

論文 ストラット部材を用いたRC橋脚の耐震性向上に関する実験的検討

鈴木 裕隆^{*1}・菅野 貴浩^{*2}・土田 大輔^{*3}・石橋 忠良^{*4}

要旨：耐震性の劣る RC 橋脚の耐震補強は、現在、躯体の全周面を鉄筋コンクリートや鋼板により巻き立てることによりせん断耐力および変形性能を向上させる方法が一般的である。しかし、この場合、躯体基部まで掘削を行うことが原則となるため、施工条件が悪い場合には工事の長期化やコストの増大に繋がっているのが現状である。そこで今回、コンクリート充填鋼管をフーチング天端まで立て込み、それを躯体からの張出し部にて固定しストラット部材とすることで橋脚躯体の耐震性を向上する工法（ストラット工法）を開発し実験的検討を行った。

キーワード：耐震補強, RC 橋脚, ストラット部材

1. はじめに

土木構造物の柱部材の耐震補強は、現在、補強対象部材を曲げ破壊先行型とし、さらにその部材の変形性能を向上させる目的で部材端部のせん断耐力を上げる方法が一般に用いられている。RC 橋脚の耐震補強でいえば、躯体基部まで掘削し、せん断補強鉄筋を躯体の全周面に追加配置してコンクリートにより巻き立てる方法や、躯体の全周面に鋼板を巻き立て、その隙間にモルタルを充填する方法等がそれにあたる。

一方、RC 橋脚の耐震補強工事を行うにあたっては、橋脚躯体が地中部深くまで埋まっていたり、水中部にあったり、道路や鉄道に近接していたりなど、施工条件が厳しい場合も少なくない。そのような場合、躯体基部までの掘削に膨大な仮設工事が必要となり、上述の方法を用いると工事の長期化やコストの増大に繋がる現状がある。

そこで、躯体基部をコンクリートや鋼板で巻き立てる補強方法ではなく、ストラット部材を配置する新しい構造形式（ストラット工法）により耐震性を向上させる方法を提案した。スト

ラット工法とは、基部までの大掛かりな掘削を行うことなしに、地上部からコンクリート充填鋼管をフーチング上に構築し、躯体からの張出し部にて固定することにより耐震性を向上させるものである。

今回、ストラット工法の効果について実験的検討を行ったので報告する。

2. 実験の概要

図-1 に試験体概要図 (No.3 の例) を、表-1 に使用材料を示す。コンクリート充填鋼管の強度およびヤング係数はコンクリート充填鋼管構造設計施工指針¹⁾を適用して算出した。なお、コンクリート強度の低減係数 c_{γ_u} は 1.0 とした。

試験体は、短辺と長辺の比が 1:6 である既設の RC 壁式橋脚に対し、新たに設けた張出し部がフーチング上に配置されたコンクリート充填鋼管を固定する構造を模擬したものであり、躯体基部の圧縮側のコンクリートが破壊した後もコンクリート充填鋼管がストラット部材として圧縮力を負担することにより耐力を維持するこ

*1 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 耐震技術 PG 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 耐震技術 PG グループリーダー 工修 (正会員)

*3 東鉄工業 (株) 土木本部 土木エンジニアリング部 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道 (株) 構造技術センター 所長 工博 (正会員)

対して十分な量の補強鉄筋を配置した。

なお、ストラット部材は張出し部に 80 mm 挿入されている形であるが、それ以外に定着のための特別な措置等はしていない。また、フーチング上面に対しても圧縮力を伝えるのみで定着していない。

載荷は、551.25kN ($0.75\text{N}/\text{mm}^2$) の鉛直軸力のもと正負交番載荷にて行った。載荷点を躯体基部から 1200mm の高さとし、正負交番荷重は、最外縁の軸方向鉄筋のひずみが鉄筋の材料試験から求めた降伏ひずみに達するときの変位を降伏変位 δ_y とした上で、正負それぞれ $1\delta_y$ まで載荷後、 $10\delta_y$ までは δ_y の整数倍を、それ以降は δ_y の偶数倍を片振幅とした変位制御により正負 1 サイクルずつ載荷した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の荷重と変位の関係を図-2に示す。配置したストラット部材の本数に関わらず、すべての試験体において、変位の増加とともに躯体基部付近（躯体基部から張出し部下端までの範囲）に損傷が集中し荷重が低下する破壊性状を示した。以下に、載荷開始からの載荷終了までの破壊性状を示す。なお、荷重と変位の関係については次節に詳述する。

正側に載荷開始後、荷重 150kN~400kN 程度で躯体基部に曲げひび割れが確認された。荷重が増加すると躯体基部から 1D 区間内 (D: 躯体断面高さ) の高さ方向に 100mm 程度の間隔で曲げひび割れが複数発生し、引張側の軸方向鉄筋が基部付近の位置において降伏した。

その後、負側に載荷し、正側とほぼ同様のひび割れ発生性状を示した後、引張側の軸方向鉄筋が基部付近の位置において降伏した。

変位の増大とともに、1D 区間に発生した複数のひび割れ幅が大きくなり、さらにそのひび割れが圧縮側の基部に向かって伸びる傾向を示した。2 δ_y 時には、各試験体とも、軸方向鉄筋は 1D 区間内の高さ方向すべての範囲において降

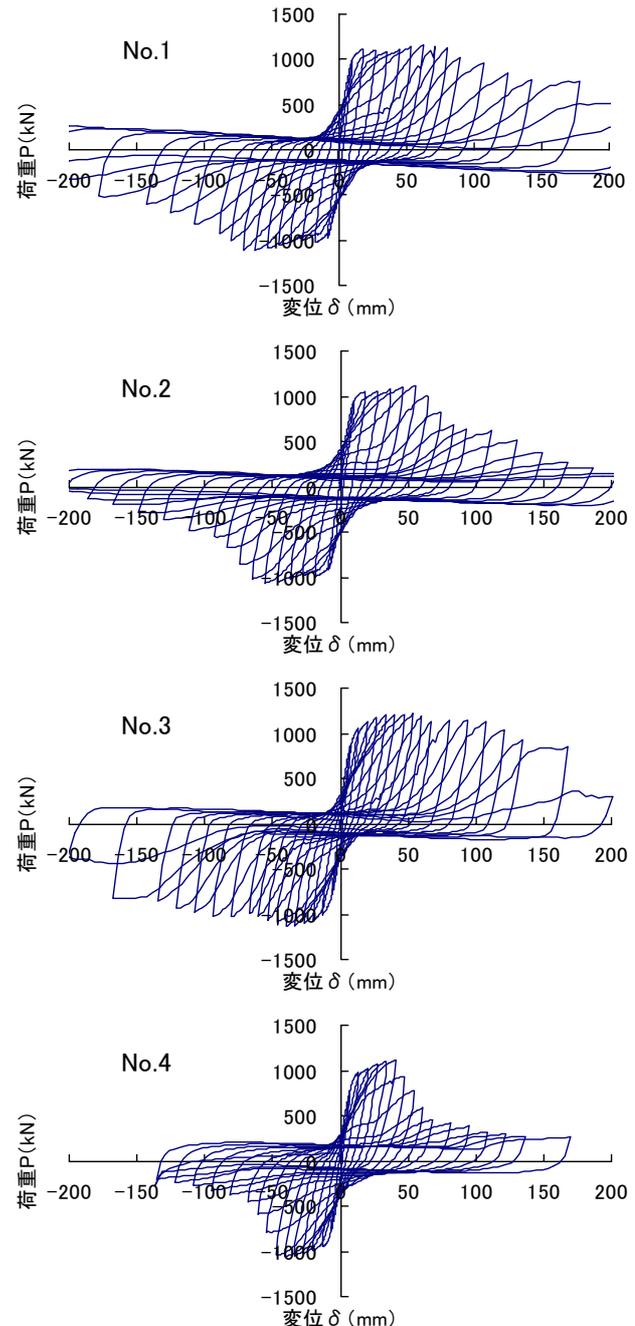


図-2 荷重と変位の関係

伏した。

3 δ_y ~4 δ_y 時には、ひび割れの本数が増加するとともに、すでに発生しているひび割れの幅が拡大した。特に、引張側の基部より 1D の高さの位置付近から斜め下 45° の角度で圧縮側の基部付近に向かって伸びるひび割れの幅の拡大が顕著となり、その幅は 5mm 程度であった。また、この時点から、軸方向鉄筋がかぶりコンクリートを押し出すような傾向が確認され始めた。

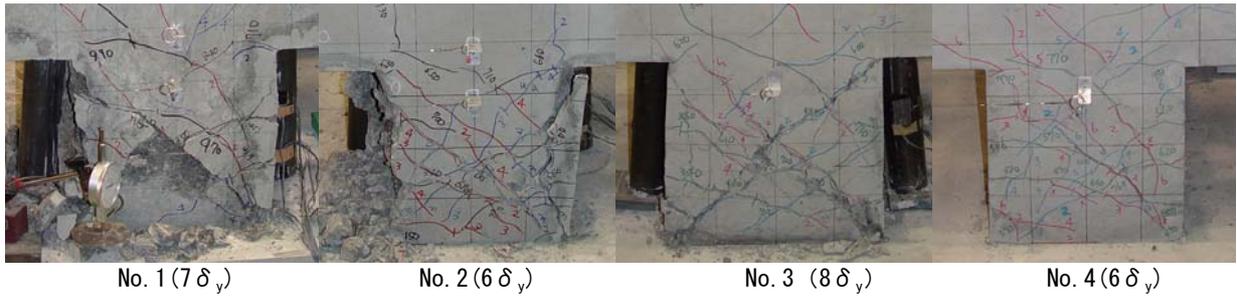


写真-1 各試験体の最大荷重時における躯体基部付近の状況

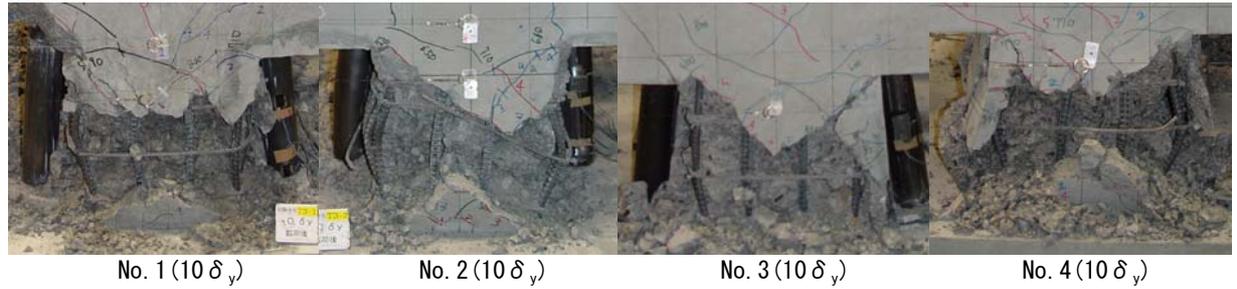


写真-2 各試験体の10δy時における躯体基部付近の状況

5δ_y～8δ_y 時には、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが発生し、かぶりコンクリートと軸方向鉄筋の付着がほとんど取れていない状況となった後、一部のかぶりコンクリートが剥落し内部の鉄筋がむき出しになった。それとともに荷重が低下しはじめた。各試験体の最大荷重時における躯体基部付近の状況を写真-1に示す。

9δ_y～10δ_y 時には、変位の増加とともに荷重が低下する傾向を示した。その低下の程度は配置したストラット部材の本数によって違いが見られ、ストラット部材を6本配置したNo.1およびNo.3の荷重低下は、ストラット部材を3本配置したNo.2や1本配置したNo.4と比較して緩やかであった。1D区間内のかぶりコンクリートはほぼすべて剥落し、ストラット部材の圧縮変形も進んだ。各試験体の10δ_y時における躯体基部付近の状況を写真-2に、No.1の10δ_y時における全体状況を写真-3に示す。

その後、20δ_yを超える程度まで変位を増加させた。No.1では12δ_y時(変位107.0mm時)の負側載荷時に張出し部端部が破壊し、端部に配置したストラット部材が有効に働かない状況となり、正側に比べて早く荷重が低下した。それ以外の試験体については、20δ_y時においてもス



写真-3 No.1の10δy時における全体状況

トラット部材は張出し部とフーチングの間に固定されていた。

ストラット部材を6本配置したNo.1およびNo.3は20δ_yを超えても荷重の低下は比較的緩やかであった。また、9～10δ_y時に荷重の低下が進んだストラット部材を3本配置したNo.2および1本配置したNo.4についても、10δ_yを超えたあたりで荷重の低下が緩やかとなる傾向を示した。

また、ストラット部材の変形についてであるが、初期の段階では張出し部とフーチング上面との間で突っ張るために働く圧縮力により鉛直方向に圧縮変形しているものと考えられる。し

かし、変位が大きくなると、ストラット部材に圧縮力だけでなく内側の軸方向鉄筋がかぶりコンクリートを押し出そうとする水平力も働き、やや弧の字形状となる傾向がみられた。

3.2 荷重と変位の関係

各試験体の荷重と変位の関係（包絡線）を図-3に示す。無補強の場合と比較するため、図中には、すべての試験体の中でコンクリート強度が最大の $f'_c=40.8 \text{ N/mm}^2$ であるNo.2試験体の条件でストラット部材を配置しない場合（無補強の場合）の計算値（鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物²⁾を適用して算出）を付記した。

図から、ストラット部材を配置すると、無補強の場合の計算値と比較して、降伏荷重に至るまでの荷重増加の割合はほとんど変わらないが、その後の変形性能が大きいことがわかる。ストラット部材の本数が多いほど変形性能は向上し、

ストラット部材を6本配置したNo.1およびNo.3では変位150mm（回転角1/8）程度においても顕著な荷重低下は見られなかった。また、No.3にはストラット部材下端に支圧プレートを設けたが、設けていないNo.1と比較して荷重-変位の関係に明確な違いは見られなかった。

無補強の場合の計算値とストラット部材を配置した実験値の比較を表-2に示す。降伏荷重（基部付近の軸方向鉄筋が降伏）については、ストラット部材が1本であるNo.4は無補強の場合の計算値とほぼ同じであるが、ストラット部材が3または6本であるNo.1~No.3は無補強の場合の計算値と比べ1~2割程度上回った。最大荷重については、ストラット部材の本数によって、無補強の場合の計算値に比べて3~4割程度上回った。

無補強の場合の降伏変位の計算値を基準としたじん性率 $\delta_n/\delta_{y\text{cal}}$ については、ストラット部材

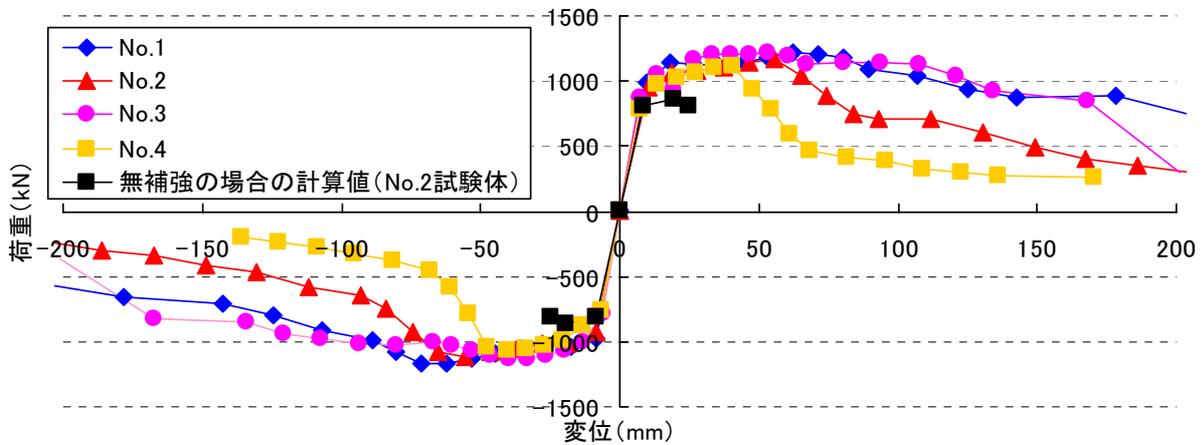


図-3 荷重と変位の関係（包絡線）

表-2 無補強の場合の計算値とストラット部材を配置した実験値の比較

No.	無補強の場合の計算値					S/(T _y +N)	ストラット部材を配置した実験値(正側)							ストラット部材を配置した実験値(負側)								
	P _{ycal}	δ _{ycal}	P _{mucal}	δ _{mucal}	δ _{ncal}		P _y	δ _y	P _{max}	δ _{max}	δ _n	δ _{n2/3}	δ _n /δ _{ycal}	δ _{n2/3} /δ _{ycal}	P _y	δ _y	P _{max}	δ _{max}	δ _n	δ _{n2/3}	δ _n /δ _{ycal}	δ _{n2/3} /δ _{ycal}
	kN	mm	kN	mm	mm		kN	mm	kN	mm	mm	mm			kN	mm	kN	mm	mm	mm		
1	808	8.5	862	19.2	24.8	0.59	992	9.5	1216	62.2	192.2	251.4	22.7	29.7	979	8.4	1169	71.1	124.6	211.2	14.7	24.9
2	828	6.2	884	16.7	22.3	0.35	956	10.0	1168	55.5	78.6	139.7	12.6	22.5	928	8.5	1117	55.7	79.6	116.7	12.8	18.8
3	782	6.4	837	16.9	22.8	0.69	869	7.5	1216	53.3	172.0	186.0	27.0	29.2	780	5.9	1134	40.1	170.5	187.1	26.8	29.4
4	797	6.4	851	16.9	22.6	0.11	779	7.1	1118	40.7	53.8	64.5	8.4	10.1	758	6.6	1060	40.6	54.1	64.0	8.5	10.0

P_{ycal}:降伏荷重の計算値, δ_{ycal}:降伏変位の計算値, P_{mucal}:最大荷重の計算値, δ_{mucal}:最大荷重時の変位の計算値, δ_{ncal}:降伏荷重を維持できる最大の変位の計算値, S:ストラット部材の負担する圧縮力(kN), T_y:引張鉄筋の降伏耐力(KN), N:軸力(kN)
P_y:降伏荷重, δ_y:降伏変位, P_{max}:最大荷重, δ_{max}:最大荷重時変位, δ_n:降伏荷重の計算値を維持できる最大の変位, δ_{n2/3}:降伏荷重の計算値の2/3を維持できる最大の変位

が3本である No.2 試験体においても 10 を上回った。

3.3 変形性能に関する検討

ストラット部材の配置による変形性能の向上は、大変形時に圧縮側のコンクリートが破壊し圧縮力を負担できなくなった後も、ストラット部材が圧縮力を負担することにより荷重低下を抑えるためであると考えられる。

ストラット部材の本数の少ない No.2 および No.4 の荷重試験結果では、一度荷重が低下した後にある一定の荷重を保持する傾向がみられたが、これは、コンクリートが圧縮力を負担できない状態となってもストラット部材がその配置した本数分機能し続けたためであると考えられることができる。

コンクリートが圧壊し圧縮力をストラット部材のみが負担すると仮定した場合、力のつり合いから、 $S=N+T$ （ここに、 S ：ストラット部材が負担する圧縮力、 N ：軸力、 T ：引張側の鉄筋に発生している引張力）となる。ここで、 T を引張側の最外縁に配置された全ての軸方向鉄筋が降伏する際に発生する引張力 T_y とした場合、 $S/(N+T_y) \geq 1.0$ を満足するようにストラット部材を配置すれば、変位の増加に伴いコンクリートが圧壊したとしても軸方向鉄筋が降伏した際の引張力が低下することなく、降伏荷重程度を維持し続けることができることとなる。そこで、今回の荷重試験結果について、 $S/(N+T_y)$ を指標とし、じん性率 δ_n/δ_{ycal} （無補強時の降伏荷重の計算値を維持できる最大の変位を無補強時の降伏変位の計算値で除した値）およびじん性率 $\delta_n/\delta_{ycal2/3}$ （無補強時の降伏荷重の計算値の 2/3 を維持できる最大の変位を無補強時の降伏変位の計算値で除した値）の比較を試みた。

比較結果を図-4 に示す。試験時に一部のストラット部材が荷重途中で有効に働かなくなった No.1 の負側では若干傾向が異なるが、ストラット部材が有効に働いたものについては、 $S/(N+T_y)$ が大きくなればじん性率もほぼ比例して大きくなる傾向にあるといえる。

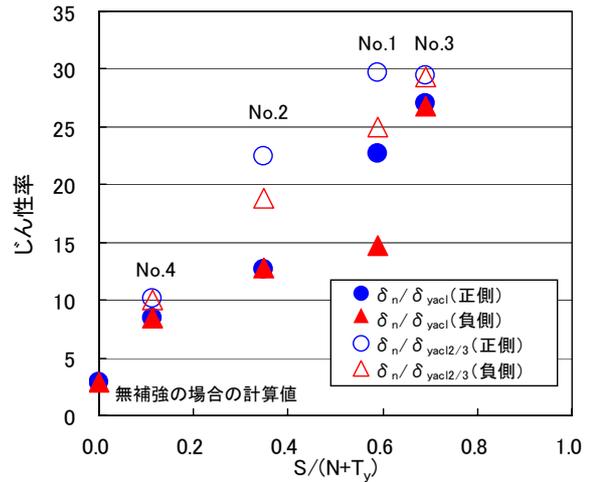


図-4 $S/(N+T_y)$ とじん性率の関係

4. まとめ

ストラット部材を用いた RC 橋脚の耐震性向上に関して、今回の実験範囲（軸力： $0.75N/mm^2$ ，既設部引張鉄筋比：1.31%，既設部せん断補強鉄筋比：0.09%，耐力比：1.0 程度）において得られた結果を以下に示す。

- (1) ストラット部材を配置し張出し部にて固定する本工法を用いることにより、無補強の場合の計算値と比較して橋脚躯体の変形性能は向上する。
- (2) 配置するストラット部材の本数が増えると変形性能は向上する。
- (3) ストラット部材配置後のじん性率は、引張側の鉄筋が降伏する際に発生する引張力と軸力の和に対するストラット部材が負担する圧縮力の割合 $S/(N+T_y)$ を指標として概ね評価でき、 $S/(N+T_y)$ が大きくなると、じん性率はほぼ比例して大きくなる傾向がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997.10
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，2004.4