

論文 外周に鋼材を配置する PC 電車線柱の耐震補強工法の基礎的検討

伊東 佑香^{*1}・小林 薫^{*2}

要旨：東北地方太平洋沖地震での PC 電車線柱折損事象を受け、JR 東日本では PC 電車線柱の耐震補強工法の開発を進めている。現在開発中の工法は、既設 PC 電車線柱に対して補強鋼材を配置し、剛性を付与する工法である。本稿では、在来線 PC 電車線柱の諸元を用いて、補強鋼材の最適配置について解析的に検討した結果を報告する。検討の結果、適切な量の補強鋼材を配置することで、補強鋼材と PC 電車線柱の断面力分担により、PC 電車線柱基部の発生モーメントを低減できること、補強鋼材によって PC 電車線柱の固有周期が短くなり、高架橋との共振が抑制できることを確認した。

キーワード：PC 電車線柱，耐震補強，共振，補強鋼材，動的解析

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震での高架橋上の電車線用プレストレストコンクリート柱（以下 PC 電車線柱）の折損被害を受け、JR 東日本では PC 電車線柱の耐震補強を進めている¹⁾。

筆者らは、PC 電車線柱が地震時に基部で脆性破壊するため復旧に時間を要する点²⁾、また、PC 電車線柱と高架橋の共振箇所が被害が多数発生している点³⁾に着目し、これらの課題を解決するための新たな耐震補強工法の検討を行っている。本稿では、開発中の耐震補強工法について解析的に検討を行った結果を報告する。

2. 検討工法の概要

検討工法は、図-1 のように高架橋や橋りょう上の既設 PC 電車線柱に対して、鉛直方向に補強鋼材を配置することで耐震性能を向上させる工法である。

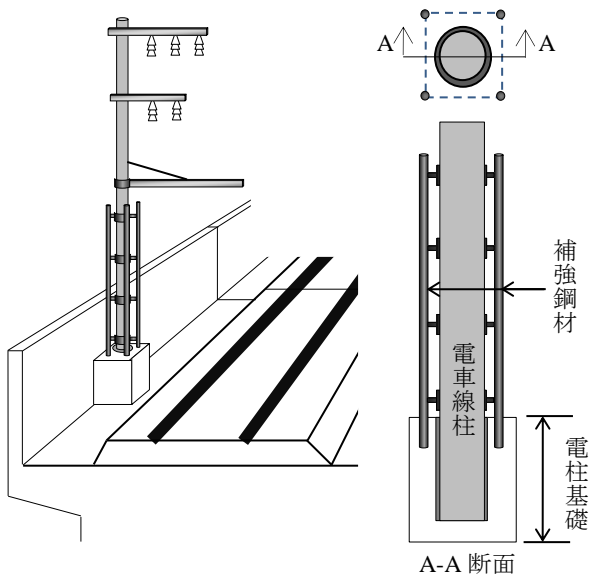


図-1 耐震補強工法の概要

検討工法の要求性能は、大規模地震時、PC 電車線柱基部に発生する断面力を脆性破壊未満（終局モーメント未満）に抑え、PC 電車線柱折損による列車支障を防ぐことである。検討工法では下記の補強効果の実現を図る。

- ・補強鋼材による断面力分担効果

補強鋼材を配置することで、大規模地震時に PC 電車線柱のみで負担していた断面力を補強鋼材と分担し、PC 電車線柱基部に発生する断面力を低減する。

- ・補強鋼材による共振抑制効果

PC 電車線柱と高架橋等の弾性固有周期が近く、共振が懸念される場合、補強鋼材の剛性付加により PC 電車線柱の固有周期を短くすることで応答初期の共振を避け、PC 電車線柱基部に発生する断面力を低減する。

- ・補強鋼材による倒壊防止効果

補強設計で想定した以上の地震動発生した場合、無補強 PC 電車線柱は脆性破壊するため PC 電車線柱単体でエネルギー吸収が期待できないが、検討工法では補強鋼材を降伏させることでエネルギー吸収を実現する。また、PC 電車線柱基部で脆性破壊が生じても、補強鋼材が破断しない諸元とすることで、補強鋼材に PC 電車線柱の倒壊防止機能を持たせる。補強鋼材の塑性化に伴い補強鋼材の取替が必要となるが、列車支障を防ぎ、かつ迅速な復旧が可能となる。

以上の補強効果を実現するため、補強鋼材は電柱基礎に定着させ、PC 電車線柱基部で断面力を負担できるようにする。加えて、PC 電車線柱は高さが 10m 近いことから、補強鋼材は 1m 以下に分割して PC 電車線柱に固定し、補強鋼材の座屈防止と施工性を確保する構造とする。

本稿では、在来線 PC 電車線柱を実際の装柱条件に基づきモデル化し、PC 電車線柱単体および高架橋上での地震時応答を求め、先の要求性能を満足するために必要な補強鋼材の諸元について検討した結果を示す。

*1 JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 工修 (正会員)

*2 JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 博(工) (正会員)

3. 無補強 PC 電車線柱の地震応答解析

JR 東日本管内の在来線 PC 電車線柱の地震時応答性状を確認し、これに基づき補強鋼材諸元を検討する。

3.1 解析モデルおよび解析条件

補強対象は、JR 東日本管内に設置された在来線 PC 電車線柱とし、軌道直線区間のうち装柱条件の厳しい箇所を選定してモデル化した。

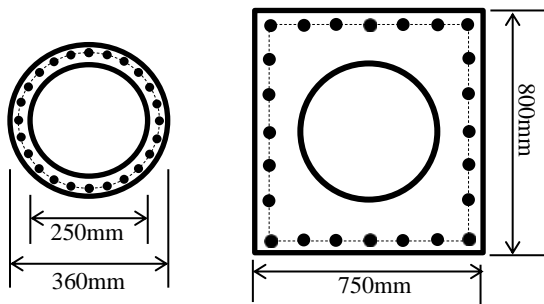
(1) PC 電車線柱

PC 電車線柱は、実際の装柱条件を考慮し、1991 年までに製造された $\phi 360$ 柱 (電柱種類 12-35-N6.5B) とする。ひび割れによる剛性低下を考慮し、既往の水平交番載荷試験結果¹⁾に基づき履歴によるエネルギー吸収の小さい逆行型で履歴復元力特性をモデル化した。実際の PC 電車線柱の破壊形態は基部コンクリートの圧壊となるが、解析上終局点を設けずにモデル化している。PC 電車線柱自重は 150kg/m とし、質点毎に割り振った。

(2) 電柱基礎

電柱基礎は、高架橋上の RC 製投げ込み基礎を対象とした。電柱基礎も PC 電車線柱と同様にひび割れ剛性低下を考慮した逆行型で履歴復元力特性をモデル化した。また、本稿ではモルタルを充填した基礎を想定し、電柱基礎内で PC 電車線柱が変形する可能性は考慮しない。

PC 電車線柱および電柱基礎について、図-2 に断面諸元を、図-3 に骨格曲線を示す。PC 電車線柱の終局モーメントは 189.8kNm であった。



PC 電車線柱

主筋： $\phi 8$ -24 本

電柱基礎

主筋：D20-20 本

図-2 PC 電車線柱および電柱基礎の断面諸元

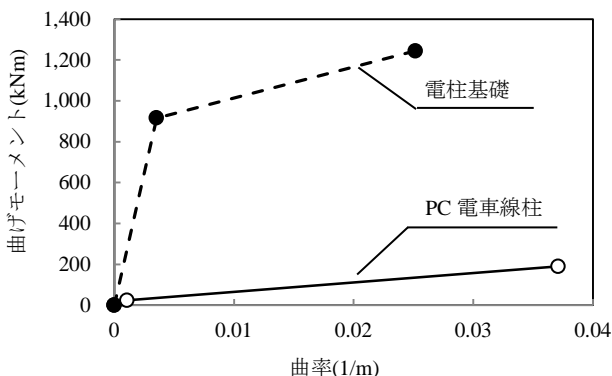


図-3 PC 電車線柱および電柱基礎の骨格曲線

(3) 支持物

支持物は、架空地線、高压配電線、き電線および電車とした。配置および荷重を図-4 および表-1 に示す。

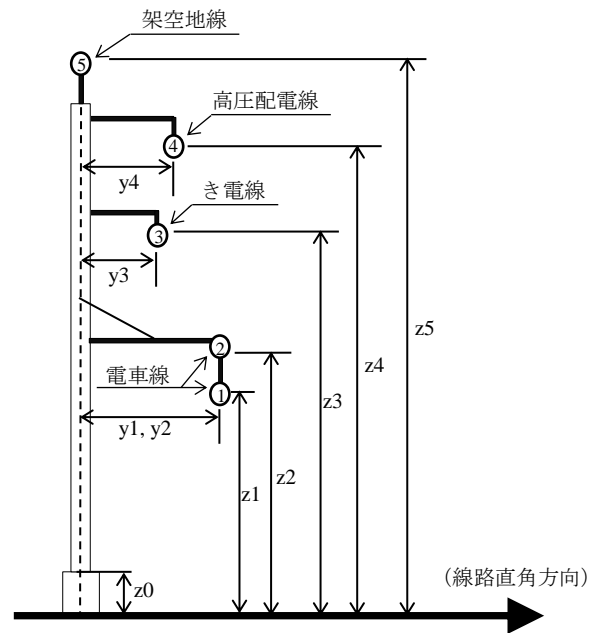


図-4 支持物配置

表-1 支持物荷重

No	名称	y(m)	Z(m)	荷重(kN)
0	電柱基礎	0.0	1.0	—
1	電車線	3.5	6.2	0.689
2	電車線+ブラケット	3.5	7.2	1.092
3	き電線	1.2	9.0	3.946
4	高压配電線	1.5	11.0	1.305
5	架空地線	0.0	13.0	0.377

本稿では PC 電車線柱が支持する鉛直方向の荷重のみを考慮し、PC 電車線柱の挙動を抑制する方向に働くとみられる電車線等の線路方向の張力は考慮しないものとした。また直線部のため、横張力は考慮していない。

各支持物を PC 電車線柱に固定する治具 (腕金およびブラケット) は剛性の小さい条件でモデル化し、固有値解析で剛性の影響を確認する。なお、腕金およびブラケットの鉛直方向部材は十分に剛な部材と仮定し、いずれの治具も弾性の履歴復元力特性にてモデル化した。

(4) 動的解析条件

動的解析は電柱基礎下端を固定端とし、鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計)⁴⁾の L2 地震動 (スペクトル I, G2 地盤) を線路直角方向に入力し、ニューマークの β 法 ($\beta=1/4$) を用いて解析した。減衰は実物大試験結果⁵⁾に基づき 2% とし、指針³⁾の設計スペクトル作成時の 5% と応答値の比較を行う。

3.2 解析結果

(1) 固有値解析

PC 電車線柱の固有値解析の結果、PC 電車線柱が線路側に倒れ込むモードが一次モードとなり、固有周期は 0.807sec となった。固有周期は、既往の研究における新幹線 PC 電車線柱の固有周期に対して長くなり、本稿で対象とした在来線 PC 電車線柱は、PC 柱の断面諸元に対して支持する重量（質量）が大きいことを示している。

変形は、全体系での一次モードが軌道側へ倒れ込むモード、二次モードはブラケットが PC 電車線柱の変形を抑制するモードとなった。各モード図を図-5 に示す。

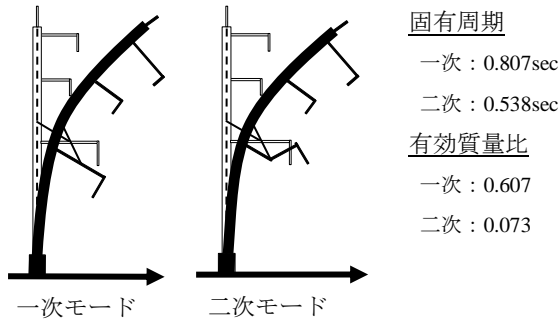


図-5 全体系の変形モード

ブラケットが柔に挙動することによる応答低減を想定したが、一次モードが卓越しており、ブラケット諸元の影響は小さい結果となった。

(2) 高架橋による共振検討

この条件の PC 電車線柱モデルに高架橋モデルを追加し、高架橋の固有周期をパラメータとして PC 電車線柱天端の最大応答加速度の値を求めた。ここで、高架橋は 30m×30t/m の自重を仮定し、この自重とパラメータである固有周期からひび割れを考慮しない割線剛性で初期剛性を算定し、二次剛性を初期剛性の 1/100 として、バイリニアの骨格曲線とした。降伏震度は指針³⁾で最も設計スペクトル値の大きい降伏震度 1.0、履歴復元力特性はエネルギー吸収の小さい原点指向型、減衰は 5% とした。最大応答加速度の結果を図-6 に示す。

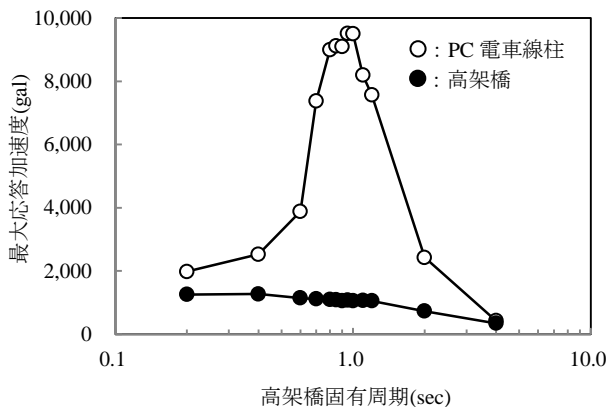


図-6 各部材天端の最大応答加速度

PC 電車線柱天端での最大応答加速度は、明確なピークが見られ、高架橋と PC 電車線柱の共振が確認できた。一方で、高架橋は長周期化による低減はあったが固有周期の変化に対し PC 電車線柱ほど変化は見られず、PC 電車線柱の共振による高架橋側の応答増幅は小さかった。

(3) 減衰定数の影響検討

本稿では PC 電車線柱および電柱基礎の減衰定数を 2% と設定したが、指針³⁾の設計スペクトル作成時と同様に PC 電車線柱 5% および電柱基礎 15% の減衰定数とした場合の最大発生モーメントの結果を図-7 に示す。

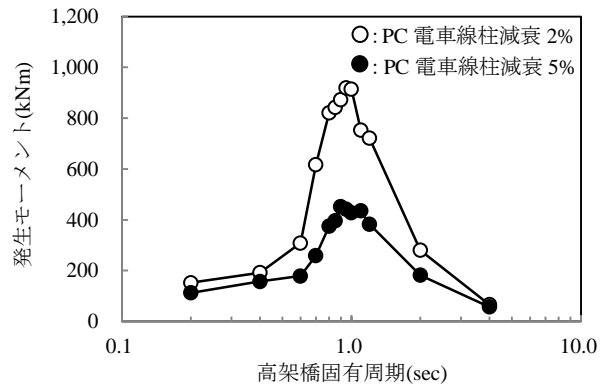


図-7 PC 電車線柱基部モーメント（減衰）

最大発生モーメントについても、最大応答加速度と同様に明確な共振が確認できた。また、減衰の影響が非常に大きいことがわかる。当社で実施した実物大 PC 電車線柱加振試験では減衰定数が 5% より小さかったことから⁵⁾、本稿では減衰定数を安全側に設定するものとし、以降の補強諸元の検討については PC 電車線柱および電柱基礎の減衰定数を 2% と設定した。

図-7 の条件では、高架橋の固有周期 2.0sec 未満で高架橋がいずれも塑性化している。地震動の入力レベルが小さく、高架橋が塑性化しない場合の方が PC 電車線柱の応答が増幅する場合もある⁴⁾ことから、地震動の加速度振幅を 0.25 倍および 0.50 倍とした場合の最大発生モーメントを算定した。この結果を図-8 に示す。

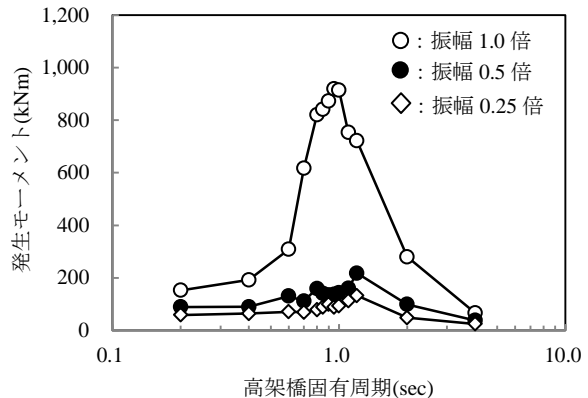


図-8 PC 電車線柱基部モーメント（振幅）

0.50倍では一部高架橋が塑性化したが、0.25倍では高架橋が全て弾性範囲で挙動した。いずれの固有周期でも加速度振幅1.0倍での応答が最大であり、設計地震動1.0倍に対して耐震補強工法の検討を行うこととした。

4. 補強 PC 電車線柱の地震応答解析

4.1 解析モデルおよび解析条件

既設 PC 電車線柱に対して、最大発生モーメントが 919.4kNm と最大となった固有周期 0.95sec の高架橋との組み合わせに着目し、耐震補強工法の効果を検証する。補強鋼材に関するパラメータは以下の通りである。

(1) 補強鋼材の径

補強鋼材径は、人力施工が可能な諸元とするため鋼材 1 本あたり 10kg 程度となるよう、 $\phi 24$ 、 $\phi 32$ 、 $\phi 36$ 、 $\phi 42$ 、 $\phi 48$ の丸鋼に対して検討した。補強鋼材は軸力のみ負担する部材としてモデル化し、最大軸力から必要強度を求め、実用可能な数値内か検証する。固定治具は PC 電車線柱に対してリング状の剛部材として配置する。補強鋼材および固定治具の自重も各々の径に合わせて付与した。

(2) 補強鋼材の平面配置

補強鋼材は、応答が卓越する線路直角方向で、PC 電車線柱中心から補強鋼材中心までの距離を長く取った方が効率的に剛性を付与できる。このため、図-9 のように PC 電車線柱中心から線路直角方向に 45 度の配置とする。

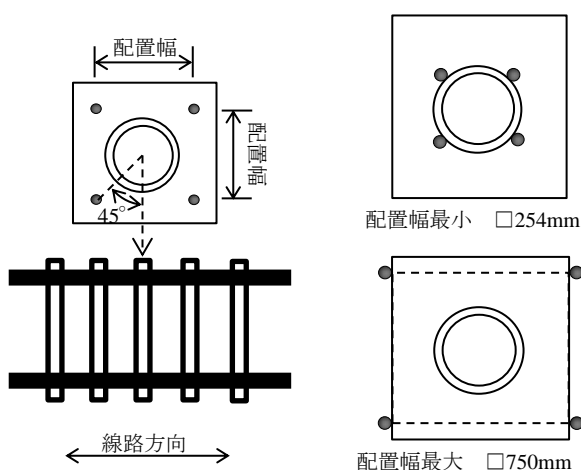
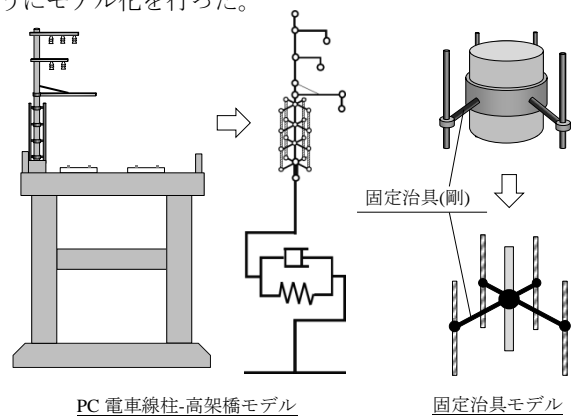


図-9 補強鋼材の配置

また、基部で電柱基礎に固定するため、電柱基礎の寸法を最大として補強鋼材を配置する必要がある。PC 電車線柱に沿わせる配置を最小とし、電柱基礎側面に固定する配置を最大として、実際の電柱基礎寸法を考慮し、最小 $254\text{mm} \times 254\text{mm}$ 、 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 、 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 、最大 $750\text{mm} \times 750\text{mm}$ の配置に対して検討した。

補強鋼材は、鉛直方向は PC 電車線柱ブラケットの直下までとし、鉛直方向に 800mm 間隔で固定治具を設け

て配置した。この長さは人力施工が可能な寸法であり、PC 電車線柱の固定治具間隔が短くなりすぎないように設定したものである。本稿の条件では、PC 電車線柱基部からブラケット下まで 6.2m となるため、800mm 間隔で 7 段および最上段のみ 600mm 間隔で 1 段の計 8 段の補強鋼材配置としている。以上の条件を踏まえて図-10 のようにモデル化を行った。



PC 電車線柱-高架橋モデル

固定治具モデル

※モデル化の際は 6.2m 範囲を 800mm \times 7 段+600mm \times 1 段で補強。

図-10 補強解析モデル (略図)

4.2 解析結果

(1) 最大発生モーメント

無補強時および補強時の高さ方向の発生モーメントを図-11 に示す。補強時は、補強鋼材径 $\phi 36$ および配置 600×600 の場合のものとした。

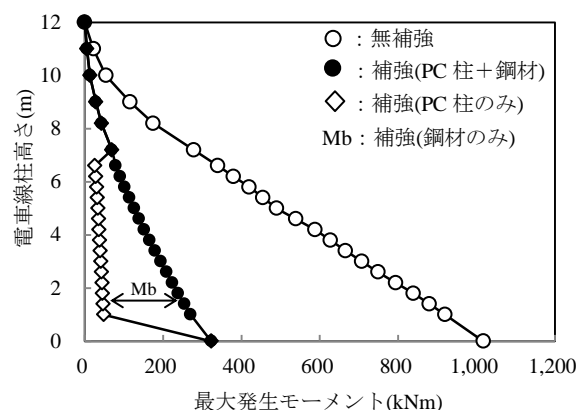


図-11 最大発生モーメント-高さ関係

図-11 において、電車線柱高さが 0m の位置は電柱基礎の基部、高さ 1m および 12m の位置は PC 電車線柱の基部および天端の位置である。

補強時については、PC 電車線柱の高さ方向に発生する最大発生モーメントについて、PC 電車線柱および補強鋼材の両部材に負担するモーメントと、PC 電車線柱単体で負担するモーメントで示している。このモーメントの差が、補強鋼材が負担しているモーメント (Mb) である。

補強鋼材を配置することにより、補強部で PC 電車線

柱と補強鋼材が各々モーメントを分担している。補強部の PC 電車線柱と補強鋼材のモーメント分担率は、PC 電車線柱：補強鋼材として、PC 電車線柱基部で 1：4.58、補強天端で 1：2.07 となった。基部ほど補強鋼材の分担率が高く、高さ方向に PC 電車線柱の分担率が増す傾向となった。分担率の平均値は 1：3.29 であり、PC 電車線柱と補強鋼材の曲げ剛性の比率 1:3.37 に概ね一致する。

PC 電車線柱の耐力を大きくした場合、補強の影響により高架橋の受梁等に損傷が生じる可能性がある⁴⁾が、検討工法で、補強後の無補強に対する高架橋の最大発生モーメントの変化は 0.1%以下で十分小さい値となった。

ここで、無補強時と補強時で諸元が同じ電柱基礎の最大発生モーメントに着目すると、補強後の応答値低減が確認できる。補強後の PC 電車線柱が変形するモードの固有周期は 0.432sec で、固有周期が短くなり本稿で検討対象とした高架橋の共振範囲を外れたとみられる。

(2) 補強鋼材の径および配置幅の影響

補強鋼材の径および配置幅をパラメータとし、PC 電車線柱基部に生じた最大発生モーメントを求めた結果を図-12 に示す。

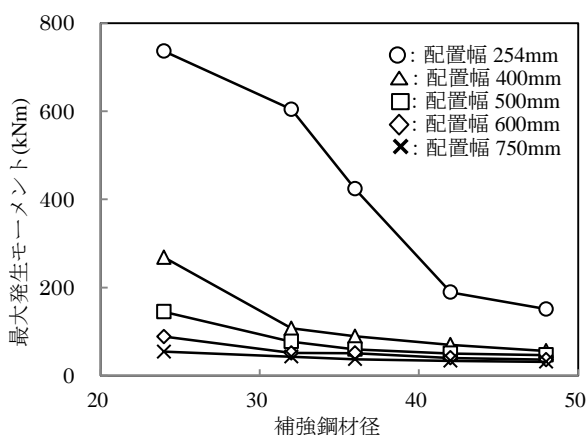


図-12 補強鋼材径-最大発生モーメント関係

いずれの条件でも、補強鋼材の径および配置幅に比例して PC 電車線柱の最大発生モーメントが低減した。

配置幅を小さく取った 254mm で補強鋼材の径と関係に着目した場合、補強鋼材の径が発生モーメントの低減に大きく寄与していたが、配置幅 400mm 以上となると補強鋼材の径によるモーメント低減効果は小さくなった。

(3) 補強鋼材の座屈検討

図-12 は、補強鋼材が座屈を生じない理想的な挙動をするものと仮定して算定を行っている。実際の補強鋼材は、補強鋼材の径が細いほど座屈の恐れがある。補強鋼材の径および配置幅の各条件に対して、補強鋼材に生じる最大圧縮軸力を求め、長さ 800mm の両端固定部材を仮定して、補強鋼材の径毎に座屈荷重を算定し比較した。その結果を表-2 に示す。

表-2 補強鋼材の最大軸力 (圧縮)

		補強鋼材の配置幅 (mm)				
		254	400	500	600	750
補強鋼材の径 (mm)	24	689.5	698.3	456.2	253.1	160.7
	32	1,099.0	468.7	317.5	191.9	137.8
	36	1,186.0	440.6	257.7	195.6	118.0
	42	1,021.0	391.4	231.6	161.9	120.7
	48	1,009.0	308.5	231.0	158.5	136.3

上表のうち、最大圧縮軸力が座屈荷重を上回った補強鋼材の径および配置幅の組み合わせについては、最大圧縮軸力値に下線を入れて示している。

この結果から、補強鋼材の径がφ24 と比較的小さい場合は、配置幅を 600mm まで確保しても座屈荷重を上回る圧縮軸力が生じることがわかる。

また、補強鋼材に弾性を仮定しているため、配置幅が狭まるほど断面的に不利となり、補強鋼材が負担する圧縮軸力が増すはずだが、配置幅 254mm および 400mm では、圧縮軸力がほぼ等しい結果となった。この時 PC 電車線柱に発生するモーメントは、配置幅 254mm で 736kNm、400mm で 268kNm と、配置幅 254mm の場合は PC 電車線柱のモーメント分担が大幅に増加していた。この補強鋼材の圧縮軸力が頭打ちとなる現象が生じる配置幅の条件は、PC 電車線柱の装柱条件毎に異なると考えられ、今後、耐震補強対象となる PC 電車線柱の装柱条件に応じて確認する必要がある。

一方、配置幅を 750mm まで確保できる場合には、補強鋼材の径が小さいものの、配置幅による断面発生する圧縮軸力も小さいため、座屈荷重を下回っている。

続いて、配置幅 254mm とした場合に着目すると、φ42 まで補強鋼材の径を上げなければ座屈荷重を下回ることができない。補強鋼材の径が大きいほど現場での作業性が低下するため、出来るだけ配置幅を確保し、補強鋼材の径が過大とならないよう設定する必要がある。この点において、新幹線のように高欄等との離隔が狭く配置幅確保が難しい箇所より、比較的電車線柱周囲の施工空間が確保できる在来線向けの工法であると言える。

(4) 補強鋼材の降伏強度検討

座屈と同様、本稿の解析モデルは補強鋼材が降伏しない条件で検討を行っているため、補強鋼材に発生する最大応力の妥当性について検証する必要がある。PC 電車線柱は変形が生じた場合、列車の走行に支障がある可能性が高い。そこで、補強鋼材は大規模地震時に降伏を許容せず、弾性挙動の範囲内とするように配置するものとする。実用化に向け、補強鋼材に発生する応力が、一般に流通する鋼材の降伏強度程度に抑えられるか確認する。

補強鋼材に生じる最大軸力より、各補強鋼材に求められる降伏強度を表-3に示す。

表-3 補強鋼材の最大応力

		補強鋼材の配置幅(mm)				
		254	400	500	600	750
補強鋼材の径(mm)	24	1,524	1,544	1,008	619	355
	32	1,366	583	395	<u>239</u>	<u>171</u>
	36	1,165	433	<u>253</u>	<u>192</u>	<u>116</u>
	42	737	<u>283</u>	<u>167</u>	<u>117</u>	<u>91</u>
	48	558	<u>170</u>	<u>128</u>	<u>88</u>	<u>75</u>

丸鋼にSR295を想定し、発生応力が295N/mm²となる範囲を下線により示した。必要降伏強度を295N/mm²以下とする補強鋼材の径および配置は、この範囲内で設定することができる。

補強鋼材に対しては、座屈よりも降伏に対する条件が厳しい結果となった。降伏強度の高い補強鋼材とすると、大規模地震時には弾性範囲内で挙動するが、設計想定以上の地震動時に通常の鋼材よりもエネルギー吸収能が小さくなってしまふ。その点も踏まえ、検討工法では高強度で降伏荷重以降伸びが小さいものは対象外とする。

以上から得られた、本稿の条件によるPC電車線柱および補強鋼材の損傷発生結果を表-4にまとめる。

表-4 検討工法での各部材の損傷発生結果

		補強鋼材の配置幅(mm)				
		254	400	500	600	750
補強鋼材の径(mm)	24	①	①	②	②	③
	32	①	③	③	○	○
	36	①	③	○	○	○
	42	③	○	○	○	○
	48	③	○	○	○	○

凡例①：PC電車線柱終局，補強鋼材座屈

②：PC電車線柱終局未満，補強鋼材座屈

③：PC電車線柱終局未満，補強鋼材降伏

○：PC電車線柱終局未満，補強鋼材降伏未満

表において番号記載のない補強鋼材条件がPC電車線柱の基部に発生するモーメントが終局未満、かつ補強鋼材が座屈および降伏しない補強鋼材の諸元となる。

これは、あくまでJR東日本管内の在来線における荷重条件の厳しい1パターンのみを対象とした結果であり、今後は代表的な複数の装柱条件に対して同様の検討を行い、補強鋼材の最適諸元を検討していく予定である。

また、実際にPC電車線柱を耐震補強する場合、補強鋼材が本稿の解析条件と全く同じように断面力を分担し、固有周期を低減できるとは限らない。実施工での施工精度に対応するために、要求性能を満足する限界の諸元でなく、余裕を取って補強鋼材を径および配置幅を設置するのが望ましい。補強鋼材の固定方法や、施工に伴う設計時の補強効果低減率については、今後実験的に検証していく予定である。

5. まとめ

PC電車線柱の耐震補強工法として、既設PC電車線柱の外周に補強鋼材を配置し、剛性を付与する工法の実現性について解析的検討を行い、下記の知見を得た。

- JR東日本管内の在来線PC電車線柱を対象に、大規模地震時の挙動を動的解析により検証した。その結果、高架橋との共振によりPC電車線の脆性破壊が懸念されることがわかった。
- PC電車線柱の外周に適切な量の補強鋼材を配置することにより、PC電車線柱と補強鋼材で断面力を分担することで、PC電車線柱の脆性破壊を抑制できることを確認した。また、無補強PC電車柱と高架橋の弾性固有周期が近い場合には、補強鋼材の剛性付与によりPC電車線柱の固有周期を短くすることで、高架橋との共振を抑制できることを確認した。
- 検討工法を成立させるため、補強鋼材に発生する軸力を座屈荷重未満および降伏強度未満にする必要がある。本稿のPC電車線柱の装柱条件に対して、この条件を満足する補強鋼材の径および配置幅が、実施工可能な範囲に収まることを確認した。

参考文献

- 1) 岩田道敏，渡部一功，野澤伸一郎，鷹野秀明：PC電化柱の耐震性向上に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol34，No.2，pp979-984，2012
- 2) 林屋均ほか：東日本大震災における新幹線電力設備の被害状況と復旧，電気学会研究会資料，交通・電気鉄道研究会，pp.1-6，2012.5
- 3) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：電車線路設備耐震設計指針・同解説，2013.3
- 4) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），2012.9
- 5) 佐々木崇人，築嶋大輔，草野英明：コンクリート柱（電車線用）の耐震補強工法の実物大試験，土木学会第69回年次学術講演会，V-410，pp.819-820，2014.9