of retrofit details

解できる。柱せい側にアングル鋼材が配置されると、せん断補強効果がそれほど期待できない。これは、アングル鋼材が主筋の座屈防止や横拘束効果には効果的に働くが、せん断補強材としては有効でないからと考えられる。特に、柱せい側の両面にアングル鋼材を配置した試験体R04S-P65Dの耐震性能が最も悪い。主筋が曲げ降伏することなくせん断劣化が生じ、水平耐力も靱性もFig. 2に示した6体の試験体の中で最も小さい。

一方、柱せい側に両面とも緊張PC鋼棒を配置した試験体R04S-P65AW, R04S-P65AW1, R04S-P65の3体は、柱せい側にアングル鋼材を配置した試験体と比較して強度・靱性とも改善されていることがわかる。しかし、これらの3体の試験体の中で緊張PC鋼棒のみを配置した試験体R04S-P65の耐震性能は、Fig. 2に示した ϵ_v -Rの関係まで考慮するとあまり良くない。この原因は3体ともせん断補強効果はほぼ同程度であるが、主筋の座屈防止

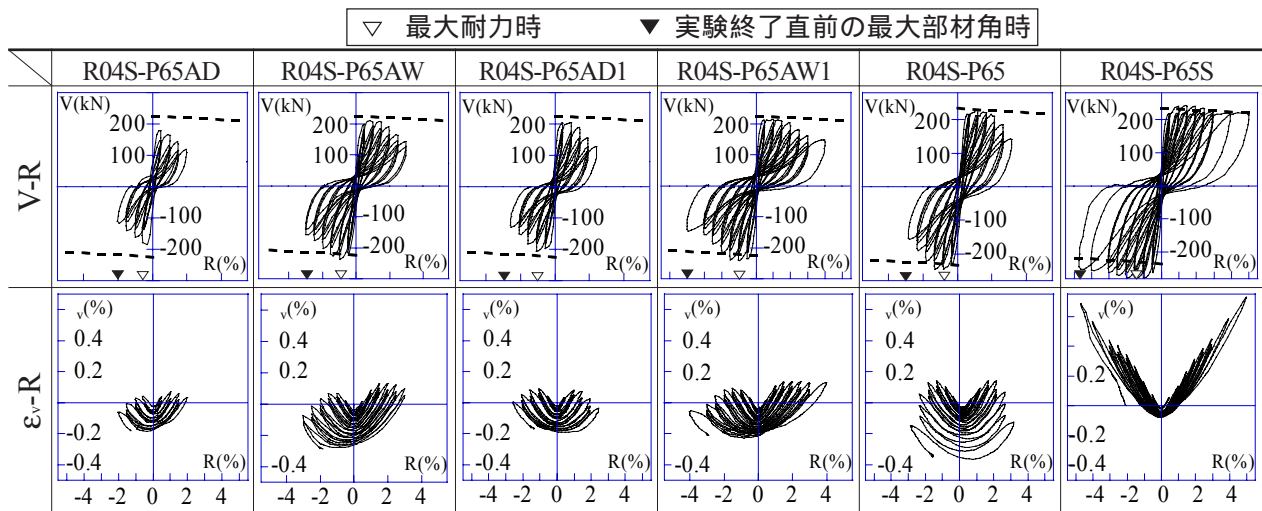


Fig. 2 Measured V-R and ϵ -R relationships

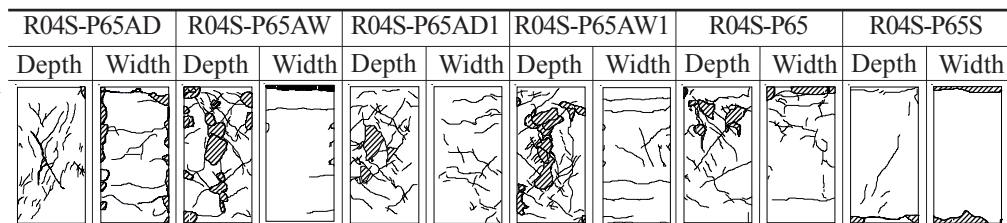
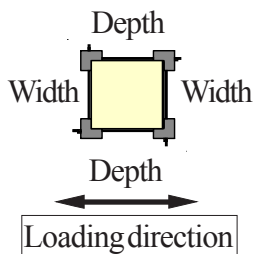


Fig. 3 Observed cracking patterns after roading test

効果に関する横拘束効果に関して、試験体 R04S-P65 が最もよくないからであると思われる。アングル鋼材の場合は主筋が拘束されているが、PC 鋼棒の表面と柱表面には 3mm の隙間があり、中間主筋が拘束されていないからである。

主筋の座屈防止効果を増大させるために、RC 柱試験体の 4 面に鋼板を当てた上で緊張 PC 鋼棒で圧着した試験体 R04S-P65S は、横拘束効果が増大したので完全な曲げ挙動に移行させることができた。Fig. 2 に示す ϵ -R 関係も部材角 R の増大とともに大きな引張りひずみが生じ、曲げ挙動が顕著に表れていることがわかる。これらの一定軸力下の繰り返し水平加力実験により、せん断補強効果を増大させる RC 柱の耐震補強であっても、特に

短柱の場合は横拘束効果と主筋の座屈防止効果もそれなりに大きくないと、靱性に富んだ曲げ挙動を維持できないことがわかる。また、アングル鋼材は緊張 PC 鋼棒を支持する支点としてのコーナブロックの代替品、さらには横拘束材としてその効果を認めたととしても、せん断補強材としてはその効果を発揮できない事が分かる。

アングル鋼材と PC 鋼棒の効果を比較するために、各試験体のひずみ分布を Fig. 4 に示す。アングル鋼材は、柱表面に圧着された面の中央のひずみであり、帯筋方向に 1 枚貼付されているので、面外曲げによる引張りひずみを計測している。一方、PC 鋼棒は帯筋方向に沿って対になるように貼付された 2 枚のひずみゲージの平均を採用してい

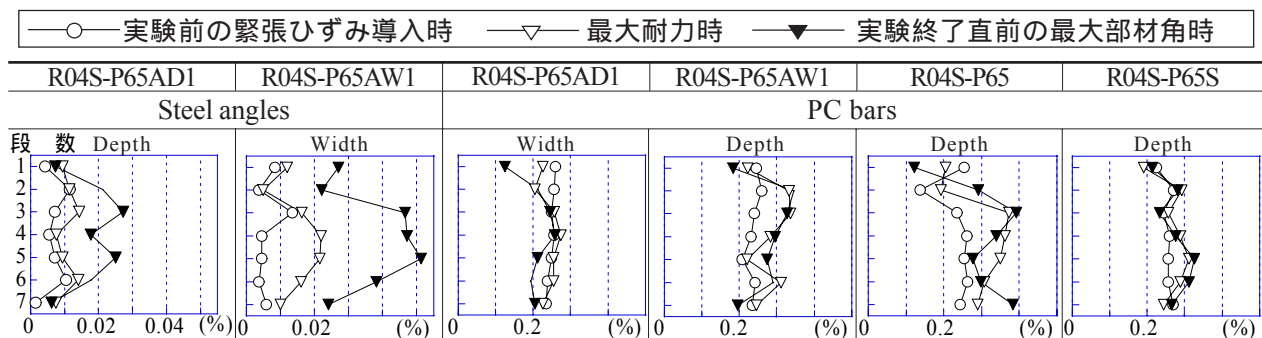


Fig. 4 Measured strain of steel angles and PC bars

るので、純引張りひずみを計測している。紙面の都合で4体の試験体のみについて示す。Fig. 4のひずみは実験前の緊張導入時のひずみと、最大耐力時と実験終了直前の最大部材角時のひずみである。R04S-P65AD1とR04S-P65AW1ではR04S-P65AW1の耐震性能が優れているが(Fig. 2参照)、このことはFig. 4のひずみ状況にも表れている。すなわち、R04S-P65AW1ではアングル鋼材が柱幅面で横拘束効果に、せい面ではPC鋼棒がせん断補強材として働き、いずれもR04S-P65AD1における横補強材のひずみよりも大きなひずみが生じている。また、試験体R04S-P65とR04S-P65Sでは、鋼板があるとPC鋼棒のひずみ分布が柱高さ方向に一様化され、部材角の増大に対してもPC鋼棒

のひずみ変化が小さい。鋼板が圧着されることでPC鋼棒が一様に横拘束する傾向にある。

4. 解析的検討

RC柱の外部横補強材の役割は横拘束効果とせん断補強効果の2つである。この2点について、定量的に検討を行うための解析仮定を記述する。

(1)横拘束効果に関して、PC鋼棒を介して導入する緊張力(2450μ)は、コーナブロックやアングル鋼材、鋼板を通してRC柱に能動的横拘束効果として作用する。さらに水平外力が作用すると、これらの横補強材に受動的横拘束効果が生じる。これらには、Manderらの有効拘束係数 k_e ⁴⁾の概念を利用する。

(2)(1)の能動的横拘束効果はPC鋼棒の緊張力の

Table 3 Calculation details for transverse confinement and shear reinforcement

| | R04S-P65AD | R04S-P65AW | R04S-P65AD1 | R04S-P65AW1 | R04S-P65 | R04S-P65S |
|--------|--|------------|---|-------------|----------|-----------|
| 有効拘束領域 | | | | | | |
| 有効拘束圧 | | | | | | |
| | : Pre-tension force through corner blocks : Friction force through steel angles | | : Pre-tension force through steel angles : Loading direction | | | |

横拘束効果

| | |
|--|--|
| (能動的横拘束圧) | σ_{act} : 能動的横拘束圧 |
| $\sigma_{act} = 4.1\sigma_r \cdot k_e$ | $p k_e$: 外部補強材の有効拘束係数(有効拘束領域(斜線部分)の角度はコーナブロック = 45°, アングル鋼材 = 15°, 鋼板 = 30°とする。アングル鋼材の有効間隔は 15mm, コーナブロックは 33mm. 混在する場合は平均を使用する。) |
| $\sigma_r = \frac{\bar{p}}{b \cdot s}$ | $h k_e$: 帯筋の有効拘束係数(従来通り。) |
| (受動的横拘束圧) | b : 柱幅, s : PC鋼棒の間隔, σ_u : PC鋼棒ネジ部の破断強度, σ_u : PC鋼棒の緊張応力度 |
| $f'_1 = p f'_1 + h f'_1$ | σ_r : 側圧(PC鋼棒による緊張力を面ごとに平均化し、柱幅とPC鋼棒の間隔で除す。) |
| $\begin{cases} p f'_1 = \frac{2\bar{p}}{b \cdot s} \cdot k_e \\ h f'_1 = \frac{2\bar{p}}{b \cdot s} \cdot h k_e \end{cases}$ | \bar{p} : 拘束力を平均化したもの(PC鋼棒の利用可能な応力度は $(\sigma_u - \sigma_{ps} - 800\text{MPa})$ を使用。アングル鋼材や鋼板は摩擦力を考慮(摩擦係数 0.4)する。) |
| $c\sigma_{cB} = \sigma_p \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{\sigma_p} - 2 \frac{f'_1}{\sigma_p}} \right) + \sigma_{act}$ | $p f'_1$: 外部補強材による受動的横拘束圧, $h f'_1$: 帯筋による受動的横拘束圧 |
| | $c\sigma_{cB}$: コンファインドコンクリート強度(能動・受動的横拘束圧を考慮し計算する。) |
| | σ_p : 無拘束コンクリート強度(スケール効果を考慮) |

せん断補強効果(加力方向と平行な外部横補強材について考慮する)

| | |
|---|--|
| $\sigma_{we} \cdot P_{we} = \frac{2\bar{p}}{b \cdot s}$ | \bar{p} : 外部補強材による拘束力を平均化したもの(PC鋼棒の受動的応力度は $(\sigma_u - \sigma_{ps} - 800\text{MPa})$ を使用。アングル材、鋼板は、PC鋼棒の緊張力による摩擦力を負担せん断力とみなす。帯筋は従来どおり。) |
| $\lambda = 1 - \frac{s}{2D} - \frac{b}{4D}$ | λ : トラス機構の有効係数(一様に適用。アングル鋼材とコーナブロックが混在する場合は、 λ の平均値。) |
| | D : 柱せい, b : 柱幅, s : PC鋼棒の間隔 |

みが負担し,これはRichertらの提案式⁴⁾に従って,コンクリートの初期圧縮強度の増大に寄与する。

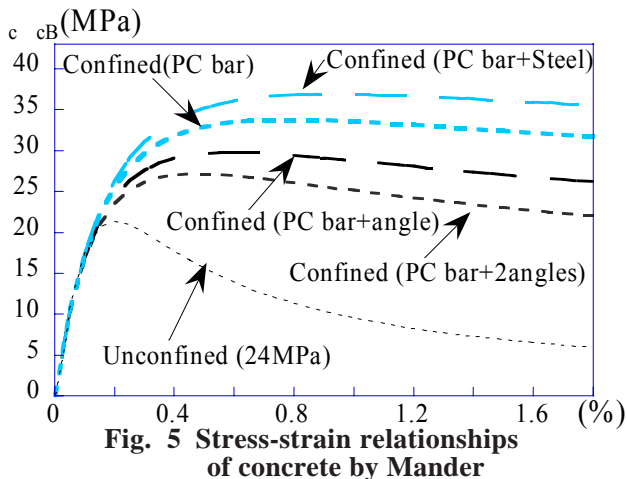
(3)(1)の受動的横拘束効果に関して,PC鋼棒の破断強度 σ_u から緊張応力度 σ_{ps} を差し引いた利用可能な応力度は,800MPaを上限とする($\sigma_u - \sigma_{ps}$ 800MPa)¹⁾。PC鋼棒の受動的横拘束圧と帯筋のそれを加算し,柱の受動的横拘束圧とする。帯筋の受動的横拘束圧は従来通り取り扱う。

(4)無拘束コンクリートは,文献⁷⁾にしたがって試験体(250×250mm)のスケール効果(シリンダー強度低減係数:0.89)を考慮する。

(5)せん断補強効果は,加力方向と平行な外部横補強材について考慮する。PC鋼棒がある場合は,利用可能な応力度($\sigma_u - \sigma_{ps}$)をせん断強度とみなす。しかし,アングル鋼材と鋼板がある場合,共にPC鋼棒の初期緊張力による反力によって柱表面に圧着されているので,初期緊張力による摩擦力の分のみがせん断補強効果として働くと考える。その際の摩擦係数は文献⁶⁾を参考に0.4を採用する。また,トラス機構の有効係数 λ は帯筋が非常に少ないことから,PC鋼棒と同じ値を採用。

(6)PC鋼棒の利用可能な応力度($\sigma_u - \sigma_{ps}$)に加えて,アングル鋼材と鋼板は,(3)の受動的横拘束効果と(5)のせん断補強効果の両方に寄与する。

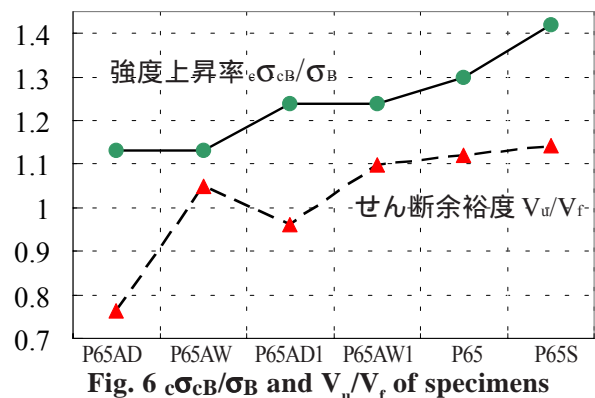
以上の基本的な考えに沿ってPC鋼棒とアングル鋼材,鋼板を配置した横拘束効果とせん断補強効果について,具体的な計算方法をTable 3に整理する。これらにより,計算した各補強方法ごとのコンファインドコンクリートと,無補強のコンクリートの構成則をFig. 5に示す。



計算された構成則の最大値をコンクリート(シリンダー)強度で除した強度上昇率(c_{cCB}/σ_B)と,AII 靱性指針のせん断強度式⁸⁾により計算された値 V_u を,曲げ強度時のせん断力 V_f で除したせん断余裕度(V_u/V_f)をFig. 6に示す。また,加力実験で得られたスケルトンカーブと,AII 靱性指針による各強度算定式で計算した結果をFig. 7に示す。ただし,点線は補強前のせん断強度と曲げ強度である。横補強によるせん断強度の増大は大きい,曲げ強度の増大は小さい。横補強により横拘束効果が期待できるのに曲げ強度が小さい理由は,軸力比が0.2と小さいからである。

Fig. 6より,柱せい面にアングル鋼材を両面または片面に使用したR04S-P65AD,R04S-P65AD1の試験体だけはせん断余裕度がより小さく,特にアングル鋼材を両面使用した試験体R04S-P65ADは極端に小さいことが分かる。これらの試験体はアングル鋼材がせん断面にあり,かつPC鋼棒の緊張力による摩擦力分しか働かないため,他の試験体と比べると非常に小さい値となっている。したがって,アングル鋼材をせん断面に配置してもせん断強度の増大にはあまり寄与していないことが分かる。また,Fig. 7のスケルトンカーブとせん断強度を見ると,上記の試験体は曲げ強度に達することなく,せん断破壊していることになる。実験上でも,これらの試験体は主筋が降伏する前にせん断破壊しており,せん断強度に関する計算値が実験値を精度良く評価できている。

R04S-P65AW,R04S-P65AW1とR04S-P65はせん断面にPC鋼棒があるため,せん断余裕度は他の試験体よりも高い計算結果となった。Fig. 7を見



ると、どの試験体もせん断強度が曲げ強度を上回っており、曲げ破壊先行型を示唆している。実験でも曲げ破壊先行の柱となったが、十分な靱性を確保できなかった。このときのせん断余裕度は1.05～1.12である。特にこれらの3体の中でR04S-P65が横拘束効果とせん断補強効果が計算上高いにもかかわらず、靱性能があまりよくない理由は、計算に反映されない主筋の座屈防止が十分でないためであると推定される。このことが、柱の軸ひずみの増加に影響している。

R04S-P65SはPC鋼棒で鋼板を圧着することで

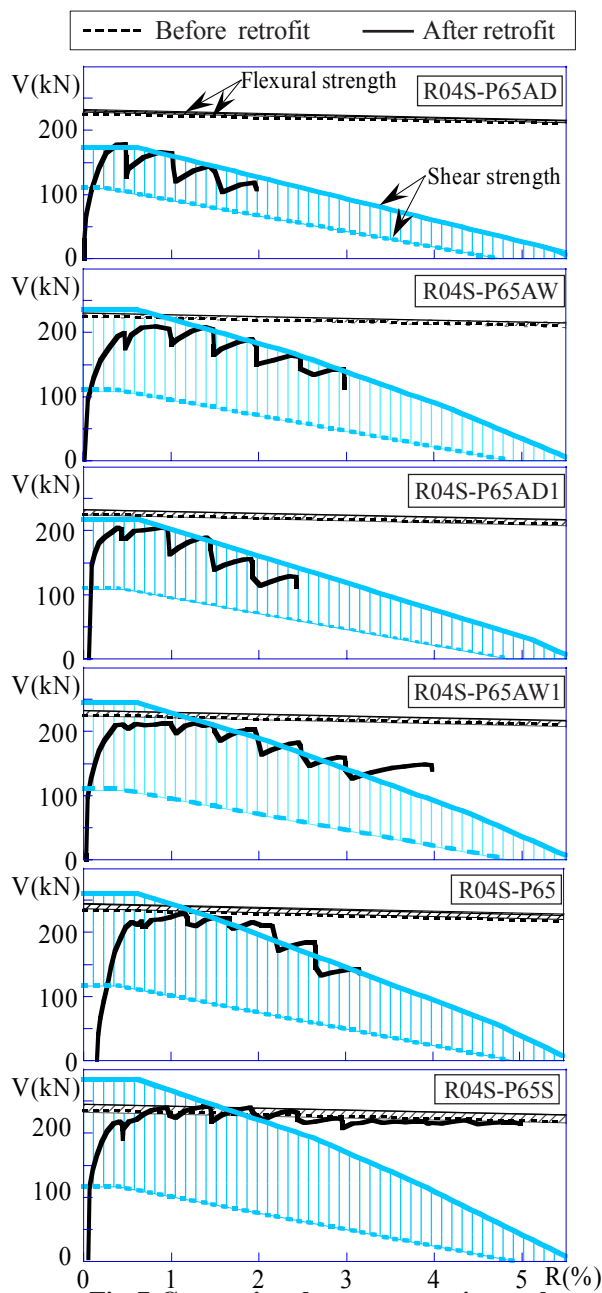


Fig. 7 Comparison between experimental and calculated results

強度上昇率、せん断余裕度共に他の試験体に比べ上昇している。Fig. 7より、曲げ強度略算値に沿った実験結果を得ることができた。ヒンジ部のせん断損傷を高い横拘束効果によって防ぐことができたので、曲げ降伏後にせん断劣化することなく、良好な靱性が確保されたものと思われる。このときのせん断余裕度は1.15で、強度上昇率が1.42である。

5. 結論

1) 靱性を維持するためには、横拘束効果とせん断補強効果だけではなく、主筋の座屈防止効果も考慮することが必要であると分かった。

2) アングル鋼材はせん断補強材としては不適切だが、コーナブロックの代替品や主筋の座屈を抑制できる横拘束材としてその効果を発揮できる。したがって、アングル鋼材はせん断破壊が考えられる面と直交する面に利用したほうが望ましい。それにより、コーナブロックを使用した試験体とほぼ同等の耐震性能を確保できる。

参考文献：

- 1) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: プレストレスを導入したPC鋼棒で外帯筋状に横補強したRC柱の耐震補強法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 No. 526, pp. 141-145, 1999.12
- 2) 森下陽一, 山川哲雄, 小早川直史, 堀田勲: 緊張PC鋼棒を用いた偏心袖壁付き柱の耐震補強に関する実験的研究Vol.25, No.2, pp.1513-1518, 2003
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999, 日本建築学会, pp. 52-57, 154-155, 1999.11
- 4) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, Aug. 1988
- 5) Richart, F. E. et al.: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stress, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Bulletin, No. 185, 1928.
- 6) 日本建築学会: 鉄骨工事技術指針, 工事現場施工変, 日本建築学会, pp. 174-176, 1996.2
- 7) 崎野健治, 山口達也, 中原浩之, 向井照義: コンクリート充填円形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp. 231-236, 2002. 3
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, pp. 142-162, 175-192, 1999.8