Japan Concrete Institute

論文　ゴム支承の経年劣化を考慮した免震RC橋梁の耐震性能に関する検討

北原　武嗣[*1]

要旨：近年，耐震性能の向上を期待して免震支承が普及してきている。しかしながら，免震ゴム支承は長期の使用により剛性増加などの経年劣化の生じることが一般的に知られている。免震ゴムの劣化により，免震橋梁全体系システムとしての耐震性能も変化すると考えられるが，これらの影響は十分に解明されていない。そこで本研究では，免震ゴムの経年劣化が免震RC橋梁全体系システムの耐震性能に与える影響を，解析的に検討した。今回の検討結果では，免震ゴムの経年劣化が橋梁全体系の耐震性能に与える影響はあまり大きいものではなかった。

キーワード：免震ゴム支承，経年劣化，免震橋梁，耐震性能

1. はじめに

日本は地震大国であり，現在までに数多くの橋梁構造物が地震被害を受けている。特に，平成7年の阪神・淡路大震災では橋梁構造物が大きな損傷を受けたのはもちろん，金属支承にも損傷が生じた。この被害を受け，橋梁構造物に対する耐震設計が見直され，道路橋示方書・V耐震設計編[1)]が改訂された。そこでは，支承自体の損傷防止だけでなく，橋梁システム全体系としての耐震性能向上が必要と考えられるようになり，免震ゴム支承の重要性が認識されるようになった。

一方，免震ゴムは長期の使用により性能劣化の生じることが一般的に知られている。特に，劣化によりゴムが硬化し剛性が増加することがわかっている[2), 3)]。ところが，ゴム支承の劣化により橋梁システム全体系の耐震性能がどのような影響を受けるかに関しては，伊藤ら[4)]が鋼製免震橋脚を対象として検討した例があるが，未だ十分には解明されていないのが現状である。

そこで本研究では，ゴム支承の経年劣化が免震橋梁全体系の耐震性能に与える影響を検討することを目的として，5径間連続RC免震橋梁を対象とした非線形時刻歴応答解析を実施した。

2. 検討手法

2.1 免震ゴムの劣化特性

免震ゴム支承に用いられるゴム材料の劣化特性には，外気温，時間，ゴムサイズが関係していることが分かっている[3)]。本研究では平均外気温をパラメータとし，文献3）に示される検討結果を用いて，免震ゴム支承の経年劣化による剛性変化を表-1のように仮定した。この際，免震ゴム支承のサイズを60cm×60cmの平面形状とした。詳細な設定手法に関しては文献3)を参照願いたい。

表-1には，新設時の剛性を1として基準化した値を示している。平均外気温の高い場所ほど剛性の変化が顕著であり，最も平均外気温の低い場所として考慮した札幌では，100年後の剛性は1.10倍，最も平均気温の高い地域として考慮した那覇では，100年後の剛性は1.16倍になることがわかる。

表-1　経年劣化によるゴム支承の剛性の変化

平均外気温	50年後	100年後
低（札幌）	1.08倍	1.10倍
中（東京）	1.09倍	1.13倍
高（那覇）	1.12倍	1.16倍

2.2 解析対象

本研究では，文献5）に示される5径間連続RC免震橋梁を対象として，耐震性能の経年変化を動的解析により検討した。解析対象橋梁の諸元を表-2に示す。解析に際しては，図-1に示すような桁を11節点，橋脚は6節点，橋台は4節点を有する全体系モデルにモデル化した。橋脚，橋台の下端はそれぞれ固定とした。解析対象モデルの1次の弾性固有周期は1.08秒である。

表-2　解析対象

形式	5径間連続免震橋梁
支間長	40m×5径間
幅員	12m
橋脚高さ	12.2m
橋台高さ	7.1m
P1, P4橋脚が受ける死荷重	7100kN
P2, P3橋脚が受ける死荷重	6100kN
橋台が受ける死荷重	250kN
バネ支承	鉛プラグ入り積層ゴム
固有周期	1.08秒

*1 関東学院大学　工学部社会環境システム学科准教授　博(工)　(正会員)

NII-Electronic Library Service

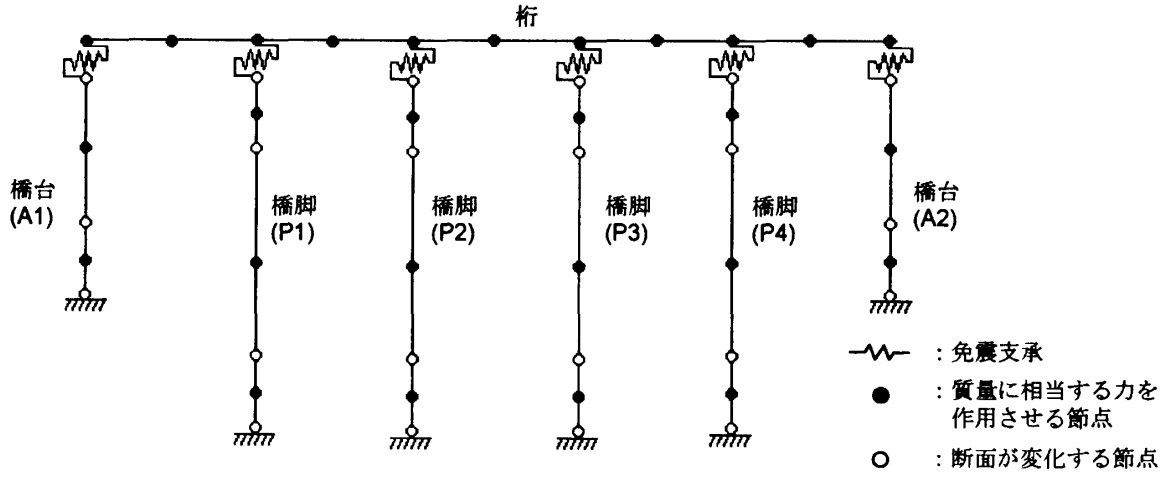


図-1　解析モデル

図中，○は断面が変化する節点，●は質量に相当する力を作用させる節点を示している。各節点には並進1自由度を与えている。

免震ゴムの復元力特性は**図-2** に示すようなバイリニアモデル，橋脚の復元力特性は**図-3** に示すような武田型トリリニアモデルとした。それぞれの復元力特性に設定した値を**表-3** に示す。なお，橋台は弾性として解析した。

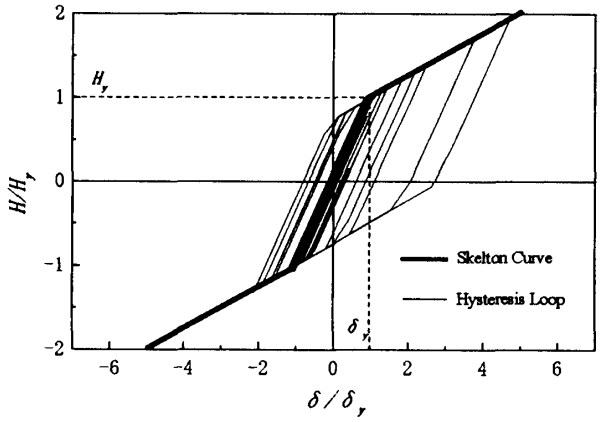


図-2　免震ゴムの復元力特性

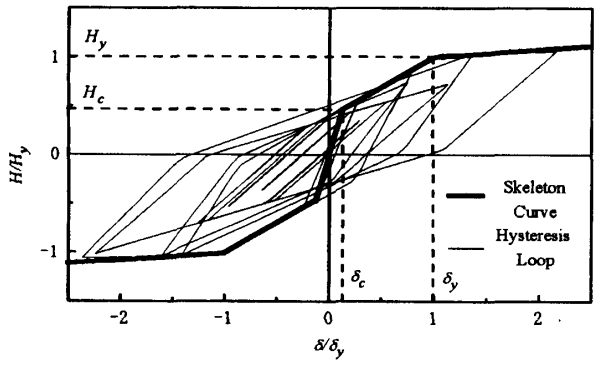


図-3　橋脚の復元力特性

表-3　復元力特性

支承	初期剛性	56950kN/m
	降伏後剛性	8760kN/m
	降伏水平力	1140kN
橋脚	初期剛性	115055kN·m/rad.
	降伏モーメント	35552kN·m

解析結果の評価に際しては，橋脚頂部の最大応答変位，橋脚基部の最大応答せん断力と最大応答曲げモーメント，免震ゴムの最大水平力および最大水平変位，桁の最大水平変位および最大加速度に着目して，検討を行った。

2.3　入力地震波

特定の地震波に対する応答ではなく，一般的に設計に用いられる地震波に対する平均的な応答性状を検討するため，本研究では，道路橋示方書・V耐震設計編に示されるレベル2の加速度応答スペクトルを有する模擬地震波18波を入力地震波として用いた。II種地盤に対する加速度応答スペクトル（減衰定数0.05相当）を**図-4** に，加速度時刻歴波形の例を**図-5** に示す。また，地震波の諸元を**表-4** に示す。

図-5 中，(a)はタイプI波を，(b)はタイプII波を表している。これらの図表から，タイプI，タイプII波の間には，継続時間や卓越周期に差異のあることがわかる。免震ゴムの劣化による耐震性能の変化に対して，このような入力地震波の特徴が影響するかどうかに関しても検討を行うものとする。

なお解析にあたっては，加速度時刻歴波形は，すべて時間間隔0.01秒のデータとし，ニューマークのβ法(β=1/4)により時刻歴応答解析を行うものとした。この際，減衰にはレーリー減衰を用い，卓越する上位2つのモードに対して，それぞれ0.02の減衰となるよう設定した。

NII-Electronic Library Service

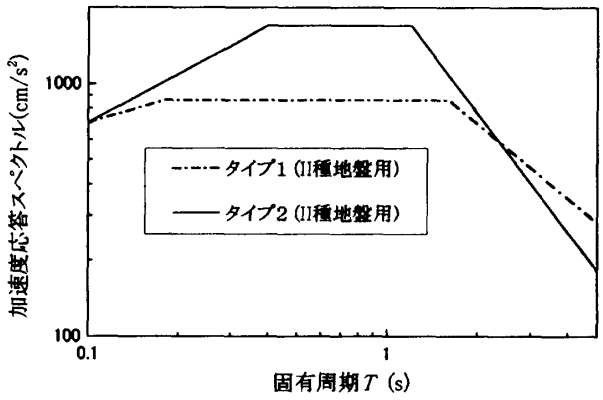
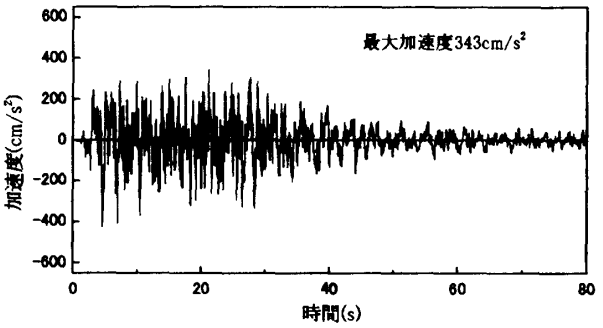
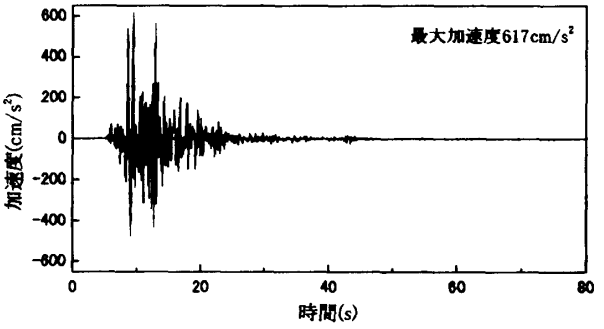


図-4　加速度応答スペクトル（減衰定数 0.05 相当）



(a)タイプⅠ(模擬地震波)



(b)タイプⅡ(模擬地震波)

図-5　加速度時刻歴波形

表-4　地震波一覧

地盤種	タイプⅠ		タイプⅡ	
	名称	最大加速度 (cm/s²)	名称	最大加速度 (cm/s²)
Ⅰ種	I-I-1	318	II-I-1	814
	I-I-2	314	II-I-2	766
	I-I-3	324	II-I-3	788
Ⅱ種	I-II-1	343	II-II-1	617
	I-II-2	362	II-II-2	672
	I-II-3	354	II-II-3	656
Ⅲ種	I-III-1	433	II-III-1	593
	I-III-2	424	II-III-2	577
	I-III-3	438	II-III-3	598

2.4　免震ゴム支承の経年劣化の考慮方法

免震ゴムの経年劣化を，動的解析モデルに取り入れるため，**図-2** に示したバイリニアモデルにおいて，初期剛性，2 次剛性ともに硬化すると考え，**表-1** に示した係数を建設当初の剛性の値に乗じることによって表現した。この際，降伏荷重は変化しないものとした。

50 年および 100 年経過後は，それぞれ 50 年後，100 年後の免震ゴム支承の剛性を採用し，他の諸元は建設当初のまま不変として動的解析を行った。

3.　解析結果と考察

3.1　桁応答の経年変化

桁に生じる最大応答加速度および最大応答変位に関して検討する。**図-6**，**図-7** にそれぞれ，建設当初の応答値を 1 として基準化した最大応答加速度と最大応答変位の経年変化を示す。図中，ゴム支承の剛性変化の大きい那覇での応答を▲，小さい札幌での応答を◇，中間の東京での応答を■で表している。ここでは，最大応答値を全入力地震波 18 波による平均応答として検討する。

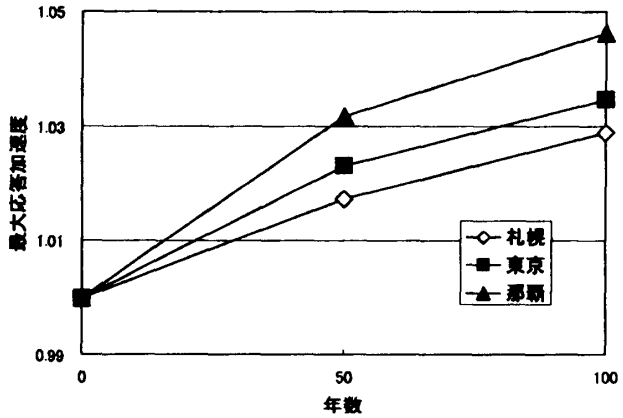


図-6　最大応答加速度の経年変化

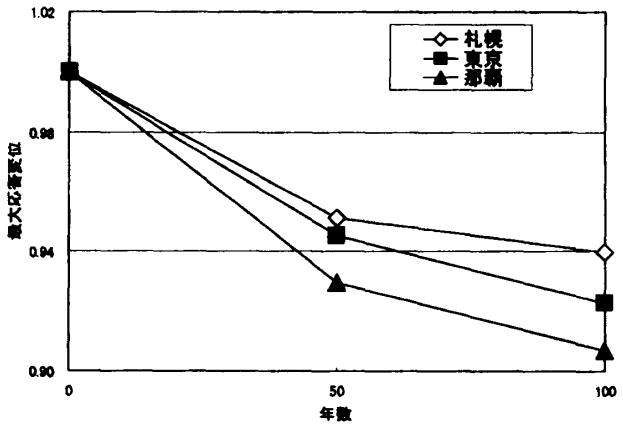


図-7　最大応答変位の経年変化

図-6 より，50 年後，100 年後と経過するにしたがい，最大応答加速度も大きくなることがわかる。最も影響の

NII-Electronic Library Service

小さい札幌で100年後に1.03倍，最も影響の大きい那覇でも1.05倍弱までの増加であることがわかる。これは，免震ゴム支承の剛性が増加するため，橋梁システム全体が剛くなる方向に向かうためであると考えられる。

一方，**図-7**より，桁の応答変位は，経年により徐々に小さくなっていることがわかる。札幌では0.94倍，那覇では0.91倍程度まで減少することがわかる。これは，免震ゴム支承の剛性が増加することにより，免震支承部での変位が小さくなるため，桁の応答変位も小さくなったと考えられる。 ただし，応答加速度，応答変位ともに経年変化の絶対量は小さいと判断できる。

3.2 橋脚，免震ゴム支承の応答の経年変化

つぎに，橋脚および免震ゴムの応答に関して検討する。**図-8**および**図-9**には，橋脚基部に作用する最大応答曲げモーメントと最大応答せん断力の経年変化を，**図-10**には免震ゴム支承に作用する最大応答水平力の経年変化を示す。図中，縦軸は，それぞれ建設当初の応答値を1として基準化した値であり，横軸は経過年を示している。また，ゴム支承の剛性変化の大きい那覇での応答を▲，小さい札幌での応答を◇，中間の東京での応答を■で表している。

図-8および**図-9**より，橋脚基部に作用する最大応答曲げモーメントおよび最大応答せん断力ともに，経年にしたがい，応答値も小さくなっていく傾向が現れている。最大応答曲げモーメントでは，最も影響の小さい札幌で0.992倍，最も影響の大きい那覇で0.988倍程度まで減少している。また，最大応答せん断力では，札幌で0.996倍，那覇で0.992倍程度まで減少していることがわかる。

一方，**図-10**をみると，免震ゴム支承に作用する最大応答水平力は，経年にしたがい増加する傾向にある。最も影響の小さい札幌で1.10倍，最も影響の大きい那覇で1.16倍程度に増加することがわかる。

これらは，経年により免震ゴム支承の剛性が増加するため，建設当初の免震ゴム支承と橋脚との剛性バランスに比較して，免震ゴム支承の剛性比が大きくなり作用する力の分担率も大きくなるためと考えられる。すなわち，建設当初では橋脚で負担していた力が，経年の剛性増加により免震ゴム支承に流れていったということである。

これらの結果から，橋脚の耐震性能にとって免震ゴム支承の劣化は有利に働く可能性も示唆できる。しかしながら，今回の結果はあくまでも，免震ゴム支承の剛性のみが劣化することを考慮した場合であるため，必ずしも，一般性の有する結果とは限らない。また，変化の割合も全体的に小さく，最も影響の大きい場合でも約10%程度の増減であり，免震ゴム支承の剛性劣化の影響は，相対的には小さいと判断しても差し支えないといえる。

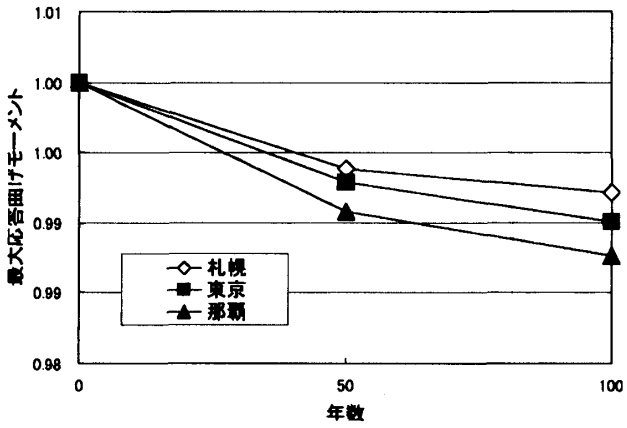


図-8 最大応答曲げモーメントの経年変化（橋脚基部）

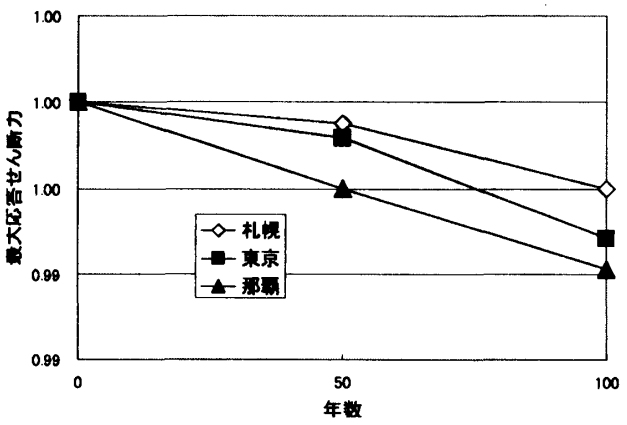


図-9 最大応答せん断力の経年変化（橋脚基部）

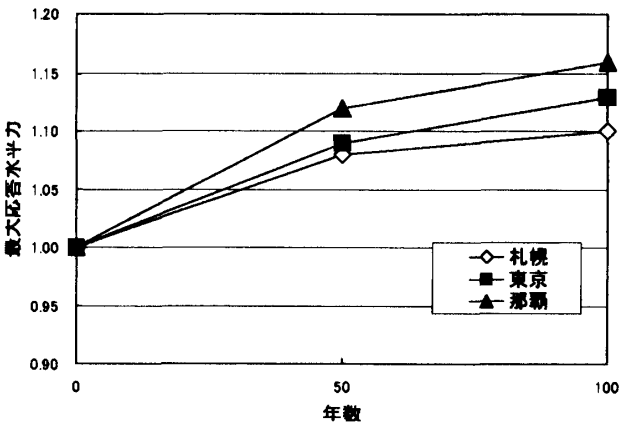
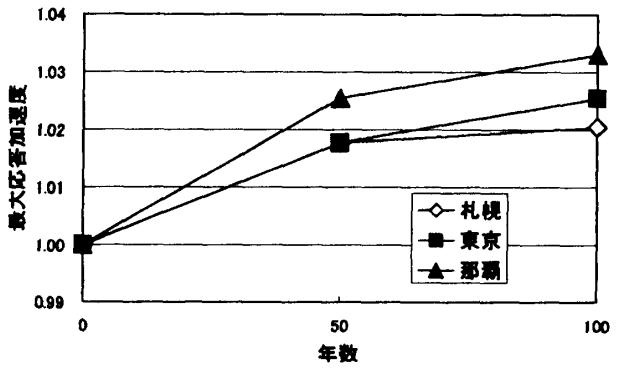


図-10 最大応答水平力の経年変化（免震ゴム支承）

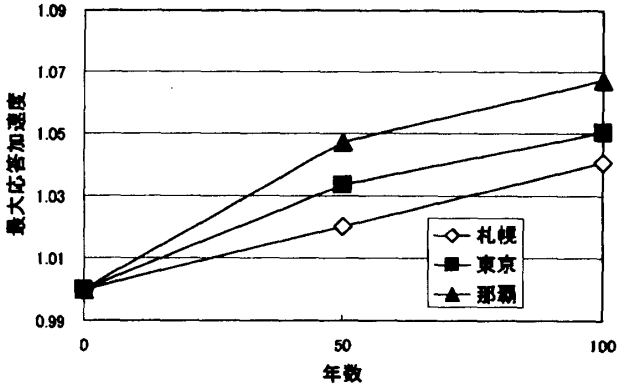
3.3 入力地震波の違いによる検討

入力地震波のタイプⅠとタイプⅡの違いにより，応答の経年変化に影響があるかどうかを検討した。**図-11**に，桁の最大応答加速度の経年変化を示す。図中，(a)はタイプⅠ地震9波による平均応答を，(b)はタイプⅡ地震9波による平均応答を示している。

NII-Electronic Library Service



(a) タイプIによる結果



(b) タイプIIによる結果

図-11 最大応答加速度の経年変化（地震波種別の比較）

図-11より，タイプIおよびタイプIIの種別により最大応答加速の経年変化の傾向に大きな差異は認められない。詳細にみると，タイプIでは最も影響の大きい那覇で1.03倍強なのに対し，タイプIIでは那覇で1.06倍強となり，タイプIIの方が少し影響の大きい結果となっている。

同様の検討のため，橋脚基部での最大応答曲げモーメントの経年変化を図-12に示す。図中，(a)はタイプI地震9波による平均応答を，(b)はタイプII地震9波による平均応答を示している。

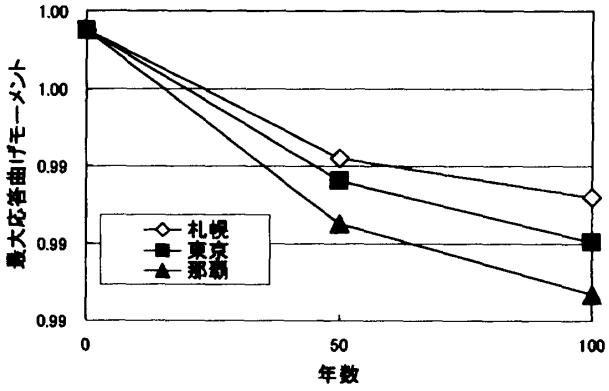
図-12からも，先ほどと同様，タイプIとタイプIIで経年変化に与える影響は，ほとんど同様である。ただし，タイプI地震では最も影響の大きい那覇で0.986倍なのに対し，タイプIIでは那覇で0.988倍となっており，タイプI地震の方が若干影響の大きいことがわかる。ただし，どちらの場合も，経年による変化は相対的に小さく，耐震性能に大きな影響を及ぼすものではないと判断しても差し支えないといえる。

4. 結論

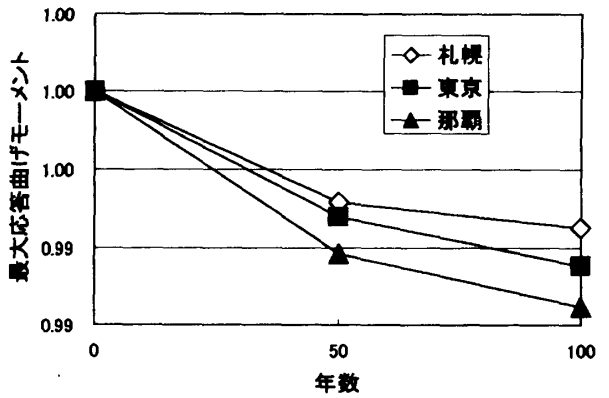
免震ゴム支承の経年劣化によるRC免震橋梁全体系の耐震性能の経年変化を，動的解析により検討した。検討結果を下記にまとめる。

1) 桁の最大応答変位は100年の経年劣化により，最大で建設当初0.91倍程度の応答に減少する。一方，最大応答加速度は100年の経年劣化で最大1.05倍程度に応答が増加する。
2) 橋脚基部に作用する最大曲げモーメントは最大で0.988倍程度まで減少する。一方，免震ゴム支承に作用する最大水平力は1.16倍程度に増加する。これは，免震ゴム支承の剛性増加に伴い，橋梁全体系の中で力の負担割合が変化するためであると考えられる。
3) 免震ゴム支承の劣化が橋梁全体系の耐震性能に与える影響に関して，地震波種別による違いはほとんど認められなかった。
4) 今回検討した程度の免震ゴム支承の劣化であれば，橋梁システム全体系の耐震性能に及ぼす影響は相対的に小さいと判断して差し支えない。

今後，免震ゴム支承だけでなく，橋脚や橋台等の経年劣化も考慮した，橋梁システム全体系の耐震性能の変化を検討していくことが課題であるといえる。



(a) タイプIによる結果



(b) タイプIIによる結果

図-12 橋脚基部最大応答曲げモーメントの経年変化（地震波種別の比較）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

謝辞

名古屋大学大学院　伊藤義人教授には，ゴム支承の経年劣化に関してご教示頂き，本研究の遂行に甚大なるご協力を得た。また，研究当時，関東学院大学工学部社会環境システム学科(土木工学科)北原研究室の卒業研究生には，解析の実施に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説　V 耐震設計編，丸善，2002.
2) 伊藤義人，佐藤和也，顧浩声，山本吉久：橋梁支承用ゴムの長期劣化予測に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.801/I-73，pp.185-196，2005.
3) 伊藤義人，佐藤和也，顧浩声，山本吉久：橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究，土木学会論文集A，Vol.62，No.2，pp.255-266，2006.
4) Haosheng Gu and Yoshito ITOH: Seismic response of steel bridge piers with aged base-isolated bearing, Journal of Structural Engineering, Vol.52A, pp.537-546, 2006.
5) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.

NII-Electronic Library Service