

低降伏点鋼を用いた落橋防止壁の衝撃応答解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS FOR LOW YIELD STRENGTH STEEL-BRIDGE
RESTRAINER WALL角掛 久雄¹, 森下 泰光², 小林 治俊³, 坂井 康孝⁴

Hisao TSUNOKAKE, Hiromitsu MORISHITA, Harutoshi KOBAYASHI and Yasutaka SAKAI

¹修(工) 大阪市立大学大学院助手 工学研究科 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)²高田機工(株)技術研究所 (〒649-0111 和歌山県海草郡下津町方 1375-1)³工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)⁴日本国土開発(株) (〒107-8466 東京都港区赤坂 4-9-9)

キーワード：低降伏点鋼，落橋防止壁，衝撃解析，ひずみ速度効果

(low-yield strength steel, bridge restrainer wall, impact response analysis, strain rate effect)

1. はじめに

兵庫県南部地震により多くの道路橋が被災したことを契機として『道路橋示方書』(平成8年12月)[1]により耐震設計法とともに、落橋防止装置の見直しが行われ、設計荷重の増大と併せて落橋防止システムとして上部構造の落下を防ぐ規定が強化された。そのため、これまで以上に落橋防止構造に関する研究がなされている。特に、橋梁上部工と落橋防止構造間に設置する緩衝材の緩衝性能を向上させことを目的とした研究は多くなされており、ゴムを利用した研究[2-4]が最も多いものの化学繊維[5]あるいは鋼管[6]を利用するものなど様々な取り組みが行われている。落橋防止構造そのもののエネルギー吸収性能を向上させる目的での研究は、文献[7,8]の様に構造そのものに、ゴムを組み込むことで行われている。つまり、緩衝材を落橋防止構造に取り込んだ形式に対する取り組みがなされている。そこで、著者らの一人はゴムなどを利用せず単体として落橋防止構造そのものに衝撃緩衝能力があり、エネルギー吸収性能が向上する構造を検討することとして低降伏点鋼に着目し、この低降伏点鋼を用いた落橋防止壁構造に関する衝突実験を行った[9]。この低降伏点鋼は普通鋼(SS400)と比較して、強度が1/2~1/3、伸びが約2倍の低強度、高変形性能の特性を有する。

本研究では、低降伏点鋼を用いた落橋防止壁構造に対して汎用ソフトを用いて三次元弾塑性解析を行い、実験結果との比較検討を行った。

2. 実験概要

実験[9]において対象とした落橋防止構造形式は、橋台・橋脚側面に設置する壁構造タイプであり、図-1にその供試体概要を示す。落橋防止壁に相当する鋼製ブラケットをアンカーボルトによりRC基礎に固定した形式であり、鋼製ブラケットの製作には板厚6mmの川崎製鐵(株)製River Flex100を使用している。なお、供試体縮尺は実物の1/2スケールを想定している。衝突実験は、(社)日本機械化協会建設機械化研究所にて行った。その実験の概念図を図-2に示す。実験は傾斜路上の所定の高さより上部構造に見立てた衝突体(台車:7.34t)を走行させ、あらかじめ固定している実験供試体に衝突させることで行った。実験では衝突速度をパラメーターとし、0.07~1.25m/sec間の9ケースの衝突速度で実験を行い、鋼製ブラケット、衝突体それぞれの変位・加速度とアンカーボルトのひずみなどの計測を行った。なお、供試体に対する衝突面(幅500mm×高さ100mm)の上端は供試体上端から30mm下方としている。

3. 解析モデル

解析における供試体と RC 基礎の有限要素分割モデルを図-3 に示す。供試体は衝突方向に対し対称であることから、1/2 モデルとして解析を行うこととした。鋼製ブラケット等の材料定数を表-1 に示す。

解析では低降伏点鋼製ブラケット部のみを弾塑性モデルとし、

材料試験で得られた応力-ひずみ曲線に出来るだけ忠実にモデル化することとして、図-4 の様に多直線近似させている。境界条件は RC 基礎底面のみを固定とし、各物体の接触条件に関してはアンカーボルトと RC 基礎を剛結とした他は接触面方向に対するすべりは自由とした。また、本解析においては、減衰定数を 5 % と仮定している。その条件下において低降伏点鋼に対し、ひずみ速度を考慮した場合と考慮しない場合についての比較も併せて行うこととした。ただし、低降伏点鋼に対するひずみ速度効果に関する研究[10,11]はなされているものの、一般式としての提案までは行われていない。そこで、普通鋼に対して提案がなされている高橋ら[12]の式を準用することとした。すなわち、

$$f_y^d / f_y^s = 1.202 + 0.040 \times \log \varepsilon$$

ここで、 f_y^d : 動的降伏応力、 f_y^s : 静的降伏応力、 ε : ひずみ速度である。

以上の条件により、実験においてアンカーボルトの抜け落ち等が発生しなかった 5 ケースの衝突速度 v (0.37, 0.47, 0.65, 0.86, 1.16 m/sec) に対して解析を行った。その際、汎用衝撃解析ソフト LS-DYNA [13]を用いた。

4. 解析結果

4. 1 応答値の比較

図-5 に各衝突ケースに関する解析および実験により得られたブラケットと衝突体の時刻歴応答変位、衝突体の時刻歴応答加速度およびブラケットの変位と衝突体の質量に加速度を乗ずる事により求めた衝撃力の関係を示している。併せて表-2 に各部の変位と加速度の最大値を示す。

(1) ブラケット水平変位の時刻歴応答

各ケースにおいて、ひずみ速度効果を考慮したケ

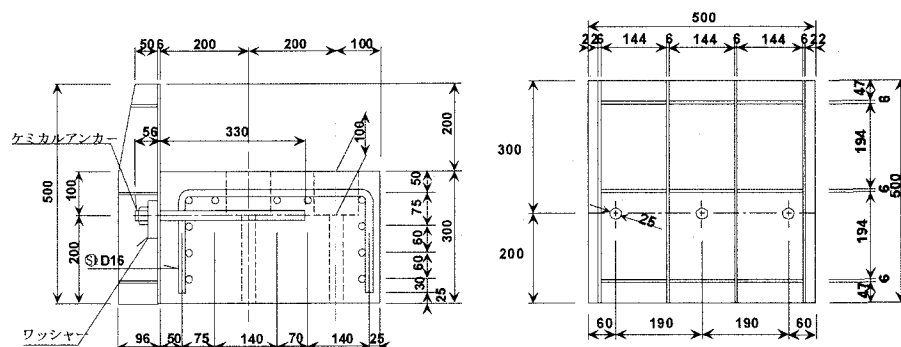


図-1 供試体概略図 (単位: mm)

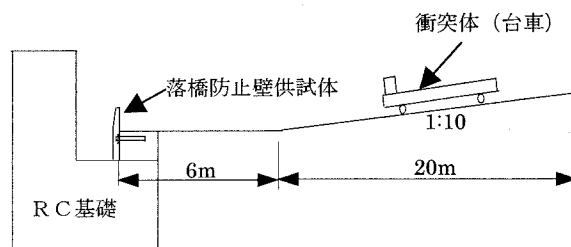


図-2 衝撃実験の概念図

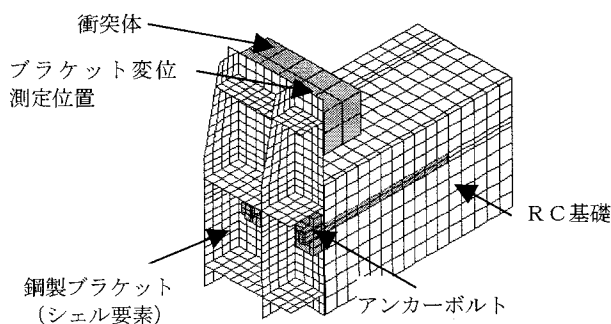


図-3 要素分割モデル

表-1 材料定数

	物性モデル	弾性係数	初降伏点	ポアソン比
鋼製ブラケット	トリニア	210 GPa	85 MPa	0.300
アンカーボルト	弾性	210 GPa	—	0.300
RC基礎	弾性	21 GPa	—	0.167
衝突体	剛体	—	—	—

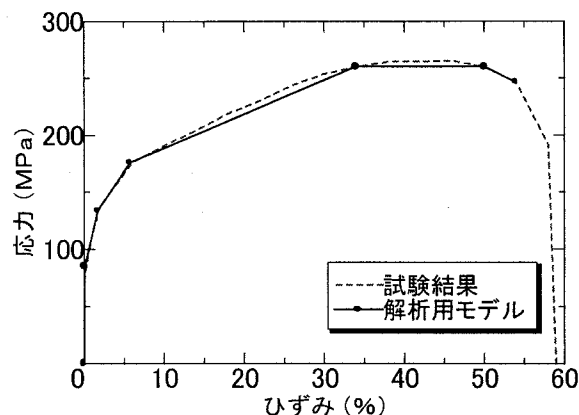
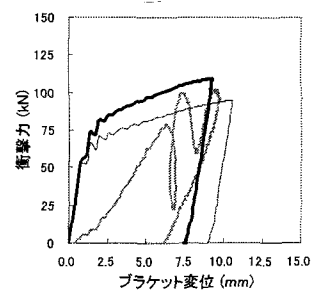
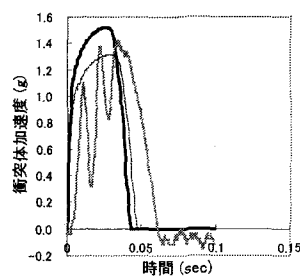
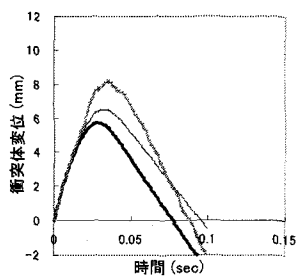
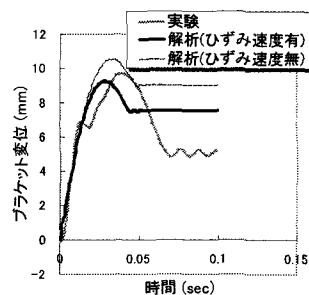
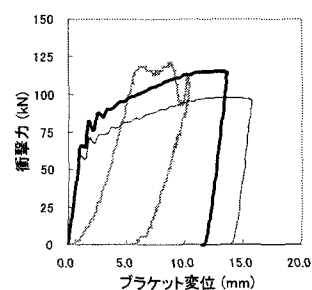
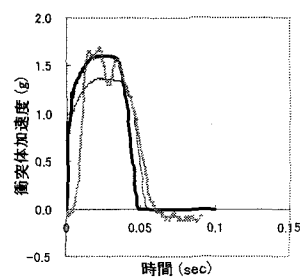
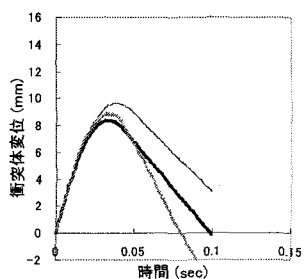
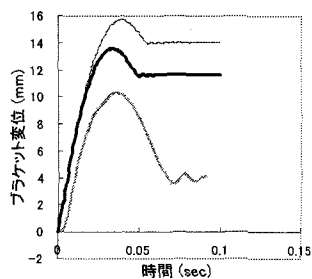


図-4 低降伏点鋼の応力-ひずみ曲線

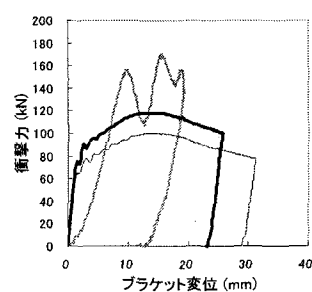
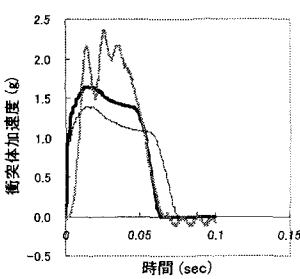
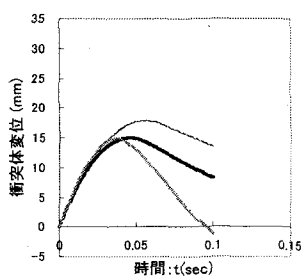
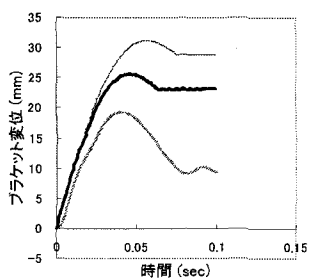
ースの方が実験結果に類似した応答を示している。しかし、解析における残留変位は実験に対し、非常に大きな値となった。また、表-2 より、ひずみ速度



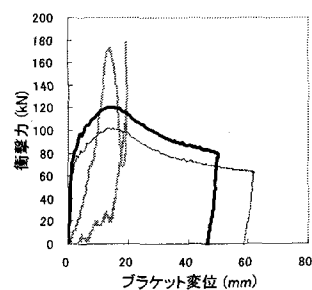
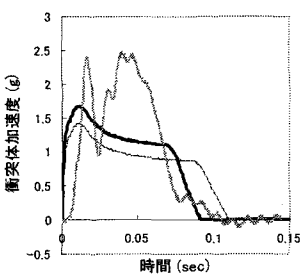
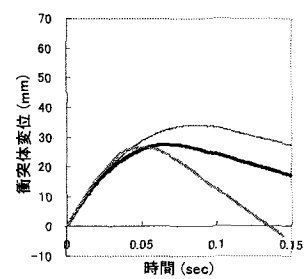
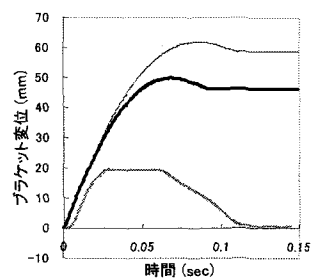
(1) 衝突速度 $v = 0.37$ m/sec



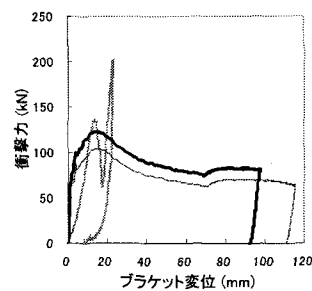
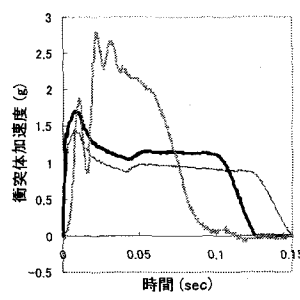
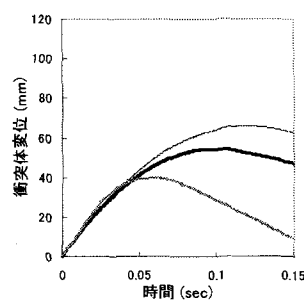
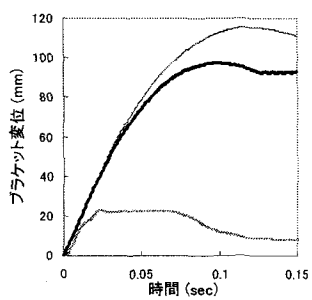
(2) 衝突速度 $v = 0.47$ m/sec



(3) 衝突速度 $v = 0.65$ m/sec



(4) 衝突速度 $v = 0.86$ m/sec



(5) 衝突速度 $v = 1.16$ m/sec

(a) ブラケット水平変位

(b) 衝突体水平変位

(c) 衝突体水平加速度

(d) ブラケット水平変位
と衝撃力

図-5 各応答の解析値と実験結果との比較

表-2 最大応答値の一覧

衝突速度 (m/sec)	計測項目	解析値		実験値	実験に対する比率	
		ひずみ 速度有	ひずみ 速度無		ひずみ 速度有	ひずみ 速度無
0.37	ブラケット変位 (mm)	9.27	10.55	9.72	0.95	1.09
	衝突体変位 (mm)	5.73	6.52	8.22	0.70	0.79
	衝突体加速度 (g)	1.52	1.31	1.38	1.10	0.95
0.47	ブラケット変位 (mm)	13.59	15.72	10.30	1.32	1.53
	衝突体変位 (mm)	8.40	9.64	8.92	0.94	1.08
	衝突体加速度 (g)	1.60	1.36	1.69	0.95	0.80
0.65	ブラケット変位 (mm)	25.63	31.17	19.34	1.33	1.61
	衝突体変位 (mm)	14.96	17.83	14.87	1.01	1.20
	衝突体加速度 (g)	1.64	1.39	2.36	0.69	0.59
0.86	ブラケット変位 (mm)	49.85	61.79	-	-	-
	衝突体変位 (mm)	27.59	33.99	26.35	1.05	1.29
	衝突体加速度 (g)	1.67	1.41	2.47	0.68	0.57
1.16	ブラケット変位 (mm)	97.36	115.52	-	-	-
	衝突体変位 (mm)	54.34	65.82	39.94	1.36	1.65
	衝突体加速度 (g)	1.70	1.44	2.79	0.61	0.52

速度効果を考慮したケースにおける最大応答値の実験値に対する比率は、 $v=0.86, 1.16$ m/sec のケースを除き 0.95~1.33 となった。衝突速度の速いケースの実験値に関しては、設置した変位計の性能により 20 mm 前後までしか測定できなかったために適切な測定が出来ず、ブラケットの水平変位よりも衝突体の水平変位の方が大きい値となっている。

(2) 衝突体水平変位の時刻歴応答

各ケースにおいて、ひずみ速度効果を考慮したケースの方が実験結果に類似した応答を示している。しかし、衝突速度が速くなると解析結果と実験結果とでは、それぞれの最大応答値の発生時間の差が大きくなる傾向を示している。また、ひずみ速度効果を考慮したケースにおける最大応答値の実験値に対する比率は、0.70~1.36 となった。

(3) 衝突体水平加速度の時刻歴応答

加速度の応答に関して実験結果と解析結果に幾分相違があることが確認できる。実験結果は振動しながら増加する現象がみられるのに対し、解析では衝突した瞬間に大きな加速度が生じ、その後、徐々に増加して最大応答値となっている。ひずみ速度効果を考慮したケースにおける実験値に対する比率をみると、 $v=0.37, 0.47$ m/sec のケースでは 1.10, 0.95 とほぼ近似しているが、その他のケースでは 0.61~0.69 と若干低めの値となっている。そこで、衝突体の力積について考えることとし、表-3 に各衝突速度に対する力積の一覧を示した。ひずみ速度効果を考慮しないケースにおける実験値に対する比率は 0.83~1.02 を示し、一方ひずみ速度効果を考慮したケースでは 0.85~1.06 とほぼ近似した値となり、

表-3 衝突体の力積一覧

衝突速度 (m/sec)	計測方法	力積 (kN・sec)	実験に対する比率
0.37	実験結果	3.58	-
	ひずみ有	3.67	1.03
	速度無	3.54	0.99
0.47	実験結果	4.22	-
	ひずみ有	4.46	1.06
	速度無	4.31	1.02
0.65	実験結果	6.35	-
	ひずみ有	5.79	0.91
	速度無	5.62	0.89
0.86	実験結果	8.62	-
	ひずみ有	7.35	0.85
	速度無	7.19	0.83
1.16	実験結果	10.38	-
	ひずみ有	9.76	0.94
	速度無	9.32	0.90

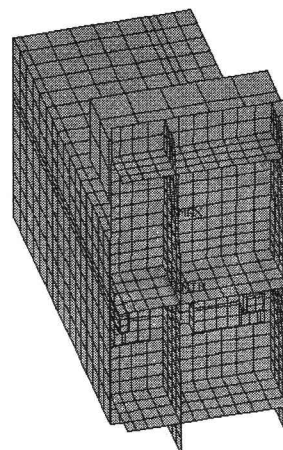
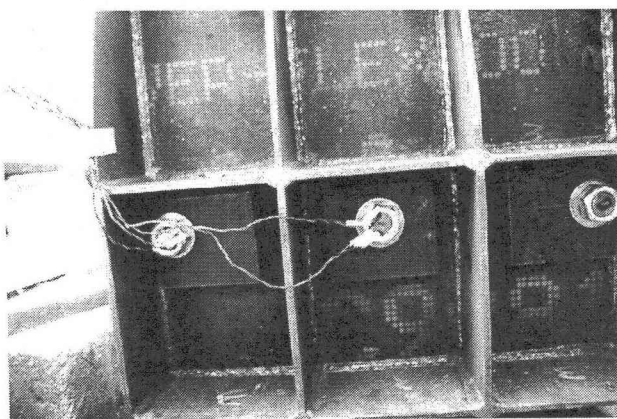
衝突体の運動量はひずみ速度の影響を考慮するしないに関わらず実験結果とほぼ同等になっている。ただし、解析結果を比較すると各ケースにおいてひずみ速度の影響を考慮した方が、わずかながら、大きい値となった。

(4) ブラケット水平変位と衝突体衝撃力の履歴

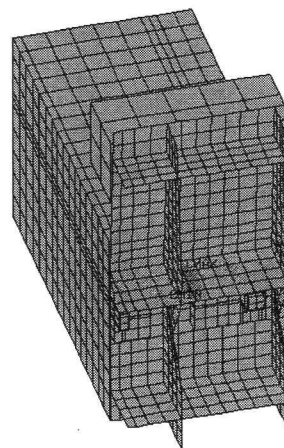
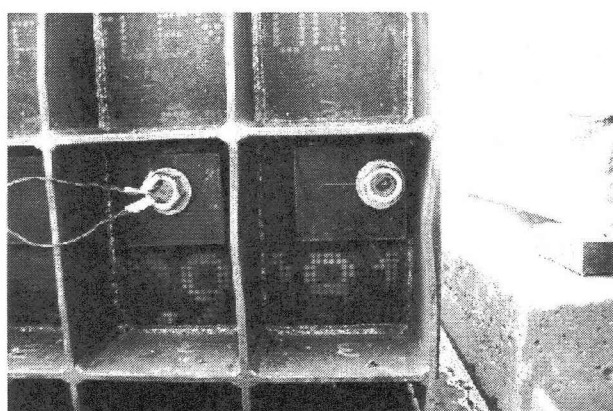
衝突速度 $v=0.86, 1.16$ m/sec のケースは (1) 項で述べたように変位が 20 mm 程度までしか計測できていないので、その範囲でのみ実験結果および解析結果を比較する。この応答においても実験結果と解析結果に相違が見られる。解析結果では変位はあまり大きくならず急激に衝撃力が上昇し、その後、徐々に衝撃力が上昇する傾向を示すのに対し、実験結果では最初の勾配は小さく徐々に大きくなる傾向を示している。ブラケットの変位計測位置が衝突体の衝突位置と異なり、ブラケット上端であるために衝突部に比べ、幾分大きな変位になっているが、履歴曲線下の面積を吸収エネルギーと考えると明らかに実験結果は小さく、解析における吸収エネルギーの評価を行うには、さらに解析モデルの検討が必要であると考えられる。

4. 2 ブラケットの変形状況

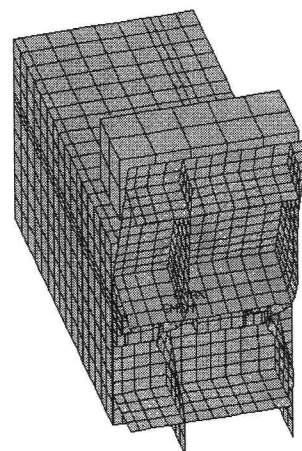
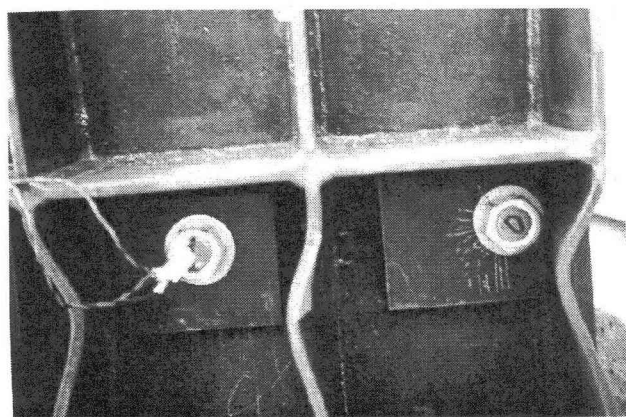
ブラケットの衝突後の変形状況を図-6 に、 $v=0.47, 0.65, 1.16$ m/sec の 3 ケースのみ示した。 $v=0.47$ m/sec のケースは実験、解析ともにブラケットリブにほとんど局部座屈は生じていないことが分かる。衝突速度の遅い $v=0.37$ m/sec のケースにおいても同様であった。実験では局部座屈が明らかに生じたのは $v=0.65$ m/sec 以上の速度のケースであっ



(1) 衝突速度 $v = 0.47$ m/sec



(2) 衝突速度 $v = 0.65$ m/sec



(3) 衝突速度 $v = 1.16$ m/sec

図-6 衝突後のブラケットリブの変形状況

たが、図から分かるように解析においても同様な結果となった。(1)項で述べた様に実験結果と解析結果で残留変位の大きさは大きく異なった結果となったが、ブラケットリブに生じる局部座屈の発生に関しては良くシミュレート出来ていると考える。

5. まとめ

本研究では低降伏点鋼を用いた落橋防止壁構造に対して三次元弾塑性衝撃解析を行い実験結果との比較検討を行った。本解析により得られた結果を以下に示す。

- (1) ブラケットおよび衝突体の水平変位の応答は、すべての衝突速度においてひずみ速度効果を考慮すれば実験結果に類似した応答を示す。

- (2) ブラケットの残留変位は実験と解析では異なった結果となったが、リブに生じる局部座屈の発生に関しては良くシミュレート出来た。
- (3) 衝突体の水平加速度に関しては、その応答に相違が認められる。しかし、衝突体の力積に関しては、ひずみ速度の影響を考慮するしないに関わらず衝突体の運動量は実験結果とほぼ同等になった。
- (4) 計測されたブラケットの水平変位と衝突体の衝撃力による履歴曲線は大きく異なり、吸収エネルギー量を解析で評価するには、さらに解析モデルの検討が必要である。

参考文献

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp. 199-226，1996.
- [2] 園田佳巨，彦坂熙，穴水宏和，生駒信康，石川信隆：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的弾性および衝撃弾性応答特性に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1645-1654，1999.
- [3] 西本安志，梶田章秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する基礎的研究，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp. 107-112，2000.
- [4] 島ノ江哲，長谷川恵一，川島一彦，庄司学：衝撃力を受けるゴム製緩衝装置の動的特性，土木学会論文集，No. 675/I-55，pp. 219-234，2001.
- [5] 窪田賢司，菅野匡，上東泰，石田博：緩衝効果を有する落橋防止装置の衝撃実験及び効果の検証，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp. 418-419，1997.
- [6] 中田宏司，長嶋文雄，都築昭夫，金子修，大竹為吾：鋼製緩衝装置の衝撃性能と設計手法に関する検討，第 5 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp. 153-158，2000.
- [7] 関惟忠，西岡敬治，宇野裕恵，小塚幹夫，潤田久也：緩衝性のある落橋防止ブロック型ゴム被覆チェーン式落橋防止装置－，橋梁と基礎，Vol. 38，No. 1，pp. 31-36，1997.
- [8] 村田清満，高山智宏，後藤貴士，山田正人，生駒信康，浮島徹：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果，土木学会論文集，No. 689/I-57，pp. 275-288，2001.
- [9] 森下泰光，山田靖則，安田修：低降伏点鋼を用いた鋼製落橋防止壁の衝突実験，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp. 600-601，1999.
- [10] 佐伯英一郎，杉沢充，山口種美，望月晴雄，和田章：低降伏点鋼のヒステリシスおよびヒステリシスエネルギー特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 473 号，pp. 159-168，1995.
- [11] 飛鳥馬隆志，安部義，長嶋文雄：極低降伏点鋼のひずみ速度効果に関する一考察，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，I-A，pp. 606-607，2001.
- [12] 土木学会：構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法，pp. 82-84，1994.
- [13] 日本総合研究所：LS-DYNA version 950 USER'S MANUAL，1999.