論文 既設鉄道ラーメン高架橋の耐震性能におよぼす柱部材特性の影響

黒川 浩嗣^{*1}·谷村 幸裕^{*2}·田所 敏弥^{*3}·渡邉 忠朋^{*4}

要旨:本研究では,既設構造物の耐震診断を実施するにあたり,材料強度などのばらつきが耐震性能におよぼす影響を把握することを目的として,時刻歴動的応答解析により感度分析を行った。本検討では,既設鉄道 RC ラーメン高架橋の柱部材に着目し,材料強度,柱高さが構造物の応答値や耐震性能におよぼす影響について分析を行った。その結果,コンクリートの圧縮強度を25%増加した場合は応答変位が小さくなり損傷レベル2,3に対し大きく影響すること,軸方向鉄筋の降伏強度を20%増加した場合,損傷レベル2に対する影響は大きいが,損傷レベル3への影響が比較的小さいことなど,耐震性能におよぼす影響がわかった。 キーワード:耐震診断,動的解析,柱,せん断,変形性能

1. はじめに

近年の地震被害を鑑み,既設構造物の耐震性 能への関心が高まっており,耐震補強の要否を 判断するための耐震診断が実施されている。一 般的に既設構造物の耐震診断を行う場合,材料 強度は設計値を用いることが多いが,施工条件 や環境条件などにより大きく変動することが考 えられる。また,既設構造物の設計においては, 類似構造物の高さを図面上で修正するだけで済 まされている場合が少なくなく,このような修 正が耐震性能におよぼす影響を把握しておく必 要がある。

そこで、本研究では既設構造物の耐震評価に あたり、材料特性などが耐震性能におよぼす影 響を把握することを目的とした。検討対象構造 物は既設鉄道 RC ラーメン高架橋とし、本論文で は柱部材に着目し、材料強度、柱高さ等が、構 造物の応答値や耐震性能にどの程度の影響をお よぼすか、時刻歴動的応答解析により感度分析。

2. 検討概要

2.1 検討対象構造物

検討対象構造物は,一般的な鉄道構造物である RC ラーメン高架橋の,線路直角方向の中間部 ラーメンとした。図-1に高架橋の概略形状と 柱断面形状を示す。柱の軸方向鉄筋は D32,帯 鉄筋比は 0.2%とした。

検討パラメータは、コンクリートの圧縮強度、 軸方向鉄筋の降伏強度、帯鉄筋の降伏強度、お よび柱高さとした。表-1に解析ケースを示す。 既設鉄道 RC ラーメン高架橋の標準的な設計強 度を組み合わせた CASE0 を基本ケースとし、各 パラメータの影響を検討した。



*1(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員) *2(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員) *3(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博(工) (正会員) *4 北武コンサルタント株式会社 博(工)(正会員)

2.2 解析モデル

本研究では,鉄道構造物等設計標準同解説(耐 震設計)(以下,耐震標準)¹⁾に基づき解析を行 った。図-2に解析モデルを示す。解析モデル は,2次元の骨組みモデルとし,柱梁接合部は剛 域とし,基礎は固定端とした。図-3に荷重図 を示す。本解析における荷重条件は,固定死荷 重,付加死荷重,乾燥収縮の影響を考慮し,列 車荷重は考慮しないものとした。質点は,図-2の節点4と104に配置した。

一般に RC ラーメン高架橋の耐震性能には,柱 の特性が大きく影響するため,本検討は柱に着 目することとした。そこで,柱のみ非線形を考 慮し,上層梁は線形部材とした。材料モデルに 関しては,鉄道構造物設計標準同解説(コンク リート構造物)²⁾に基づいたモデルを用いた。部 材の曲げモーメントに対する非線形特性は,耐 震標準に従い,曲げモーメントー部材角関係(以 下,M- θ)で考慮したテトラリニア型の骨格曲 線を用いた。図-4にM- θ モデルの骨格曲線と 復元力特性³⁾を示す。

2.3 解析方法

6.758*

(1)

[2]

 πh

時刻歴動的応答解析に用いた入力地震波は, 鉄道構造物の設計に用いられているL2地震動の 弾性加速度応答スペクトル2に適合する波形を 基盤波としたG2地盤の地表面設計地震動であ る¹⁾。図-5に用いた地震波形を示す。なお,本 解析においては,基本ケースであるCASE0で最 大荷重を維持することができる図-4に示すM 点を確保するように,図-5に示す地震波形の

3

104

103

[3]

[4]

● 数字:節点

【数字】: 部材

(単位:m)

%h=6m : 5.758

h=5m: 4.758

: 剛域

5.2 4.6

11

[6]

105

102

101

振幅を 0.5 倍したものを用いた。減衰はひずみエ ネルギー比例型で減衰定数を 0.05 とし,直接積 分法である Newmark β 法 (β =0.25) を用いた。

表-1 解析ケース								
CA	コンクリート	軸方向鉄筋	帯鉄筋	高さ				
SE	\mathbf{f}_{cd}	f_{syd}	f_{wyd}	h				
5E	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(m)				
0	24	345	345	7				
1	18	345	345	7				
2	30	345	345	7				
3	24	295	345	7				
4	24	414	345	7				
5	24	345	235	7				
6	24	345	414	7				
7	24	345	345	5				
8	24	345	345	6				







なお,積分時間の間隔は0.001 (sec) とした。骨 格曲線は,各パラメータの材料強度を用いて算 出した。また,構造物の等価固有周期(T_{eq})と 降伏震度は,静的非線形解析により求めた。

3. 解析結果

図-6に CASE0 の高架橋天端の応答加速度と 応答変位の波形を,**図**-7に M-0 関係を,**図** -8に M-N (軸力)関係を示す。これらは,**図** -2の節点4における応答加速度と応答変位, ならびに部材【2】基部の M-0 関係, M-N 関 係を示している。応答加速度の最大値は460.5gal, 応答変位の最大値は-105mm となった。最大応答 変位は,柱部材【2】が**図**-2において左側へ変 形している時,すなわち【2】の軸圧縮力が増加 している時に発生している。

表-2に、各 CASE の等価固有周期,降伏震 度,最大応答加速度,最大応答変位を示す。ま た, 図-9にパラメータごとに最大応答加速度 および最大応答変位の関係を示す。材料強度に 関して,最大応答加速度は軸方向鉄筋の降伏強 度の影響が大きく、鉄筋の降伏強度が 20%増加 すると応答加速度は10%増加した。これは、軸 方向鉄筋の降伏強度が上がったため降伏点 My や最大曲げモーメント Mm が大きくなり、それ に伴い最大応答加速度が大きくなったものと考 えられる。最大応答変位に関してはコンクリー トの圧縮強度の影響が大きく、圧縮強度が25% 増加すると応答変位が 13%低下した。これはコ ンクリート強度が増加したため剛性が上がった ことによるものと考えられる。また, 柱高さは, 最大応答加速度,最大応答変位の両者に影響を



表-2 解析結果

CASE	Teq (sec)	降伏 震度	αmax (gal)	δmax (mm)	CASE	Teq (sec)	降伏 震度	αmax (gal)	δmax (mm)
0	0.744	0.339	460.5	-105.0	5	0.744	0.339	462.6	-104.8
1	0.799	0.332	461.0	-121.4	6	0.744	0.339	459.4	-105.1
2	0.706	0.345	458.8	-91.6	7	0.438	0.501	592.8	-33.1
3	0.729	0.301	430.0	-109.4	8	0.587	0.407	503.6	-57.8
4	0.764	0.391	504.9	-101.5	α max:最大応答加速度、 δ max:最大応答変位				





与え,高さが7mから6mに1m低くなると,最 大応答加速度は10%増加し,最大応答変位は 45%減少した。

4. 耐震性能の検討

4.1 せん断力の検討

表-3に V_d/V_{yd} が最大となる時刻における部 材【2】基部の断面力とせん断耐力を示す。本検 討ではせん断スパン比が 3.7 から 5.6 となるため, せん断耐力は式(1)に示す棒部材のせん断耐力 式⁴⁾を用いて時刻ごとに算出した。図-10 にパ ラメータごとに V_d/V_{yd} の最大値を示す。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \tag{1}$$

- Vyd: 棒部材の設計せん断耐力
- V_{cd}:
 せん断補強鋼材を用いない棒部材の

 設計せん断耐力
- V_{sd}: せん断補強鋼材により受け持たれる
 棒部材の設計せん断耐力

コンクリートに関しては、圧縮強度が増加す ることで若干せん断耐力は増加しているが、 V_d/V_{yd}の最大値についてあまり変化は見られな い。軸方向鉄筋の降伏強度が20%増加した場合、 発生したせん断力が大きくなったため、V_d/V_{yd} の最大値が 11%ほど増加した。帯鉄筋に関して は,降伏強度が増加したことでせん断耐力が増 加し, V_d/V_{yd} の最大値は 10%減少した。柱高さ に関しては,式(1)はせん断スパンの影響を無視 しているためせん断耐力の変化はほとんどみら れないが,発生したせん断力は大きくなるため, 7mから 6m \sim 1m 低くなると V_d/V_{yd} の最大値は 14%大きくなり,さらに 5m \sim 2m 低くなった場 合には V_d/V_{yd} の最大値が 38%大きくなり, V_d/V_{yd} が 1.0 を超過する結果となった。

4.2 曲げ変形の検討

耐震性能の評価は,耐震標準にしたがって, 部材の損傷レベルによって表すこととした。損 傷レベルは,部材の損傷状況と補修の難易性等 の関係から区分されたものである⁵⁾。ラーメン高 架橋などの鉄筋コンクリート部材の場合の各損 傷レベルとその限界点は,一般的に次のような 関係となっている。損傷レベル1は無補修の状 態であり,限界点は軸方向鉄筋が降伏する点(図 -4に示すY点),損傷レベル2は場合によって は補修が必要な状態であり,限界点は最大荷重 を維持できる点(図-4に示すM点),損傷レベ ル3は補修が必要な状態であり,限界点は降伏

CAS	Æ	M _d (kNm)	N _d (kN)	V _d (kN)	V _{yd} (kN)	CASE	M _d (kNm)	N _d (kN)	V _d (kN)	V _{yd} (kN)
0		-859	1075.9	-289.3	368.5	5	-865	1078.4	-291.4	311.4
1		-828	1058.0	-280.6	352.5	6	-856	1074.5	-288.2	404.3
2		-874	1081.3	-294.1	382.3	7	-805	1077.5	-400.7	368.5
3		-783	1040.5	-263.7	371.7	8	-811	1058.2	-329.9	368.0
		061	1123 4	373.7	365 /	M. • #	bげエーメ	YE N.	動力	

表-3 最大 Vd/Vyd 発生時の各断面力とせん断耐力



M_d:曲けモーメント, N_d:軸力

 V_d : せん断力, V_{yd} : せん断耐力



図-10 最大 Vd/Vyd の最大値におよぼす影響

荷重を維持できる最大変位点(図-4に示す N 点)となり,それ以上の領域は損傷レベル 4 と なる。

表-4に最大応答部材角θ_dと最大応答塑性 率 μ (= θ_d / θ_v) を, 図-11 にパラメータごとに 最大応答部材角θ_αと損傷レベル2の制限値であ る M 点の部材角 θ_m , 損傷レベル 3 の制限値であ る N 点の部材角 θ_n の比を示す。最大応答部材角 は、図-2の【2】の柱基部の部材角を示す。こ こで θ_m は、く体の曲げ変形による部材角と、部 材接合部からの軸方向鉄筋の伸び出しによる部 材端部の回転角の和として算定されている。く 体の曲げ変形は, 塑性ヒンジ部とそれ以外の部 分の曲げ変形によるものに分けて算定しており, 塑性ヒンジ部の変形におよぼす要因としては, 引張鉄筋比、帯鉄筋比、帯鉄筋強度を考慮して いる。軸方向鉄筋の伸び出しに影響をおよぼす 要因としては、帯鉄筋比と帯鉄筋強度を考慮し ている。 θ_n も同様に計算されているが、N 点に

おける軸方向鉄筋の伸び出しによる回転角は, M 点と同じ値としている ⁵⁾。

損傷レベル2では、コンクリートの圧縮強度 を25% 増加させることにより応答部材角は13% 減少し、 θ_d/θ_m の値は 9%の減少となる。軸方 向鉄筋の場合,降伏強度を 20%増加させると応 答部材角は 3%しか減少しないが、 θ_d/θ_m の値 は 10%減少し、帯鉄筋においては降伏強度を 20%増加させると応答部材角には変化はみられ ないが、 θ_d/θ_m の値は 3%減少した。つまり、 本解析条件の損傷レベル 2 に関しては、コンク リートの圧縮強度を大きくした場合,応答値が 小さくなるため θ_d/θ_m に影響し、軸方向鉄筋の 降伏強度を大きくした場合は,応答値は大きく 変化しないが限界値が大きくなるため照査結果 が小さくなることがわかった。また、柱高さを 7mから 6m ~ 1m低下させることによって応答 値は 34%減少し、 θ_d/θ_m は 30%程度減少した。 損傷レベル3において、コンクリートの圧縮



強度を 25%増加させると、応答部材角は 13%減 少し、 θ_d/θ_n の値は 15%減少した。これに対し て、軸方向鉄筋および帯鉄筋の降伏強度を 20% 増加させることによって、応答部材角について 軸方向鉄筋は 10%減少し、帯鉄筋の応答部材角 には変化は見られなかったが、 θ_d/θ_n の値はそ れぞれ 4%、2%減少した。つまり、損傷レベル 3においては、コンクリートの圧縮強度の影響が 最も大きく、軸方向鉄筋と帯鉄筋の降伏強度の 影響は比較的小さいということがわかった。ま た、柱高さを 7m から 6m へ 1m 低下させること によって θ_d/θ_n が 31%減少した。

5. まとめ

本研究では,柱部材に着目し,材料強度に起 因する部材特性と柱高さが,構造物の応答値お よび耐震性能におよぼす影響について検討した。

その結果、本解析条件の範囲では、コンクリ ートの圧縮強度を 25%増加させた場合には最大 応答部材角が小さくなり、損傷レベル2および3 に大きく影響し、軸方向鉄筋の降伏強度を 20% 増加させた場合には損傷レベル 2 においては影 響が大きいが、損傷レベル 3 になると影響が小 さくなることが把握できた。

このように,既設構造物の耐震性能の評価に おいては,材料強度などを調査することによっ て,精度向上につながることが確認できた。

CA SE	θ_{d} (rad)	μ	CA SE	θ_{d} (rad)	μ
0	0.0174	2.08	5	0.0174	2.07
1	0.0202	2.10	6	0.0174	2.08
2	0.0152	2.00	7	0.0082	1.27
3	0.0182	2.57	8	0.0115	1.55
4	0.0168	1.63			

表-4 最大応答部材角と最大応答塑性率

今後,入力地震動による感度の違いや,既設 構造物の材料強度のばらつきを考慮した評価法 に関して検討を行い,既設構造物の耐震診断時 の材料強度の取り扱いに反映する必要がある。

参考文献

- (財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設 計標準・同解説(耐震設計),丸善,1999.10
- (財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設 計標準・同解説(コンクリート構造物),丸
 善,2004.4
- 3) 玉井真一,瀧口将志,佐藤勉: RC 部材の復 元力特性,鉄道総研報告, Vol.13, No.4, pp.15-20, 1999.4
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書 構造性
 能照査編 2002 年制定, 2002.3
- (2) 渡邉忠朋,谷村幸裕,瀧口将志,佐藤勉:鉄 筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した 変形性能算定手法,土木学会論文集,No.683, V-52, pp.31-45, 2001.8