

損傷部材を考慮した鋼製ラーメン橋脚の非線形地震応答性状

Nonlinear Seismic Response of Viaduct with Steel Rigid Frame in Consideration of Damaged Members

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学工学部土木工学科 学生員 ○吉田 裕 (Yutaka Yoshida)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 伊勢 典央 (Norio Ise)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司 (Takashi Obata)

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震によって、社会基盤施設には甚大な被害が生じた。特に、道路や鉄道などの高架橋での被害は大きく、橋脚や支承の損傷、それに伴う上部構造の損傷などが発生した¹⁾。都市交通での大きな役割を担う高架橋の損壊は、交通機能を麻痺させ、復旧作業の妨げとなり、日本経済にも大きな損害を与えた。これに対して、道路橋耐震設計法の見直しが検討され、平成 8 年と平成 14 年に 2 度、道路橋示方書²⁾³⁾が改訂された。これによって、非線形性を考慮した動的解析は、以前にも増して重要な位置付けとなっている。

しかし、レベル 2 規模の地震に対して、構造物全ての部材が損傷を受けることなく、健全性を保つには限界があると思われる。そのため、構造物の強度を向上させることに加え、同時に、構造物の機能を維持できる範囲内での部分的な損傷を認めることが必要と考えられる。このような考え方から、地震による吸収エネルギーを特定箇所に集中させ、他の部材よりも早期に塑性化させることで、ひずみエネルギーによってエネルギー吸収機構⁶⁾を構成するという手法が挙げられる。これにより、構造物の部材端部や基部などを含む主構造の変形を弾性領域内に抑え、構造物の使用性を維持することが可能になると考えられる。また、取り替えや修復が容易な部分を損傷箇所とすることで、地震後の構造物の復旧が迅速に行えるようになる。鋼製ラーメン橋脚では、大地震発生時においても高架橋の機能を維持することが重要であること、また、迅速にその健全性を回復させることが重要であることから、使用性への影響が小さいと思われる部分に、低降伏点鋼などを用いること⁷⁾により、あえて損傷箇所を限定することで耐震性能を確保することができるものと考えられる。

そこで本研究では、中空長方形断面と断面内部に垂直補剛材を有する鋼製ラーメン橋脚を単体として取り上げ、3 次元立体骨組構造にモデル化し、幾何学的非線形性と鋼材の降伏を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて解析を行う。鋼製ラーメン橋脚の橋軸直角方向の動的挙動に着目し、変位や曲げモーメント、エネルギー曲線などをもとに、低降伏点鋼などを用いた損傷部材の有効性について比較検討する。

2. 地震応答解析

2-1 解析モデル

本研究では、伊勢原・藤沢線の高架橋の 1 つを参考に、ファイバー要素により鋼製ラーメン橋脚を 3 次元立体

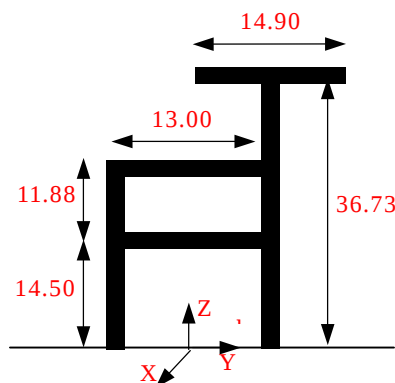


図-1 橋脚の骨組形状

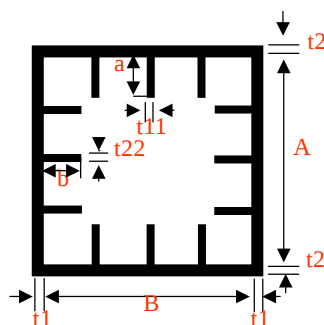


図-2 垂直補剛材をもつ中空長方形断面

表-1 断面諸元

断面寸法 (cm)		外形寸法			
		A	B	t1	t2
橋脚部材		300	250	2.5	2.5
		300	200	1.8	1.8
		300	100	2.8	2.8
		300	250	3.5	3.5
		300	250	2.2	2.2
断面寸法 (cm)		補剛材寸法			
		a	b	t11	t22
橋脚部材		23	23	3.2	3.2
		20	20	2.2	2.2
		22	22	2.2	2.2
		23	23	3.2	3.2
		23	23	3.2	3.2

骨組構造にモデル化したものを用いる。解析モデルの橋脚形状は図-1に示す。橋脚の骨組形状は2層門型構造の橋脚右上部にT型の橋脚が接続されている構造形式である。上部構造の位置は2層門型上部の水平部材とT型上部の水平部材に設定している。死荷重は径間長を48mとして、上部構造を設置した位置の水平部材に鉛直下向きに作用させている。基本寸法は、2層門型部分では橋脚高さ26.38m、上部構造の幅13mであり、T型部分では橋脚高さ10.35m、上部構造の幅14.9mである。また、橋脚基部は固定としている。部材断面は垂直補剛材を有する中空長方形断面であり、その断面形状は図-2に示す。他の橋脚による橋軸方向の剛性は水平ばね要素にモデル化し置き換えている。

橋脚の骨組部材にはSM490Yを採用し、これに対して、2層門型構造の1層目の水平部材のみに普通鋼SM400、低降伏点鋼LY100を用いた場合を比較検討する。断面諸元は表-1に示す。

2-2 解析方法

本研究では、鋼材の降伏と幾何学的非線形性を考慮した、はり柱要素の有限要素法とNewmark β 法および修正Newton-Raphson法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析を3次元的に拡張した解析手法を用いる。塑性域のひずみ硬化を0.01とし、橋脚の骨組みに使用する鋼材はSM490Yとする。降伏応力と弾性係数の値はそれぞれ355MPa、200GPaとする。また、1層目の水平部材に用いるLY100、SM400の降伏応力の値はそれぞれ100MPa、235MPaである。鋼製ラーメン橋脚の減衰にはRayleigh減衰を適用しており、減衰定数は1次固有振動モードの面内、面外に対して2%としている。入力地震波は、兵庫県南部地震の海洋気象台記録における3成分加速度波形を用いる。E-W波は橋軸方向にN-S波は橋軸直角方向に、U-D波は鉛直方向に入力する。

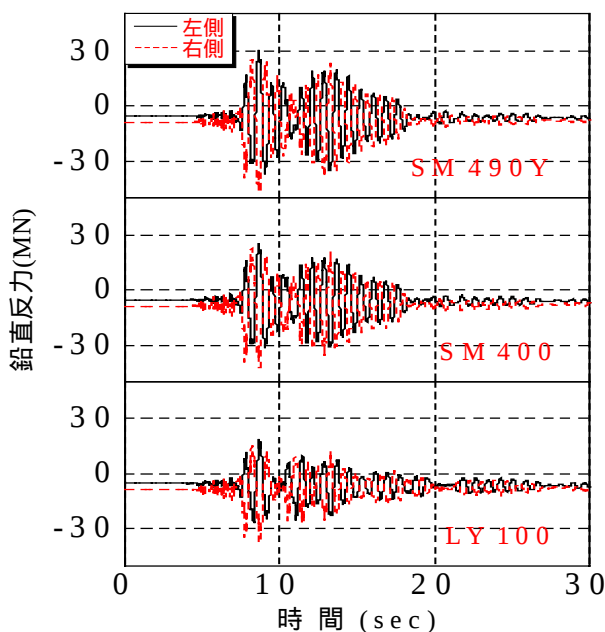


図-3 鉛直反力の時刻歴応答

3 非線形解析結果

(1) 鉛直反力

橋脚基部の鉛直反力の時刻歴応答を図-3に、最大鉛直反力を表-2に示す。

図-3より地震波によって左右の橋脚はロッキング振動を起こしており、それに伴い大きな鉛直反力が生まれている。表-2より左右の橋脚の最大鉛直反力を比較すると、橋脚全体の自重のかかる割合が左右の橋脚で異なることや重心の偏りなどから、右側の橋脚の方が圧縮力が大きく、負反力が小さくなっていることが確認できる。また、LY100を用いた場合では、SM490Yに比べ負反力では約40%、圧縮力で約25%程度減少する。SM400では、共に約12%程度減少する。これは、1層目に用いたLY100、SM400によってエネルギーが吸収されていることに起因していると考えられる。

(2) 曲げモーメント～曲率関係

左右の橋脚基部の曲げモーメント～曲率関係を図-4、図-5に示す。

左側橋脚はほぼ全ての場合で弾性域内に収まっているが、右側橋脚ではわずかに履歴ループを描いている。左側橋脚に比べ、右側橋脚にかかる自重が大きいたことが原因と考えられるが、低降伏点鋼の使用による影響は見られない。

表-2 最大鉛直反力

	鉛直反力	SM490Y	SM400	LY100
左側橋脚	圧縮力(MN)	37.1224	31.6344	27.1754
	負反力(MN)	30.625	25.1272	18.7572
右側橋脚	圧縮力(MN)	47.089	42.0714	37.7104
	負反力(MN)	25.5388	22.8144	15.2292

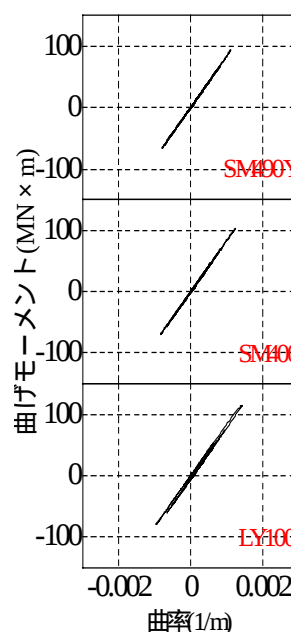


図-4 左側橋脚基部の
曲げモーメント～曲率

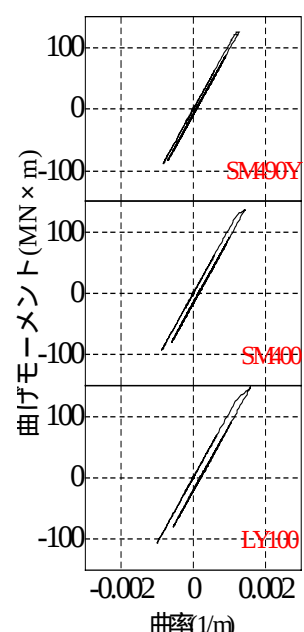


図-5 右側橋脚基部の
曲げモーメント～曲率

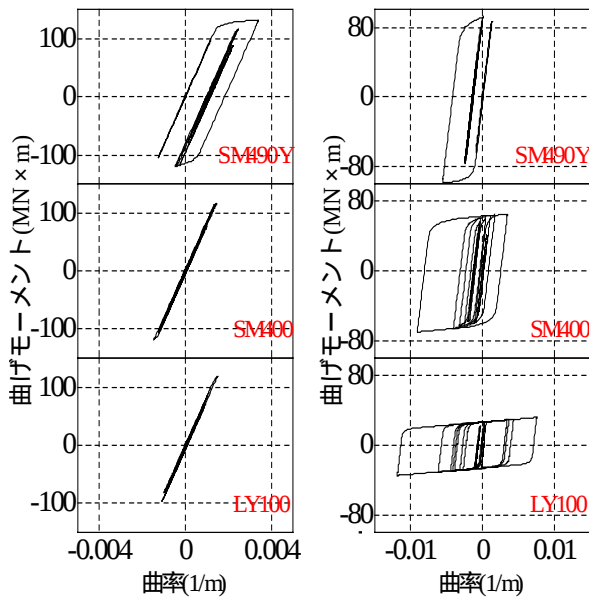


図-6 T型柱下端部の
曲げモーメント～曲率

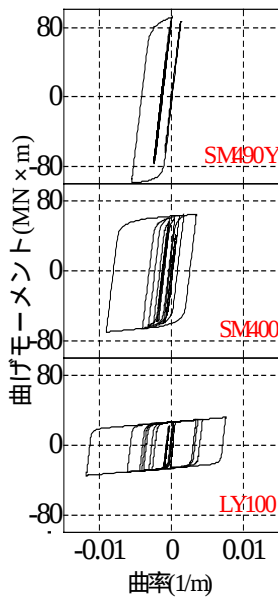


図-7 1層目水平部材左端
曲げモーメント～曲率

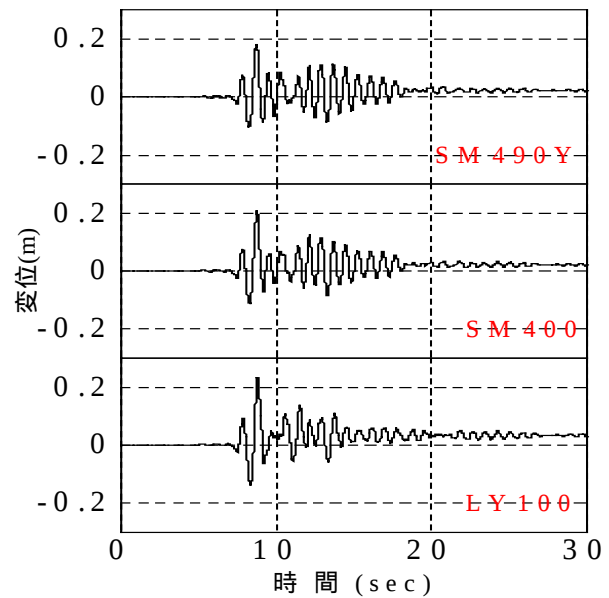


図-10 橋脚上部中央の時刻歴応答変位

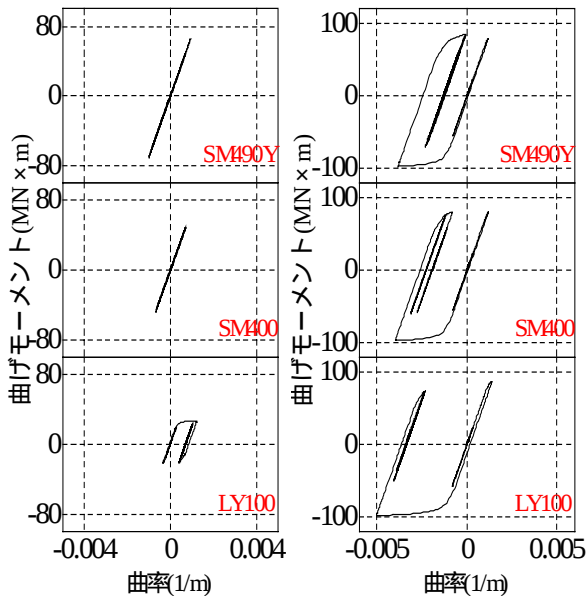


図-8 1層目水平部材右端
曲げモーメント～曲率

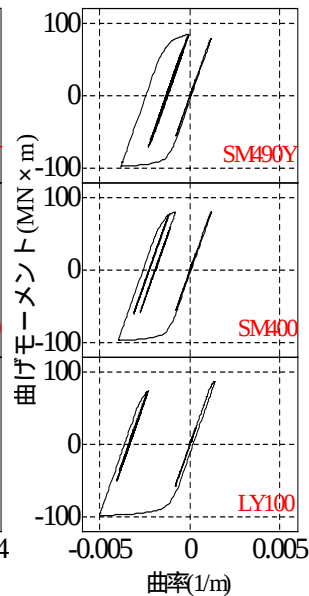


図-9 2層目水平部材左端
曲げモーメント～曲率

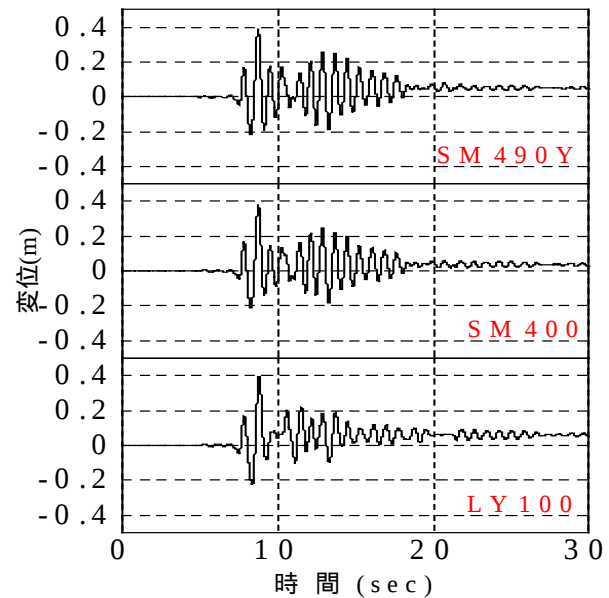


図-11 2層目水平部材中央の
時刻歴応答変位

次に、T型の柱下端部分と1層目水平部材の左端、右端における曲げモーメント～曲率関係をそれぞれ図-6、図-7 図-8 に示す。

図-6 より SM490Y では大きく塑性化することが確認できるが、SM400、LY100 では塑性化が抑制され弾性域内に収まっている。また、図-7 より1層目水平部材の左端で SM400、LY100 が大きく履歴ループを描いている。LY100 においては、1層目水平部材の右端でも履歴ループが確認できる。これは、1層目の水平部材を損傷部材とすることで塑性ひずみエネルギーが増加し、T型の柱下端部分の損傷レベルを低減することができると考えられる。

2層目の水平部材左端における曲げモーメント～曲率関係を図-9 に示す。

表-3 最大応答変位と残留変位

	応答変位	SM490Y	SM400	LY100
橋脚上部 中央	最大変位(m)	0.3908	0.3789	0.3965
	残留変位(m)	0.0444	0.0305	0.0519
2層目水平 部材中央	最大変位(m)	0.1827	0.2062	0.2324
	残留変位(m)	0.0206	0.0195	0.0301

図-9 より1層目の鋼材の種類に関わらず2層目の水平部材は塑性化している。特に、1層目の水平部材に LY100 を用いた場合は SM490Y を使用した場合に比べ大きく損傷していることが確認できる。SM400 の場合も SM490Y よりわずかに大きな履歴ループを描いている。これは、1層目の水平部材の大きな損傷により曲げ剛性が低下し、2層の門型部分での耐震性能が低下したことが原因と考えられる。

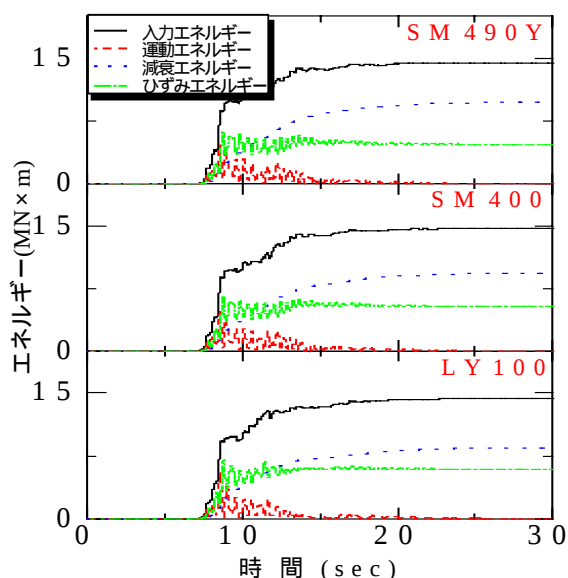


図-12 エネルギー曲線

(3) 時刻歴応答変位

橋脚上部中央 (T 型柱上端部) の時刻歴応答変位を図-10 に、最大変位と残留変位を表-3 に示す。

最大応答変位は低降伏点鋼を用いても大きな変化はない。残留変位についても大きな変化はないが、SM490Y では T 型の柱下端部の損傷、LY100 と SM400 では 1 層目と 2 層目の損傷がそれぞれの残留変位に影響を与えていると考えられる。また、それぞれの残留変位は 5cm 程度であり、橋脚高さ 36.73m の 1/100 を下回っているの で許容範囲内にあると思われる。

次に、2 層目の水平部材中央の時刻歴応答変位を図-11 に示す。

最大応答変位と残留変位は低降伏点鋼を用いた場合がわずかに大きくなっている。これには、1 層目の水平部材での大きな損傷が影響していると考えられる。ここでも残留変位は 2cm 程度なので許容範囲内に収まっていると思われる。

(4) エネルギー曲線

入力エネルギー、減衰エネルギー、ひずみエネルギー、運動エネルギーを図-12 に示す。

入力エネルギーと運動エネルギーに関しては、大きな変化は確認できない。減衰エネルギーは SM490Y が最も大きく、次いで SM400、LY100 となっている。ひずみエネルギーは反対に LY100 が最も大きく、次いで SM400、SM490Y となっている。これによって、入力エネルギーに占める減衰エネルギーとひずみエネルギーの割合は、SM490Y で約 2:1、SM400 で約 3:2、LY100 で約 4:3 となっている。つまり、降伏応力が低い場合は、大きな塑性履歴ループを描くことによって塑性ひずみエネルギーが増加し、また、曲げ剛性の低下によって減衰エネルギーが低下すると考えられる。

4. まとめ

本研究は、鋼製ラーメン橋脚を対象として非線形動的応答解析を行い、橋軸直角方向の動的挙動に着目して、低降伏点鋼などを用いた損傷部材の有効性について比較検討した。

(1) 低降伏点鋼の使用によって鉛直反力は、負反力、圧縮力がともに大きく低減されており、橋脚基部のアンカーボルトの引き抜き、局部座屈の可能性が低減できると考えられる。

(2) 曲げモーメント～曲率関係からは、低降伏点鋼の使用によって T 型の柱下端部で損傷が抑えられるが、橋脚基部ではほとんど変化がなく、2 層目の水平部材においては SM490Y よりも大きく損傷することが確認できる。本研究の解析モデルのように 2 層の門型構造に T 型の橋脚が接続されている構造形式では、それぞれが異なる挙動を示すことがあると思われる。これは、2 層の門型構造の中に損傷箇所を設けると、門型部分の曲げ剛性が低下して損傷が大きくなりエネルギーを大きく吸収し、これによって、T 型橋脚の部分に作用する地震力が小さくなり、損傷が抑えられると考えられる。

(3) 鋼材条件による時刻歴応答変位に大きな変化はあまり見られない。しかし、橋脚上部中央 (T 型柱上端部) における変位が、2 層目の水平部材の変位に比べ、およそ 2 倍大きくなっている。この結果からも 2 層門型構造と T 型橋脚部分では挙動が異なることを表していると考えられる。

(4) 鋼材条件によって入力エネルギーに占める減衰エネルギーとひずみエネルギーの割合が変化している。LY100 を用いた場合では、その部分の大きな損傷によって塑性ひずみエネルギーが増加し、また、損傷による曲げ剛性の低下によって減衰エネルギーが低下すると考えられる。1 層目の鋼材条件だけでは、入力エネルギーの変化は見られないことが確認できる。

1 層目の水平部材に低降伏点鋼を用いることで、2 層門型部分の損傷や残留変位にわずかな増加が見られるが、このことを考慮しても T 型柱部の損傷を抑えられることは、使用性を保つうえで有効と考えられる。損傷箇所を使用性への影響が小さい部分に設けると、履歴ダンパーとして作用し、容易にエネルギー吸収機構を取り入れることができる。これによって、上部構造の損傷を抑え高架橋の機能を維持することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告書 - 土木構造物の被害、橋梁 -、丸善、1992.12.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編、1996.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編、2002.
- 4) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000.
- 5) 野田勝哉、菅勝司：鋼製ラーメン橋脚の軸力変動に関する研究、平成 13 年度土木学会北海道支部論文報告集、第 58 号、pp.208-211、2001.
- 6) 市村賢太郎、西村宣男、池内智行：極低降伏点鋼を用いた吸振装置の開発、土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部(B)、pp.1554 - 1555、1995.
- 7) 阿部雅人、藤野陽三、賀川義昭：低降伏点鋼の履歴吸収エネルギーを基準とした損傷指標、鋼構造年次論文報告集 第 7 巻、pp.331-336、1999.11.