

(14) 局部めり込みを考慮した鋼管はりの衝撃吸収エネルギーに関する一考察

防衛大学校土木工学科
同 上

○ 星川 辰雄
石川 信隆

1. 緒言

近年、土石流あるいは流木対策ダムとして鋼製砂防構造物が数多く建設されている。このうちB型スリットダムおよび格子型ダムにおいては中空鋼管が用いられており、これらの構造物に土石流中の巨礫が衝突する場合は、その運動エネルギーを鋼管の局部変形と全体変形の両方による吸収エネルギーで受けとめることになる。そのため著者ら^{1), 2)}は中空鋼管単純ばりを対象に、局部と全体の吸収エネルギーの分担割合や終局限界について検討を行ってきた。

本研究は、さらに実際に用いられる鋼管部材の両端が剛結であることに着目して、鋼管固定はりに対する衝撃吸収エネルギーに関する検討を行った。すなわち、まず鋼管固定はりに対する高速載荷実験および落錘式衝突実験を行い、その終局限界について検討した。次に、エネルギーの吸収メカニズム、すなわち、局部めり込み変形と全体のはり変形による吸収エネルギー分担率について実験的に検討を行った。

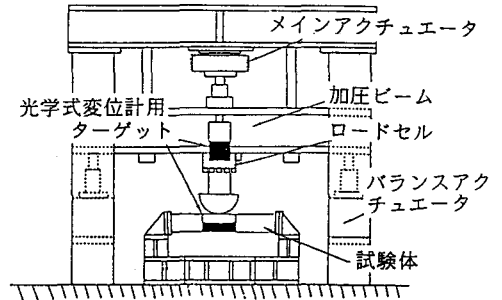


図-1 高速変形負荷装置

2. 実験の概要

2.1 高速載荷実験

実験は、図-1に示す高速変形負荷装置を用いた。この装置の目的は、鋼管固定はり部材の動的限界性能を測定するため、一定の高速変形速度で部材を一挙に破壊させ、その荷重～変位関係より面積を積分して限界吸収エネルギーを算出しようとするものである。本装置の載荷容量は、載荷荷重が50tf、載荷速度は0～4m/sである。測定項目は、載荷点荷重、載荷点変位および載荷部鋼管の等断面軸の変位で、荷重は載荷体下部に取り付けられたロードセルにより測定した。また載荷点変位および等断面軸変位は光学式変位計を用いて測定した。ここで、等断面軸とは、軸の上部と下部の鋼管断面積が等しくなる軸位置で、例えば局部めり込み後の断面においては図-2のようになる。

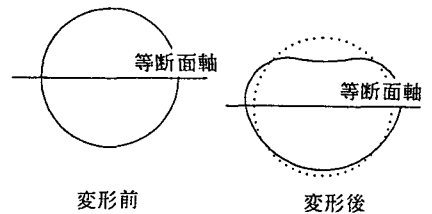


図-2 等断面軸

2.2 落錘式衝突実験

実験は、図-3に示すように重錘を試験体にガイドを通じて自由落下させて衝撃を与えるようにした。測定項目は載荷点荷重、載荷点変位および載荷部鋼管の等断面軸の変位で、載荷点荷重は重錘に取り付けられた加速度計の値に重錘重量を乗じて

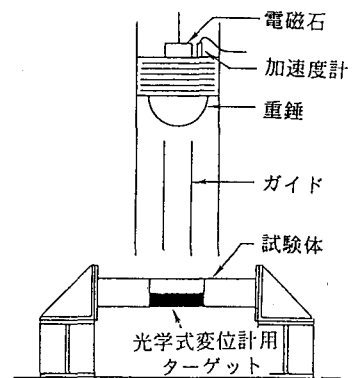


図-3 落錘式衝突実験装置

算定した。また載荷点変位は、加速度計の値を2回積分して算定し、等断面軸変位は光学式変位計により測定した。

2.3 試験体

試験体は、STK41の鋼管（鋼管径114.3mm、肉厚3.5mm、スパン長582mm）の両端に鋼板を溶接したものをを用いた。鋼板を固定台にボルト締めすることにより固定はりとした。鋼管の諸元は、表-1の通りである。

2.4 実験ケース

高速載荷実験においては、載荷速度が4m/sと1m/sの2ケースについて実験を行った。載荷体は落錘式衝突実験と条件を等しくするため、R=11cmの球体のものを用いた。

落錘式衝突実験においては、実際の構造物に巨礫が衝突する現象に対して相似則を考慮して実験を行った。すなわち、既往の研究³⁾において現象を支配する物理法則に着目して相似則を導いた。ここでは支配的物理法則を応力による力、重力、慣性力と仮定して実験の条件を定めた。すなわち、長さに関する相似比をsとすると、重さ、速度、時間に関する相似比はそれぞれ s^2 、 \sqrt{s} 、 \sqrt{s} となる。本実験においては $s=5.25$ として、実際の構造物への巨礫の衝突との関係をまとめると表-2のようになる。また、実験は重錘の条件を一定にし、試験体が破壊するまで繰り返し載荷した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重～変位関係

中空鋼管はりに載荷をした場合、図-4(a)および(b)に示すようにはり全体として変位するとともに局部めり込みが発生する。このはり変位と局部めり込みの和を全変位と定義する。すなわち、全変位は載荷点変位により表され、また、はり変位はN. Jonesらの研究⁴⁾と同様に等断面軸の変位により表されるものとする。よって、局部めり込みは載荷点変位と等断面軸の変位の差によって求められる。ここで、はり変位を等断面軸変位として選んだ理由は、次のとおりである。まず従来のはり変位をはりの下変位として採用した場合を図-4(a)に示すが、図より局部めり込みによって鋼管下面是偏平化し、実際のはり変位より δ_F だけ過少に評価することになる。これに対して、はり変位を等断面軸変位として採用した場合を図-4(b)に示すが、この場合は全変位（載荷点変位）が局部めり込み変位とはり変位（等断面軸変位）の和として表すことができる。

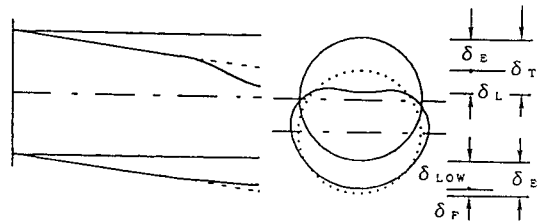
高速載荷実験から得られた荷重～全変位関係および荷重～局部めり込み関係をそれぞれ図-5および図-6に示す。あわせて静的実験結果についても付記する。図-5、6より、一般に載荷速度が増すにしたがって、

表-1 試験体の諸元

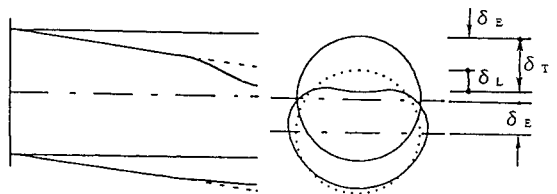
材 質	STK41
鋼管径 (mm)	$\phi 114.3$
肉厚 (mm)	t 3.5
降伏応力 (kgf/cm ²)	3800
引張強さ (kgf/cm ²)	4240
伸び (%)	30.0
断面積 (cm ²)	12.18

表-2 実現象とモデルの比較

	モデル	実 際
鋼管径 (cm)	11.43	60.0
肉厚 (cm)	0.35	1.84
スパン長 (cm)	58.2	306
巨礫直径 (cm)	22	116
巨礫重量 (kgf)	386	10640
衝突速度 (m/s)	4.4	10.0



(a) 下変位をはり変位とした場合



δ_T : 全変位 δ_L : 局部めり込み δ_E : 等断面軸変位
 δ_{LOW} : 下変位 δ_F : 偏平量

(b) 等断面軸変位をはり変位とした場合

図-4 はり変形の測定

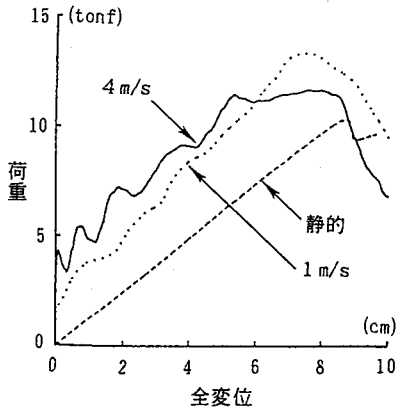


図-5 荷重～全変位関係
(高速载荷実験)

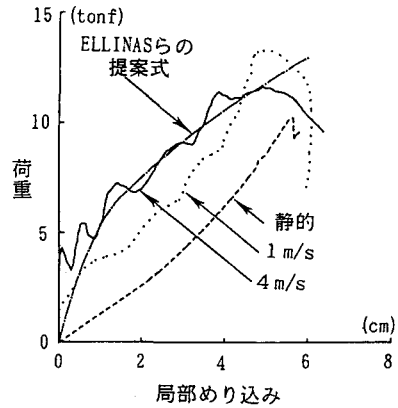


図-6 荷重～局部めり込み関係
(高速载荷実験)

ひずみ速度効果により荷重が大きくなることが認められる。しかし、4 m/sと1 m/sのケースについては最大荷重付近で荷重が逆転しているが、これは4 m/sの場合は固定端土台に若干の滑りが生じたためと考えられる。しかし、高速载荷の場合はいずれのケースについても静的载荷に比べて荷重低下時、すなわち破壊したときの変位は小さな値を示すことが認められる。

さて、Ellinasら⁵⁾は、荷重と局部めり込みの関係を次式で提案している。

$$P = \frac{1}{4} K \sigma_y t^2 \left(\frac{\delta_a}{D} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ただし、P：荷重、K：実験定数(150)、 σ_y ：鋼管の降伏応力、D、t：鋼管径および肉厚、 δ_a ：めり込み量。

図-6に式(1)を用いて計算した結果を示すが、定性的にはよく局部めり込みの状況を示している。また静的実験より大きめの値を示しているが、これは载荷体の形状が実験では球状であるのに対し、式(1)ではくさび型を対象としているためと考えられる。また著者ら²⁾の別に行った実験からも载荷体の形状によりめり込み量に差異が生じており、球状载荷体で载荷した場合の局部めり込みの形状について今後検討する必要があると考えられる。

図-7は、落錘式衝突実験によって得られた加速度～時間関係を示したものである。図-7より、応力波等の影響と考えられるが、かなりの高周波成分の存在が認められる。そこで、ここでは得られた加速度の値に対し200Hzのローパスフィルターをかけて、図-8のようにスムージングした加速度計の値に重錘重量を乗じて荷重とした。ここでローパスフィルターをかけることにより加速度のピーク値は低下してはいるものの、平均値は同じ値を示しており、後で述べる荷重～変位関係から算定するエネルギーについてはローパスフィルターをかけても等しい値を示すことを確認している。これに対し、変位はローパスフィルターをかけない生データを2回積分して算定した。

図-9は、上記の方法を用いて落錘式衝突実験によって得られた荷重～時間曲線、変位～時間曲線から時間軸を消去して得られた変位～時間曲線を落下回数別に示したものである。図-9より落下回数が増すにしたがい全変位は減少し、また荷重が増大することが認められる。また図-10および図-11は、落錘式衝突実験から得られた荷重～局部めり込み関係および荷重～はり変位関係を示したもので、図-10、11より、1回目の衝突では局部めり込みがかなり発生しているのに対し、落下回数が増すにしたがい局部めり込みの発生量は減少していくことが認められる。これに対し、はり変位は落下回数が増すにしたがい増加していることが認められる。すなわち、変形が進むにしたがい、応答は局部的なめり込みからはり全体への変形へと移っ

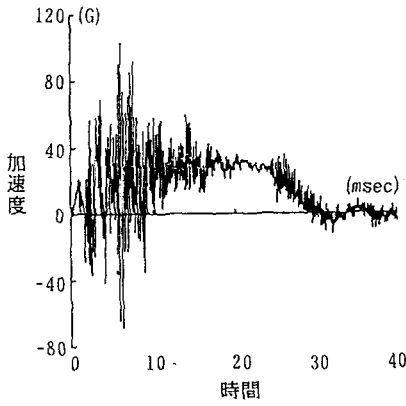


図-7 加速度～時間関係
(フィルターなし)

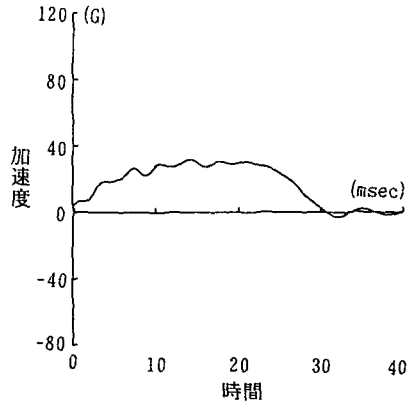


図-8 加速度～時間関係
(ローパスフィルター 200Hz)

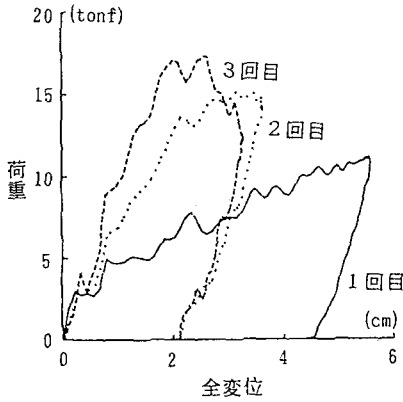


図-9 荷重～全変位関係
(落錘式衝突実験)

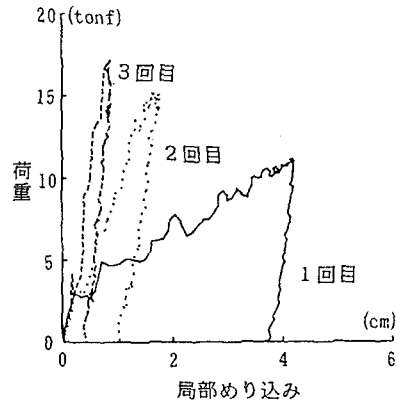


図-10 荷重～局部めり込み関係
(落錘式衝突実験)

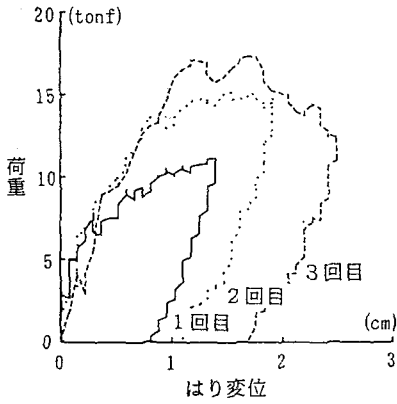


図-11 荷重～はり変位関係
(落錘式衝突実験)

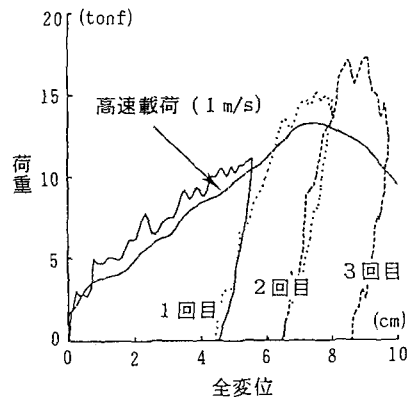


図-12 荷重～全変位関係
(落錘式衝突実験)

ていることが確認される。しかし、はり全体変形が進みつつも引き続き局部めり込みは発生し続けていることも認められる。

また図-12は、落錘式衝突実験から得られた荷重～変位関係において、変位を当初の状態から加算して示したもので、あわせて高速載荷実験において載荷速度が1 m/sの場合の荷重～変位関係も図示する。図-12より荷重～包絡変位量関係は高速載荷実験から得られた荷重～変位関係と同様な傾向を示すことが認められる。

3. 2 破壊形態

N. Jonesらの研究⁴⁾において、先端が鋭利な物体を鋼管固定はりに衝突させた場合には、固定端付近の鋼管内側のせん断滑り、支点部鋼管の延性破壊、衝突点のせん断滑り、そして支点部付近の鋼管下面の座屈等の破壊形態を示すことが報告されている。しかし、本実験においては、高速載荷実験および落錘式衝突実験ともに、写真-1に示すように衝突点において大きな局部めり込みを発生しつつもすべて固定端の溶接止端部における引張による亀裂の発生が認められた。すなわち、鋼管固定はりの破壊は固定端（溶接止端部）の亀裂の発生により生じると考えられ、したがって、本実験の範囲内においては、鋼管固定はりの終局限界は、固定端における亀裂の発生時として定義してよいと考えられる。

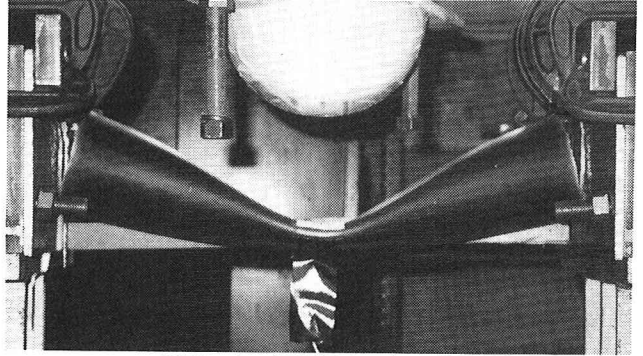


写真-1 鋼管固定はりの破壊形態
(高速載荷実験)

表-3 限界吸収エネルギー

	静 的	高 速		衝 突	
		4.0m/s	1.0m/s	1 回目	2 回目
全変位 (cm)	8.9	8.3	8.0	8.5	9.0
はり変位 (cm)	5.7	3.1	2.7	3.0	3.7
局部めり込み (cm)	3.2	5.2	5.3	5.5	5.3
全吸収エネルギー (tonf·cm)	47.5	73.1	64.5	81.5	93.9
局部吸収エネルギー (tonf·cm)	24.8 (52%)	43.3 (59%)	37.5 (58%)	42.6 (52%)	50.6 (54%)
はり変形吸収エネルギー (tonf·cm)	22.8 (48%)	29.9 (41%)	27.0 (42%)	38.9 (48%)	43.3 (46%)

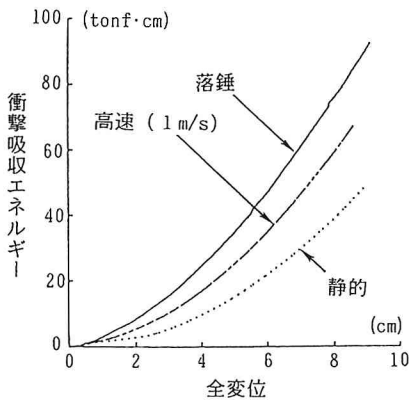


図-13 衝撃吸収エネルギー～全変位関係

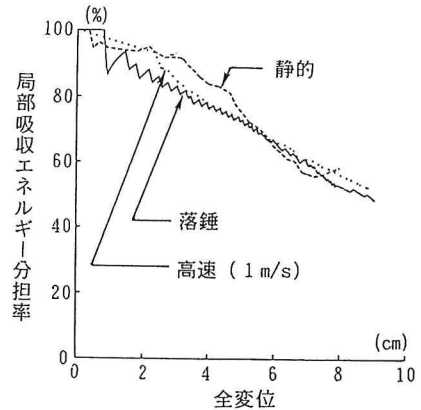


図-14 局部吸収エネルギー分担率
～全変位関係

3.3 限界吸収エネルギー

前項で述べたように、鋼管固定はりの終局限界を溶接止端部に亀裂が発生した時点と定義し、図-5あるいは図-12の荷重～変位関係において、終局限界に達するまでの面積を限界吸収エネルギーと定義して算定した。算定した結果を表-3に示す。また、衝撃吸収エネルギー～全変位関係および局部吸収エネルギー分担率～全変位関係をそれぞれ図-13および図-14に示す。図-13および表-3より、落錘式衝突実験においては荷重を若干大きめに評価しているため、限界吸収エネルギーも大きめの値を示しているが、概ね本試験体の限界吸収エネルギーは静的では48tonf・cm、衝突では68tonf・cm程度を示すことが認められる。また図-14および表-3より、全吸収エネルギーに対する局部めり込みによるエネルギー吸収分担率は、載荷の方法によらず全変位の増加にしたがい減少し、破壊時においては局部めり込みとはり変形によるエネルギー吸収分担率は、それぞれ約55%、約45%となることが認められた。しかし、この分担率は鋼管径、肉厚および載荷体の形状により異なることが予測される。

4. 結論

本研究から得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 静的載荷に比べ、衝突の場合は荷重は大きな値を示すものの、変形能が小さくなることが認められた。
- (2) 本実験においては、鋼管固定はりの溶接止端部に亀裂が発生して破壊した。よって、巨礫を球体と仮定した場合は、鋼管固定はりの終局限界は、固定端の亀裂破壊により定義できると考えられる。
- (3) 本実験において、静的載荷と衝突載荷における破壊形態の相違はあまり認められなかった。よって、本実験はひずみ速度効果による耐力向上と変形能の低下を考慮した準静的手法により解析できると考えられる。
- (4) 本実験における吸収エネルギー分担率は、静的、高速および衝突載荷ともほぼ局部めり込みが約55%、はり変形が約45%であることが認められた。

参考文献

- 1) 伊藤一雄、石川信隆、川嶋幾夫、鈴木宏；モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1581～1589、1991年3月
- 2) 松木昭彦、星川辰雄、石川信隆；局部めり込みを考慮した鋼管はりの限界変形性能について、第20回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.56～57、平成5年3月
- 3) 江守一郎；模型実験の理論と応用（第2版）、技報堂出版、1988年
- 4) N. Jones, S E Birch, R S Birch, L Zhu and M Brown；An experimental study on the lateral impact of fully clamped mild steel pipes, Journal of Process Mechanical Engineering, Vol 206, pp.111～127, 1992
- 5) Charles P. Elinas and Alastair C. Walker；Damage on Tubular Bracing Member, IABSE, Colloquium Copenhagen, Vol.42, 1983