

# 断層交差角度に着目した 橋梁の挙動特性に関する基礎的研究

室野剛隆<sup>1</sup>・弥勒綾子<sup>2</sup>・紺野克昭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 副主任研究員, 工学博士  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: muro@rtri.or.jp

<sup>2</sup>(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 研究員

E-mail: miroku@rtri.or.jp

<sup>3</sup>芝浦工業大学土木工学科助教授, 工学博士 (〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)

E-mail: konno@sic.shibaura-it.ac.jp

地表地震断層を跨ぐ構造物にとって、断層交差角度は地震時挙動を支配する重要なパラメータの一つである。筆者らは、地表地震断層を模擬した実験模型を用いて、橋梁の破壊メカニズムを検証している。その結果、橋梁が断層を跨ぐ角度によって、桁の変形モードと損傷パターンが異なることが分かった。桁長を長くすると落橋に対して有利かと思われたが、桁の回転角度が小さくなり線路方向のはらみ出し量が減少するため、逆に不利な結果となった。また、幾何学的関係による簡易算定法を用いて桁の挙動メカニズムを検証し、今後の実設計に適用する際の足がかりを得た。

**Key Words :** *Surface fault deformation, Bridges, Fault-crossing angle, Seismic design*

## 1. はじめに

1999年のトルコ・コジャエリ地震や台湾集集地震では、あらためて地表地震断層による土木構造物の被害の恐ろしさを認識させられた<sup>1)2)</sup>。また、1998年の岩手県中北部地震では地表に現れた変位は僅かであったにもかかわらず放水路の被害も報告されている<sup>3)</sup>。ただし、この問題は特に新しい問題として突然に提起されたわけではなく、濃尾地震に伴って現れた根尾谷断層は最大10mのずれが生じ、多くの技術者がその写真を目にしているはずである。しかし、現行の耐震設計のほとんどは、専ら地盤震動により構造物が揺さぶられることにより生じる応力や変形を照査することに力点が置かれてきた。鉄道の耐震標準<sup>4)</sup>でも、兵庫県南部地震での苦い経験を受けて、いわゆるL2と言われる大地震の揺れに対する応答計算法や照査法が大幅に見直されてきた。しかし、断層変位に対する対策としては、当時の被害データの蓄積や解析技術レベルを考慮して、被害を受けても復旧しやすい構造とすること、ソフト的な対応策を用意すること、の2点が記載されているのみである。土木学会の耐震設計のガイドライン<sup>5)</sup>でも同様の記述がされている。しかし、近

年では先に述べた地震による被害データの蓄積や被害解析<sup>6)7)</sup>、大変形問題を扱う解析手法の進歩<sup>8)9)</sup>により、断層の進展に伴ってどのような変形が発生するかを解析的に表現できるようになりつつある。

さて、断層変位に対する最も有効な策は、断層を避けて建設することであると思われる。米国・カルフォルニア州では、地表に現れている断層上での開発を規制する州法を1972年に制定し、必要な整備が順次進められている。しかし、我が国は伏在断層を含め多数の活断層が存在し、鉄道や道路などの線状ライフライン構造物を活断層を完全に避けて建設する事は非現実的な対応と言える。どこかで活断層を跨いで建設せざるを得ない場面も想定しなければならないのが現状であろう。このような現状を考えると、どのように断層を跨ぐかを考える必要がある。つまり、断層と構造物の交わる角度により、構造物の損傷状況がどのように変化するかを検討しておくことは極めて重要である。この関係が定性的・定量的に把握できれば線路線形を多少変更することにより、有利な構造計画を考えることが可能であり、技術的対処法と組み合わせることにより、断層変位に対して有効な方策となるとと思われる。そこで、本研究では、断層変位を模擬した変位を模型橋梁に強制

的に載荷できる装置を開発し，その装置を用いて断層と橋梁の交差角度により橋梁全体がどのような変形モードを示し破壊パターンを呈すのかを実験的に検討するとともに簡易な予測式を構成し，実務的な範囲で断層変位による影響を考慮できるノモグラムを作成した。

## 2. 実験の概要

### (1) 載荷装置および橋梁模型

載荷装置は，横ずれ断層を模擬し，水平 2 方向（左右）に移動可能な可動盤と固定盤の 2 つの台から構成されている(図 1)．その上にアクリル製の橋梁模型（概ね 1/50 程度）を設置した．また，桁や載荷テーブルに標点を貼付け，その動きを真上からデジタルビデオで撮影し，その映像を画像解析システムにより桁の面内の 2 次元的な動きを追跡した．ストッパーは 5mm のゴム製で，ある程度の変形で破断する材質とした。

### (2) 実験ケース

実験では，断層直上桁の桁長を 400mm，800mm，1200mm の 3 パターンとし，桁長が 400mm でスパン数が多い場合についても実施した．実験ケースを図 2 に示す．また，それぞれのケースでは，交差角度による構造物の損傷・破壊への影響を検討するために，交差角度を 30, 60, 90, 120, 150° とした 5 ケースを考えた。

### (3) 計測方法

載荷盤に，2mm ずつ小刻みに静的な変位を与え，各時点での支承部の損傷状況，桁の接触状況などを計測する．支承部は各桁につき，固定側・可動側各 2 個ずつ設置し，ひび割れ，破断などの損傷度を記録した。

## 3. 実験結果

### (1) 桁落橋時の断層変位量

図 3 に，各ケースにおいて実験中落橋した時点の断層変位量を示す．交差角度が 90° に近づくにつれ変位量は増加し，落橋しにくい傾向を示す．交差角度が 90° の場合には，全ケースとも落橋に至ることはなく，落橋に対して最も有利な条件であるといえる．また，CASE-2，CASE-3 のように直上桁のスパン長が長くなるケースでは，より早い時点で落橋する傾向にある．断層直上の桁長以外が同条件である場合，図 4 に示すように，同じ断層変位量  $D$  に対して桁の回転角度は桁長が長い方が小さくなり，桁のはらみ出し量  $\delta$  が小さくなる．その結果，桁長が長い方が落橋しやすくなると考えられる．従って，スパン長を長くしても構造物にとって有利にならない場合もある事を示唆している。

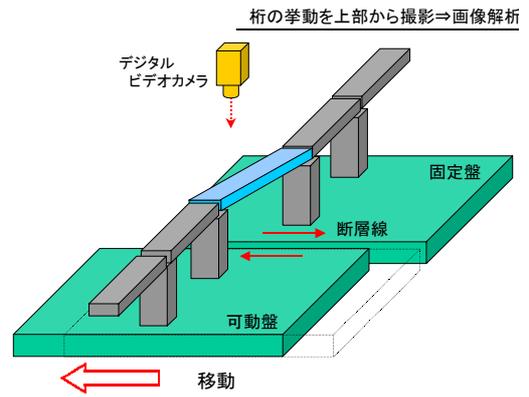


図-1 実験概要

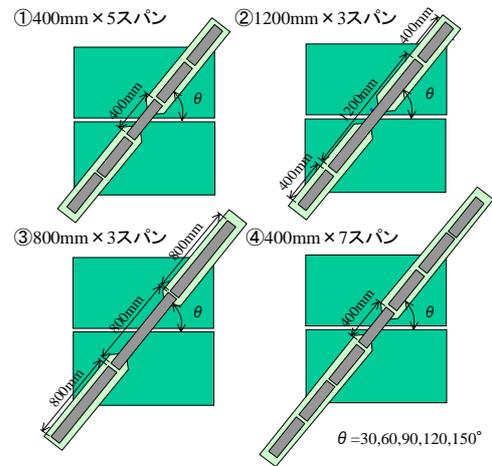


図-2 実験ケース

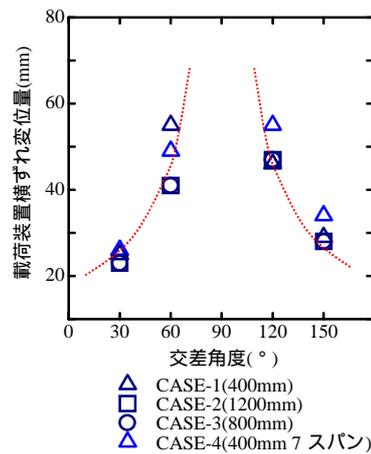


図-3 落橋時変位量

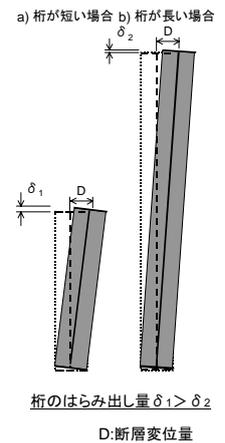


図-4 桁の回転と隅角部

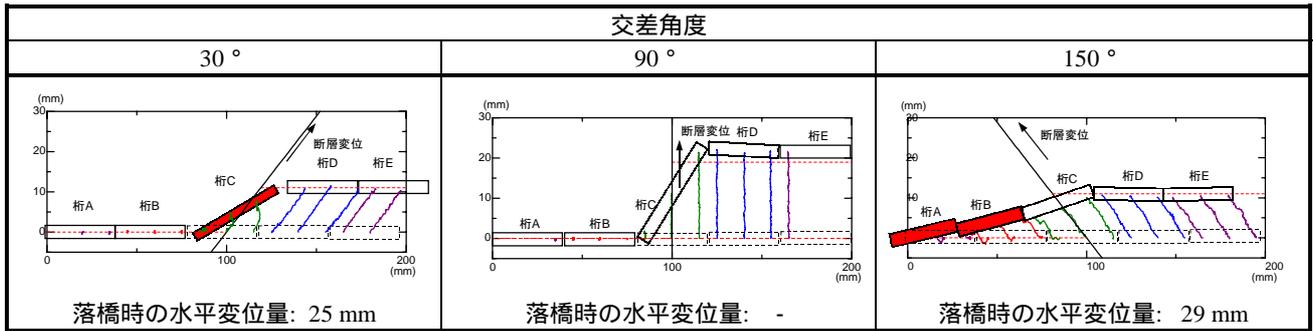


図-5 桁の変形モード

		水平変位量	
		20mm	60mm
交差角度	30°		
	90°		
	150°		
支承部の損傷度合		<p>① - : 損傷なし          ② Δ : 軽微な損傷(ひび割れ)          ③ ▲ : 重度の損傷(破断)</p>	
		ゴム支承の直径: 5mm	

図-6 支承の破壊モード

(2) 桁の変形モード<sup>10)</sup>

桁の変形モードは、全てのケースで同じ傾向がみられた。実験中装置上部からビデオカメラで撮影し、桁の挙動を追跡したものを図5に示す。CASE-1において、荷重装置が20mm変位した時の桁の変形モードおよび落橋時の荷重装置変位量を示す。図中の値は模型上の寸法を示し、横軸と縦軸のスケールは異なっている。色つきの桁は、実験中に落橋した桁を表す。また、表中には落橋時の可動盤の水平変位量を示す。

90度以下の交差角度では、断層を跨ぐ橋梁にとっては引張方向の変形が作用するので、桁同士が接触することもなく、断層を跨ぐ桁のみに被害が集中する。その結果、他のスパンには影響が波及しない。交差角度90度の場合には、断層を跨ぐ2橋脚の橋軸方向間隔は一定なので非常に落橋しにくく、実験中落橋に至ることはなかった。ただし、隣接の桁には影響が波及し、隣接桁が押し出されるような変形を

する。90度以上の交差角度では、断層を跨ぐスパンにとっては圧縮方向の変形なので、直上桁そのものは落橋に至りにくいものの、次々に隣接スパンに伝播し、最終的には全スパンに影響が及んだ。なお、全ての実験ケースで同様の傾向が見られた。

(3) 支承の破壊モード

図6に20mmおよび60mm荷重時の支承部の破壊モードを示す。ただし、90度以外のケースでは60mm荷重到達前に桁が落橋したため、落橋時の損傷度とする。図内の支承部に記した記号は、ひび割れを、完全に破断した状況を示す。90度では、他のケースに比べて損傷の出現が顕著に遅い。また、90度以下のケースでは断層直上の桁のみに損傷が集中しているのに対し、150度のケースではほぼ全桁の支承が損傷している。このように、交差角度が大きくなるにつれて広範囲に被害が拡大する

傾向は、全ての実験ケースで同様であり、また桁の変形モードにおいてみられた傾向と同様である。

#### 4. 破壊過程および簡易算定法

桁の変形モード（画像解析結果）および支承の損傷状況から、断層を跨ぐ角度が  $90^\circ$  以上であるか  $90^\circ$  以下であるかによって、橋梁が全く異なる破壊過程を辿る。そのため、算定方法も交差角度  $< 90^\circ$  と  $> 90^\circ$  とで区分して考える必要がある。断層と構造物の幾何学的関係を図7に示し、算定方法の詳細を以下に記す。

##### i) $< 90^\circ$ の場合：

断層変位によって直上桁の橋脚間隔が広がる。支承部にひび割れ・破壊が生じる。橋脚の桁かかり以上間隔が広がると落橋に至る。これらの特性より、以下のような算定式が導かれる。桁長を  $L$ 、桁幅を  $B$ 、断層変位量を  $D$ 、桁と断層の交差角度を  $\theta$ 、桁の回転角度を  $\varphi$  とすると、軸方向の桁変形量  $G_L$  は、式(4.1)で表される。 $G_L$  が桁かかり余裕量に等しくなった時点で落橋すると判定できる。

$$G_L = D \cos \theta + (L - L \cos \varphi) - \frac{B}{2} \sin \varphi \quad (4.1)$$

##### ii) $> 90^\circ$ の場合：

断層変位によって直上桁の橋脚間隔が狭まる。直上桁の支承全てがほぼ同時に破壊する。線路方向に圧縮力が働き、隣接桁を次々と押し出し断層直上から離れた位置の所が落橋に至る。この場合、軸方向の桁変形量  $G_L$  は式(4.2)で示され、桁かかり余裕量と遊間の総計に等しくなった時点を落橋と判定する。

$$G_L = D \cos \theta \quad (4.2)$$

断層と構造物の幾何学的関係から落橋時の断層変位量を算定し、実験から得られた値とともに図8に示す。なお、常田<sup>11)</sup>も同様の簡易式を導いており、ノモグラムを提示している。ただし、この方法では  $90^\circ$  以下の検討のみであること、及び、桁の回転による軸方向のはらみ出しの効果を無視している。この場合には、スパン長が長いほど落橋に対して有利になる結果が得られるが、3.(1)でも述べたように実験とは異なる結果を与える。それに対して、本論文で提案する方法では、算定値は実験から得られた結果とほぼ一致しており、簡易算定法によって桁の変形量はおおよそ推定可能であるといえる。ただし、スパン数が多く線路方向に大きな拘束力が働く場合には、実際には算定値よりやや落橋しにくい傾向を示す。今後は、より高精度な解析を行い、様々

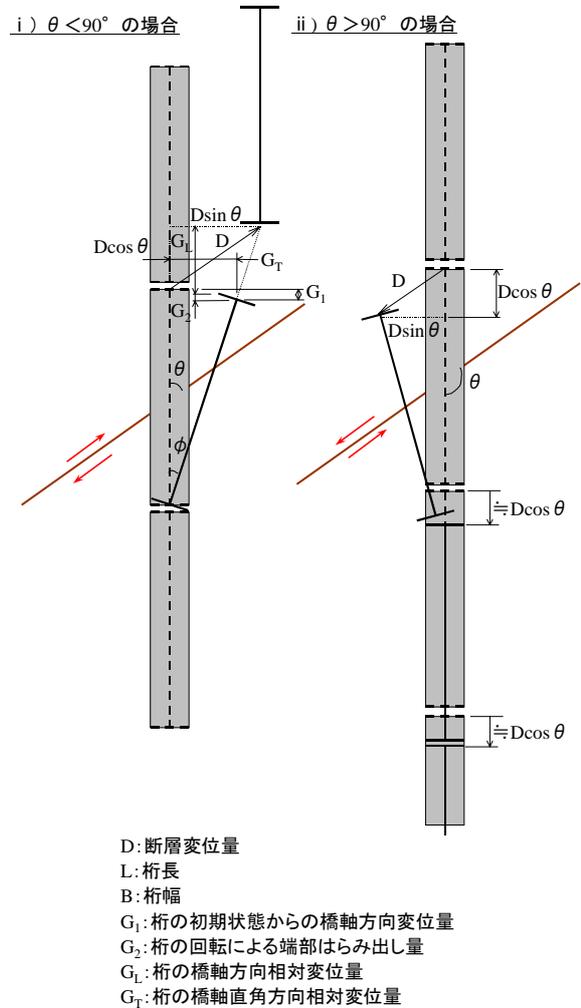


図-7 簡易式算定において仮定した断層と構造物の幾何学的関係

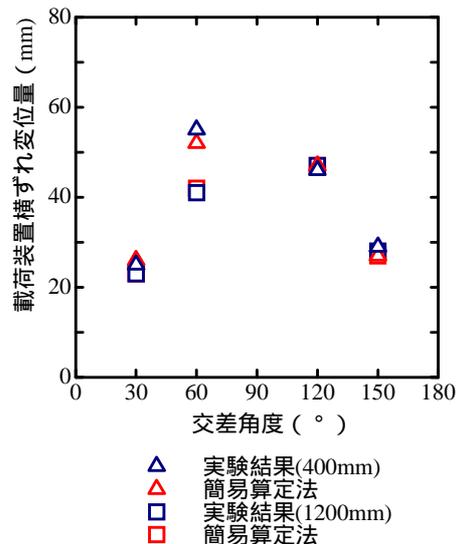


図-8 実験結果と簡易算定法の比較

な諸条件を反映したモデルを構築する必要がある。

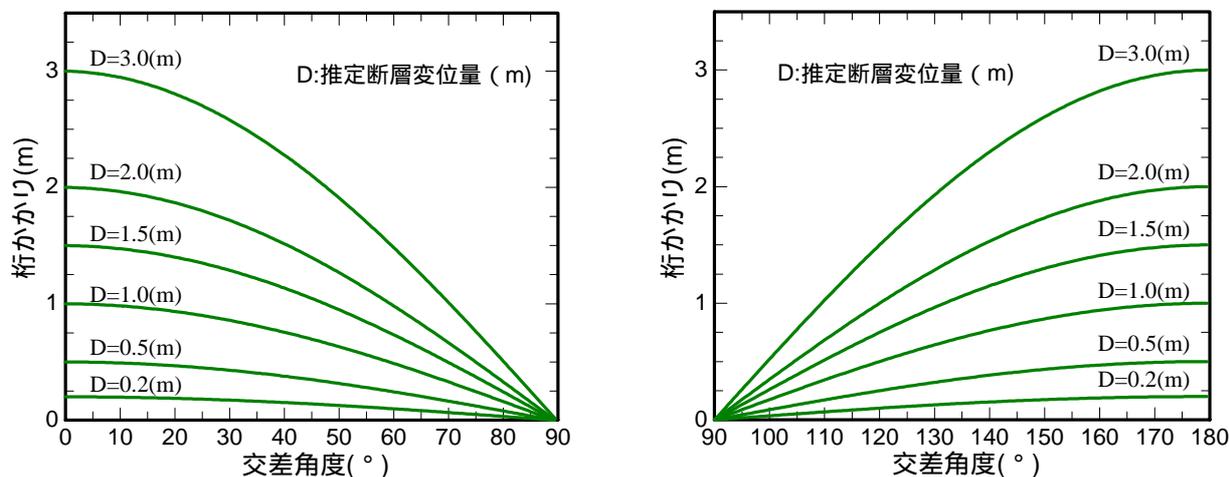


図-9 断層との交差角度と簡易算定法から求められた必要桁かかり長の関係を示す設計ノモグラム

## 5. 設計ノモグラム

断層と構造物の幾何学的関係を用いた簡易算定法を用いれば、想定断層変位量に対する必要桁かかり長が求まる。ここで、式(4.1)および(4.2)を用いて算出した必要桁かかり長と交差角度の関係を図9に示す。ただし、桁の構造条件は桁幅  $B = 4$  (m)、桁長  $L = 10$  (m)として算出した。断層を跨ぐと想定される構造物を設計する場合、想定変位量  $D$  と交差角度  $\theta$  さえわかれば、その地点に必要な桁かかり長が求まる。一般的に、桁座拡幅は最も有効な落橋対策工であると考えられるが、その場合このノモグラムから必要拡幅量を推定することが可能である。

## 6. おわりに

本論文では、断層を跨ぐ角度により橋梁の破壊メカニズムが大きく異なることを明示し、交差角度と落橋変位量の関係を示す設計ノモグラムを提示した。また、簡易算定法においても桁の挙動をおおよそ把握し、実験結果とも整合性のある結果が得られた。今後も、盛土構造物や地下構造物など多様な条件下での実験を行い、メカニズムの解明とともに地表断層変位への有効な対策を施す足がかりにしたいと考える。

謝辞：実験の実施においては、ジェイアール九州コンサルタンツ（株）の村上昌彦氏（当時鉄道総合技術研究所に出向中）および北海道旅客鉄道（株）の堀道明氏（当時芝浦工業大学）の多大な協力を得た。ここに併せて感謝の意を表する。

## 参考文献

1) R. Ulusay, O. Aydan, and M. Hamada : The behavior of structures built on a active fault zones :

examples from the recent earthquakes of Turkey, *Proc. of workshop on Seismic Fault-induced Failures –Possible Remedies for Damage to Urban Facilities-*, K. KONAGAI, M. HORI and K. MEGURO edited, pp.1-26, 2000.

- 2) Earthquake Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers : The 1999 JI-JI earthquake, Taiwan, -Investigation into damage to civil engineering structures-, *Earthquake Damage Investigation Series 6*, 1999.
- 3) Konagai, K. *et al*: Report of Damage caused by the Mid-North Iwate Earthquake of September 3, 1998, *Bull. of Earthquake Resistance Structure Research Center, IIS*, 32, pp3-13
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 耐震設計編，丸善出版，1999。
- 5) 土木学会 地震工学委員会 耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン(案) - 耐震基準作成のための手引き - ，土木学会，2001。
- 6) 近藤益央，運上茂樹：断層変位に対する橋梁の耐震性に関する解析的研究，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 I，pp.100-101, 2001。
- 7) 鈴木直人，幸左賢二，田崎賢治：断層変位を受ける連続橋の被災メカニズムに関する解析的研究，第 4 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.133-136，2000。
- 8) R. Pradeep Kumar and K. Megro : Applied element simulation of non-linear behavior of dip-slip faults for studying ground surface deformation, *Proc. of workshop on Seismic Fault-induced Failures – Possible Remedies for Damage to Urban Facilities-*, K. KONAGAI, M. HORI and K. MEGURO edited, pp.109-114, 2000.
- 9) Konagai, K. and Johansson J. : Lagrangian particles for modeling large soil deformations, *Proc. of*

*workshop on Seismic Fault-induced Failures – Possible Remedies for Damage to Urban Facilities-*, K. KONAGAI, M. HORI and K. MEGURO edited, pp.101-108, 2000.

- 10) 室野剛隆，弥勒綾子，村上昌彦，紺野克昭，棚村史郎：断層と橋梁の交差角度に着目した橋梁

の変形モードと破壊パターンに関する実験的研究，第 11 回日本地震工学シンポジウム，pp.1333-1338, 2002.

- 11) 常田賢一：土木構造物における地震断層の工学的対応に関する一考察，第 11 回日本地震工学シンポジウム，pp.947-952, 2002.

(2003. 6. 30 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANISM OF FAULT-INDUCED DAMAGE OF BRIDGES

Yoshitaka MURONO, Ayako MIROKU and Katsuaki KONNO

We examine a deformation mode of bridges induced by surface rupture by changing a fault-crossing angle of structures by using a newly experimental device. When the crossing angle is smaller than 90 degree, a fault-induced damage concentrates on only one span which crosses the fault line. And when the crossing angle is larger than 90 degree, the damage spreads through whole spans, but the girder which crosses the fault line is hard to fall. We develop a new simple method to evaluate the response characteristics of bridges mentioned above. The efficiency of this method is confirmed by simulating results of the experiments. We, finally, develop a nomogram for seismic design of railway structures.