

礫の衝突位置の違いによるフランジ継手付き鋼管はりの耐荷性能 Load Carrying Capacity of Steel Pipe Beams with Flange Joints by Difference between Impact Positions of Boulder

國領 ひろし (日鉄建材) 堀口 俊行 (防衛大・工) 別府 万寿博 (防衛大・工)
園田 佳巨 (九州大・工) 石川 信隆 (防衛大)
Hiroshi KOKURYO, Nippon Steel Metal Products Co., Ltd.
Toshiyuki HORIGUCHI, National Defense Academy
Masuhiro BEPPU, National Defense Academy
Yoshimi SONODA, Kyusyu University
Nobutaka ISHIKAWA, National Defense Academy
FAX: 03-6625-6251, E-mail: hkokuryo@ns-kenzai.co.jp

This paper presents an analytical approach on the load carrying capacity of steel pipe beams with flange joints against boulder impact by changing the impact position of boulder. First, this method was validated by comparing with the static and dynamic test results. Second, the load carrying capacities of steel pipe beams (fixed and cantilever beams) with flange joints were investigated by changing the impact positions of boulder using the static and dynamic elastic-plastic FEM analyses.

1. はじめに

近年、鋼製透過型砂防堰堤が巨礫等の衝突により大きな損傷を受けた事例が発生している。その原因の一つは、鋼管継手（フランジ継手）の耐荷性能が関係しているといわれている。しかし、鋼製透過型砂防堰堤を対象とした鋼管継手の動的な解析や実験は、園田ら¹⁾や國領ら²⁾の研究以外にあまり見当たらない。

そこで本研究は、フランジ継手付き鋼管はり部材について、礫の衝突位置の違いによる耐荷性能を検討するものである。まず、著者らが先行実験で実施したフランジ継手付き鋼管はりの載荷実験データをもとに再現解析を行い、本解析法の妥当性を検証する。次に、フランジ継手付き両端固定鋼管はりおよび片持ち鋼管はりを対象に、礫衝突位置の違いによる静的および動的挙動を弾塑性 FEM 解析により調べ、その耐荷性能について検討を行うものである。

2. 載荷実験の再現解析

2.1 実験概要および解析条件

実験は、Fig. 1 に示すようなフランジ継手（ボルト数 12 本）付き鋼管片持ちはりで、片側を治具で固定し、先端部に載荷体を静的および動的（約 1.0 m/s）に載荷した²⁾。

解析は、有限要素法による非線形解析汎用プログラム

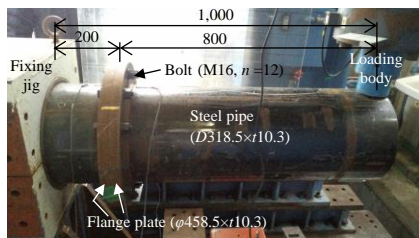


Fig. 1 Load test model (unit: mm).

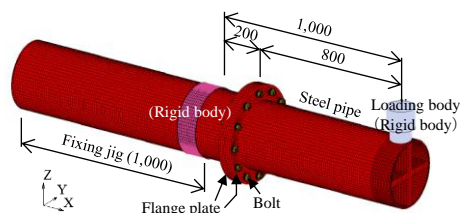


Fig. 2 Analytical model (unit: mm).

Marc (MSC) を用いて実施した。解析モデルは、Fig. 2 に示すような実験供試体を再現したモデルで、使用要素は 3 次元ソリッド要素、載荷体および固定治具先端は剛体とした。解析では、支点となるはり端部は完全固定条件とし、鋼材間および鋼材と載荷体の接触面の摩擦係数は、それぞれ 0.4, 0.3 とした。解析に用いた材料物性値は Table 1 に示すとおりで、材料の構成則にはトリリニア型の応力-ひずみ関係を与え、von-Mises の降伏条件を適用し、等方硬化するものとした。

2.2 解析結果

Fig. 3(a)に静的載荷、Fig. 3(b)に動的載荷の荷重-変位関係を示す。まず、Fig. 3(a)の静的載荷の場合、解析結果と実験値での最大荷重の差異は約 1.0 %で、このときの鋼管上面および下面の変位の差異は 2.0 mm 以下である。次に、Fig. 3(b)の動的載荷の場合では、最大荷重の差異は 3.1 %とやや大きくなるが、変位の差異は 1.5 mm 以下となった。これより、解析結果は両ケースとも実験での全体的な傾向を概ね再現できており、本解析法の妥当性を確認できた。

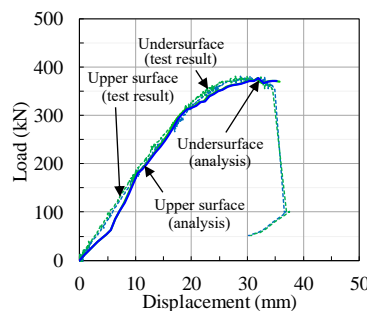
3. フランジ継手付き鋼管はりの耐荷性能評価解析

3.1 解析条件

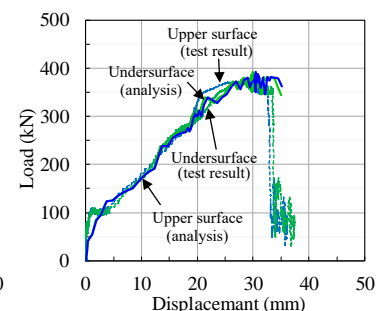
解析は、再現解析と同様に非線形解析汎用プログラム

Table. 1 Material properties.

Name	Material	Shape dimensions (mm)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Steel pipe	STK490	D318.5×t10.3	2.0×10 ⁵	0.30	477	541	33
Flange plate	SM490	φ458.5×t28.0	2.0×10 ⁵	0.30	382	527	31
Bolt	S10T	M16×L85	2.0×10 ⁵	0.30	1,012	1,062	20



(a) Static loading



(b) Dynamic loading

Fig. 3 Load-displacement relationship.

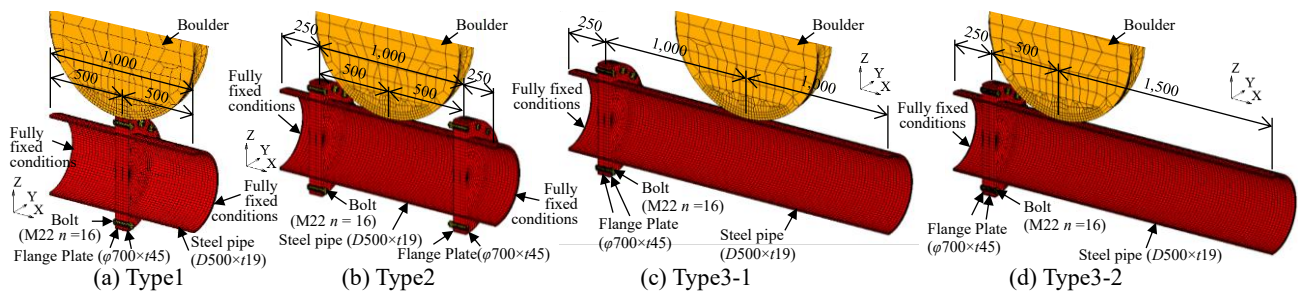


Fig. 4 Analytical model (unit: mm).

Table 2 Physical property values.

Name	Material	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Steel pipe	STK490	2.0×10^5	0.30	315	550	23
Steel plate	SM490	2.0×10^5	0.30	295	550	23
Bolt	S10T	2.0×10^5	0.30	900	1,100	14
Boulder	—	5.0×10^4	0.23	—	—	—

Table 3 Opening of joint part.

Type	Static loading		Dynamic loading	
	Top	Bottom	Top	Bottom
Type1	0.4 mm	10.2 mm	0.4 mm	0.6 mm
Type2	10.6 mm	0.0 mm	1.7 mm	0.0 mm
Type3-1	10.3 mm	0.0 mm	6.0 mm	0.0 mm
Type3-2	10.3 mm	0.0 mm	3.2 mm	0.0 mm

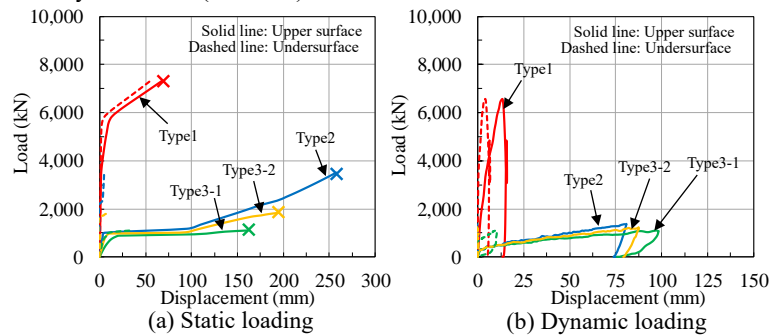


Fig. 5 Load-displacement relationship.

Marc を用いて実施した。解析モデルおよび寸法は、Fig. 4 に示すとおり、Fig. 4(a)は両端固定はりの継手直上载荷モデル (Type1: 载荷位置が継手部と同位置のスパン中央 0.5 m)、Fig. 4(b)は両端固定はりの継手間载荷モデル (Type2: 载荷位置が継手間中央 0.5 m)、Fig. 4(c)および Fig. 4(d)は片持ちはりの継手遠方载荷モデル (Type3-1: 载荷位置が継手部より 1.0 m) および継手近傍载荷モデル (Type3-2: 载荷位置が継手部より 0.5 m) の 4 タイプを設定した。なお、本解析では構造の対称性を考慮して 1/2 モデルとしている。使用した要素は、すべて 3 次元ソリッド要素で、支点となるはり端部は、全自由度を拘束する境界条件を設定した。接触条件は、再現解析と同様に、鋼材間の接触面は摩擦係数 0.4、鋼材と礫の接触面は摩擦係数 0.3 とした。荷重条件は、静的载荷では直径 1.0 m の礫を接合ボルト 1 本が破断に至るまで静的に载荷するものとし、動的载荷は直径 1.0 m の礫を初速度 10.0 m/s で衝突させた。

3. 2 材料特性

解析に用いた材料物性値を Table 2 に示す。鋼製材料の構成則は、公称伸びと公称引張強度が互に対応し、公称伸び以降は強度が一定となるようなトリリニア型の応力-ひずみ関係を与えた。

3. 3 静的解析結果

Fig. 5(a)に、静的载荷の荷重-変位関係を示す。まず、両端固定はり (Type1 および Type2) の場合、接合ボルト 1 本が破断に至る時点 (図中の×印) の荷重は、Type1 (継手直上载荷) のほうが Type 2 (継手間载荷) に比べてはるかに大きい (約 2.1 倍 = 7,344 kN / 3,513 kN)。一方、载荷点上面の変位 (上変位) は、Type2 のほうが Type1 に比べ大きくなる (約 3.8 倍 = 258 mm / 68 mm)。これは、载荷点の断面剛性の違い (へこみ変形) によるもので、Type2 でははり変位 (下変位) がほとんど発生していないことがわかる。

次に、片持ちはり (Type3-1 および Type3-2) の場合では、最大荷重は Type3-2 (近傍载荷) のほうが Type3-1 (遠方载荷) より大きい。これは、継手部から载荷点までの距離 L の影響によるもので、Type3-2 のほうが、距離 L が短い (0.5 m) ため、接合ボルトが破断に至る曲げモーメント M_y (一定) に対する荷重 ($P = M_y / L$) が大きくなったためである。

さらに、Table 3 に継手部の開き量を示す。Type1 では、継手上部に比べ、継手下部の開きが大きくなっている。一方、その他のモデルでは、継手上部のみに開きが生じている。つまり、継手部の開きは、曲げ引張力が作用する側に生じ、接合ボルトの伸びに起因していると考えられる。

3. 4 動的解析結果

Fig. 5(b)に、動的载荷の荷重-変位関係を示す。まず、両端固定はりでは、静的载荷と同様に、最大荷重は Type1 のほうが Type2 に比べて顕著に大きいが、载荷点上面の変位 (上変位) は Type1 のほうが顕著に小さくなる。また、はり変位 (下変位) は Type1 のみで発生している。

次に、片持ちはりでは、最大荷重は Type3-2 のほうが Type3-1 に比べてやや大きいが、顕著な差異は認められなかった。一方、载荷点の上変位は Type3-1 のほうがやや大きくなるが、上変位から下変位を差し引いたへこみ変形は、両者ともほぼ同じ (87 mm) であった。

継手の開き量は、Type3-1 が最も大きい。これは、接合ボルトへの曲げ引張り作用に起因していると考えられる。

4. まとめ

本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 本解析法は、静的および動的载荷実験の結果を、よく再現できることを確認した。
- 2) 両端固定はりの継手直上载荷の場合、耐荷力は大きくなるが、継手下側に大きな開きが生じることが認められた。
- 3) 片持ちはりでは、荷重は継手遠方载荷に比べて継手近傍载荷のほうが大きくなる。一方、継手部の開きは、载荷点が継手から離れている継手遠方载荷のほうが曲げ引張りの影響を受け、とくに動的载荷の場合に開きが大きくなった。

参考文献

- 1) 園田佳巨, 土屋洋平, 玉井宏樹, 嶋丈示: 鋼製透過型砂防堰堤の耐荷性能に関する基礎研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1019-1030, 2016.
- 2) 國領ひろし, 堀口俊行, 別府万寿博, 園田佳巨, 石川信隆: フランジ継手を有する鋼管はり部材の動的载荷性能実験, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.807-820, 2019.