

空洞金具を有する埋設型切り梁の安定照査について

平成 29 年 9 月

株式会社 三研テクノクリエイト

1. 安定照査の方針

切り梁は、軸力と曲げモーメントを同時に受ける部材とし、応力度の照査のほか、安定に対する検討が必要である。

照査方法についても設計スパンの全長にわたり同一断面形状の H 形鋼梁部材として(図 1)、構造力学的な手法が用いられている²⁾。

しかし、設計スパンの中間部において、H 形鋼梁部材と異なる機械的要素を持つ空洞金具が一連の梁部材の一部として配置される場合(図 2)、構造力学的に照査を行うことは困難である。

したがって、空洞金具を有する埋設型切り梁の安定照査は、任意な形状の解析が可能な三次元非線形有限要素法により行うこととする。

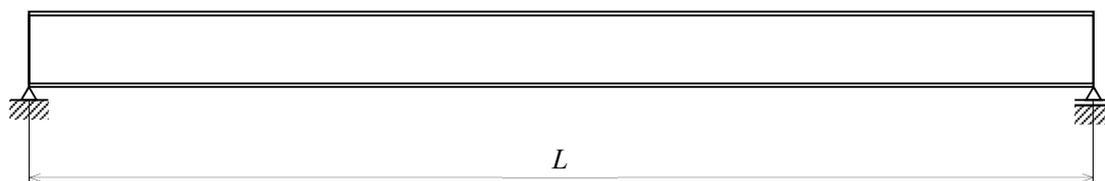


図 1 同一断面形状の H 形鋼梁部材の場合

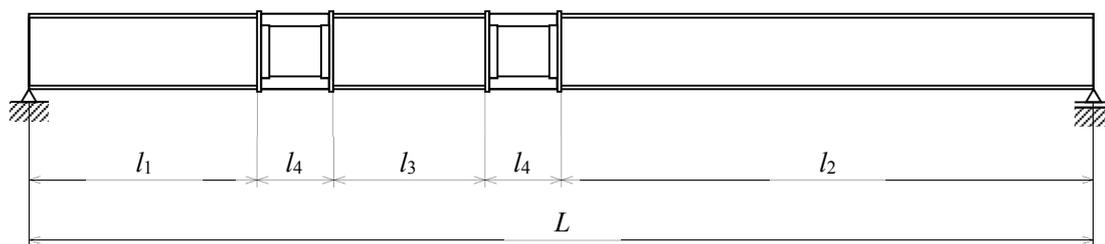


図 2 空洞金具が H 形鋼梁部材の一部に配置された場合

2. 照査条件

照査条件は、以下の通りとする。

- ① 作用軸力は、土圧、水圧による作用軸力のほか、温度変化による増加荷重 150 kN を加えたものとする。
- ② 作用曲げモーメントは、切り梁の自重を含めた等分布荷重 $w=5\text{kN/m}$ で算出したものとする。

3. 解析仮定

三次元非線形有限要素解析は、以下の仮定で行う。

- ① H形鋼梁部材の初期不整として、断面内の残留応力 ($0.5\sigma_y$) および強軸、弱軸両方向の初期曲がり (スパン中央において、 $f_0 = L/1,000$) を考慮する (図3)³⁾。
- ② 埋設型切り梁とH形鋼梁部材の連結部は、解析上考慮しない。
- ③ H形鋼梁部材はボルト孔を考慮する。
- ④ 材料の応力-ひずみ曲線には、JIS規格の値を用いる。

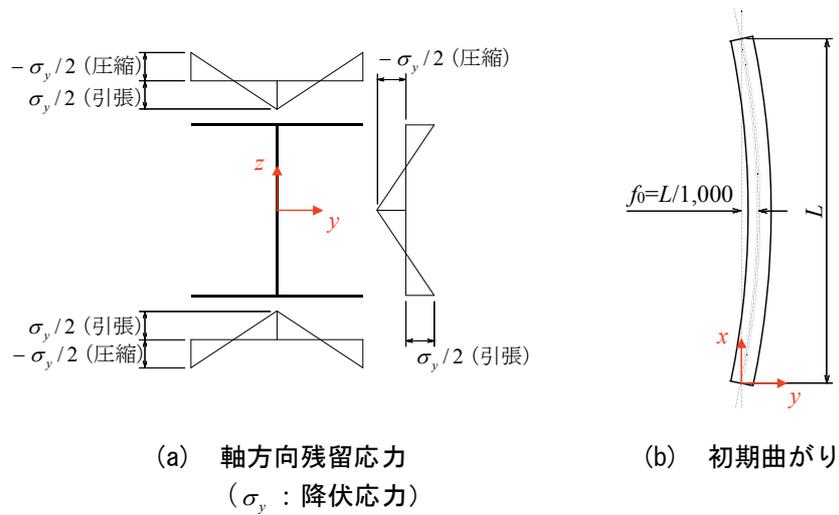


図3 H形鋼梁部材の初期不整

4. 三次元非線形有限要素解析について

三次元非線形有限要素解析は、複数現象達成解析システム ANSYS を用いて行う⁴⁾。解析手順を図 4 に示す。

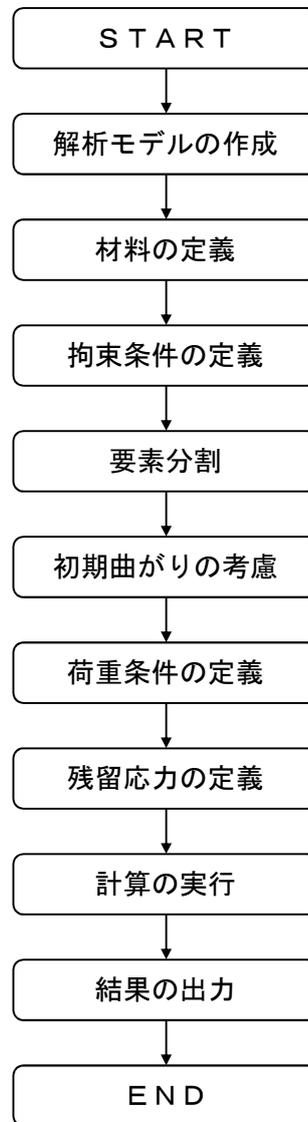


図 4 三次元非線形有限要素法 解析フロー

4.1 解析モデルの作成

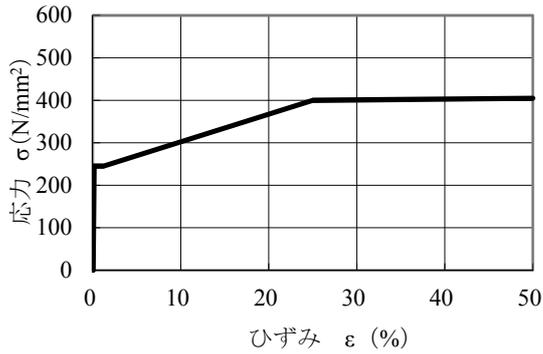
H 形鋼梁部材の長手方向を x 軸、断面弱軸を y 軸、断面強軸を z 軸とする直交座標系において解析モデルを作成する。なお、H 形鋼梁部材の初期曲がりは 4.5 節の方法によって導入し、ここでは考えない。作成には三次元 CAD (SPACE CLAIM) システムを利用した。

4.2 材料の定義

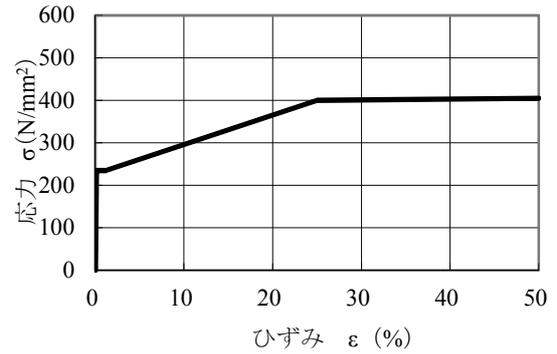
ANSYS で解析モデルをインポートし、材料の定義を行う。埋設型切り梁の材質および機械的性質を表 1 に、応力-ひずみ曲線を図 5 に示す。

表 1 埋設型切り梁の材質および機械的性質

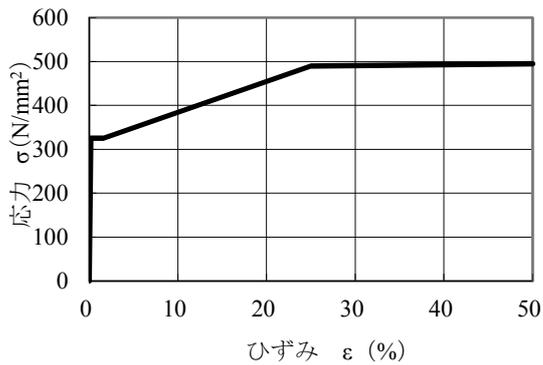
部品		材質	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
空洞金具	台板	SM490A	2.0×10 ⁵	325 以上	490~610	17 以上
	ピラー	S35CN		305 以上	510 以上	23 以上
	補強材	SS400		245 以上	400~510	17 以上
H 形鋼						



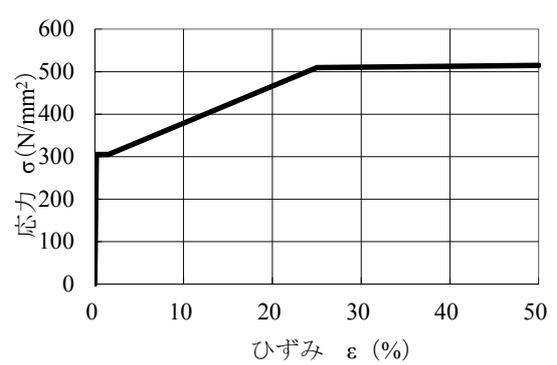
(a) SS400 (6 ≤ t ≤ 16)



(b) SS400 (16 < t ≤ 40)



(c) SM490A (6 ≤ t ≤ 16)



(d) S35C

図 5 応力-ひずみ曲線

4.3 拘束条件の定義

H 形鋼梁部材両端の断面図心の拘束条件として、単純支持（ローラー、ヒンジ）の条件を定義する（表 2）。 u_i, θ_i はそれぞれ、 i 軸方向の変位、 i 軸まわりの回転を表す ($i=x, y, z$)。

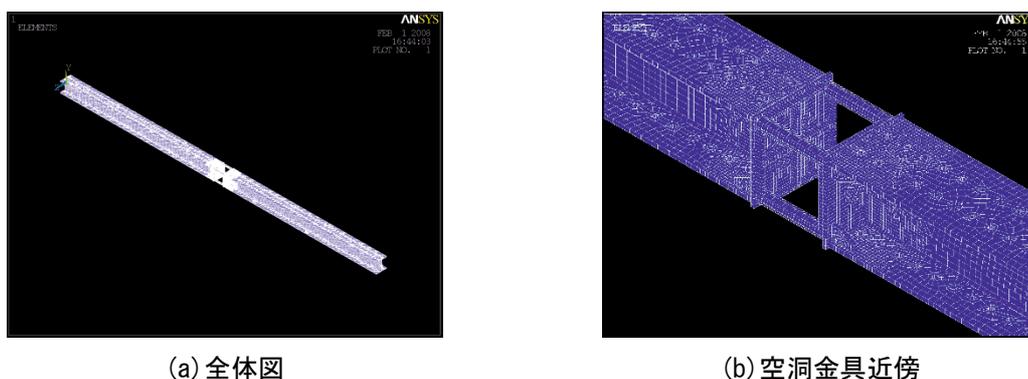
表 2 拘束条件の定義

	変位条件			回転条件		
	u_x	u_y	u_z	θ_x	θ_y	θ_z
ローラー側	自由	固定	固定	固定	自由	自由
ヒンジ側	固定	固定	固定	固定	自由	自由

4.4 要素分割

空洞金具の棒部材（ピラー）は SOLID2 次要素、その他の板部材は SOLSH 要素により要素分割を行う。いずれも非線形解析対応の要素となっている。

要素長については、H 形鋼梁部材と空洞金具の連結部では断面が急変し、周辺の応力勾配が大きくなることから、この部分を細かく分割する（図 6）。



(a) 全体図

(b) 空洞金具近傍

図 6 要素分割

4.5 初期曲がりの考慮

H 形鋼梁部材の弱軸、強軸両方向の初期曲がり ($f_0=L/1,000$) を考慮する。始めに、弱軸方向に仮定の重力を作用させて解析を行い、同方向のたわみを定数倍して初期曲がりを与える。続いて、強軸方向についても同様の操作を行う。

4.6 荷重条件の定義

自重を含めたステップ型の等分布荷重として、 $w=5\text{kN/m}$ を H 形鋼梁部材全長に作用させる。続いて表 2 の拘束条件のうち、ローラー側の変位条件 u_x を自由からランプ型の強制変位に切り替える。

4.7 残留応力の定義

要素中心の座標値を用いて残留応力（図 3 (a)）を計算し、解析モデルに読み込ませる。

4.8 計算の実行

圧縮強制変位 0.25mm ピッチで最大変位 $d_{\text{max}}=10.0\text{mm}$ までを計算、 0.5mm ピッチで結果の出力を行う（計 20 回分）。

4.9 結果の出力

計算結果より、座屈荷重を求める。座屈荷重とは構造が不安定になる限界荷重のことであり、安定照査を行う上での指標となる。三次元非線形有限要素解析の結果より、**図7**に示す軸力-圧縮強制変位曲線を作成すると、空洞金具を有する H 形鋼梁部材の座屈荷重 N_c は、この曲線の最大荷重となる⁴⁾。

図8および**図9**は、**図6**の空洞金具近傍 H 形鋼梁部材断面および空洞金具中央断面の座屈時における累積相当塑性ひずみ分布および変形状態を図示したものである。累積相当塑性ひずみの分布図は、赤色の部分が塑性域、青色の部分は弾性域であることを表す。

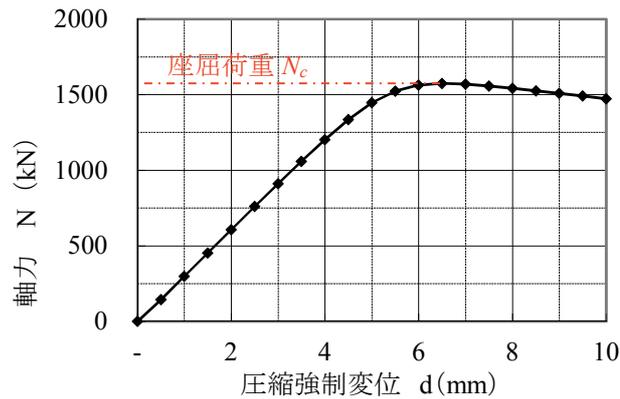
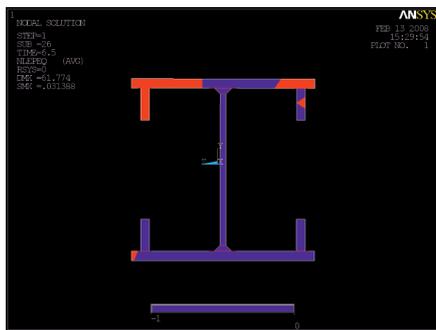


図7 軸力-圧縮強制変位曲線



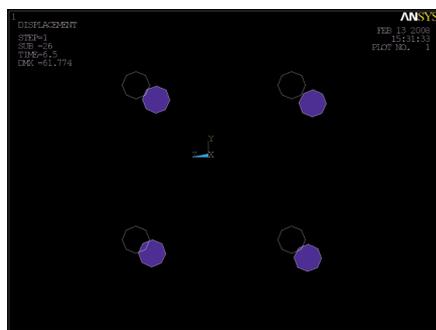
(a) 累積相当塑性ひずみ分布



(a) 累積相当塑性ひずみ分布



(b) 変形状態



(b) 変形状態

図8 座屈時の空洞金具近傍 H 形鋼梁部材の状況

図9 座屈時の空洞金具中央の状況

座屈をむかえる前でも左上のフランジやピラーに塑性域が広がっているが、右上のフランジ、ウェブおよび下側のフランジやピラーが抵抗して安定を保つ。やがて、構造系全体の抵抗力は失われ、座屈すると考えられる。

5. 許容耐力

許容耐力は、座屈荷重に対して安全率を見込んだ値のほかに、荷重の組み合わせによる割増し係数を乗じた値とする。

許容耐力を求めるための安全率は、道路橋示方書に記載される耐荷力曲線 a に基づいて定められている「局部座屈を考慮しない許容軸圧縮応力度」の算定に用いられる基準降伏点に対する安全率 1.7 とする。

また道路土工・仮設構造物工指針では、仮設構造物であることから仮設時割増係数 1.5 が用いられている。

したがって、許容耐力は次式のとおりとする。

$$N_a = \frac{N_c}{n} \times \alpha \quad \dots \dots \dots \text{(式 5-1)}$$

ここに、

N_a : 許容耐力

N_c : 座屈荷重

n : 安全率 (=1.7)

α : 仮設時割増係数 (=1.5)

6. 三次元非線形有限要素解析の妥当性の検証

6.1 解析条件

三次元非線形有限要素法による埋設型切り梁の解析手法の妥当性を検証するために、道路橋示方書、図-解 3.2.1 の耐力曲線IVを対象に解析する。解析条件は以下のとおりである。

H形鋼梁部材：H-300×300×10×15 (SS400)

初期不整：弱軸方向の初期曲がり（スパン中央において、 $f_0 = L/1,000$ ）

残留応力（ $0.5\sigma_y$ ）

設計スパン：4.0m および 9.0m

作用荷重：軸力

6.2 解析結果

解析によって得られた軸方向の圧縮強制変位と作用軸力の関係を図 10 に示す。

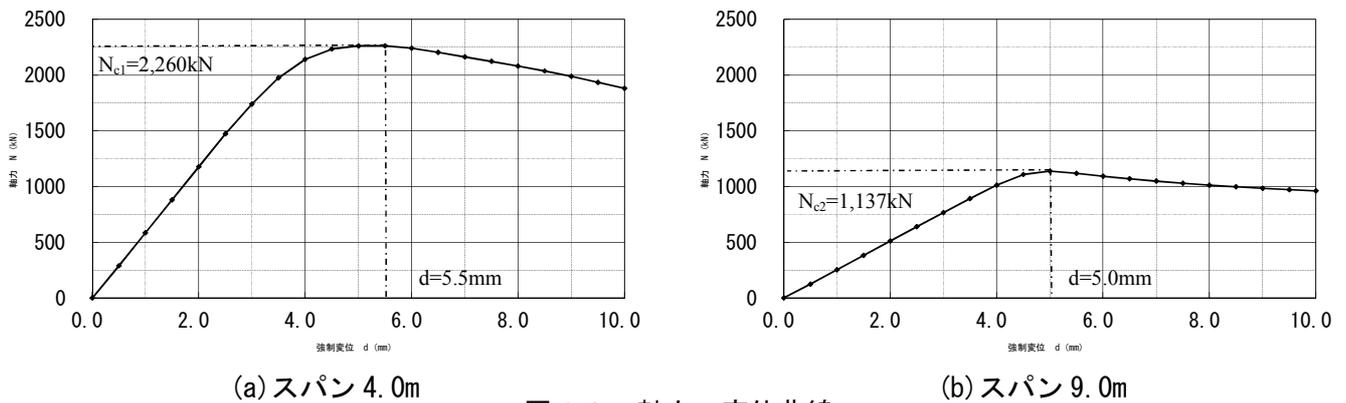


図 10 軸力-変位曲線

座屈荷重はこの曲線のピーク荷重であり、スパン 4.0m で $N_{c1}=2,260$ kN、スパン 9.0m で $N_{c2}=1,137$ kN が得られた。

6.3 $\bar{\lambda}$ および $\bar{\sigma}$ の計算

(1) $\bar{\lambda}$ の計算

$$\bar{\lambda} = 1/\pi \cdot \sqrt{\sigma_y/E} \cdot l/r$$

ここに, σ_y : 材料降伏強度(N/mm²)

E : 縦弾性係数(N/mm²)

l : 部材の有効座屈長(mm)

r : 部材の総断面の断面二次半径(mm)

(イ) スパン 4.0m の場合

$$\bar{\lambda} = 1/\pi \times \sqrt{245/2 \times 10^5} \times 4,000/75.1 = 0.59$$

(ロ) スパン 9.0m の場合

$$\bar{\lambda} = 1/\pi \times \sqrt{245/2 \times 10^5} \times 9,000/75.1 = 1.33$$

(2) $\bar{\sigma}$ の計算

$$\bar{\sigma} = \sigma_{cr}/\sigma_y$$

ここに, σ_{cr} : 座屈応力度(N/mm²)

σ_y : 材料降伏強度(N/mm²)

$$\sigma_{cr} = N_c/A$$

N_c : 座屈荷重(N)

A : 部材の断面積(mm²)

(イ) スパン 4.0m の場合

$$\sigma_{cr} = 2,260,000/11,980 = 188.64 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\bar{\sigma} = 188.64/245 = 0.77$$

(ロ) スパン 9.0m の場合

$$\sigma_{cr} = 1,137,000/11,980 = 94.9 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\bar{\sigma} = 94.9/245 = 0.38$$

6.4 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編との整合性

前述の計算によって得られた結果を元に道路橋示方書、図一解 3.2.1 の耐荷力曲線Ⅳと比較する。

設計スパン 4.0m および 9.0m の場合の座屈荷重解析結果を、道路橋示方書に記載される耐荷力曲線Ⅳに▲で示すと、ほぼ一致していることが確認できる (図 1 1)。

$$\left. \begin{array}{l} L=4.0\text{m} : \bar{\lambda} = 0.59, \bar{\sigma} = 0.77 \\ L=9.0\text{m} : \bar{\lambda} = 1.33, \bar{\sigma} = 0.38 \end{array} \right\}$$

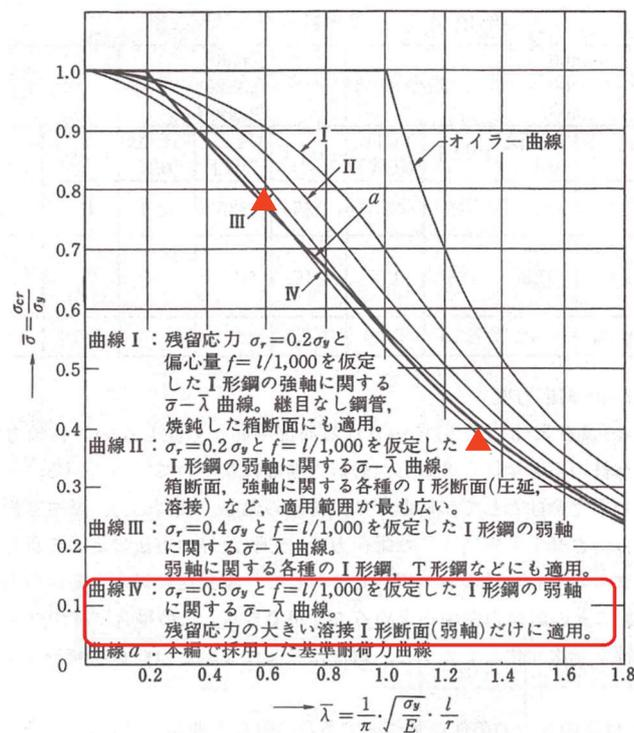


図 1 1 耐荷力曲線 (道路橋示方書より抜粋)

7. 実験との整合性

三次元非線形有限要素法による埋設型切り梁の解析手法の妥当性を検証するために、空洞金具を有する H 形鋼梁部材 (H-100×100×6×8×L3000) の実験を行った。

7.1 実験方法

軸力載荷装置を**写真 1**、供試体を**写真 2**、実験全景を**写真 3**に示す。供試体の両側には、**表 2**の拘束条件を満足する治具が設置され、両端単純支持となっている。

供試体を設置後、強軸まわりの曲げモーメントを作用させる。ここでは、等分布荷重の代わりにスパン中央に 300kg の重錘を吊るして集中荷重を載荷し (**写真 4**)、曲げモーメントを作用させた。続いて、重錘を吊るしたままジャッキストロークの制御により軸方向の圧縮強制変位を負荷し、この時の軸力を測定した。



写真 1 軸力載荷装置



写真 2 供試体



写真 3 実験全景



写真 4 集中荷重の載荷

7.2 実験結果

圧縮強制変位を横軸、軸力を縦軸に取ってグラフを作成すると図12の実験結果が得られた。ここに、青色線が実験結果、赤色線が三次元非線形有限要素法による解析結果であり、両者はほぼ一致していることが確認できる。写真5は、座屈後の変形状態を撮影したもので、断面強軸方向と弱軸方向の二方向に変形したことを示している。

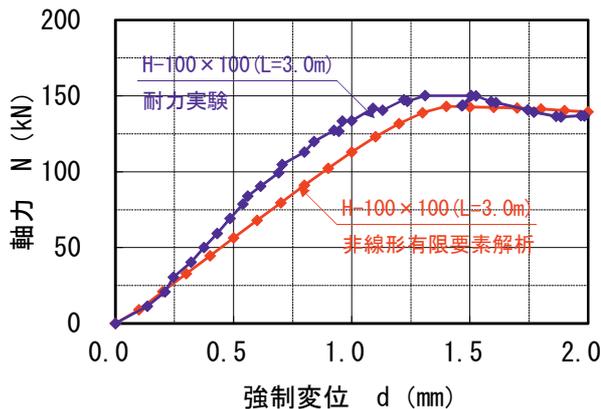


図12 軸力-圧縮強制変位曲線

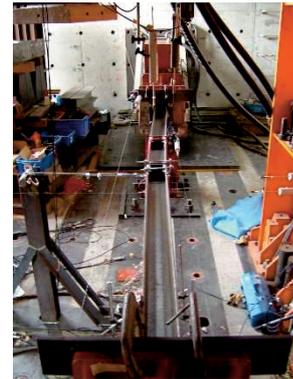


写真5 変形状態

8. まとめ

以上、三次元非線形有限要素法による解析結果が、道路橋示方書および実験結果に対してほぼ一致していることから、本解析手法は妥当であると判断できる。

したがって、スルーサーB許容耐力の照査は三次元非線形有限要素解析により行う。

(以上)

参考文献

- 1) (社)日本道路協会編, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 平成24年3月.
- 2) (社)日本道路協会編, 道路土工仮設構造物工指針, 平成11年3月.
- 3) (社)土木学会編, 新体系土木工学9 (構造物の座屈・安定解析), 昭和57年9月.
- 4) サイバネットシステム株式会社, ANSYS 構造非線形セミナー, 平成18年2月.