

スリットを有する箱形断面部材の 衝撃エネルギー吸収特性に関する実験的研究

Experimental Study on Impact Energy Absorption Characteristics of Box Section Members with Delaminations

森山 卓郎*、依田 照彦**

Takuro MORIYAMA and Teruhiko YODA

*工修 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

**工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

In this paper, the energy absorption in laminated thin-walled box section members with artificially introduced delaminations has been studied experimentally. Generally, by introducing artificial delaminations, buckling load of laminated structures decreases and then large axial deformation is likely to occur. This deformation characteristics are favorable from the view point of impact energy absorption. Test specimens of thin-walled box section members were made from laminated plates with various delaminations, and both impact and static tests were carried out. By comparing with experimental results, desirable dispositions and lengths of delaminations aiming at excellent energy-absorbing ability were experimentally examined.

Key Words : Impact test, Energy absorption, Delamination, Box section members

1. はじめに

剛性や強度の高い構造部材は、大きな荷重を小さな変形で受け持つため、構造物の静的強度を向上させるには適しているものの、その小さな変形のために、衝撃荷重を受ける場合には、衝撃力を緩和するのが必ずしも容易ではない。それゆえ、このような剛性の高い構造部材について、衝撃力を緩和するメカニズムがいろいろと検討されている。例えば、自動車車両の衝突安全性の向上を目的として、部材に潰れビード(切り欠き)を入れ、衝撃力を緩和することはその一例である¹⁾。そこでは、潰れビードを適切に配置し、圧潰モードを操作することによって、エネルギー吸収効率を向上させている。

このように、従来の研究には、どちらかといえば自動車の車体のように衝突安全性を高めることを目的としたものが多い。土木構造物を対象とした構造部材に対しても、衝撃力を緩和することが必要になる場合がある。例えば、橋脚に船舶が衝突する場合の、船舶の安全性の確保や橋脚の崩壊防止などがそれにあたる。また、大地震の際に、部材同士が衝突し、破壊することを防ぐため、衝撃エネルギーを吸収する部位を設け、衝撃力を緩和することも必要と思われる。しかしながら、これらのことを目的とした研究は土木工学分野では比較的少ない^{2)~6)}。

本研究では、人為的にスリットを入れた積層板より構成される箱形断面部材の衝撃エネルギー吸収特性について検討を加える。一般に、スリットを施すことにより座屈荷重は低下し、座屈に伴い軸方向の変形は大きくなる(図-1)。このことは、座屈後の剛性低下が衝撃力緩和の観点から見れば好ましいことを意味している。そこで、スリットの個数および配置を変化させた積層板よりなる

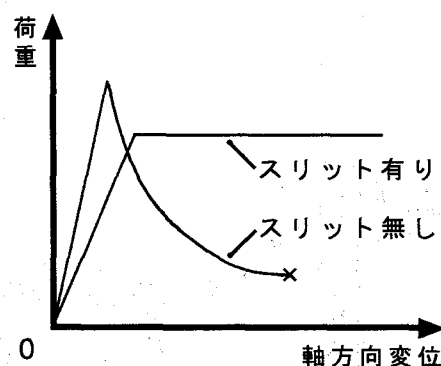


図-1 スリットの有無による座屈挙動の相違

箱形断面部材を作成し、スリットを施すことによって、このような箱形断面部材の衝撃エネルギー吸収能力が、どの程度向上するかを検討する。さらに、衝撃エネルギー吸収性能に優れたスリットの個数や配置を模索する。その際、静的載荷試験も併せて行い、衝撃試験の場合の変形モードと比較し、どのような変形モードをとることが衝撃エネルギー吸収能力の向上に寄与するか検討する。

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体として、100×300mm、板厚 0.3mm の純アルミニウム A1050 (ヤング率: $E=70.2\text{GPa}$ 、ポアソン比: $\nu=0.38$ 、降伏応力: $\sigma_y=116\text{MPa}$) の板を用いた。そして、図-2 に示すような種々のスリットを有する積層板を、2枚のア

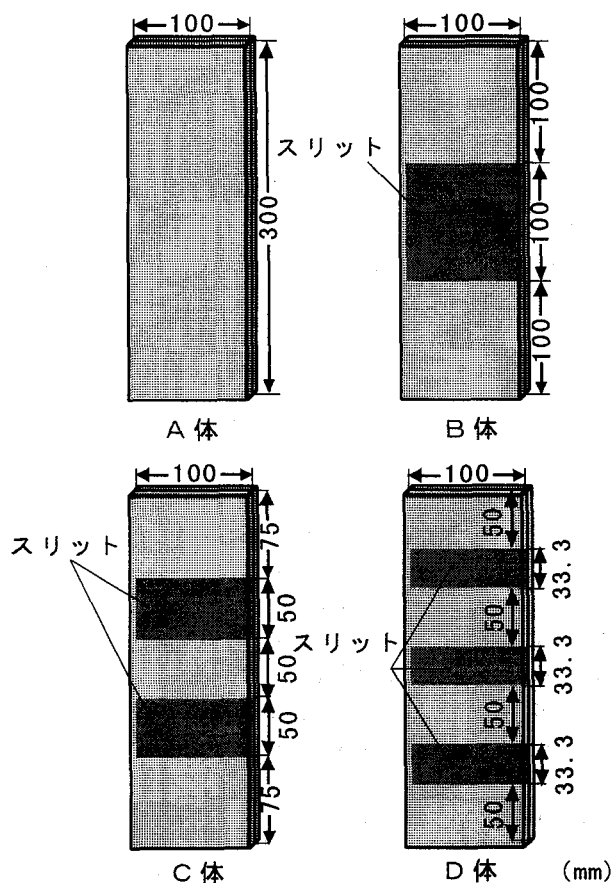


図-2 供試体形状および寸法

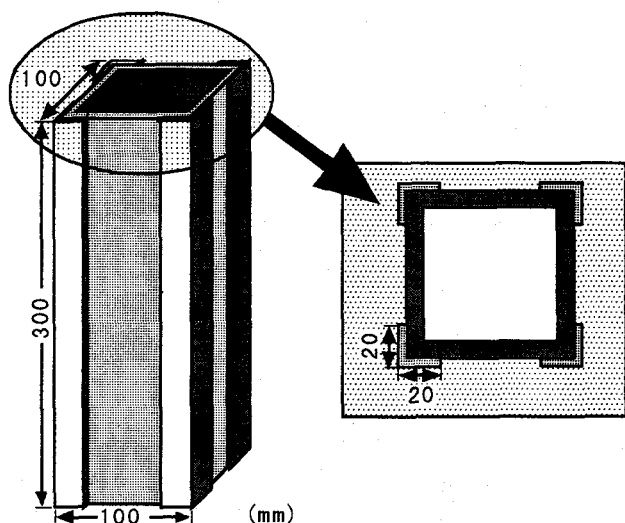


図-3 供試体補強部状況

ルミニウム板を用いて接着剤(アララダイド)で貼り合わせ、24時間支圧して作成した。スリットは接着剤を塗布しないことにより作成した。また、比較のため、スリットを作らない、全面に接着剤を塗布した積層板も準備した。なお、スリットを有する供試体については、スリットの全長を等しくし、スリットの個数、配置を変化させ

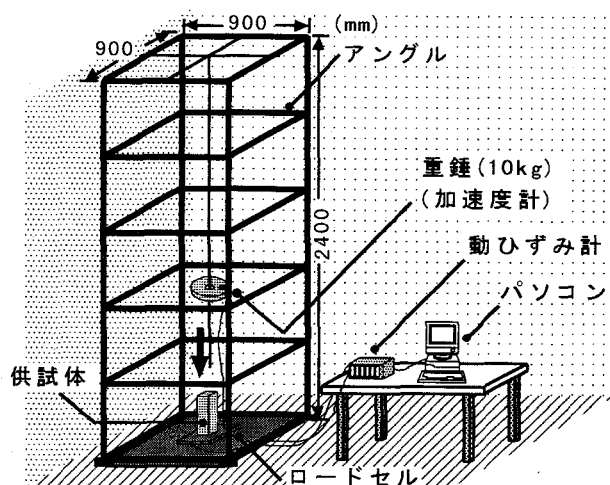


図-4 実験方法概略図

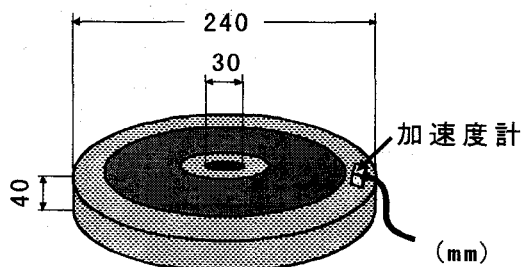


図-5 重錘形状および寸法

た。そして、これらの積層板を4枚用い、箱形断面部材を作成した。その際、部材の4隅を、40×300mm、板厚0.3mmのアルミニウム板を直角に折り曲げて接着することにより、補強した(図-3)。

2.2 実験方法

(1) 衝撃試験

スリットを施さない供試体とスリットを施した供試体3種類の合計4種類を、それぞれ2体ずつ衝撃試験に供した。実験では、図-4に示すようにアングル部材を組み立て、供試体の上端より0.5mの高さから図-5に示す形状の重錘(10kg)を自由落下させた。このとき、重錘に加速度計(測定範囲:最大200G)を取り付け、衝撃時の重錘の応答加速度の変化を測定した。また、供試体下部に厚さ10mmの鉄板を敷き、その裏にロードセル(測定容量:1tf)を3個取り付け、衝撃時の供試体に伝達される力の変化を測定した(図-6)。なお、加速度計およびロードセルのサンプリング間隔は200μsecとし、計測時間は1.5secとした。データは、動ひずみ計からADボードによりAD変換し、パーソナルコンピュータに記録させた。

(2) 静的試験

供試体として、衝撃試験の場合と同様に、スリットを施さない供試体とスリットを施した供試体の2種類を用いた。これらを、図-7に示すように、アムスラー型圧縮試験機を用い、静的圧縮試験に供した。このとき、試験

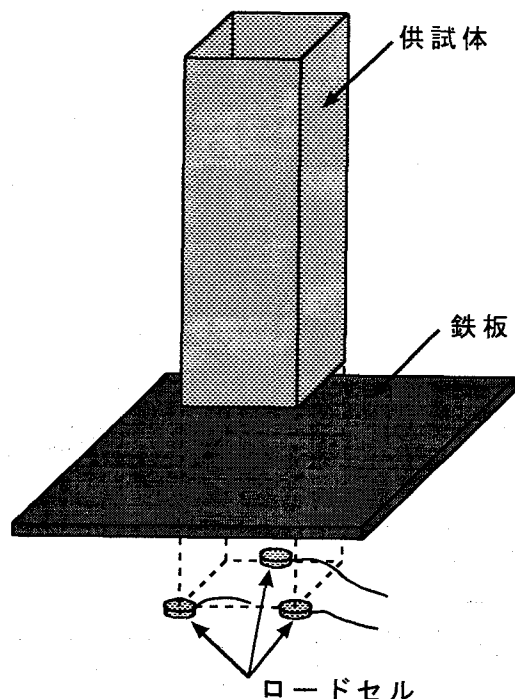


図-6 ロードセル設置状況

機に取り付けたダイヤルゲージにより各荷重レベルにおける鉛直方向変位を測定した。これらのデータは、UCAMデータロガーを用い、採取した。

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃試験結果

(1) 応答加速度の結果

衝撃実験による応答加速度などのデータは、種々の要因によりノイズが多く含まれるため、真の信号を得るために適切な処理を施すことが必要となる。このため、計測データのノイズの除去方法として、FFTローパスフィルターなどのフィルター処理方法について様々な検討がなされている^{7)~11)}。本実験では、得られた計測データを、簡便な手法である移動平均法を用いてフィルター処理することによりノイズの除去を行った。図-8に、A体-1における加速度計から得られた応答加速度の生データ、および移動平均法を用いて平滑化したデータを示す。さらに、図-9に、全供試体の応答加速度の結果を示す。このとき、移動平均法の時間幅を $15\Delta t$ ($\Delta t=0.0002\text{sec}$)とした¹²⁾。これらの図より、スリットを入れないA体と比較して、B、C、D体では応答加速度の最大値が小さくなっており、スリットを導入したことにより、最大衝撃力が緩和されていることがわかる。

(2) 速度および変位の結果

次に、重錘の応答速度や応答変位の履歴を調べるために、加速度計から得られた応答加速度の計測データを、台形公式により数値積分した^{13), 14)}。なお、このとき、積分による残留変位は見られなかったため、基線の補正等

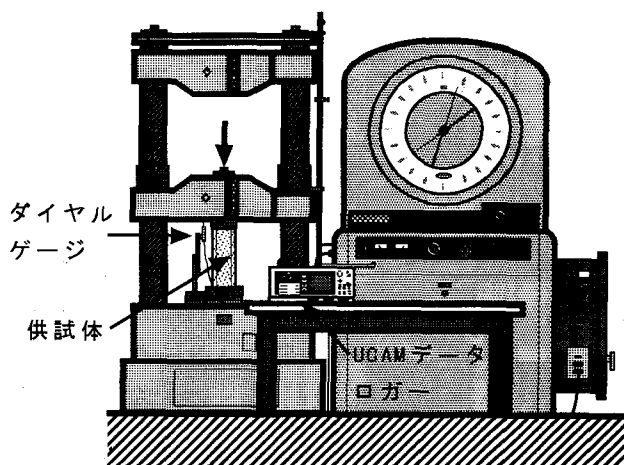


図-7 静的試験方法概略図

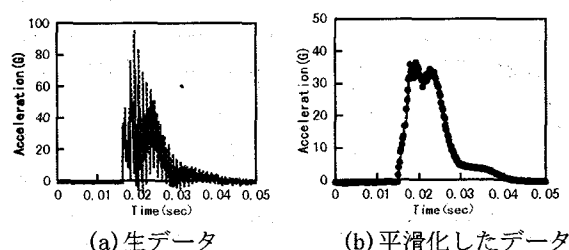


図-8 A体-1の応答加速度と時間の関係

は行っていない。図-10に、各供試体について得られた応答速度の変化を示す。ただし、このとき、重錘が供試体に衝突する直前の速度を、エネルギー保存則より導かれる $\sqrt{2gh}$ から、 3.13m/sec (重錘の落下高さ: $h=0.5\text{m}$) として補正した。これらの図より、応答加速度については、生データのままで供試体の有意差を判断するのは難しい面も見られたが、移動平均法を用いてフィルター処理をしなくても、数値積分して得られる速度や変位では計測データのノイズが除去され、明瞭な違いの見られる曲線が得られることがわかった。その結果、スリットを入れないA体と比較して、B、C、D体では、応答速度の低下が緩やかであり、特に、D体ではその傾向は顕著になっていることが確認できる。また、A体では衝突後、速度が低下し、他の供試体と比較して、早い時刻に負から正に変化していることがわかる。これは、A体はスリットを有しておらず、最も剛な構造であるために、衝突した後、重錘が跳ね返り易いからであると考えられる。B体とC体でも、速度は正の値を取っているが、その大きさはA体と比較して小さく、スリットにより衝撃が緩和されていると考えられる。また、D体-1では、衝突後速度は正の値を取らず、0.05秒経過しても最大値は0であることがわかる。これは、D体のスリットの配置の効果により、十分に衝撃が緩和され、重錘がほぼ静止したためと思われる。D体-2では、衝突後、約0.025秒において速度の値は正に転じているが、この時刻は他の供試体と比較してやや遅く、D体-1と同様に、スリットの配置の効果のために衝撃が緩和されていると考えられ

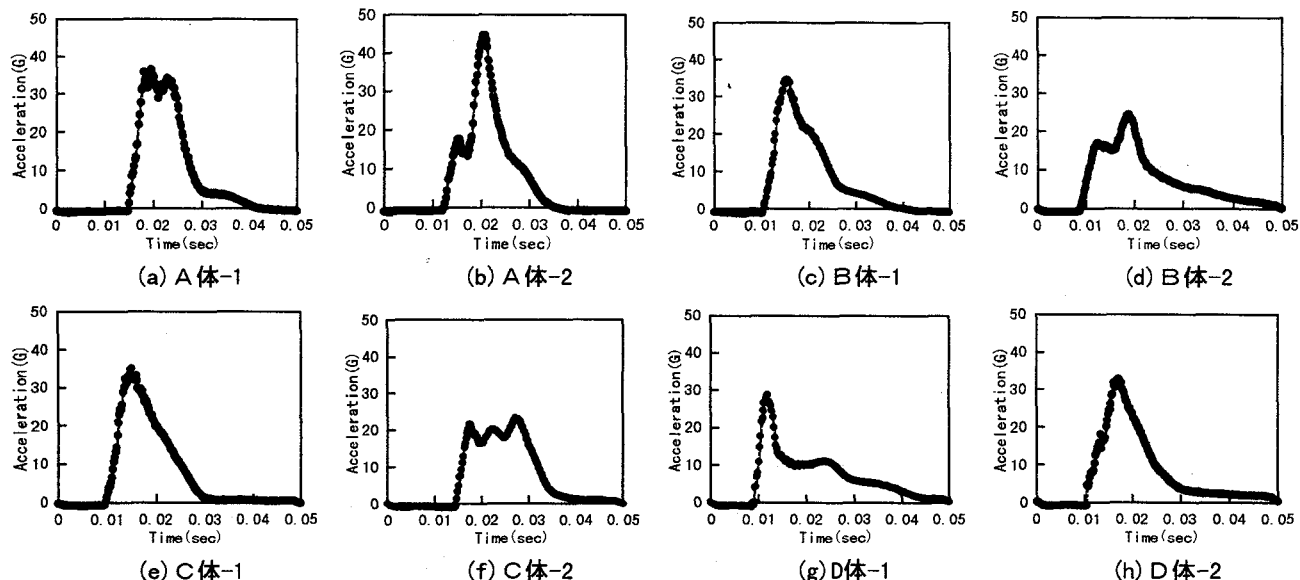


図-9 応答加速度と時間の関係

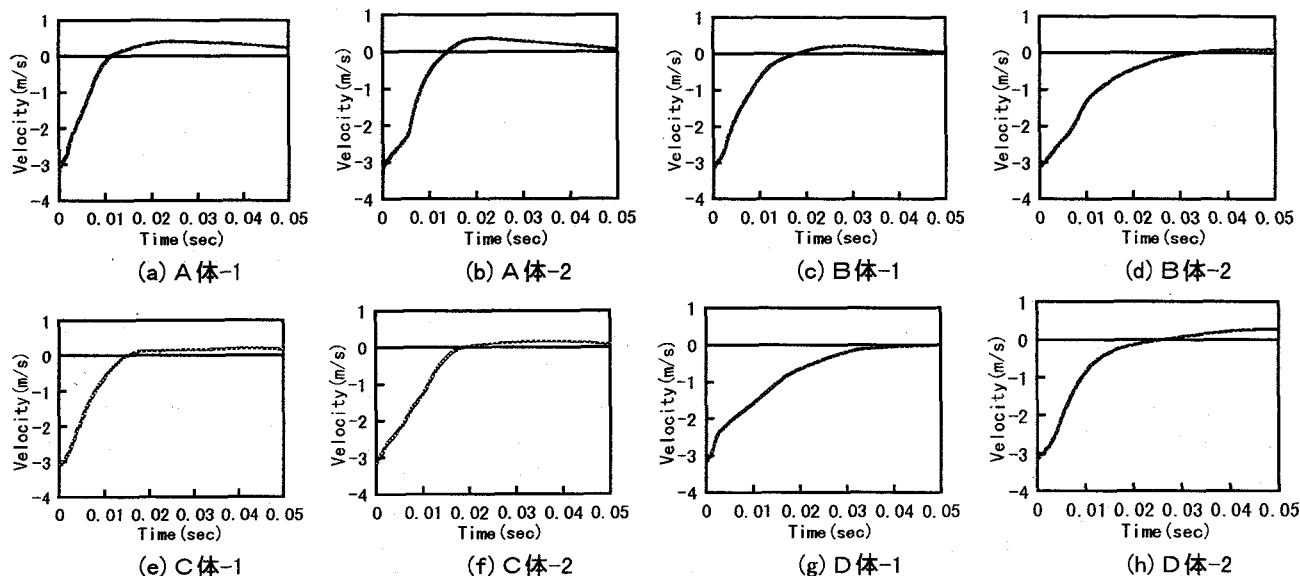


図-10 応答速度と時間の関係

る。

さらに、応答速度の結果を数値積分することによって得られる重錘の応答変位の履歴を図-11に示す。このとき、重錘が供試体に衝突する直前の変位を0と仮定して補正した。図-11より、スリットを入れないA体と比較して、B、C、D体では、衝撃による応答変位が大きくなることわかる。A体では、衝突後、約0.01秒において応答変位は最小値を取り、その後上昇していることがわかる。このことから、A体はスリットを有しておらず、最も剛な構造であるために、重錘が跳ね返り、それ程衝撃を緩和していないことがわかる。B体とC体でも、応答変位は最小値を取った後、上昇していることが認められるが、その度合いは小さく、A体と比較して衝撃力を緩和しており、スリットを施した効果が見られることがわかる。また、D体-1では衝突後、他の供試体のように応答変位は下に凸な曲線とならず、衝突後約0.03秒においてほぼ一定値を取っていることがわかる。その大き

さも、他の供試体の応答変位の最小値の大きさよりも大きく、それだけ十分に圧潰していることがわかる。このことから、D体では、そのスリットの配置の効果のために、十分に衝撃力が緩和されていると考えられる。

以上のことから、本実験においては、スリットを施したB、C、D体では、スリットを施していないA体と比較して、衝突後の速度の低下は緩やかであり、かつ変位の最小値の大きさは大きくなっていることから、スリットを施したことによる衝撃吸収効果は見られる。しかしながら、B、C、D体相互間では顕著な有意差はあまり見られなかった。

(3) 伝達力の結果

図-12に、A体-1とD体-1についての、ロードセルによって測定した伝達力の結果を示す。このとき、加速度計のデータと同様に、時間幅を $15\Delta t$ ($\Delta t=0.0002\text{sec}$)とした移動平均法により平滑化した。この図から、若干で

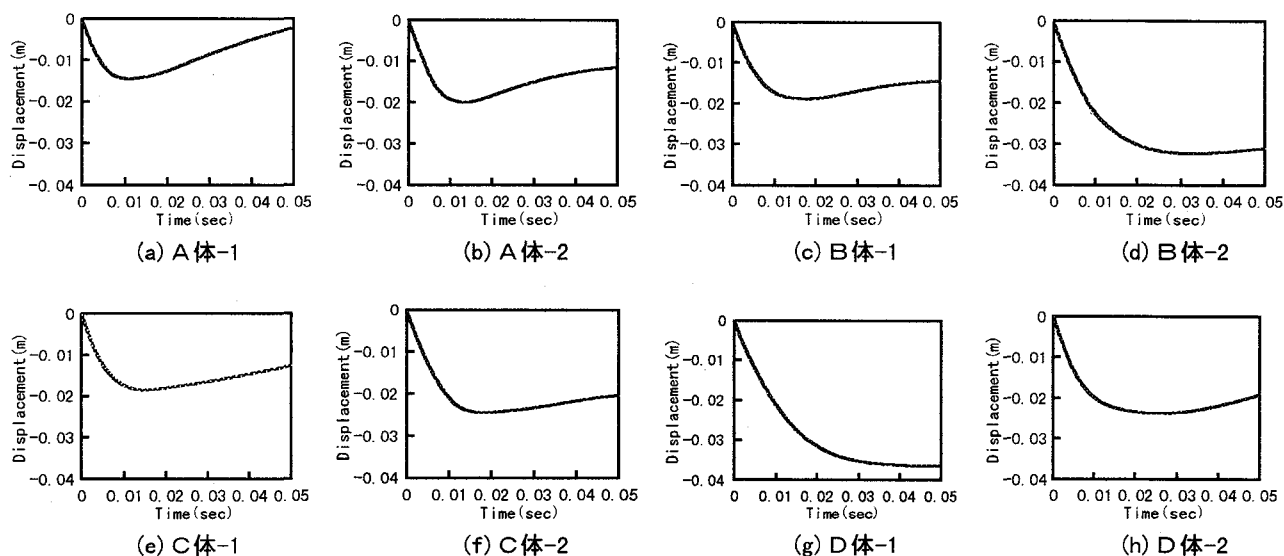


図-11 応答変位と時間の関係

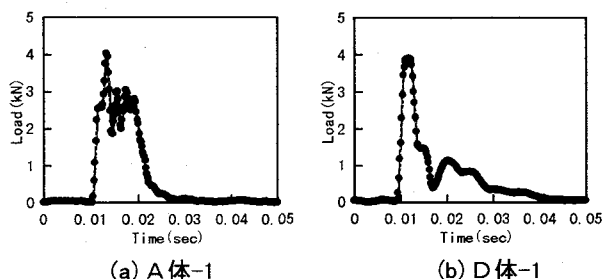


図-12 伝達荷重と時間の関係

はあるが、D体-1ではA体-1よりも伝達力の最大値は小さいことがわかる。また、A体-1では衝突後、力が0になる時刻が早く、重錘が跳ね返っていると考えられる。一方、D体-1では衝突後の荷重の下がり方も緩やかであり、あまり重錘が跳ね返らず、衝撃エネルギーを吸収していることがわかる。

3.2 衝撃試験結果と静的試験結果の比較

(1) 荷重と変位の関係

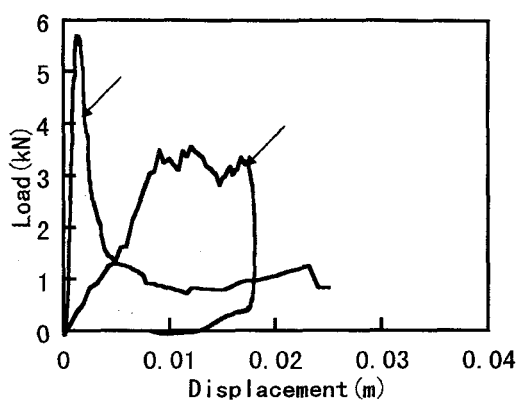
図-13に、A体とD体の衝撃試験および静的試験における荷重と応答変位の関係を示す。このとき、衝撃試験の結果において、荷重については移動平均法を用いてフィルター処理した加速度の値に重錘の重量10kgを乗じた衝撃力であり^{15)~18)}、また、応答変位についてはその加速度の値を2回積分したものをを用いた。一方、静的試験の結果については、荷重、変位いずれも測定結果の生データを用いた。この図から、A体とD体のいずれの場合も静的試験と衝撃試験においては、明らかに荷重と変位の履歴が異なり、荷重の大きさのピークにずれが生じていることがわかる。静的試験においては、小さな変形で荷重が最大値を取った後、ある程度の大きさまで荷重が下がり、その後荷重がほぼ一定のまま変位が増大する傾向を示すことがわかる。これは、荷重のピーク点で座屈が発生し、剛性が急激に低下したためであり、A体とD体の最高荷重を比較すると、スリットのあるD体の方

が座屈強度が小さいことが確認できる。ただし、その差は小さく、10%程度の差しか見られない。これに対し、衝撃試験においては、静的試験の場合よりは大きな変位のときに最大値を取り、その最大値は静的試験の場合の最大値よりは小さいことがわかる。さらに、衝撃試験の場合では、静的試験の場合より剛性が大きく低下していることがわかる。通常の衝撃実験では、最高荷重は静的試験よりも衝撃試験の方が大きくなるが、本実験では衝撃試験の結果の方が小さくなった。これは、重錘を自由落下させたために衝撃力に偏心が生じ、静的試験のように力が断面に平均して作用しなかったことが原因と考えられる。偏心して衝撃力が作用していることを示す例として、A体-2に注目すると、最初荷重が小さいピークを経過した後、大きなピークに至っているが、これは重錘の下端面が水平のまま落下せず、多少の傾きを持ったまま落下したために2回衝突したものと考えられる。図-13のみから定量的な議論をするのは難しいが、もし理想的に重錘が供試体に衝突したならば、D体-1のような荷重-変位曲線を描き、A体と比較してD体の方が衝撃後の変形が大きくなり、衝撃エネルギー吸収が大きくなるということが容易に想像できる。

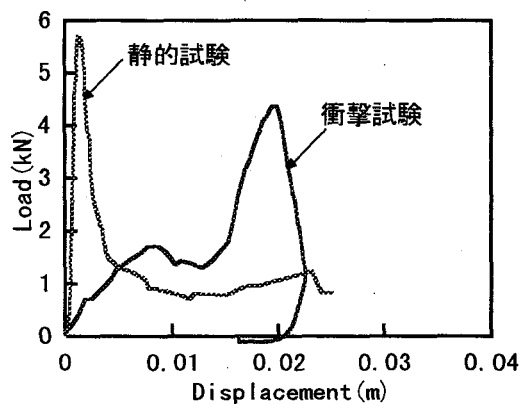
以上のことを総合すると、スリットを有する供試体の座屈荷重はスリットの無い供試体に比べて小さく、荷重がピークを超えた後の剛性が小さいために衝撃エネルギーの吸収効率がよく、スリットを施したことにより、部材の衝撃エネルギー吸収能力が向上したことがわかる。

(2) 吸収エネルギーの比較

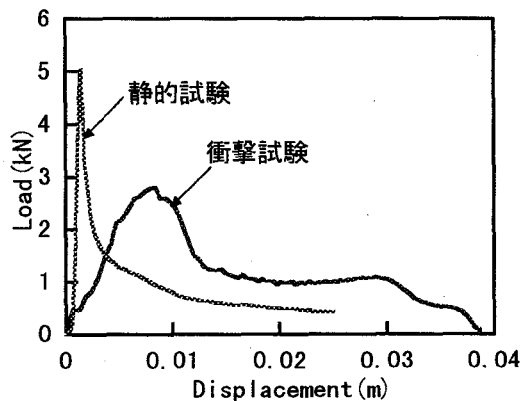
図-14に、衝撃試験および静的試験における供試体の吸収エネルギーと応答変位の関係を示す。吸収エネルギーについては、図-13の荷重と変位の関係を数値積分することにより求めた¹⁹⁾。その結果、衝撃試験と静的試験においては、吸収エネルギーと変位の履歴は明らかに異なることがわかる。静的試験の場合の吸収エネルギーは、変位が小さいときは急増していくが、変位がある程



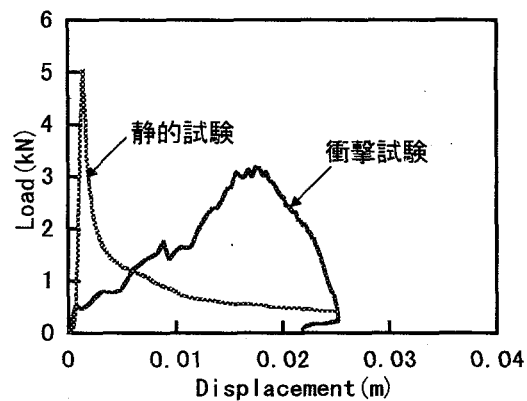
(a) A体-1



(b) A体-2

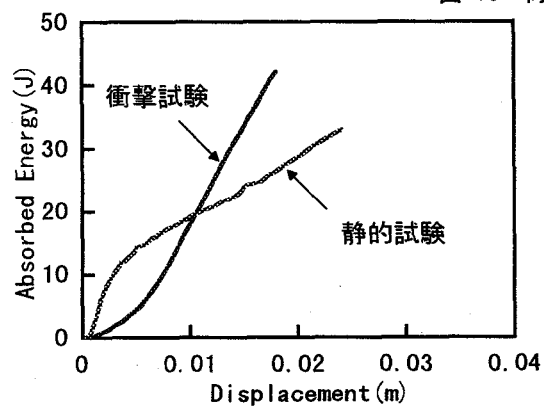


(c) D体-1

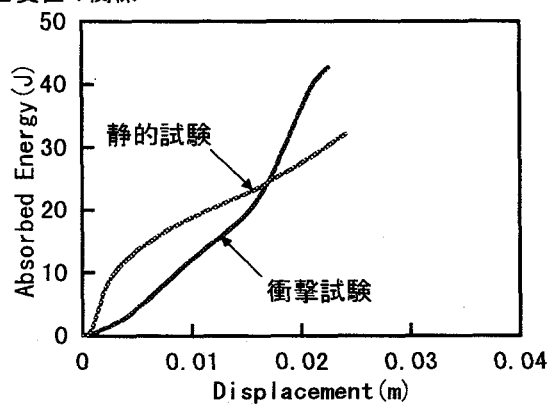


(d) D体-2

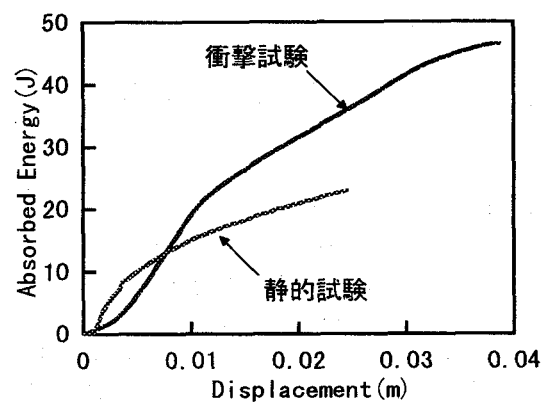
図-13 荷重と変位の関係



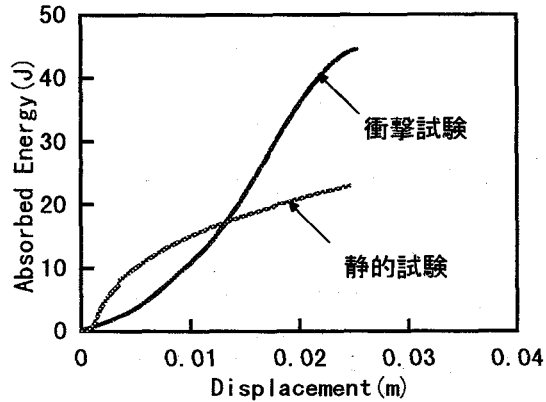
(a) A体-1



(b) A体-2



(c) D体-1



(d) D体-2

図-14 吸収エネルギーと変位の関係

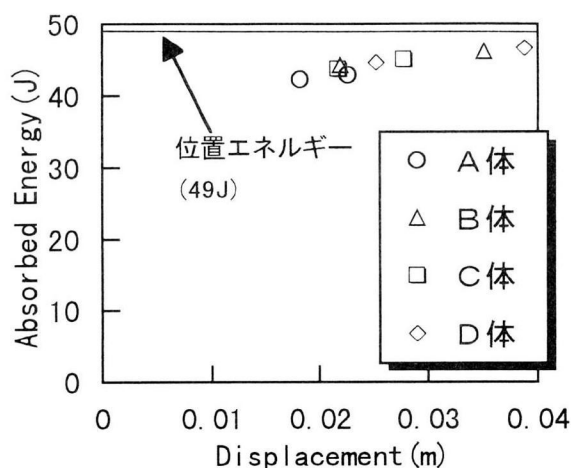


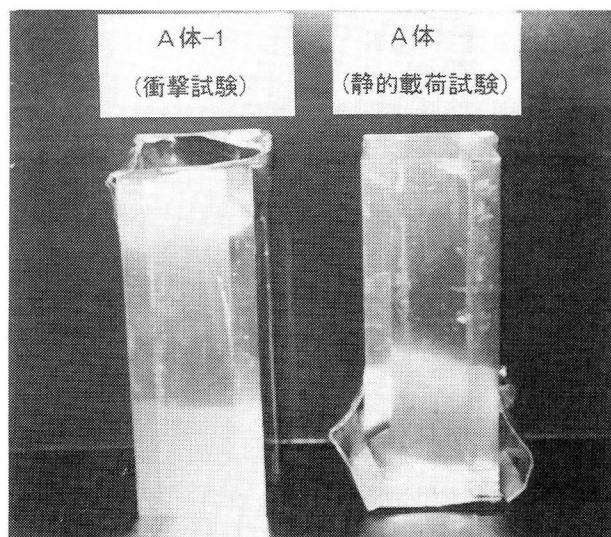
図-15 各供試体の吸収エネルギーと最大変位の関係

度大きくなると吸収エネルギーの増加は緩やかになる。これに対し、衝撃試験の場合の吸収エネルギーは変位が小さいときは緩やかに増加し、ある程度の大きさの変位から吸収エネルギーの増加する割合が大きくなる。それゆえ、ある点を境に静的試験と衝撃試験の吸収エネルギーの大小関係が逆転することになる。このことは、図-13の荷重と変位の関係において、静的試験では、変位が小さいときに荷重が大きいため、吸収エネルギーも大きくなるのが原因である。その後、変位が大きくなるにつれて、荷重が激減していくため、吸収エネルギーの増加量は小さくなる。一方、衝撃試験においては、衝突時の重錘との接触面積が小さいため、変位が小さい間は衝撃力が小さく、吸収エネルギーの増加量も小さいが、変位がある程度大きくなって重錘との接触面積が増加するにつれて衝撃力も増加するため、吸収エネルギーの増加量が大きくなっていくものと思われる。したがって、衝撃試験における最大変位の時点の吸収エネルギーを比べると、静的試験の場合よりも、衝撃試験の場合の方が吸収エネルギーが大きくなることがわかる。

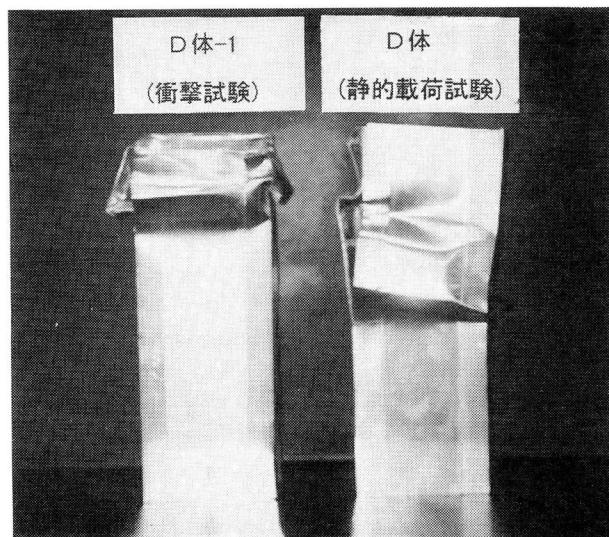
また、図-14において、衝撃試験結果によって得られた各供試体の吸収エネルギーと変位の最大値をプロットすると図-15のようになる。この図から、プロットは右上がりになっており、当然ながら、変位の最大値が大きくなるほど、吸収エネルギーが大きくなっていくことがわかる。A体と比較して、B、C、D体では、吸収エネルギーおよび変位の最大値がともに大きくなることがわかる。もともと、重錘は位置エネルギーを49J(重錘の質量: $m=10\text{kgf}$ 、落下高さ: $h=0.5\text{m}$)有していたことを考慮すれば、いずれも、十分に位置エネルギーを吸収できていることがわかる。本実験では、スリットの配置を変化させたB、C、D体相互間で特に有意差は見られない。しかしながら、スリットを施したことにより、エネルギー吸収効果が向上していくことがわかる。

(3) 変形モードの比較

写真-1に、A体とD体の衝撃試験および静的試験後の供試体の写真を示す。この写真から、静的試験において



(a) A体



(b) D体

写真-1 衝撃試験と静的試験の場合の変形モードの比較

は、スリットの無いA体では供試体の下部から圧潰していくが、D体では供試体上部のスリットの部分を起点として圧潰することがわかる。一方、衝撃試験においては、スリットの有無に関わらず、供試体上部より圧潰していることがわかる。A体-1では、供試体上部が部分的に圧潰しているが、D体-1ではスリット部分を起点とした座屈が生じていることが認められた。また、このとき、接着層とスリット部のどちらが先に破壊したかは確認していない。他の供試体においても、衝撃試験の場合、スリット部分を起点とした座屈が見られることから、人為的に座屈を促進するようなスリットを導入することにより、衝撃エネルギー吸収能力を向上させることができると思われる。

4. あとがき

本実験では、スリットを有する供試体について衝撃実験と静的載荷試験を行い、スリットを施さない供試体の場合と比較することにより、衝撃エネルギー吸収能力に優れた積層構造を実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 衝撃エネルギー吸収能力を向上させるためには、座屈を意図的に促進させる構造を採用するのがよく、その一つ的手段としてスリットの効果は大きい。すなわち、スリットは衝撃力作用時の変形モードを制御するために利用できる。
- 2) 衝撃に伴う加速度の変化を観察するだけでもスリットの有無による衝撃エネルギー吸収能力の差は明らかになるが、加速度を積分した量である応答速度と応答変位を利用して相互に比較すると、その差はさらに明確になる。さらに、加速度の計測データのノイズを除去せずに、単純に数値積分のみで求められる点からも、応答速度・応答変位は比較・対照に便利である。
- 3) 本実験のように、剛性の大きな軸方向に重錘を衝突させる問題では、比較的良好に衝撃力が上部から下部まで伝達する。しかしながら、荷重の偏心や部材の不整による応答値の変化のバラツキは、はりの曲げ衝撃試験などに比べると大きくなるので注意が必要である。

参考文献

- 1) 萩原、津田、佐藤：有限要素法による薄肉箱型断面真直部材の衝撃圧潰解析、日本機械学会論文集(A編)、55巻、514号、pp. 1407-1415、1989
- 2) Yoda, T., Aoki, T. and Ando, K. : Crashworthiness design of laminated plate structures with multiple delaminations、1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures、pp. 569-575、1992
- 3) 桑原、依田、一瀬：衝撃荷重を受ける積層板の衝撃緩衝効果に関する実験的研究、土木学会第48回年次学術講演会概要集第1部、pp. 1450-1451、1993
- 4) 依田、桑原、一瀬：衝撃荷重を受ける複合材料積層板の衝撃力緩和機構に関する実験的研究、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp. 167-171、1993
- 5) 桑原、依田、住田：箱形断面部材の衝撃エネルギー吸収能に関する実験的研究、土木学会第50回年次学術講演会概要集第1部(B)、pp. 1104-1105、1995
- 6) 森山、角田、依田：変形モード制御方式による箱形断面部材の衝撃エネルギー吸収特性、土木学会第51回年次学術講演会概要集、pp. 258-259、1996
- 7) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、構造工学シリーズ6、1994
- 8) 小暮、佐々木、大野：衝撃実験における計測データのフィルター処理、土木学会第49回年次学術講演会概要集第1部(B)、pp. 1586-1587、1994
- 9) 井元、大野、佐々木、小暮：重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形性、構造工学論文集、Vol. 41A、pp. 1201-1212、1995
- 10) 酒巻、小暮、藤掛、大野：衝撃実験計測データのノイズ除去に関する一考察、土木学会第50回年次学術講演会概要集第1部(B)、pp. 1066-1067、1995
- 11) 酒巻、喜多、木暮、藤掛、大野：衝撃実験計測データのフィルター処理方法に関する考察、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp. 151-155、1996
- 12) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1983
- 13) 前川、塩見、吉田：鋼管・コンクリート複合はりの耐衝撃性に関する実験的研究、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp. 285-288、1996
- 14) 松葉、音田、佐藤、後藤、岡畑、井上：衝撃実験における測定方法についての一考察、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、1-6、1993
- 15) 岸、中野、今野、松岡：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集、Vol. 38A、pp. 1577-1585、1992
- 16) 岸、中野、松岡、西：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol. 39A、pp. 1587-1597、1993
- 17) 佐藤、岸、西、松岡：三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす芯材 RC スラブの継手部の影響、構造工学論文集、Vol. 41A、pp. 1249-1256、1995
- 18) 岸、佐藤、中野：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型屋外実験、構造工学論文集、Vol. 41A、pp. 1257-1265、1995
- 19) 宇治橋、十河、松本、足立：薄肉弾面部材の衝撃圧潰によるエネルギー吸収能、材料、第42巻、第483号、pp. 1427-1431、1993

(1996年9月6日受付)