

鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル

中原 正人* 池田 学*
豊岡 亮洋** 永井 紘作***

Evaluation of the Seismic Load Carrying Capacity and the Hysteresis Model of Cast Iron Bearing

Masato NAKAHARA Manabu IKEDA
Akihiro TOYOOKA Kousaku NAGAI

It was recognized that many steel structures were damaged at bearings by earthquakes in the past. On the other hand, cast iron bearings are used in a lot of existing steel railway bridges. To evaluate seismic performance of the bridges precisely, it is necessary to model the seismic load carrying capacity and the hysteresis model of cast iron bearing that is considered to be a weak point of the bridge during earthquake. In this study, static monotonic and alternative loading tests using side block of cast iron bearing and sole plate were carried out. Further evaluation method of seismic load carrying capacity and the hysteresis model of the cast iron bearing were investigated.

キーワード：鋳鉄製支承，線支承，ソールプレート，耐荷力特性，復元力モデル

1. はじめに

過去の地震時の鋼構造物の被害の多くは支承部で生じている。1995年の兵庫県南部地震においても、鋼製の支承に比較的多くの損傷が生じていた^{1), 2)}。特に鋳鉄製の線支承で被害が多く発生しており、山陽新幹線の被災地域内の合成桁では鋳鉄製線支承の約1割に損傷が生じていた。その損傷部位としては、移動制限装置である突起やアンカーボルトの損傷が75%以上占めており、次いでソールプレートの損傷が多く生じていた。

鋼製支承に関する検討は、1978年宮城県沖地震での被害を契機として、町田³⁾がコンクリート桁用の鋳鉄および鋳鋼製支承を対象に、載荷実験やFEM解析等を行い、支承部の補強方法等を提案している。最近では、安原ら⁴⁾が鋳鋼製の支承を対象に載荷実験やFEM解析による検討を行い、その耐荷力の評価方法を提案しているものの、鋼鉄道橋用の鋳鉄製を含む鋼製支承の地震時挙動に関する検討は非常に少ない。一方、道路橋の鋼製支承に関する検討は、ピン支承、ローラー支承、BP沓などを対象に行われている^{5), 6)}が、鋳鉄製の線支承を対象とした検討はほとんど行われていない。そのため、鋳鉄製の線支承の耐荷力や地震時の解析に用いる復元力特性に関しては、不明な点が多く残されている。また、ソールプレートに関しては、被害事例は多くあるものの、今まで検討が行われてこなかったのが現状である。既設の

鋼鉄道橋には鋳鉄製の線支承が多く適用されており、その耐震性能の評価を行う上では、弱点となりうる支承部を精度良くモデル化する必要がある。そこで、本研究では、今までの地震被害事例から、鋳鉄製の線支承と、ソールプレートに着目し、静的な単調載荷実験および交番載荷実験を行い、耐荷力特性の評価方法や復元力モデルの設定方法について検討を行っている。本報告では、主に載荷実験と耐荷力の評価方法について記述し、復元力モデルの考え方を示す。

2. 鋳鉄製支承の載荷実験

2.1 実験概要

既存の鋳鉄製の線支承およびソールプレートの耐荷力特性と復元力モデルを設定するために、図1に示すような載荷装置を用いて載荷実験を行った。線支承は撤去された実橋梁のものをを用い、ソールプレートは新たに製作した。線支承を固定するために底面にアンカー鉄筋を溶接しRC製の台に埋め込んだ。なお、本実験では線支承の突起のみの耐荷力や地震時挙動に着目するためアンカーボルトは設置していない。載荷方法は、上部工反力として鉛直荷重(500kN)を保持した状態で水平荷重を載荷した。載荷方向は、ソールプレートは橋軸方向、線支承は橋軸直角方向に対して行い、ソールプレートの載荷実験後に線支承の載荷実験を行った。測定は、水平荷重載荷点の荷重と載荷梁の変位、ソールプレートおよび線支承のひずみ、変位等について行った。

実験供試体の諸元一覧を表1、表2および供試体形状

* 鋼・複合構造

** 京都大学大学院(工学研究科)

*** 前 鋼・複合構造(現 小金井市役所)

特集：構造物の耐震技術

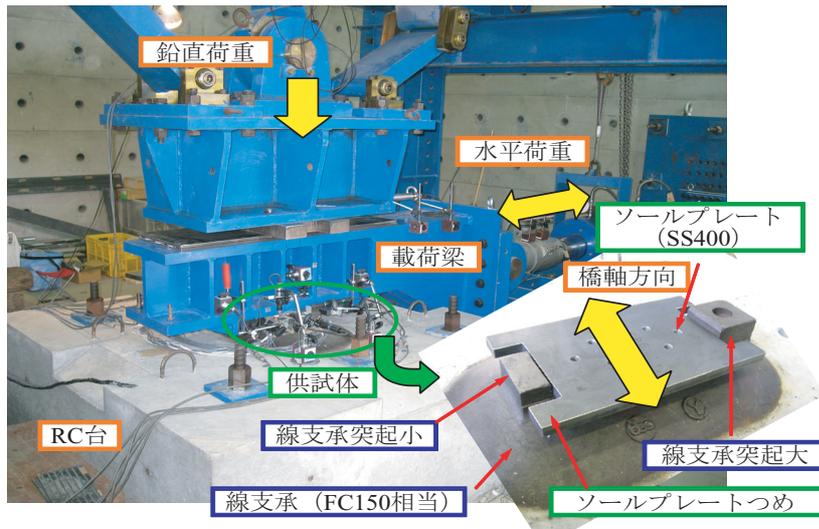


図1 载荷実験概要

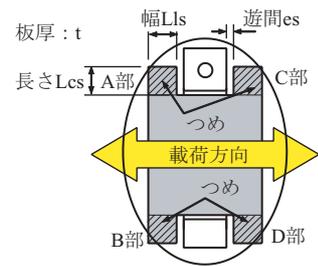


図2 ソールプレートの供試体形状

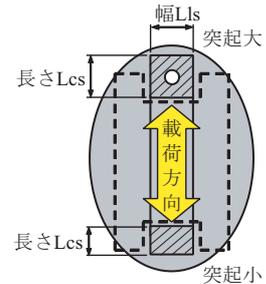


図3 線支承の供試体形状

表1 ソールプレートの供試体諸元一覧 (SS400)

供試体 No.	Lls × Lcs × t (mm)	遊間 es (mm)	備考
SP1	50 × 50 × 22	2	固定用, 単調载荷
SP2	50 × 50 × 22	30	可動用, 交番载荷
SP3	50 × 50 × 22	8	可動用, 交番载荷 施工誤差 (回転) ^{注1)}
SP4	50 (46) × 50 × 22	8 (12)	可動用, 交番载荷 Lls=46mm1箇所 (A部)
SP5	50 (48) × 50 × 22	8 (10)	可動用, 交番载荷 Lls=48mm2箇所 (A, C部)
SP6	30 × 50 × 22	6	可動用, 交番载荷

注1) 線支承中心線に対してソールプレートを2°回転して配置している。

注2) () 内数値は形状変更部の数値を示している。

表2 線支承の供試体諸元一覧 (FC150相当)

供試体 No.	Lls × Lcs	備考
SB1	突起小: 100 × 50	荷重単調増加
SB2	突起大: 100 × 100	正負交番载荷

を図2, 図3に示す。表1はソールプレートの供試体諸元を示しており, SP1は固定用, SP2からSP6は可動用のソールプレートを想定している。可動支承用のソールプレートのうち, SP2を標準形状とし, SP3~SP5はソールプレートと線支承の当り方の相違による影響を把握するために, ソールプレートの設置, つめ形状および遊間を変更している。SP6は幅Llsを標準形状SP2の50mmに対して30mm, 遊間は30mmに対して6mmとしている。载荷方法は, SP1は耐荷力の測定を主目的として変位制御により単調载荷を行った。SP2~SP6は変形性能の測定を主目的として交番载荷を行った。载荷履歴は設計引張降伏強度から算出した降伏変位を基準として2mmずつ変位を増加する方法とし, 繰り返し回数は1回とした。

表3 ソールプレートの材料引張試験結果

試験片 No.	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
規格値	—	400以上	21%以上
SP1	268.9	420.6	40.0
SP2	276.1	424.7	38.0
SP3	276.7	423.8	39.8
SP4	269.3	411.4	39.8
SP5	276.5	425.2	40.1
SP6	268.0	430.4	38.2

表4 線支承の材料引張試験結果

試験片 No.	引張強さ (N/mm ²)
規格値	80以上 ^{注1)}
SB1	121.5

注1) 規格値は, JIS G 5501の実体強度用供試材の機械的性質 (FC150, 鋳造品の肉厚80mm以上150mm未満) より設定した。なお, FC250の場合は155 N/mm²以上である。

载荷は荷重が最大点を超え, 降伏荷重程度に低下するまで行った。

表2は線支承の供試体諸元を示している。SB1, 2とも供試体形状は同じであり, アンカーボルト用孔がある突起大と孔がない突起小がある。载荷方法はソールプレートと同様の目的で, SB1は単調载荷, SB2は交番载荷としており, SB1は変位制御により突起大側および突起小側にそれぞれの方向に単調载荷を行った。SB2の载荷履歴は150kNを基準として50kNずつ荷重を増加する方法とし, 繰り返し回数は1回とした。

2.2 材料試験結果

実験に用いたソールプレートおよび線支承から材料試

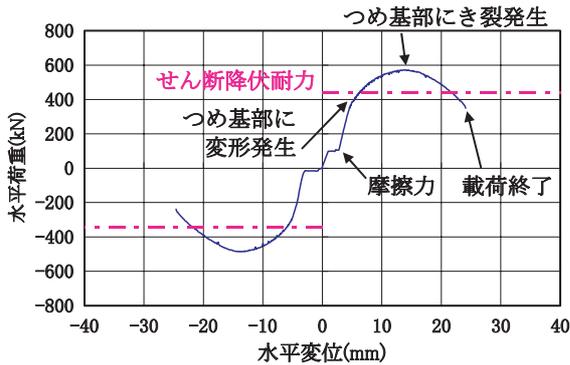


図4 SP1 荷重－変位関係

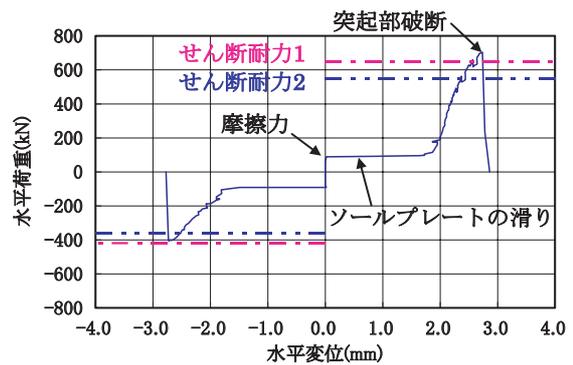


図7 SB1 荷重－変位関係

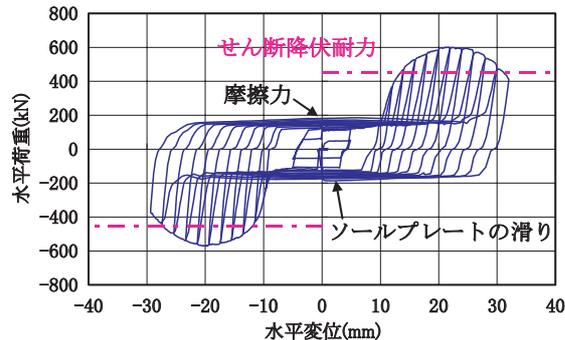


図5 SP3 荷重－変位関係

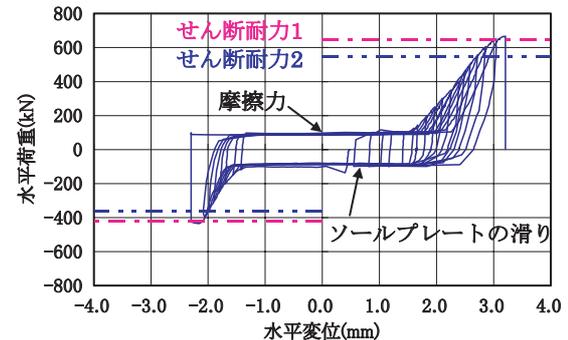


図8 SB2 荷重－変位関係

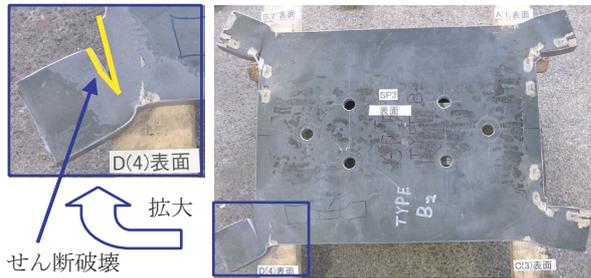
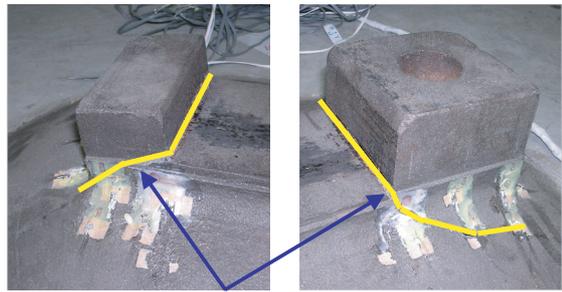


図6 SP3の破壊状態



(a) 突起小 (b) 突起大

図9 SB2の破壊状態

表5 ソールプレートの最大荷重（実験結果）

供試体 No.	最大荷重 (kN)		供試体 No.	最大荷重 (kN)	
	正側	負側		正側	負側
SP1	572.0	486.5	SP4	559.0	525.5
SP2	637.9	621.2	SP5	570.1	561.7
SP3	601.7	571.9	SP6	414.1	400.2

注) 表中の値は、摩擦力を含めた値を示している。

表6 線支承の最大荷重（実験結果）

供試体 No.	最大荷重 (kN)	
	突起大	突起小
SB1	703.8 (603.8)	406.7 (306.7)
SB2	666.7 (566.7)	435.5 (335.5)

注) 摩擦力を除いた値を () 内に示している。

験片を採取し、材料試験（引張試験およびシャルピー衝撃試験）を行った。引張試験はJIS4号試験片を用い、ソールプレートの各供試体および線支承SB1から3片ずつ採取して行った。表3にソールプレート、表4に線支承の材料引張試験結果を示す。ソールプレートについては、すべての供試体において、引張強さおよび伸びが規格値を上回った。一方、線支承については材質が不明であったが、従来、鋼鉄道橋の線支承の材料としてはFC150とFC250が用いられており、材料試験結果から線支承の使用材質はFC150相当であると判断した。また、シャル

ピー衝撃試験より、それぞれの材料について所定のシャルピー吸収エネルギーがあることを確認した。

2.3 载荷実験結果

(1) ソールプレート

図4にSP1、図5にSP3の荷重－変位関係および図6にSP3の破壊状態を示す。また、図4および図5には後述するせん断降伏耐力を示している。

SP1においては、上部工反力による摩擦力の影響を把握するために、正側に载荷する場合は鉛直荷重(500kN)

特集：構造物の耐震技術

を載荷し、負側の場合は無載荷としている。これより、摩擦力は約 100kN であることが分かった。

図4および図5の荷重－変位関係は同様の傾向をしており、以下の通りであった。荷重を増加していくと摩擦力に相当する荷重に達するとソールプレートが滑り出し、荷重が一定のまま変位が遊間に相当する値まで増加する。その後は、ソールプレートのせん断降伏耐力と評価する荷重（折れ点）まではほぼ線形を呈して荷重と変位が増加し、その後は徐々に塑性域に入り、最大荷重に達した後に荷重が緩やかに低下した。上記の傾向は他の供試体においても同様であった。また、供試体のき裂発生状況を確認すると、ソールプレートのつめは図6に示すようにせん断破壊（SP2の一部は曲げ破壊）していたが、最大荷重到達後も脆性的な破壊をしないでエネルギーを吸収する十分な変形性能があることが確認できた。

表5に各供試体の最大荷重を示す。SP2の値が他の供試体に比べて若干大きな値をしているが、これは載荷実験の進行に伴ってソールプレートのつめが線支承の突起部に少し斜めに当るようになり、荷重が一様に作用せず曲げが加わったことが原因と考えられる。これより、SP3以降の供試体については、荷重が一様に作用するように載荷時に配慮した。また、SP3～SP5の結果から、今回の形状ではソールプレートと線支承の当り方の相違による最大荷重および破壊形態に与える影響は小さかった。

(2) 線支承

図7にSB1、図8にSB2の荷重－変位関係を示す。また、図中には後述するせん断耐力1および2を示している。

線支承においては、ソールプレートと線支承が当るまではソールプレートと同様であるが、その後は、ほぼ線形に荷重と変位が増加し、線支承のせん断耐力と評価する荷重（最大荷重）に達すると急激に荷重が低下する脆性的な破壊形態を示した。図9にSB2の破壊状態を示す。線支承の突起の破断面は、突起大、突起小とも荷重載荷面側の付け根から荷重載荷面の反対側の付け根を結ぶ面であった。これは、SB1も同様であった。

表6に各供試体の最大荷重を示す。表中には、摩擦力を差し引いた場合の値も併せて示している。なお、摩擦力はすべての突起において一律に100kNとした。載荷方法の違いによる差異は10%程度であった。

3. 鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル

3.1 ソールプレート

(1) 地震時耐荷力特性の評価

ソールプレートの耐荷力特性は、上述の実験結果より図10に示すように評価できる。なお、図中には後述する復元力モデルも示している。以下に各折れ点の荷重の評価方法を示す。

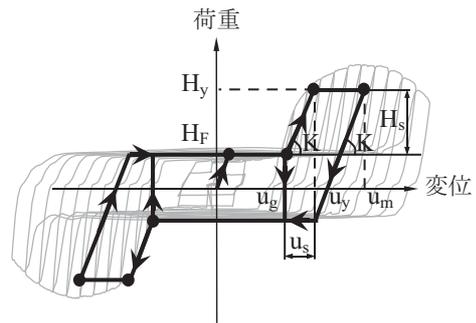


図10 ソールプレートの耐荷力特性と復元力モデル

表7 ソールプレートのせん断降伏耐力（計算結果）

供試体 No.	せん断降伏耐力 (kN)	供試体 No.	せん断降伏耐力 (kN)
SP1	441.0 (341.0)	SP4	441.0
SP2	449.8	SP5	452.0
SP3	452.0	SP6	304.6

注) 表中の値は、摩擦力 (100kN) を含めた値を示しており、SP1の負側は鉛直荷重がないため摩擦力を0とした値を () 内に示している。

- ①摩擦力 (H_r) は実験結果より約 100kN であったが、上部工反力 (500kN) に設計で用いられる鋼と鋳鉄の摩擦係数 0.20⁷⁾ を乗じた値 ($500 \times 0.20 = 100\text{kN}$) と一致しており、同方法によって評価できると考えられる。
- ②ソールプレートのせん断降伏耐力 (H_y) は、実験結果では摩擦力 (H_r) にソールプレートのつめのせん断降伏耐力 (H_s) を加えた値とよく一致しており、同方法により評価できると考えられる。なお、ソールプレートのつめのせん断降伏耐力は、材料引張試験から得られる引張降伏強度を用いたミーゼスの降伏条件に基づくせん断降伏強度にソールプレートのつめの断面積を乗じて算出している。表7にせん断降伏耐力の計算結果を示す。
- ③最大荷重については、実験では降伏以降も荷重が増加することが確認されたが、様々な点から検討しても精度よく評価できなかつたため、ここでは降伏以降は荷重は一定と評価する。

(2) 復元力モデルの設定

ソールプレートの復元力モデルは、図10に示すように設定する。荷重が摩擦力に達して滑り出してから、変位が遊間に相当する値 (u_g) になるまでは、摩擦型バイリニアモデルとする。その後は、ソールプレートのせん断降伏耐力 (H_y) を折れ点とするスリップ型バイリニアモデルとする。 u_g から降伏変位 (u_y) までの変位 (u_s) はソールプレートのつめのせん断変形量とすることで評価できると考えられる。最大変位 (u_m) は最大荷重時の変位とし、 $u_y + \alpha \cdot u_s$ で算出することとする。なお、係数 α は今回の実験結果では 2.0～3.0 程度であったが、最大荷重と併せて今後の検討課題である。また、除荷後の剛性は初期剛性 (K) と同じとする。

3.2 線支承

(1) 地震時耐荷力特性の評価

線支承の耐荷力特性は、上述の実験結果より図11に示すように評価できる。なお、図中には後述する復元力モデルも示している。以下に各折れ点の荷重の評価方法を示す。

- ①摩擦力 (H_F) は、ソールプレートと同様である。
- ②最大荷重 (H_m) は摩擦力 (H_F) に線支承の突起部のせん断耐力 (H_s) を加えた値として評価できると考えられる。線支承の突起部のせん断耐力の算出方法については (3) で詳述する。

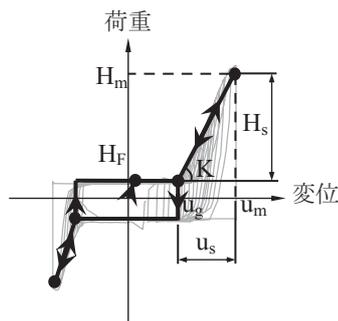


図 11 線支承の耐荷力特性と復元力モデル

(2) 復元力モデルの設定

線支承の復元力モデルは、図 11 に示すように設定する。ソールプレートと線支承が当たるまではソールプレートと同様である。その後は、線支承のせん断耐力 (H_m) を最大荷重とする線形モデルとする。 u_g から最大変位 (u_m) までの変位 (u_s) は線支承の突起部のせん断変形量とすることで評価できると考えられる。

(3) 線支承の突起部のせん断耐力の算定

線支承の突起部のせん断耐力の算出方法として、文献 4) に FEM 解析による突起付け根平面の塑性化状態からせん断応力分布状態を仮定する方法が報告されている。すなわち、図12に示すようにせん断応力が荷載面側の半断面はせん断降伏応力に達し、反対側はせん断降伏応力から0まで直線低減する台形分布と仮定するものである。しかしながら、既往の研究成果における解析は限られた条件で行われたものであり、これらの成果を補完する目的で、文献 4) と同様の3次元弾塑性 FEM 解析を実施した。以下に解析の概要を示す。

- ①解析モデルを図13に示す。線支承のモデル化は、ソリッド要素を用い、メッシュサイズは0.6mm程度とした。解析には、汎用 FEM 解析ソフト ABAQUS を用いた。
- ②境界条件は、線支承底面はすべての自由度に対して固定 (完全固定) とした。
- ③荷重方向は実験と同様に橋軸直角方向を対象とした。荷重は、突起全面に一樣分布の荷重を単調に荷重した。
- ④材料条件は、線支承の引張試験から得られた応力-ひずみ関係を曲線近似して用いた。ポアソン比は設計値⁷⁾として用

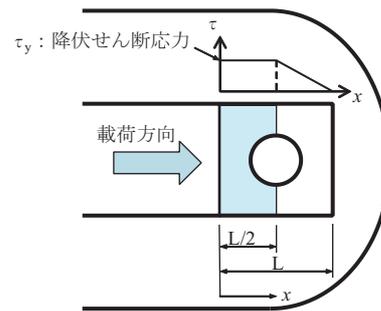


図 12 せん断応力分布の仮定

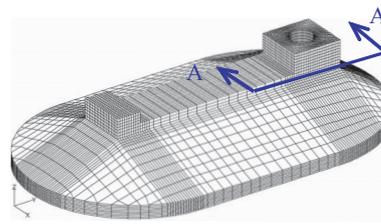


図 13 線支承の FEM 解析モデル

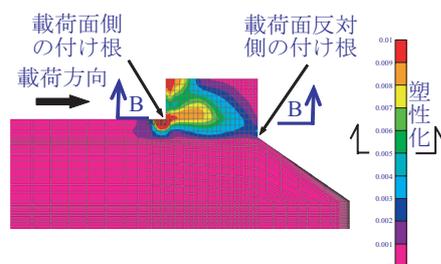


図 14 最大主ひずみ分布 (A-A 断面)

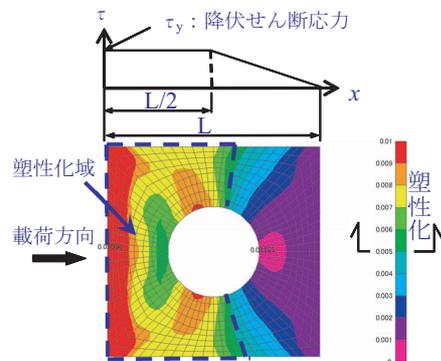


図 15 突起付け根の塑性化状態 (B-B 断面)

表 8 最大荷重の実験結果と FEM 解析結果の比較

供試体 No.	突起大 (kN)			突起小 (kN)		
	実験値 A	解析値 B	A/B	実験値 A	解析値 B	A/B
SB1	603.8	510	1.18	306.7	320	0.96
SB2	566.7		1.11	335.5		1.05

いられている 0.25 を用いた。

表 8 に最大荷重の実験・解析結果を示す。解析値の方が若干小さいが、突起小は実験値と解析値が概ね一致しており、突起大の解析値は突起付け根の面積比を考慮すると妥当な結果となっている。また、図 14 に示す最大主

特集：構造物の耐震技術

ひずみ分布より、塑性化が荷重載荷面の突起付け根から載荷面の反対側の突起付け根に進行しており、実験の破壊形態を裏付けている。以上から解析結果は妥当であると判断し、突起平面における塑性化状態を検討する。検討面は破断面とするのがよいと考えられるが、ひずみ分布が大きく異なることから、ここでは、突起付け根平面で検討する。図15に示す塑性化状態より、塑性化は突起付け根平面の半分以上に及んでおり多少範囲が大きい、突起付け根のせん断応力分布は既往の研究結果と同様の分布と仮定することとした。なお、塑性化状態は突起小も同じ傾向であった。

上記に示すせん断応力分布を考慮して、線支承の突起部のせん断耐力を算出した。なお、算出に用いるせん断強度は、設計値と同様に引張強度の70%⁷⁾とした。算出結果をせん断耐力1とし、実験・計算結果を表9に示す。これより、実験値と計算値はSB1の突起大を除くと5%程度の誤差であり、せん断耐力は同算出方法により精度よく評価できることが分かった。

表9 実験結果と計算結果（せん断耐力1）の比較

供試体 No.	突起大 (kN)			突起小 (kN)		
	実験値 A	解析値 B	A/B	実験値 A	解析値 B	A/B
SB1	603.8	545.6	1.11	306.7	319.1	0.96
SB2	566.7		1.04	335.5		1.05

しかしながら、線支承は脆性的な破壊形態であるため実設計で用いる場合は、安全側に評価する方法として、せん断耐力の算出に用いるせん断強度は、一般に鋼材に適用されるミーゼスの降伏条件に基づいて、引張強度を $1/\sqrt{3}$ (=0.58) 倍した値とするのがよいと考えられる。算出結果をせん断耐力2とする。なお、せん断耐力1および2は前記の図7および図8中に示している。

4. 結論

既存の鋳鉄製の線支承およびソールプレートに着目した載荷実験および材料試験を行い、その結果から地震時耐荷力特性と復元力モデルを検討した。

ソールプレートのつめのせん断降伏耐力は、せん断降伏強度につめの断面積を乗じて算出できることが分かった。また、復元力モデルは、荷重が摩擦力に達して滑り出し、変位が遊間に相当する値に達するまでは摩擦型バイリニアモデルとして、その後は、摩擦力にソールプレートをつめのせん断降伏耐力を加えた値を降伏荷重とするスリッブ型バイリニアモデルとして評価できることが分かった。

線支承の突起部のせん断耐力は、既往の研究結果とFEM解析結果により仮定したせん断応力分布を考慮して、せん断強度に突起部の断面積を乗じて算出できることが

分かった。なお、せん断耐力は設計値と同様に引張強度の70%の値をせん断強度として用いて算出すると実験結果を精度よく評価できることが分かったが、線支承は脆性的な破壊形態であるため実設計で用いる場合は、安全側に評価する方法として、ミーゼスの降伏条件に基づいて、引張強度を $1/\sqrt{3}$ (=0.58) 倍した値をせん断強度とするのがよいと考えられる。また、復元力モデルは、荷重が摩擦力に達して滑り出し、変位が遊間に相当する値に達するまではソールプレートと同様とし、その後は、摩擦力に線支承の突起部のせん断耐力を加えた値を最大荷重とする線形モデルとして評価できることが分かった。

5. おわりに

今後は、ソールプレートについてFEM解析を行い、最大荷重および最大変位の評価方法を検討する予定である。また、線支承に用いられている鋳鉄は、衝撃力に対しては脆い性質があるため、動的な載荷実験を行う予定であり、上記を踏まえてより汎用性のある復元力モデルの構築を目的にさらに検討を進める。

謝辞

鋳鉄製の線支承の提供にご協力頂いた東京急行電鉄株式会社、撤去・搬送にご協力頂いた東日本旅客鉄道株式会社、ならびに載荷実験および材料試験においてご協力頂いた株式会社 TESS の関係各位に感謝の意を表する。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害報告書，鉄道総研報告（特別第4号），1996.4
- 2) 安原真人，市川篤司，村田清満，杉本一郎，川井治：鋼鉄道橋支承部の損傷と復旧，橋梁と基礎，pp.65-68，1996.8
- 3) 町田富士夫：桁式コンクリート鉄道橋支承部の耐震設計に関する研究：鉄道技術研究報告，No.1175，1981.3
- 4) 安原真人，藤橋秀雄，市川篤司，水谷太作：既設鋼鉄道橋の鋼製支承の水平耐力評価法に関する実験および解析的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.633-644，2003.3
- 5) 藤野陽三，阿部雅人，宇佐美哲他：金属支承に関連した兵庫県南部地震における道路橋の被害分析と終局水平挙動に関する実験的検討，第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.191-197，2000.1
- 6) 大塚久哲，山平喜一郎，増田耕一他：兵庫県南部地震における鋼製ピン支承の破壊プロセスに関する実験的考察，鋼構造論文集，第7巻第28号，pp.19-31，2000.12
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），2000.7