

衝突実験による鋼製ブラケット型落橋防止構造の検討

日本道路公団試験研究所 道路研究部橋梁研究室

〃

〃

正会員 市岡 隆興

正会員 菅野 匡

正会員 紫桃孝一郎

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震において橋梁の被害は落橋を含め数多く発生しており、それを契機に地震時の構造物の安全性が見直され耐震基準も改定された。落橋防止システムは、「構造部材や地盤の破壊に伴う予期できない構造系の破壊が生じて、上部構造の落下を防ぐ」ことを目的としており、すなわち、想定外の不測の事態においても落橋を防ぐというフェールセーフ機能として重要視されてきている。また、主構造の損傷を最低限に抑えるという機能も要求され始めている。

道路橋示方書による現在の設計法は静的設計によっているが、実際に落橋防止構造が機能する場合には地震動という衝撃的なエネルギーが作用し、そのときの動的挙動はあまり明らかにされておらず、落橋防止構造の動的耐力、エネルギー吸収量が把握されている例は数少ない。

本研究では、緩衝材を取り付けた鋼製ブラケット型落橋防止構造について着目し、衝突実験及び衝突解析を行うことによって安全性の確認および、動的耐力、吸収エネルギー量の把握を行い、鋼製ブラケット型落橋防止構造の設計法確立のため資料を得た。鋼製ブラケット型落橋防止装置の設置例を図-1に示す。

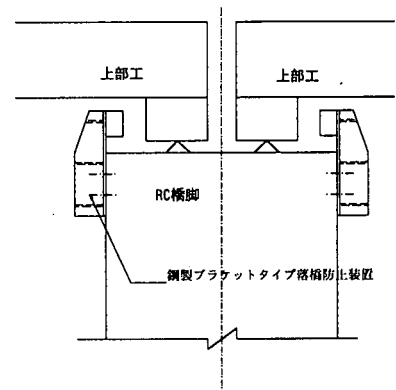


図-1 落橋防止構造設置例

2. 検討概要

検討のフローを図-2に示す。まず、衝突時の高速引抜き挙動が把握されていないアンカーボルトについて、高速引抜き試験を実施して、その挙動を把握した。その結果を基に、基本ケースとしては静的設計を行った落橋防止装置供試体に10tの衝突体を速度2.0m/sで衝突させ、衝突時の安全性の確認および衝撃に対する破壊性状やエネルギー吸収性能などの把握を行った。また、ブラケットのリップ厚さの影響、緩衝材の影響、エネルギー吸収量を検討するために、全8体で試験を行った。さらに、これらの実験に対して、LS-DYNAを用いたFEM衝撃応答解析を行った。現在、実験及び解析の結果より落橋防止構造の設計法の検討を行っているところである。

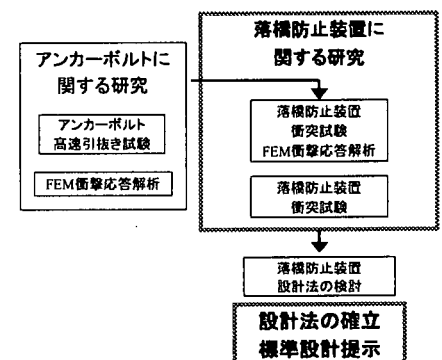


図-2 検討の流れ

3. あと施工アンカーボルトに関する検討（アンカーボルト高速引抜き試験）

3-1 試験概要

高速での引抜きの挙動が把握されていないあと施工アンカーボルトに対して、速度0、0.2、0.4、0.8m/sの一定速度でアンカーボルトを引き抜く高速引抜き試験を行い、埋込深さ長15φのアンカーボルトの安全性の確認および引抜き耐力の速度依存性の確認を行った。金属とコンクリートは高速引張で強度が高くなるが、

キーワード：落橋防止、鋼製ブラケット、エネルギー吸収、衝突実験、FEM解析

連絡先 東京都町田市忠生1-4-1 TEL042-791-1621 FAX042-792-8650

高速引張に対してボルトとコンクリートの付着部分の歪速度依存性が把握されておらず、アンカーボルト全体での挙動把握のため実施したものである。

引抜き装置の概要を図-3に示す。いずれの試験体についても引張強度・破断時の伸び・引抜き速度・アンカーボルトのひずみを計測した。

3-2 供試体

供試体形状を図-4に示す。あと施工アンカーは施工によって引抜き耐力のばらつきが比較的大きくなることを想定して、SS400材のアンカーボルト破断時にも他の破壊モードが生じないように埋込深さを 15ϕ とした。アンカーボルトは、M24ケミカルアンカー及びM22 拡底アンカーの2種類を使用した。また、施工方法の影響をみるために、鉛直打設の供試体および水平打設で削孔処理を丁寧に行わない(ブロウによるほこり飛ばしのみ) 供試体の2種類を作成した。

3-3 試験条件

試験条件を表-1に示す。ブラケット下端から衝突位置までの距離=0.45m、ブラケット下端から上段ボルト位置までの距離=0.2m であり、衝突速度を 2.0m/s と仮定した。ブラケットを剛体と考え、ブラケット下端を支点として上段ボルトが引き抜かれると仮定した場合の上段ボルトの引抜き速度は 0.89m/s ($v=2.0 \times 0.2/0.45=0.89\text{m/s}$) となる。ただし、試験機の性能の制限により、目標速度の上限を 0.8m/s とし、引抜き速度は 0、0.2、0.4、0.8m/s を設定した。

ブラケットの設計思想として全体の破壊は精度の高い鋼材の破壊に依存すべきと考え、アンカーボルトが破断するよう試験体を作成した。

3-4 試験結果

試験結果を表-1に、引抜き速度と引抜き耐力の関係を図-5に示す。アンカー破壊形態には、アンカーボルト破断、アンカー+ボルトの引き抜き、コーン破壊があるが、どのケースも所定のモードのボルト破断であった。つまり、引抜き速度の増加に伴いボルトの最大応力も増加したが、ボルト破

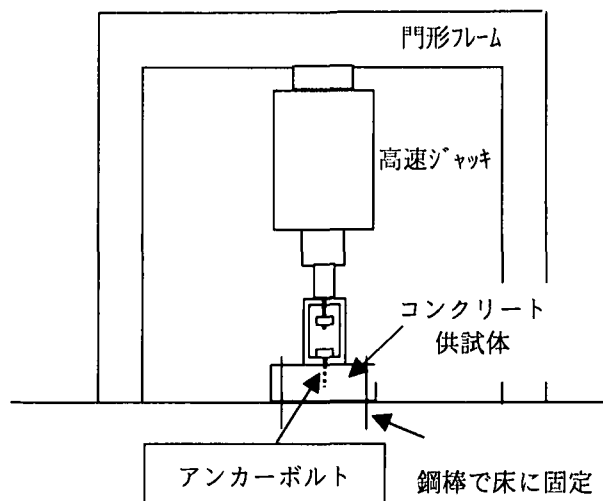


図-3 高速引抜き試験概要図

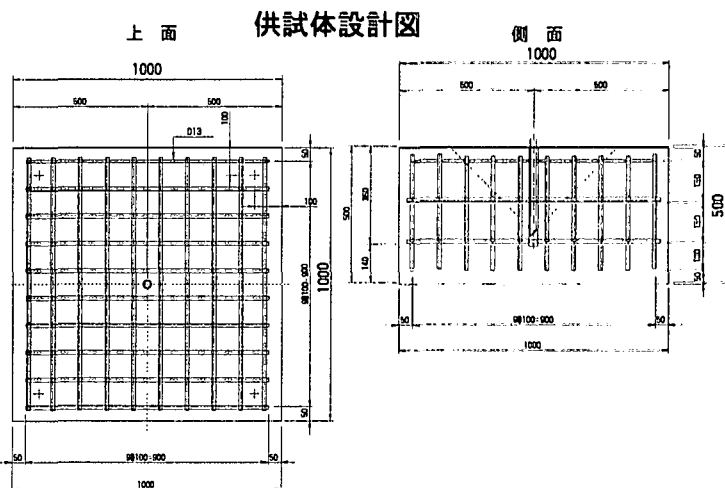


図-4 供試体形状

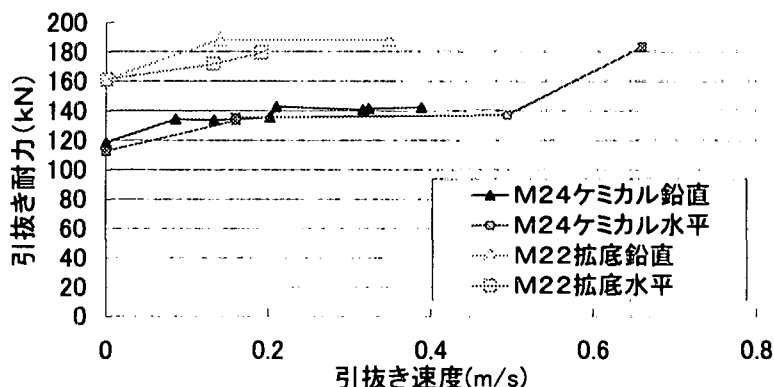


図-5 アンカーボルト引抜き耐力

断までボルト抜けはなく、埋込深さ 15φ で十分な埋込深さであったことが確認できた。また、打設方向の違いによる差は平均5%程度にとどまった。

ケミカルアンカーと拡底アンカーでは、破断耐力の違いとコンクリート内部のひずみ特性の違いがあげられる。破断耐力の違いは、ゲージ取付けのためのボルト断面欠損割合が異なったため、拡底アンカーの破断耐力が大きくなったものと考えられる。また、ひずみ計測結果よりケミカルアンカーボルトは表面付近だけでひずみが生じ、拡底アンカーボルトは全体でひずみが生じており、ひずみ応答特性の違いが観察された。

3-5 解析

非線形動的構造解析ソフト「LS-DYNA」を用いて、引抜き速度 0.2、0.4、0.8m/s のケースについて解析を行い、実験結果とあわせることによりアンカーボルトとコンクリート境界面の抵抗値を各引抜き速度ごとに求めた。

4. 落橋防止装置に関する検討（落橋防止装置衝突試験）

4-1 試験概要

上部工衝突時の落橋防止装置の挙動を把握するため、落橋防止装置に衝突体として鋼製ブロックを衝突させ、ブラケットに作用する衝撃力、ブラケットの変形、アンカーボルトへの応力伝達、ダンパーの挙動、落橋防止システムとしてのエネルギー吸収性能等を確認した。また、FEM 衝撃応答解析結果と合わせて落橋防止装置設計法構築のためのデータを得た。

4-2 供試体

供試体形状を図-6に示す。スケールとしては、実橋へ適用する装置のおよそ2分の1を想定した。ブラケット形状を図-7に示す。これらの設計は、死荷重反力を5t(10tの桁を想定)として道路橋示方書に基づいて設計したものである。ブラケットリブの高さ・板厚の影響を検討するために、標準板厚8mmに対して、6mm、12mmの供試体を1体ずつ作成した。これらの静的強度はほぼ同じになるよう設計した。緩衝材取付図を図-8に示す。厚さ100mmには型式：HD-HF10(177×203×100)のハニカムダンパーを2個、厚さ200mmには型式：HD-HF40(355×406×200)のハニカムダンパーのおよそ半分を使

表-1 アンカーボルト高速引抜き試験結果

試験体	試験条件			試験結果			
	打設方向	目標引抜き速度 (m/sec)	ボルト最小径 φ (mm)	平均引抜き速度 (m/sec)	破断荷重 max(kN)	破断応力 max (N/mm ²)	
M24 ケミカル アンカー	鉛直	0 (静的)	18.0	0.0	117.6	462	
			17.9	0.0	117.4	467	
			17.9	0.0	118.5	471	
		0.2	18.0	0.85	134.4	528	
			18.1	0.133	133.7	520	
			17.9	0.202	135.5	539	
	0.4	17.9	0.388	142.3	565		
		18.0	0.323	141.5	556		
		18.1	0.316	140.6	547		
		18.0	0.21	142.7	561		
		水平	0 (静的)	17.8	0.0	112.7	453
				0.2	18.0	0.16	133.4
0.4	17.9			0.159	135.4	538	
0.8	17.8		0.494	137.1	551		
	17.9		0.719	135.2	537		
	17.9		0.659	183.2	728		
M22 拡底 アンカー	鉛直	0 (静的)	17.9	0.0	161.2	640	
		0.2	17.9	0.14	161.0	640	
		0.4	18.0	0.348	188.4	741	
	水平	0 (静的)	18.0	0.0	171.6	674	
		0.2	18.0	0.132	188.0	739	
		0.4	17.9	0.191	179.3	713	

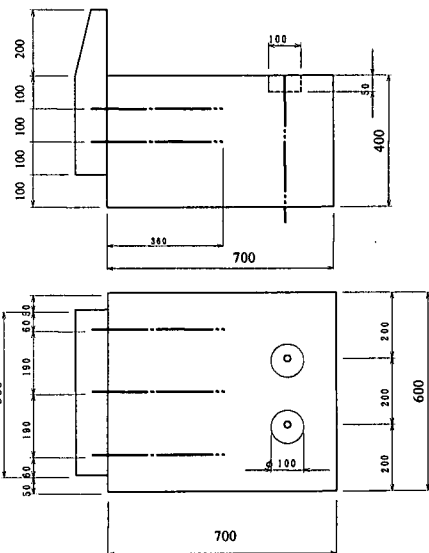


図-6 衝突試験供試体形状

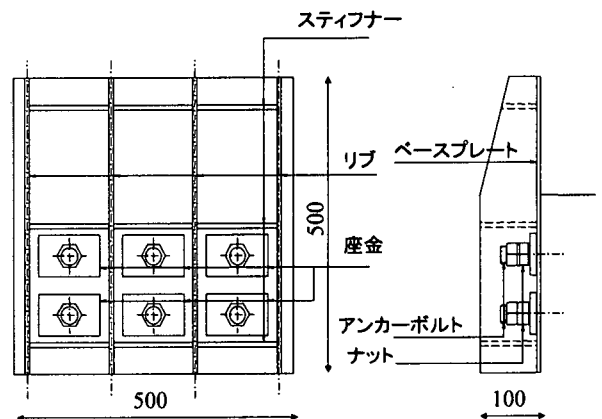


図-7 ブラケット形状

用した。あと施工アンカーボルトには、3. あと施工アンカーボルトに関する検討で用いたM24 ケミカルアンカーを使用した。

4-3 試験条件

試験条件を表-2に示した。試験場の天井からワイヤーによって吊された鋼製ブロックをウィンチによって後上方に引いておき、切り離すことによって水平速度を与え、鋼製ブラケット型落橋防止装置にあて、桁の衝突を模したものである。試験装置概要図を図-9に示す。基本ケースとして鋼製ブロックは、質量10tとし衝突面にはロードセルを設置した。衝突体の質量については実験規模により設定したものであり、例えば支間35m程度のPC橋への設置であれば、この供試体の2倍程度のサイズの落橋防止装置となる。衝突速度は、兵庫県南部地震の地震動データよりJHの標準的な上部構造の最大応答速度を計算して2.0m/sを基本とした。ケースNo.2のリブ板厚8mm、ダンパー厚さ100mm、衝突エネルギー20kJ、衝突体重量10t、衝突速度2.0mmを基本ケースとして、衝突エネルギーの変化(衝突体重量と衝突速度)、リブ高さ・板厚の影響、ダンパーの影響を検討するため、全8供試体で試験を行った。

4-4 試験結果

4-4-1 結果一覧

試験結果一覧を表-2に示した。どのケースも、ブラケットの破壊状況に違いがあるものの、衝突

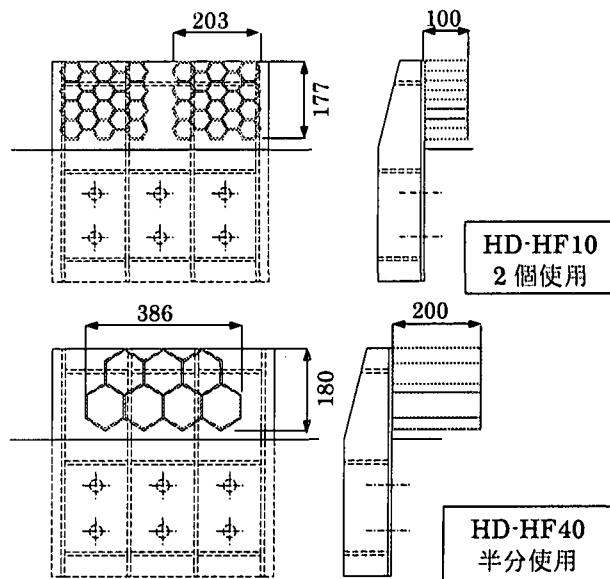


図-8 緩衝材取付図

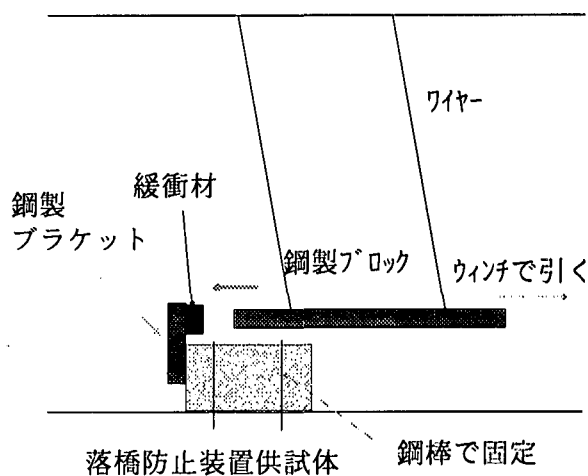


図-9 衝突試験概要

表-2 衝突試験結果

ケース No.	衝突速度 (m/sec)	衝突体重量 (ton)	衝突エネルギー (kJ)	リブ板厚 (mm)	リブ板幅 (mm)	ダンパー厚さ (mm)	試験結果のまとめ	摘要
1	1.0 (0.97)	10	5 (4.8)	8	100	100	ダンパー100mmのみではほぼ衝突エネルギーを吸収できた。ブラケット及びボルトの塑性変形は見られなかった。	エネルギー (速度)
2	2.0 (1.87)	10	20 (17.8)	8	100	100	ダンパーは完全につぶれた。ブラケットリブの座屈及びボルトの部分的な降伏が見られた。	基本ケース
3	2.3 (2.03)	15	40 (31.4)	8	100	100	ダンパーは完全につぶれた。ブラケット及びボルトの変形がケース2よりさらに進んだ。	エネルギー (速度・重量)
4	2.3 (2.05)	15	40 (32.0)	6	120	100	ダンパーは完全につぶれた。ブラケットリブの座屈及びボルトの部分的な降伏が見られた。ケース3より変形量が大い。	エネルギー (速度・重量) リブ
5	2.3 (2.00)	15	40 (30.5)	12	75	100	ダンパーは完全につぶれた。ブラケットリブの変形はほとんど見られなかった。ボルトの引抜き力によって供試体表面部分のコンクリートが抜け出し、ボルトが大きく降伏した。ただし、ボルトの抜け出しはなかった。	エネルギー (速度・重量) リブ
6	2.0 (1.87)	10	20 (17.7)	8	100	200	ダンパー200mmではほぼ衝突エネルギーを吸収できた。ブラケット及びボルトの塑性変形はほとんど見られなかった。	ダンパー
7	2.0 (1.93)	10	20 (19.0)	8	100	0	ブラケットリブの座屈及びボルトの部分的な降伏が見られた。ケース2よりさらに変形が進んだ。	ダンパー
8	2.3 (2.00)	15	40 (30.5)	8	100	0	ブラケット及びボルトの変形がケース7よりさらに進み、ほぼ完全に破壊されたがエネルギーは吸収できた。	エネルギー (速度・重量) ダンパー

(注) 衝突速度・衝突エネルギー：上段目標値、下段(実測値)

体のエネルギーを吸収し、衝突体をくい止めることが確認できた。この規模に対しては、今回の設計法で、安全に地震時の桁の移動を止めることが可能であると言える。

4-4-2 考察

8ケースについて、落橋防止装置が受ける荷重と変位の関係を図-10に示した。

(1) エネルギー吸収性能

衝突エネルギーを変えた3ケース (Case1、Case2、Case3) で試験を行い、以下の結果を得た。

- ・ Case1 5kJ : 破壊形態はダンパーの損傷のみ。ダンパーのみでほぼエネルギーを吸収した。
- ・ Case2 20kJ : ダンパーで吸収しきれず、残りのエネルギーをブラケットの変形で吸収した。
- ・ Case3 40kJ : 上記と同様にダンパーおよびブラケットの変形でエネルギーを吸収した。ブラケットリブが座屈しており、抵抗力の低下もみられるが、未だエネルギー吸収性能に余力があったことがうかがえる。

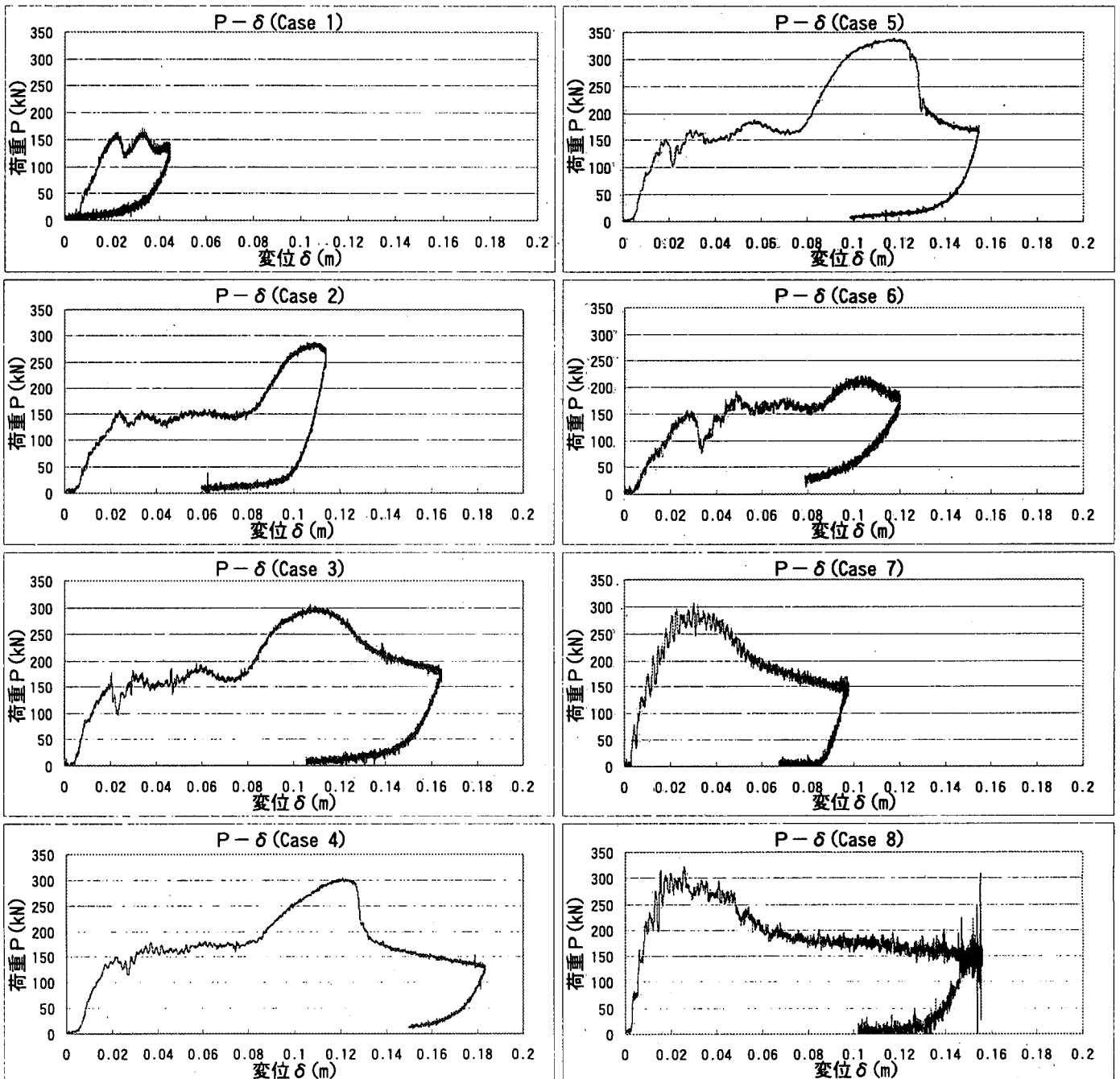


図-10 衝突試験による落橋防止装置の変位荷重曲線

Case3 の衝突状況の写真を図-11 に示すが、衝突開始後、まず、緩衝材がつぶされてエネルギーを吸収し、その後はブラケットが変形して残りのエネルギーを吸収し、衝突体を止めた様子が観察される。ケース3の荷重変位曲線を図-12 に示す。囲まれた面積がエネルギー吸収量となるが、緩衝材で約 8kJ、ブラケットの変形で約 23kJ のエネルギーを吸収したことが想定される。

(2) ダンパー性能

ダンパーの性能を確認するために、目標衝突エネルギー20kJ 一定として、ダンパー無し、ダンパー厚さ100mm、厚さ 200mm の3ケース (Case7、Case2、Case6) で試験を行い、以下の結果を得た。また、Case8、Case3 の比較によって、衝突エネルギー40kJ に対するダンパー効果を確認できる。

ダンパー厚さ 100mm は、ダンパーでかなりのエネルギーを吸収したため、ブラケットの変形はダンパー無しの変形量の 46%と小さかった。ダンパー厚さ 200mm は 20kJ のほとんどの衝突エネルギーを吸収し、厚さ 100mm のものよりさらにブラケットの変形は小さく、ダンパー無しの変形量の 10%であった。これらより、ダンパーの効果の確認ができた。また、このように、ダンパー、ブラケットの変形でエネルギー吸収を行うためには、ダンパー強度<ブラケット強度<アンカーボルト強度となるよう強度のバランスが重要となる。

また、ダンパーがあることによって、衝突初期のブラケットへの

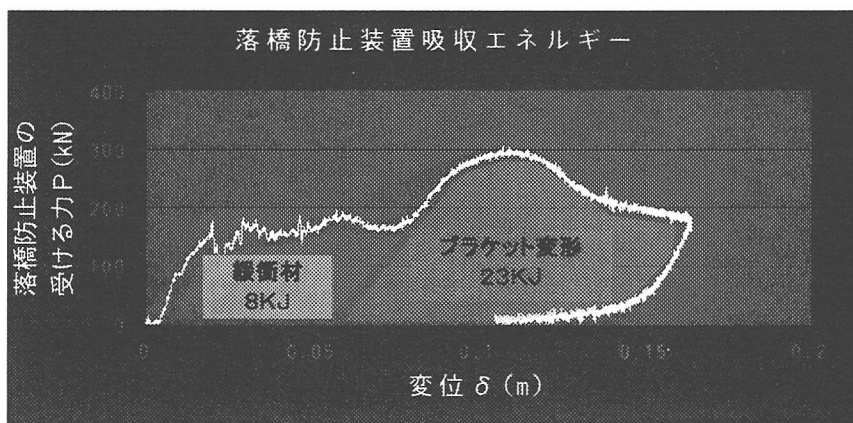


図-12 吸収エネルギー (Case3)



図-11 衝突状況 (Case3)

衝撃力の低下が見込める。これについても、ダンパー強度<ブラケット強度となる強度バランスが必要となる。

(3) ブラケットリブ高さ・幅の影響

ブラケットの板厚の影響を確認するために、板厚 8mm、6mm、12mm の3ケース (Case3、Case4、Case5) で試験を行い、以下の結果を得た。これら3ケースは静的強度をほぼ等しくなるように設計した。

・ブラケット変形量

ブラケットの変形量は 12mm のケースに対して 8mm のケースでは 1 割大きく、6mm のケースでは 3 割大きかった。これは、同じエネルギーを吸収するために、ブラケット抵抗力の低下が大きくなる板厚が薄いケースほど変形量が大きくなったといえる。

・最大荷重

板厚 6mm と 8mm のケースのブラケット最大荷重はほぼ同じであったが、12mm のケースでは、座屈しにくいいためか、1 割程度高く、板が厚いほど最大荷重が高くなる傾向が見られた。

4-4-3 試験のまとめ

どの供試体についても、想定以上の高い強度及びエネルギー吸収性能を有しており、安全に地震時の桁の移動を止めることが可能であることを実証した。また、各部材での吸収エネルギーを把握することができ、緩衝材の有効性も確認できた。緩衝材で吸収しきれないエネルギーはブラケットが変形し、システム全体で効率良くエネルギー吸収した様子が観察された。

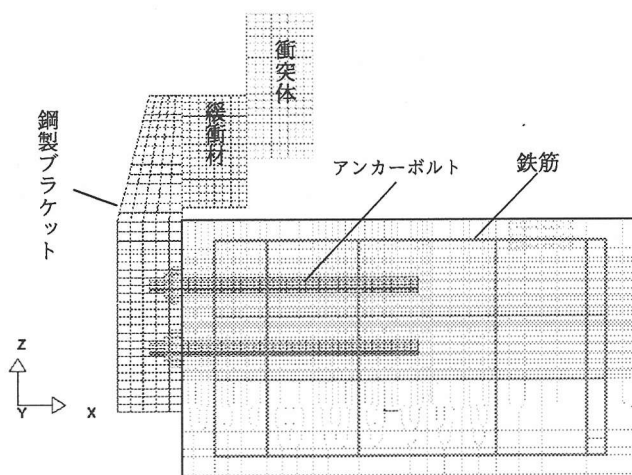


図-13 衝突実験解析モデル

4-5 FEM 衝撃応答解析

非線形動的構造解析ソフト「LS-DYNA」を用いて、ケース No.7 について衝撃応答解析を行った。アンカーボルトとコンクリート境界面の抵抗値については、3-5 解析で得られた結果を用いた。解析モデルを図-13 に示す。対称性を考慮して 1/2 モデルとしている。

解析および実験の最終破壊形態を図-14 に示す。リブの座屈程度、ブラケットの変形程度については実験結果とほぼ同じとなり、この衝撃応答解析で、ある程度は衝突状況を追

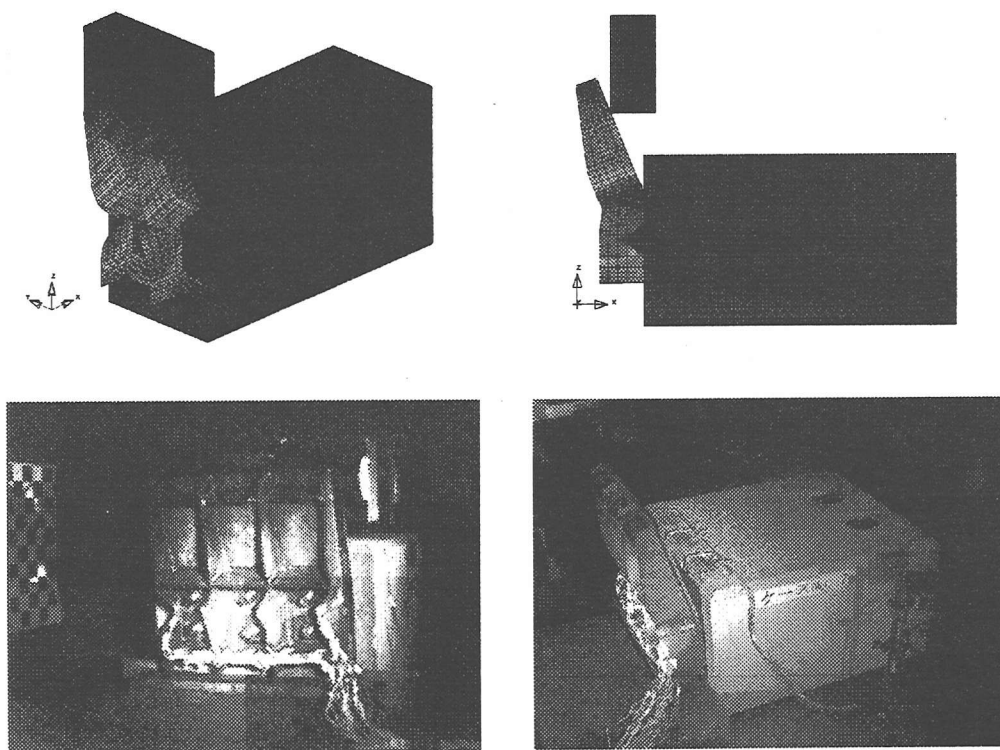


図-14 解析及び実験の最終破壊形態の比較 (Case7)

うことが可能であると言える。

しかし、実験結果より衝撃力で5～10%低く、エネルギー吸収量で30%ほど低い解析結果を得ており、解析ケース数を増やして実験結果と比較を行い、これらの問題を解決する必要がある。

5. 設計法の方針について

本検討により、今後は現在の静的設計に加え、実現象に近いエネルギーによる設計法の導入を行うことを検討している。

エネルギーによる設計は、下記の式を満たすよう、落橋防止装置の設置個数を決めることによる。

上部構造の衝突エネルギー（想定） < 落橋防止システム吸収エネルギーの合計

なお、今回の実験での落橋防止装置の吸収エネルギー量は把握できたが、1個あたりのエネルギー吸収規模を大きくする場合には、数パターンのサイズを変化させた装置に対して解析を行って、それらの安全性を検討し、サイズごとのおよそのエネルギー吸収量を把握しておく必要がある。また、上部構造の衝突エネルギーは、衝突時には伸縮装置や支承の破壊によるエネルギー吸収が起こるため、想定は非常に困難であるが、本装置にはフェールセーフ機能が要求されるため、安全側として想定地震に対する上部構造の最大応答速度を設定することを検討している。

実験により得られた、部材設計についての確認事項を以下に示す。

(1) ブラケットとアンカーボルトの強度バランス

実験で観察されたように、緩衝材、ブラケットの変形によってエネルギー吸収をさせる場合には、

緩衝材強度 < ブラケット強度 < アンカーボルト強度

という緩衝材、ブラケット、アンカーボルトの強度のバランスが重要であることが確認できた。

(2) ブラケット板厚

鋼製ブラケットは板厚の差により、静的強度が同じであっても動的強度が異なり、座屈後の変形量が異なる。衝突時の過度な変形が望ましくない場合もあるため、適当な変形量となる板厚を選定する必要がある。

(3) 緩衝材

緩衝材によるエネルギー吸収効果および初期の衝撃力の吸収効果を確認でき、落橋防止システムでの効率のよいエネルギー吸収を行うために、ブラケットおよびアンカーボルトとのバランスを考慮した上で設置する必要がある。

6. おわりに

道路橋示方書の静的設計より実現象に即している考えられる衝突エネルギーに着目した設計法の確立を目指すため、エネルギーに着目した衝突実験を行い、実際の桁が落橋防止装置に衝突する最大速度と想定される2.0m/s に対する安全性を確認した。すなわち、実構造物への適用が可能であることが確認できたといえる。

また、FEM による衝撃応答解析では実験結果から遠くない結果が出ており、今回より大きなエネルギー吸収を想定した落橋防止装置の設計の際には FEM 衝撃応答解析を参考にして安全性を検証しうる。

なお、詳細な設計法については、現在検討中である。