652 衝撃荷重を受ける両端支持ばりの基本特性

Fundamental Characteristic of The Simply Supported Beam Subjected to An Impact Load

○難波 達郎（東海大学・院） 木村 修一（通信土木コンサルタント）
本間 重雄（東海大学工学部） 近藤 博（東海大学工学部）

Tatsuro Namba, Tokai University, Kitakaname1117, Hiratsuka, Kanagawa
Shuichi Kimura, TSUSHIN DOBOKU CONSULTANTS.Co.,Ltd, Kiba3-14-4,Koutou-ku,Tokyo
Shigeo Honma, Tokai University, Faculty of Engineering
Hiroshi Kondo, Tokai University, Faculty of Engineering

Practically, it is very important to clarify the magnitude of stress and deflection of the beam subjected to an impact force. Although, many studies have been made from old, no practically useful equation has been ever found yet. There upon, loading experiments were carried out to investigate the dynamic behavior of the model beam with three sizes of span and height in the way of hitting the loading rod at the tip of which a rubber material is put on, by the knocking rod. It was revealed that the apparent static loads to produce equivalent deflections by the dynamic test are proportioned to -1 power of the span of the beam. It was also revealed the deflections are proportional power 2 of the span, and power -0.6 of the equivalent spring constants of the beam. According to the results of this study, it is possible to estimate the dynamic behavior of beams of different sizes of span and height through the test for a species of beam.

Keyword : Dynamic, Girder, Deflection, Equivalent spring constant ratio

A 1. はじめに

両端支持梁が衝撃力を受けたときの、たわみや桁応力を明らかにすることは実用上重要であり、古くから多くの研究が行われている。機械工学便覧（機械学会の衝撃と破壊調査研究分科会の成果報告書から引用）にはエネルギー法に関連した式が掲載されている。しかし、その式には、慣性力の効果を必ずしも正しく評価して得られた結果でないために、その使用にあたっては十分に注意する必要があるとの付則がついている。

このように、いまだに実用的に利用できる算定式が提案されていない。

本研究は、動的荷重の測定にはシンプルで波動の多重反射の影響を無視できるのが一番と考え、Fig.A1 に示す装置を用いて、スパンや曲げ剛性の異なる 9 種の桁 (Table A1) を用いて動的载荷試験を行った。本装置が一般の動的载荷実験方法と異なるところは、荷重の载荷に载荷棒 (直径 25mm, 長さ 300 mm の鋼丸棒にゲージを貼付したもの) を用いたことである。また、载荷棒で正確な動的荷重を測定するために、载荷棒の衝突面 (上端) にゴム製緩衝材を設置した。载荷荷重は、この载荷棒を打撃する方法で作用させた。

A 2. 実験結果の一例と検討

Fig.A2 は、同一条件での、全桁の载荷荷重を示したものであるが、桁の等価ばね定数に 64 倍の開きがあるのに関わらず、ほぼ同じになった。よって、本実験で動的たわみや桁応力に及ぼす桁寸法の影響が検討できることになる。

Fig.A3 は、動的たわみと等価ばね定数の関係を示したものであるが、動的载荷でのたわみは、振動载荷と異なり、等価ばね定数-0.63 乗に比例する興味ある結果になった (振動解析: -0.5 乗)。さらに、動的たわみを生じさせる見掛けの静的荷重はスパンの -1 乗、動的たわみはスパンの 2 乗に比例することが明らかになった。よって、1 回の実験で動的たわみを測定すれば、他の桁の動的たわみと見掛けの静的荷重が推定でき、静的設計が可能になると思量する。

Fig. A1 Outline of the experimental equipment

Table A1 Dimension of the girders

Girder	Width (mm)	Height (mm)	Span (mm)	Equivalence spring constant ratio
A	1	10	600	8.00
	2		900	2.37
	3		1200	1.00
B	1	15	600	2.70
	2		900	8.00
	3		1200	3.38
C	1	20	600	64.00
	2		900	19.00
	3		1200	8.00

Fig. A2 Loading load

Fig. A3 Deflection and spring constant ratio

1. はじめに

両端支持梁が衝撃力を受けたときの、たわみや桁応力を明らかにすることは実用上重要であり、古くから実験的あるいは理論的に多くの研究¹⁾が行われている。しかし、いまだ実用的に利用できる式は求められていない。一般に、よく利用されている式は、エネルギー法²⁾によるものである。エネルギー法に関連した式は、機械工学便覧³⁾(機械学会の衝撃と破壊調査研究分科会の成果報告書)にも掲載されている。しかし、掲載された式には、慣性力の効果を必ずしも正しく評価して得られた結果でないために、その使用にあたっては十分に注意する必要があるとの付則がついている。

以上に述べたように、いまだに実用的に利用できる算定式が提案されていない理由のひとつに、载荷荷重の測定にロードセルを利用してきた³⁾ことが考えられる。

そこで、動的荷重の測定にはシンプルで波動の多重反射の影響を無視できるのが一番と考え、载荷荷重の測定に、鋼弾性棒の上端にゴム材を設置した载荷棒を弾性棒で打撃する方法を採用して、スパンや曲げ剛性の異なる9種の模型桁を採用して動的载荷実験を行った。

その結果、動的試験でのたわみを生じさせる見掛けの静的荷重はスパンの-1乗に比例する興味ある結果が得られた。さらに、たわみはスパンの2乗に比例するとともに、桁の等価ばね定数の-0.63乗に比例する興味ある結果が得られた(静的载荷のたわみは等価ばね定数の-1乗、振動解析でのたわみは等価ばね定数の-0.5乗に比例する)。これにより、小さな桁の動的载荷試験から大きな桁の静的設計が可能であることが明らかになった。

2. 実験装置と方法

2・1 模型桁

Table1は、模型桁の寸法等を示したものである。模型桁は、桁幅を同一とし、桁高さ3段階、スパン3段階の9種を採用した。模型桁はアルミ製で、桁の呼び名を表に示すようにした。また、桁の等価ばね定数比は、等価ばね定数(以下、ばね定数と記す)の一番小さい桁A3を1とすると、ばね定数の一番大きい桁C1は64になる。

2・2 装置と方法

Fig.1は、動的载荷実験装置の概要を示したものである。一般の動的载荷実験方法と異なるところは、図に示したような、荷重の载荷に载荷棒(直径25mm、長さ300mmの鋼丸棒にゲージを貼付したもの)を用いたことである。载荷棒の先端の形状は、線载荷させるために円弧になっている。载荷棒で正確な動的荷重を測定するためには、载荷棒の衝突面(上端)が自由端的に挙動する必要がある。そこで、载荷

Fig. 1 Outline of the experimental equipment

Fig. 2 Relationship between buffer thickness and loading load

棒の衝突端にゴム製緩衝材(以下、緩衝材と記す)を設置した。また、緩衝材を設置することで、载荷棒が剛体的な挙動をすることになる。緩衝材の厚さは2, 4, 6mmの3種類を用いた。载荷荷重は打撃棒(直径25mm、長さ300mmの鋼丸棒)を、50mmと200mmの高さから自由落下させて、载荷棒を打撃して発生させた。そのときの、载荷棒での荷重、模型桁での桁応力(G1とG2ゲージ)、さらに模型桁の中央部のたわみ(レーザ変位計を採用)を、サンプリングタイム2μsで計測・処理した。

3. 実験結果と検討

3・1 载荷荷重と桁応力

Fig.2は、桁A1、打撃棒の落下高さ50mm、緩衝材厚さ3種類で実験を行ったときの、载荷荷重を並べて示したものである。図から、緩衝材厚さにより、载荷荷重形状が大きく異なることがわかる。最大荷重は緩衝材厚さ2mmで約1.47kN、緩衝材厚さ6mmで約0.48kNになった。しかし、3者の载荷荷重の力積はほぼ一致した。

Fig.3は、Fig.2に示した実験での、G1ゲージで測定した桁応力を示したものである。図から、3者の桁応力は比較的良好に一致していることがわかる。これから、桁応力は载荷荷重の大きさに直接影響を受けるのではなく、载荷荷重

Table 1 Dimension of the girders

Girder	Width(mm)	Height(mm)	Span(mm)	Equivalence spring constant ratio
A	25	10	600	8.00
			900	2.37
			1200	1.00
B	25	15	600	2.70
			900	8.00
			1200	3.38
C	25	20	600	64.00
			900	19.00
			1200	8.00

Fig. 3 Relationship between buffer thickness and stress

Fig. 4 Loading load of all girder at the 4mm buffer thickness

Fig. 5 Comparison of the stress of 2 points

Fig. 6 Comparison of calculation deflection and measurement deflection

の力積に関係することがわかる。また、最大桁応力の生じる時間は、载荷荷重よりかなり遅れることもわかる。

Fig.4 は、緩衝材厚さ 4 mm、打撃棒の落下の高さ 50mm で実験したときの全桁での载荷荷重を示したものである。図から、载荷荷重形状は、桁のばね定数に 64 倍の差異があるにもかかわらず、ほぼ同じになる興味ある結果が得られた。すなわち、今回採用した方法は、桁寸法が異なっても、载荷荷重がほぼ同じになったことにより、たわみと桁寸法等の関係が検討できることを示している。

3・2 G1 ゲージと G2 ゲージでの桁応力

Fig.5 は、桁 A2、打撃棒の落下の高さ 50mm で実験したときの、G1 ゲージと G2 ゲージでの桁応力を並べて示したものである。G1 点と G2 点の支点からの距離は、それぞれ、350mm と 200mm であるので、図から桁応力は支点からの距離に比例することがわかる。他の桁でも同様な結果が得られた。

3・3 計算たわみと測定たわみ

3・2 での検討から、桁応力の分布性状が静的载荷と同じ傾向になることがわかった。そこで、桁応力から求まる桁中

央のたわみと計測たわみの比較を試みた。

Fig.6 は、桁 A1、打撃棒の落下高さ 50mm で実験したときの、G1 点での桁応力から求めた桁中央点たわみと計測たわみ並べて示したものである。図から、両者はよく一致していることがわかる。よって、桁応力が最大値を示すときの応力分布性状は静的と同じになることがわかる。他の桁でも同様な結果が得られた。よって、桁の応力が最大値を示すときの応力分布性状は静的と同様に扱ってよいことが明らかになった。このときの動的たわみと同値の静的たわみを生じさせる静的荷重を見掛けの静的荷重 P_0 と呼ぶことにする。

3・4 桁の動的たわみについて

Table2 は、打撃棒の落下高さ 50mm で実験したときの、計測たわみと、エネルギー法及び载荷荷重を採用した応答計算によるたわみを比較したものである。表から、実験値と解析解の差異が大きいことがわかる。

Table 2 Measurement deflection and calculation deflection

Girder		Deflection(mm)		
		Experimentation Value	Energy	Response Analysis
A	1	3.50	3.60	2.00
	2	7.60	12.00	4.00
	3	14.00	19.00	5.40
B	1	2.00	3.30	1.10
	2	3.30	5.80	2.30
	3	6.50	9.80	3.60
C	1	0.90	2.00	0.80
	2	2.10	3.80	1.50
	3	3.60	6.20	2.30

Table 3 Measurement deflection and apparent static load

Girder		Deflection(mm)	Static Load(kN)
A	1	3.5	0.118
	2	7.6	0.076
	3	14.0	0.059
B	1	2.0	0.228
	2	3.3	0.112
	3	6.5	0.088
C	1	0.9	0.263
	2	2.1	0.184
	3	3.6	0.122

Fig. 8 Deflection and span

Fig. 7 Apparent static load and span

Fig. 9 Deflection and equivalent spring constant ratio

4. 衝撃曲げの静的設計法の提案

機械工学便覧には、前述したように、多くの論文から結論づけた、エネルギー法による立脚した式が示されている。しかし、使用にあたっては十分に注意する必要があると付記されている。そこで、1 回の実験から、同じ動的荷重を受ける寸法等が異なる桁の静的設計法について述べることにする。

4・1 見掛けの静的荷重とスパンの関係

Table3 は、打撃棒の落下高さ 50mm で実験したときの、全桁の計測たわみと、そのたわみを生じさせるのに必要な見掛けの静的荷重を示した。Fig.7 は、その見掛けの静的荷重とスパンの関係を示したものである。図から、見掛けの静的荷重はスパンの -1 乗に比例することがわかる。この関係は、桁の断面形状が同一ならば、桁中央点の桁応力はスパンの影響を受けず、同じになることを意味している。機械工学便覧にも、桁の最大応力はスパンに無関係となると

の記述があるので、今回の実験方法の妥当性に問題がないことがわかる。

4・2 動的たわみとスパンの関係

Fig.8 は、実験での動的たわみとスパンの関係を示したものである。図から、動的たわみはスパンの 2 乗に比例することがわかる。単純梁が中央に静的荷重を受けたときのたわみの式は $\delta=PL^3/48EI$ である。この式からわかるように、静的たわみは、静的荷重 P の 1 乗とスパン L の 3 乗に比例する。しかし、4・1 の検討から、見掛けの静的荷重はスパンの -1 乗に比例するので、動的たわみはスパンの 2 乗に比例することが、静的たわみ式からも推察される興味ある結果が得られた。

4・3 動的たわみと等価ばね定数の関係

Table3 から、ばね定数が等しい、桁 A1, B2 及び C3 のたわみがほぼ等しくなることがわかる。そこで、ばね定数比とたわみの関係を整理したものが Fig.9 である。図には、打撃棒の落下高さ 200mm での結果も示した。図から、動的

たわみはばね定数比の-0.63 乗に比例することがわかる。

4・4 静的設計法

動的たわみとスパンおよび等価ばね定数の関係が明らかになると、一つの模型での動的試験で、動的たわみを測定すれば、他の桁の動的たわみが推定できることになる。動的たわみが求まると、見掛けの静的荷重が推定でき、静的設計が可能となる。

5. まとめ

ロードセルの代わりに、緩衝材を設置した載荷棒を採用して、桁の動的載荷試験を行い次のことがわかった。

- (1) 桁のたわみは、桁の条件が同一の場合、最大載荷荷重ではなく、載荷荷重の力積に比例することが明らかになった。
- (2) 最大桁応力は、桁断面が同一ならばスパンが異なっても同じになる。
- (3) 桁に動的たわみと同値の静的たわみを生じさせる見掛けの静的荷重は動的荷重に比較して非常に小さくなる。
- (4) 静的試験では、たわみはスパンの 3 乗に比例するが、動的載荷試験でのたわみはスパンの 2 乗に比例した。

- (5) 静的試験では、たわみはばね定数の-1 乗に比例するが、動的載荷でのたわみは桁のばね定数の約-0.63 乗に比例する。これから、ひとつ桁の動的試験のたわみから、他の桁のたわみが推定できることになる。すなわち、模型桁の動的試験の結果から、動的荷重を受け大きな桁の静的設計が可能になる。
- (6) 載荷棒の上端にゴム材を設置すると、載荷棒が剛体的挙動するので、動的荷重波形は加速度と同形状になる。現在、加速度を基本に構造物の安全性を検討するケースが多いが、時間の項を加味した取り扱いが重要と推察する。

文 献

- (1) 中原一郎，渋谷寿一，土田栄一郎，笠野英秋，辻知章，井上裕嗣，弾性学ハンドブック，pp. 509-517，朝倉書店，2001。
- (2) 土木構造工学委員会，衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会編，衝撃実験・解析の基礎と応用，土木学会，2004。
- (3) 日本機械学会編，機械工学便覧，材料力学，p. A4-39，2001。