

線路上空建物における 連結制震工法の開発



林 篤*

線路上空建物の建設における計画、施工上の制約を克服する方法として、損傷制御機構の適用が考えられる。この機構を線路上空建物に適用する具体的な方法として、振動特性の異なる2つ以上の独立した構造物をエネルギー部材（ダンパー）等により連結する「連結制震工法」を提案した。本工法は簡易な装置で実現することができ、地中梁がないなどの線路上空建物の構造的な特徴を有効に活用することができる。また、適切な組み合わせを抽出することにより、構造物各部位の応答量を制御することのできるフレキシブルなシステムであり、制約条件の緩和に有効であると同時に、被災後の復旧性の向上にも寄与する。さらに、平面的な偏心を生じやすい線路上空建物のねじれ応答の制御も可能である。ここでは、性能の定量評価と効果確認を目的として行った振動台実験と、実建物への適用について記述する。

●キーワード：線路上空建物、耐震設計、制震構造、減衰、ダンパー、振動台実験

1. はじめに

都市部における空間の高度利用の必要性が高まる中、線路上空空間が着目されているが、線路上空建物にはその開発を阻害する計画、施工上の多くの制約があり、新しい工法の開発が望まれている。一方、近年免震、制震技術を適用した損傷制御機構が開発されている。損傷制御機構とは、損傷を特定部位に集中してエネルギー吸収を行うことにより、構造物全体に分散する負荷を軽減するものである。この機構を線路上空建物に適用できれば、線路近接部分など制約の厳しい部分の負担を軽減することによって躯体のスリム化が図れ、材料費のみならず施工コストの低減が可能となる。また列車運行を確保する観点から、損傷を特定部位に限定することは被災後の復旧性を高めることにもつながる。しかし、例えば基礎免震などの大掛かりな方法は、施工上の負担を大きくしてしまうことになるので、できるだけ軽微な装置によるシステムが必要となる。

本論文では、これらの課題を解決する方法の1つとして提案した「連結制震工法」に関して、性能の定量評価と効果確認を目的として行った振動台実験と、実建物への適用について記述する。

2. 連結制震工法の概要

図1に示すように、連結制震工法では振動特性の異なる2つ以上の独立した構造物をエネルギー吸収部材（ダンパー等）により連結する。ダンパーが相対変位あるいは相対速度により作動しエネルギー吸収することにより、建物自体の地震応答が低減する。このシステムに必要な要素は、連結部に設置する減衰部材と、鉛直荷重を連結部で受け渡しする場合に必要な支承部材のみであり、簡易な装置で実現することができる。また、構造物の振動特性の組み合わせや、連結する部材を変化させることにより、構造物各部位の応答量を可変とすることができる。線路上空建物では施工上の制約も建物の部位によって異なるため、外力負担率を制御できるフレキシブルなシステムは、制約条件の緩和に効果的であると同時に、損傷箇所を限定することにより復旧性の向上にも寄与する。また、一般的な線路上空建物では線路を跨ぐ部分を地中梁なしとすることが多く¹⁾、更地部分とは異なる構造特性となりやすい。このことは、振動特性に変化をつけやすいことになり、連結制震工法における理想的な構造物の組み合わせを作りやすい。さらに、線路上空建物では柱位置が線形等に制約を受け、均等な平面形状とならず偏心を生じる場合も少なくないが、この偏心によるねじれ応答の制御も可能と考えられる。

* 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

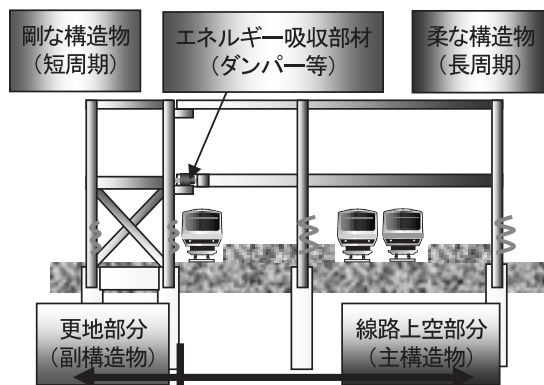


図1 連結制震工法の概要

3. 連結制震による応答低減理論

図2のような2つの独立した振動系の間にダンパーを連結して双方の構造物の応答低減を図る方法を考える。

この場合の最適な制震とは、双方の系の地動に対する伝達率のピークを最小にするような組み合わせとする。図3に示すように、2つの独立した構造物を連結して制震する場合、対応する双方の質点の伝達率曲線は、連結ダンパーの大小にかかわらず特定の振動数で一定値を通過する。この現象は定点定理として知られている。その定点はダンパーがない場合とダンパーが無限大の場合の伝達率曲線の交点として求まる。その交点において応答倍率を最小にするような連結部材の設定が最適設計となる²⁾。

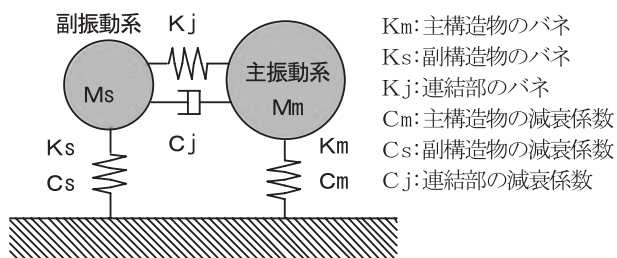


図2 連結制震の基本モデル

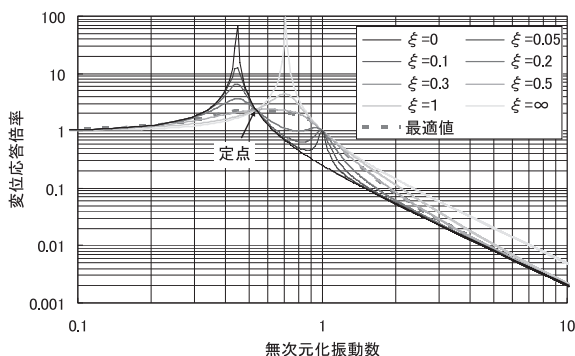


図3 連結制震における伝達率の最適設定の概念

4. 連結制震工法の振動台実験

4.1 実験概要

4.1.1 試験体

連結制震を建物に適用した際の効果を把握するために振動台実験を実施した。試験体図を図4に示す。試験体は単純化したモデルとするために4本の柱から構成される2棟で構成した。縮尺は1/2程度とし、1次モードの固有振動数が実物と相似になるよう計画した。表1に試験体の重量、固有値解析による固有振動数を示す。連結装置にはオイルダンパーを採用し、2棟間の2階床レベル位置に設置した。ダンパーは平面2方向に作動するように、X型に配置した。

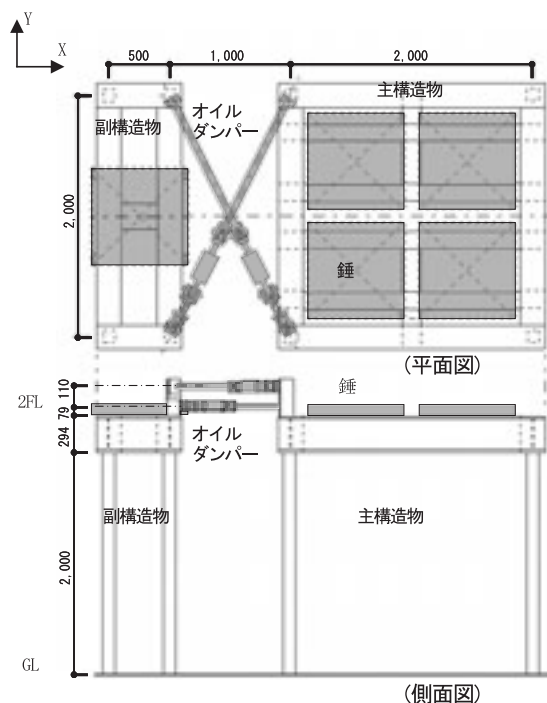


図4 試験体図

表1 試験体の重量、解析による固有振動数

	実大モデル		試験体		
	重量 (ton)	固有振動 数(Hz)	重量 (ton)	固有振動数(Hz)	
主構造物	830	1.60	8.57	X方向	3.15
副構造物	121	3.70	1.27	Y方向	7.88
副/主	0.146	2.31	0.148	2.60	2.60

4.1.2 加振ケース

加振は、試験体の振動特性把握のための試験（常時微小測定、矩形波加振、ランダム波加振、正弦波加振）および地震応答実験の2種類を行った。

地震応答実験に用いる入力地震波には表2に示す地震波を採用した。時間軸は実時間の1/2とし、試験体フレームが降伏に達しないレベルで基準化した。

表2 入力地震波

名称	成分	名称	最大加速度 (+)	最大加速度 (-)	刻み時間 (sec)
El-Centro	NS	ELNS	341.7	-263.1	0.02
	EW	ELEW	210.1	-178.6	0.02
Taft	NS	TFNS	152.7	-137.7	0.02
	EW	TFEW	175.9	-146.4	0.02
Hachinohe	NS	HANS	225.0	-146.76	0.01
	EW	HAEW	182.9	-177.04	0.01
Thco-30	NS	THNS	258.2	-206.3	0.02
	EW	THEW	202.5	-196.1	0.02

4.1.3 オイルダンパー

図5にオイルダンパーの減衰係数をパラメータにして予備応答解析を行った結果を示す。減衰係数が大きくなるに従い、主構造物の固有振動数がやや高次側にシフトし、逆に副構造物では低振動数側にシフトしているが、重量の小さい副構造物の変化が著しい。また、減衰係数が大きくなると応答倍率も小さくなっている。これらの傾向は、減衰係数が1000N/(cm/s) 以下では比較的顕著であるが、それ以上の減衰係数では大きな変化はない。以上からオイルダンパーの減衰係数は980N/(cm/s) とした。

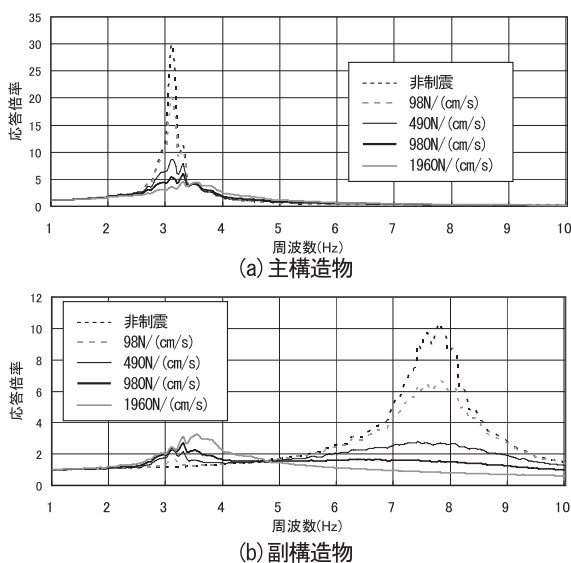


図5 予備解析による応答倍率

4.2 実験結果

4.2.1 試験体の振動特性

表3に試験体の固有振動数と減衰定数の推定結果並びに予備解析による固有値解析結果を示す。いずれの結果も解析値が実測値を上回った。これは柱梁接合部の固定度、剛域の評価が異なるためと考えられる。ダンパー取付時は、主、副構造物が互いに影響しあい両者の固有振動数の間に新たな振動数のピークが見られる。また、矩形波加振の結果から、ダンパー取付時の減衰定数が大きくなっていることがわかる。

表3 加振試験による試験体の固有振動数、減衰定数

			固有振動数 (Hz)		減衰定数 (%)	
			常時微動	ランダム波	矩形波	打撃試験
非制震	主構造物	X方向	3.05	3.00	2.1	0.10
		Y方向	3.00	2.98	1.2	0.10
	副構造物	X方向	—	7.58	2.6	0.13
		Y方向	—	7.10	0.7	0.14
制震	主構造物	X方向	6.51	6.42	4.8	—
		Y方向	6.51	3.06	4.7	—
	副構造物	X方向	6.51	6.37	1.8	—
		Y方向	6.50	3.10	2.8	—

4.2.2 地震応答実験

(1) 時刻歴応答

本試験体では、連結部材の配置上、X方向入力の場合は並進成分が卓越し、Y方向入力の場合は並進成分およびねじれ成分の応答が現れる構造となっている。図6にELNS波X方向入力の場合の時刻歴応答加速度を示す。主構造物では初期の地震波に対してその効果は小さいが、明確に応答が低減している。一方副構造物では、最大値の低減は大きい、全体的に制振効果は主構造物よりも小さくなっている。

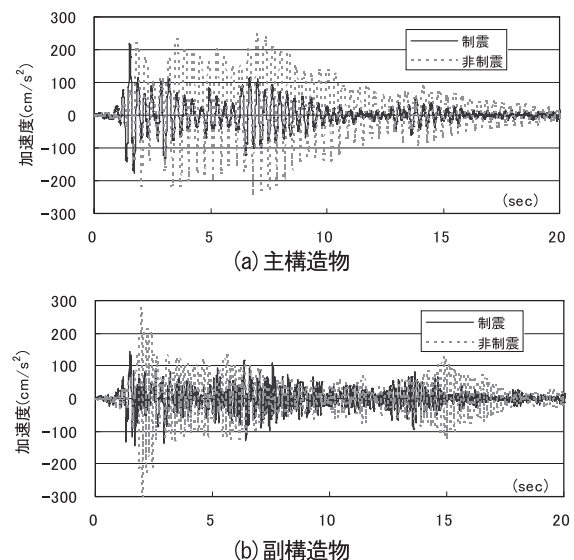


図6 時刻歴応答加速度

(2) 最大応答値の比較

図7にX方向加振時の最大応答加速度を示す。並進成分の卓越する場合は、ほとんどのケースで十分な低減効果が見られる。次に、ねじれ成分を含むY方向加振の最大応答加速度を図8に示す。加力方向の応答加速度についてはELEW波、HANS波入力時において低減がみられない。

また、ELNS波入力時は主構造物で増幅しているのに対し、副構造物で大きく振動が低減している。この原因としては、入力地震波の特性や、高次モード成分の影響あるいはねじれの影響などが考えられる。ねじれ応答量を推定するために図には加力直交方向(X方向)の応答加速度を併せて示した。直交方向の応答加速度は相当量に達しており、ねじれの影響が大きいことがわかる。また、この傾向は副構造物においてより顕著である。

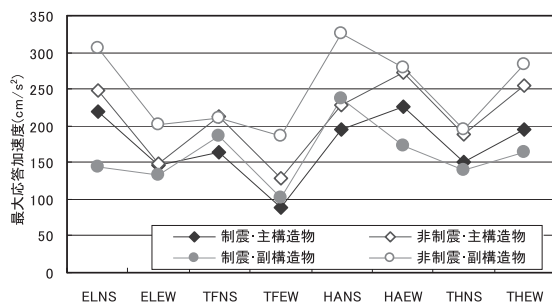


図7 最大応答加速度 (X方向加振)

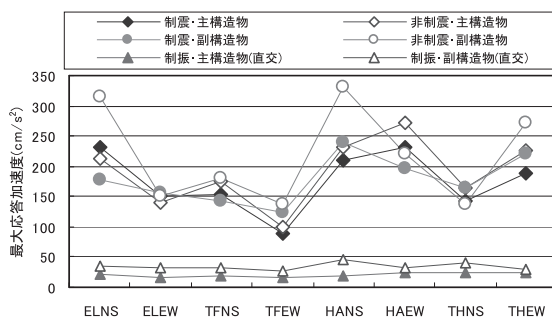


図8 最大応答加速度 (Y方向加振)

(3) ダンパーの減衰係数

図9にELNS波X方向入力時のダンパーの減衰力-速度関係を示す。低速域でリニアな特性が得られていないが、これはオイルダンパーのロット部分に発生する摩擦の影響と考えられる。それ以上の速度領域ではほぼ比例関係にあるが、全体に設計減衰係数($C=980\text{N}/(\text{cm}/\text{s})$)よりやや小さめの値を示している。

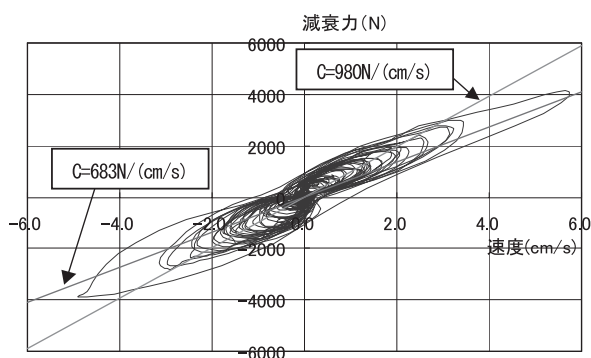


図9 ダンパーの減衰力-速度関係

(4) 解析結果との比較

実験を模擬した3次元フレームモデルにより実験結果をシミュレートした。図10にELNS波X方向加振時の最大応答値の比較を示す。部材レベルの応力についても解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示している。なお、副構造物において、加速度等が低減しているのに対して部材応力のみが増幅しており、加速度応答量と部材応答量の間には必ずしも相関がないことを示している。

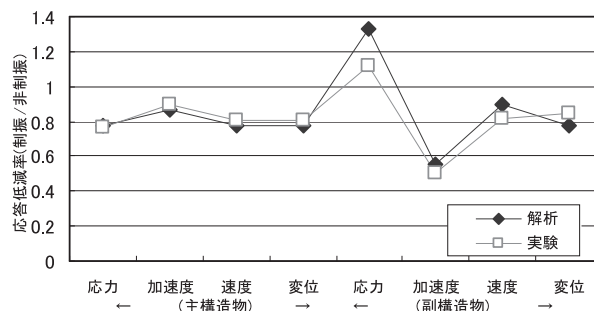


図10 解析結果と実験結果の比較

5. 橋上駅舎への適用

5.1 建物概要

連結制震工法を新潟県の越後線関屋駅橋上駅舎(2006年12月開業)に適用した。図10に平面図、図11に建物外観を示す。自由通路は線路直交3スパンの構成となっており、更地部分に地中梁を設けている。橋上駅舎は線路直交、平行方向共に1スパンで地中梁を省略している。振動特性は自由通路部が剛、駅舎部が柔という組み合わせとなる。また、両者の重量はほぼ同等である。

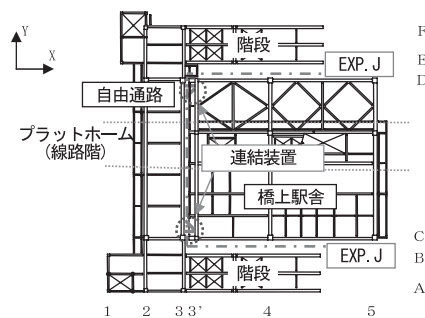


図11 コンコース階平面図



図12 関屋駅橋上駅舎外観

5.2 検討方針

5.2.1 設計クライテリア

設計入力地震動には、国土交通省告示(平12建告第1461号)に示される加速度応答スペクトルを目標とした模擬地震波(以下告示波と表記)を用いた^{3) 4)}。

稀に発生する地震動(告示波レベル1)に対してフレームは弾性域にあり、層間変形角は1/200程度以下におさまることを目標とする。

極めて稀に発生する地震動（告示波レベル2）に対してフレームの層間変形角は1/100程度以下におさまることを目標とする。鉄骨部材の塑性率は2.0以下となるようにし、1柱1杭（地中梁なし）形式となる部位の杭部材は降伏耐力を超えないようにする。

5.2.2 減衰装置

連結部のオイルダンパーはX、Y両方向に作動するよう図12に示す配置とした。オイルダンパーは過大な反力の発生を防止するため、リリース機構により一定以上の速度域では減衰力一定となるよう設定した。各ダンパーの諸元を表4に示す。ダンパーの最大応答変位は許容ストロークの70%程度におさまるようにする。また、駅舎部の自由通路側は線路階の柱を省略し、積層ゴムアイソレータにより鉛直荷重のみ自由通路側に伝達する。

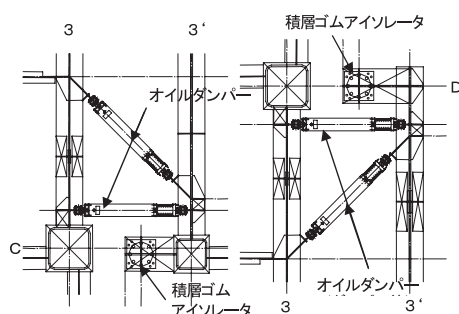


図13 連結部詳細

表4 オイルダンパーの設定値

ダンパー名称	減衰係数 α (kN/kine)	最大減衰力 F (kN)	設置角度
C x	10.0	200	90°
C y	20.0	200	45°
D x	5.0	200	90°
D y	20.0	200	45°

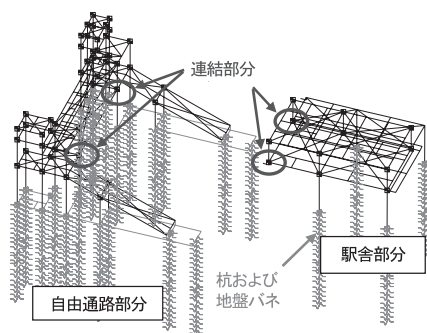


図14 解析モデル

5.2.3 解析方針

解析モデルには図10に示す3次元フレームを用いる。部分的に地中梁のない構造物となるため、上部、下部構造を連成させたモデルとした。オイルダンパーはバネとダッシュポットを直列連結したMaxwell要素によりモデル化し、荷重-速度関係においてリリース荷重にて折れ曲がり点を持つバイリニア型の復元力特性を設定した。

5.3 検討結果

固有値解析の結果、1次固有周期は自由通路が0.647秒、橋上駅舎が1.105秒となり、比率は1:1.8程度となった。

次に、レベル2Y方向入力時の最大応答値を図14に示す。自由通路、駅舎それぞれについて最大層間変形角は1/257、1/168となっており、目標値を満足している。図には連結部を剛結にした場合および非連結の場合をあわせて示した。自由通路部、駅舎部とも「制震連結」の層せん断力係数が「剛連結」「非連結」のそれより全層にわたって小さい。層間変形角についてもほぼ同様の傾向が見られる。なお、2棟間の最大相対変位は3.73cmであった。

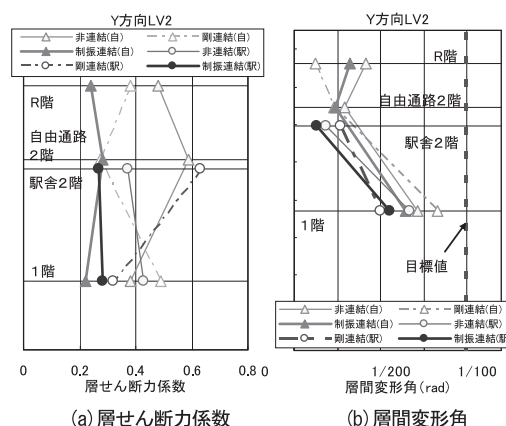


図15 最大応答値

なお、連結による入力低減効果は、設計レベルでは駅舎部分の杭径、柱断面の縮小、自由通路部分の基礎梁の一部省略という形で反映された。

6. おわりに

以上、連結制震工法の開発経緯と適用事例について紹介した。今後は新築建物のみならず、既存不適格建物の耐震補強にも適用を図っていく予定である。

ここで示した工法を含め、今後の建築構造が目指すべき方向性として、損傷制御機構の適用は必要不可欠と考えられる。線路上空建物のさらなる性能向上をめざして、引き続き有効な工法を検討していきたいと考えている。

参考文献

- (財) 鉄道総合技術研究所編；線路上空建築物（低層）構造設計標準、2002.6
- 陰山他：連結制振の基本モデルにおける連結バネとダンパーの最適解の誘導、日本建築学会構造系論文報告集、第529号、2000.3
- 建設省：建設省告示第1461号、官報（号外第106号）、平成12年5月30日
- 建設省建築研究所・(財) 日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)本文解説編、1992