

フィンガー型伸縮継手のモデル化とこれを考慮した 橋梁の地震応答特性

全貴蓮¹・川島一彦²

¹学生会員 東京工業大学工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

²フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. 背景と目的

落橋防止構造と同様に伸縮継手は、従来、マイナーな部材と見なされ、その特性に関する研究はほとんど行われていないが、伸縮継手の被害は地震後の走行性等の機能だけでなく、橋梁の地震応答にも大きな影響を与える。たとえば、近年桁間衝突の影響が注目を集めているが¹⁾、桁間衝突が生じる前にジョイントが桁の相対変位を拘束するが、このような影響は従来全く考慮されていない。また、伸縮継手の損傷もその構造に応じていろいろな形態がある²⁾。たとえば、鋼フィンガー型では、一度、橋軸方向に遊間が開いた状態で橋軸直角方向に変位すると、もとの位置に遊間が戻らず、フィンガーどうしが衝突したり噛み合う結果、フィンガーがせりあがったり、曲がったりすると同時に、伸縮遊間が広がり過ぎたり、大きい段差が生じたりする。

兵庫県南部地震以降、積層ゴム支承が大幅に採用されるようになり、支承自体の損傷は減少すると期待されているが、桁の応答変位が大きくなる結果、伸縮継手が橋梁全体系の応答に及ぼす影響に関して検討が必要である。さらに、橋軸直角方向にも免震設計を適用する場合にも、伸縮継手の役割について検討が必要とされている。

本研究では、我が国で広く使われているフィンガー型伸縮継手を取り上げ³⁾、このモデル化を提案すると同時に、伸縮継手が橋梁全体系に及ぼす影響について検討したものである。

2. フィンガー型伸縮継手のモデル化

フィンガー型伸縮継手は一般に図-1に示す構造を

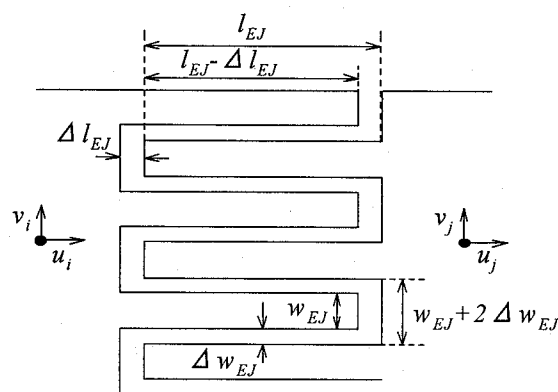


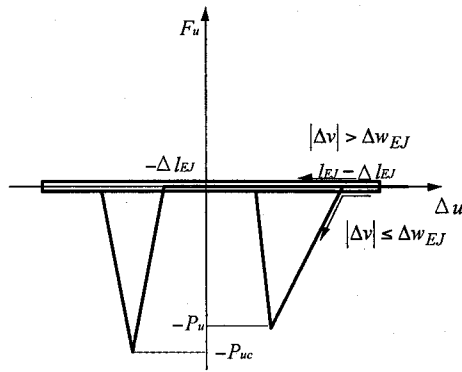
図-1 伸縮継手の変位

有している。いま、フィンガー1本の橋軸方向の長さを l_{EJ} 、橋軸直角方向の幅を w_{EJ} とし、フィンガーどうしの遊間を橋軸方向には Δl_{EJ} 、橋軸直角方向には Δw_{EJ} とする。伸縮継手の左側と右側の橋軸及び橋軸直角方向の桁の応答変位をそれぞれ u_i , v_i 、及び、 u_j , v_j とし、橋軸及び橋軸直角方向の桁間の相対変位 Δu , Δv を次式のように定義する。

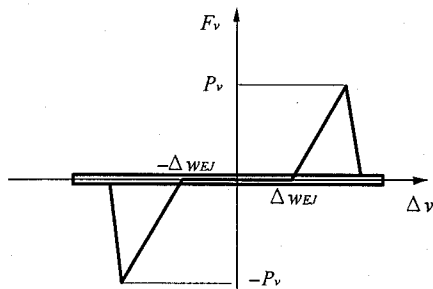
$$\Delta u = u_j - u_i ; \Delta v = v_j - v_i \quad (1)$$

また、橋軸及び橋軸直角方向の伸縮継手の作用力をそれぞれ F_u , F_v とする。伸縮継手の基本的な力学特性を示すと、以下のようになる。

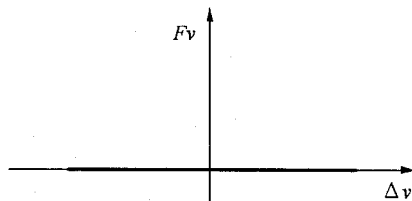
(1) 橋軸方向に圧縮を受けてフィンガーどうしがぶつからない ($\Delta u > -\Delta l_{EJ}$) か、引張りを受けてフィンガーが橋軸方向に抜け出さない ($\Delta u < l_{EJ} - \Delta l_{EJ}$) 範囲では、橋軸直角方向の相対変位 Δv が橋軸直角方向の圧縮側の遊間 Δw_{EJ} に達しない限りは ($|\Delta v| < \Delta w_{EJ}$)、伸縮継手は橋軸直角方向に自由に変位できる。しかし、橋軸直角方向の相対変位 Δv が橋軸直角方向の遊間圧縮側の遊



(a) 橋軸方向



(1) $\Delta u \leq l_{EJ} - \Delta l_{EJ}$



(2) $\Delta u > l_{EJ} - \Delta l_{EJ}$

(b) 橋軸直角方向

図-2 伸縮継手に作用する水平力と相対変位の関係

間 Δw_{EJ} に達する ($|\Delta v| \geq \Delta w_{EJ}$) と、フィンガーどうしが接触し、橋軸直角方向に抵抗力を受ける。

(2) 引張りを受けて橋軸方向にフィンガーが抜け出す ($\Delta u \geq l_{EJ} - \Delta l_{EJ}$) と、伸縮継手は橋軸直角方向の遊間 Δw_{EJ} を超えて自由に変位できる。しかし、この状態で再び伸縮継手が圧縮を受け、フィンガーの先端どうしが接触すると、フィンガーはもとのかみ合わせに戻ることはできない。フィンガーどうしの間で衝突が生じ、衝突による圧縮力に対して伸縮継手はその圧縮強度まで抵抗し、圧縮力がそれ以上になれば、最終的に破断していく。伸縮継手の

圧縮強度は、フィンガーの圧縮強度や座屈、伸縮継手と床版の結合部の強度等によって決まる³⁾。なお、フィンガーがフィンガーの幅 w_{EJ} と遊間 Δw_{EJ} の和の整数倍だけ橋軸直角方向にずれれば、原理的には橋軸直角方向にずれた状態で橋軸方向には再びもとのかみ合わせに戻ることも可能ではある。しかし、現実には、このような可能性は低いと考えられるため、ここではこのような状態になっても、フィンガーは橋軸方向にもとの位置には戻らないと仮定する。

(3) 橋軸方向にフィンガーが抜け出さない状態で圧縮を受けて、フィンガーどうしが根元でぶつかる ($\Delta u \leq -\Delta l_{EJ}$) と、伸縮継手はその圧縮強度までは抵抗し、圧縮力がそれ以上になれば、最終的に破断していく。

以上のようなフィンガー型伸縮継手の力学モデル化に際して、以下の仮定を置く。

(1) 伸縮継手の圧縮強度はフィンガーの圧縮強度や座屈、伸縮継手の取り付け部の強度等によって定まるが、ここでは、伸縮継手の取り付け部の強度は十分高いと仮定し、フィンガーを一端固定、他端自由と見なした状態での座屈強度から伸縮継手の圧縮強度を推定する。フィンガーの座屈後には、軸方向の作用力は急速に低下する。

(2) 橋軸直角方向にフィンガーが接触した場合には、フィンガーの曲げ剛性により橋軸直角方向の相対変位 Δv に比例した作用力 F_v が作用する。

以上の仮定に基づき、 n 組のフィンガーから成る伸縮継手の作用力 F_u 、 F_v と相対変位 Δu 、 Δv の関係を次式のように表す (図-2参照)。

$$F_u = \begin{cases} 0 & \Delta u > -\Delta l_{EJ} \\ k_{EJu}(\Delta u + \Delta l_{EJ}) & \Delta u < -\Delta l_{EJ} \\ \text{and } |\Delta v| < \Delta w_{EJ} \\ -P_{uc} + k_{EJuB}(\Delta u + \Delta l_{EJB}) & \Delta u < -\Delta l_{EJB} \\ \text{and } |\Delta v| < \Delta w_{EJ} \\ k_{EJu} \{ \Delta u - (l_{EJ} - \Delta l_{EJ}) \} & \Delta u \leq l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ \text{and } |\Delta v| > \Delta w_{EJ} \\ \text{once after} \\ \Delta u > l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ -P_u + k_{EJuB}(\Delta u - \Delta l_{EJB0}) & \Delta u < \Delta l_{EJB0} \\ \text{and } |\Delta v| > \Delta w_{EJ} \\ \text{once after} \\ \Delta u > l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \end{cases} \quad (2)$$

$$F_v = \begin{cases} k_{EJv}(\Delta v - \Delta w_{EJ}) & |\Delta v| \geq \Delta w_{EJ} \text{ and } \Delta u < l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ 0 & |\Delta v| < \Delta w_{EJ} \text{ and } \Delta u < l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ 0 & \Delta u \geq l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ k_{EJv}(\Delta v - \Delta v_0) & |\Delta v| \geq \Delta w_{EJ} \text{ and } \Delta u \leq l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \text{ once after} \\ & \Delta u > l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \\ 0 & |\Delta v| < \Delta w_{EJ} \text{ and } \Delta u \leq l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \text{ once after} \\ & \Delta u > l_{EJ} - \Delta l_{EJ} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

n : 伸縮継手を構成するフィンガーの組数

Δu , Δv : 式(1)によるそれぞれ橋軸方向, 橋軸直角方向の伸縮継手の相対変位

l_{EJ} : 橋軸方向のフィンガーの長さ

Δl_{EJ} : 橋軸方向のフィンガー間の遊間

Δl_{EJB} : フィンガーが圧縮を受けて破壊する時の相対変位

Δl_{EJBo} : フィンガーが橋軸方向に抜け出し, 再び両側のフィンガーどうしが圧縮を受けて破壊する時の相対変位

w_{EJ} : 1本の橋軸直角方向のフィンガーの幅

Δw_{EJ} : 橋軸直角方向のフィンガー間の遊間

ΔF_u , ΔF_v : 伸縮継手の橋軸方向, 橋軸直角方向の作用力

k_{EJu} , k_{EJv} : n 組のフィンガーの橋軸方向の圧縮剛性及び橋軸直角方向の曲げ剛性

k_{EJu0} : フィンガーが橋軸方向に抜け出し, 再びフィンガーどうしが接触した時の n 組のフィンガーの圧縮剛性

k_{EJuB} : フィンガーが軸圧縮力を受けて座屈後の n 組のフィンガーの負剛性

Δv_0 : フィンガーが橋軸方向に抜け出し, 再び両側のフィンガーが接触した瞬間に, 橋軸直角方向に生じていた相対変位

P_u : フィンガーが橋軸方向に抜け出し, 再び接触した状態の n 組のフィンガーの座屈強度

P_{uc} : フィンガーどうしが根元で接触した状態の n 組のフィンガーの座屈強度

フィンガーの剛性及び強度は以下のように求めることとする。

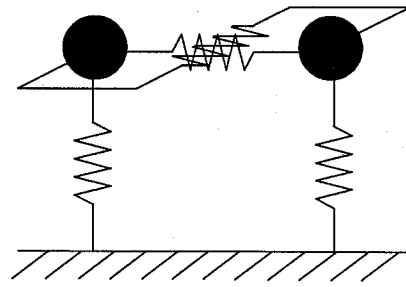


図-3 二質点系

$$k_{EJu} = 2n \frac{EA}{l}$$

$$k_{EJu0} = n \frac{EA}{l}$$

$$P_u = n \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$$

$$P_{uc} = 2n \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$$

$$k_{EJv} = n \frac{3EI}{l^3}$$

$$P_v = n \frac{M_y}{l}$$

$$M = \frac{bh^2 \sigma_y}{4}$$

(4)

ここで、

n : 伸縮継手を構成するフィンガーの組数

M_y : フィンガー1本当たりの全塑性曲げモーメント

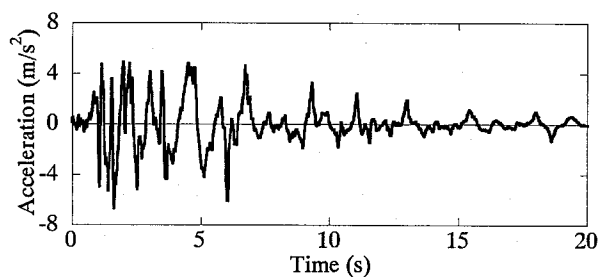
P_v : M_y に相当するフィンガーの橋軸直角方向の抵抗力

3. 解析対象とする橋梁のそのモデル化

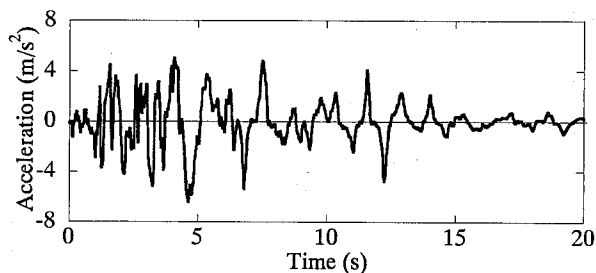
上記のモデルを用いて, フィンガー型伸縮継手が橋梁系の地震応答に及ぼす影響を検討した. 解析に用いたのは図-3に示す2連の単純橋からなる構造で⁴⁾, 解析を単純にするために2連の橋はそれぞれ線形1質点系としてモデル化した. 一連の橋梁の質量は628 tとし, 一方の橋の固有周期は0.5秒, もう一方の橋の固有周期は0.75秒となるようにばね剛性を定めた. 減衰は2%とした.

フィンガーは長さが0.275 mで, 断面は66 mm × 40 mmとした. 材質はSM440である^{3,5)}. フィンガー間の遊間は橋軸方向には0.135 m, 橋軸直角方向には0.005 mである. 桁幅が12 mであるため, フィンガーの組数 $n=120$ である. 式(4)によってフィンガーの座屈強度(120組)を求めると, $P_u=275.5$ MN, $P_{uc}=551$ MN, $P_v=6.65$ MNとなる.

入力地震動としては, 1995年兵庫県南部地震の際

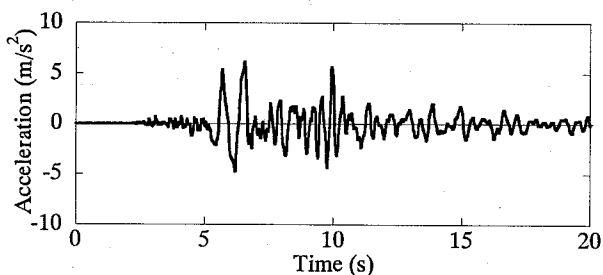


(a) NS 成分

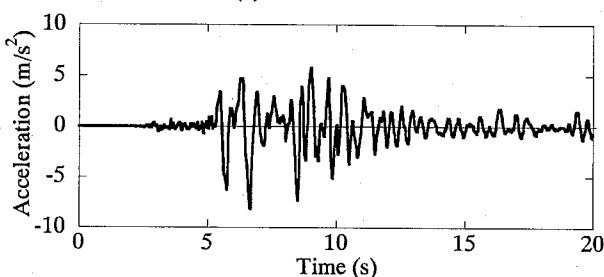


(b) EW 成分

図-4 入力地震動, JR 鷹取駅



(a) NS 成分



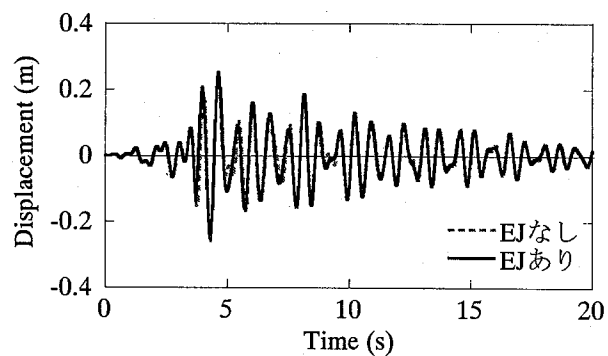
(b) EW 成分

図-5 入力地震動, 神戸海洋気象台

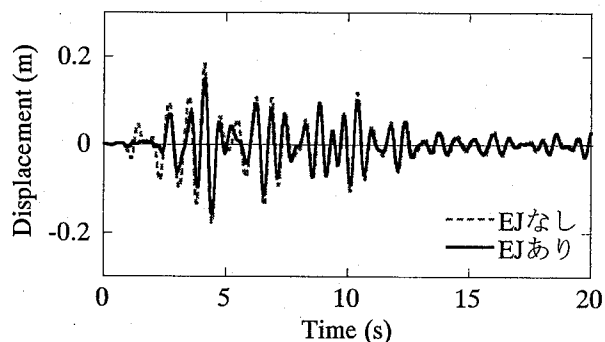
JR鷹取駅で観測された地震動（図-4）と神戸海洋気象台で観測された地震動（図-5）を考慮し、それぞれNS及びEW成分を橋軸及び橋軸直角方向に作用させた。

4. フィンガー型伸縮継手の効果

図-6及び図-7はJR鷹取駅記録を入力した場合の橋軸及び橋軸直角方向のフィンガー型伸縮継手の相対変位と作用力の関係を示した結果である。比較のため、図-6には、フィンガー型伸縮継手が無い場合の相対変位も示している。橋軸直角方向には、2.11秒

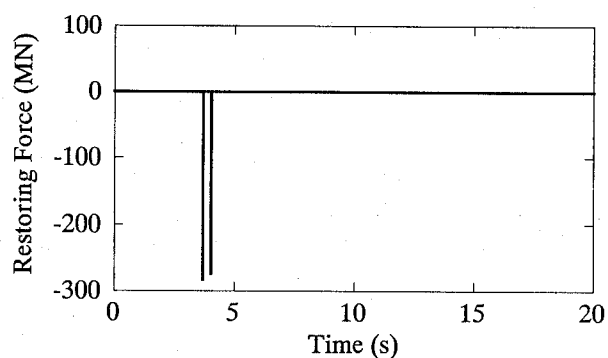


(a) 橋軸方向

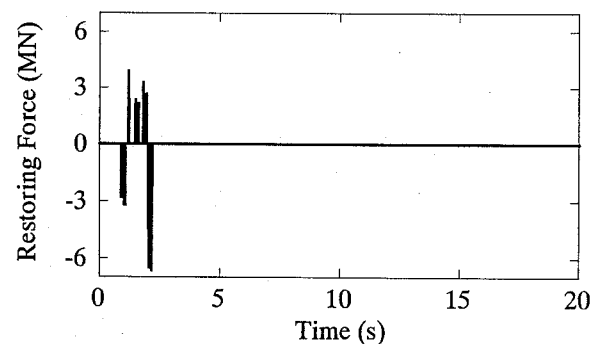


(b) 橋軸直角方向

図-6 伸縮継手の相対変位



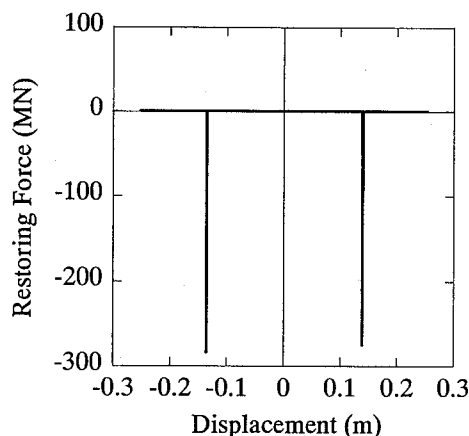
(a) 橋軸方向



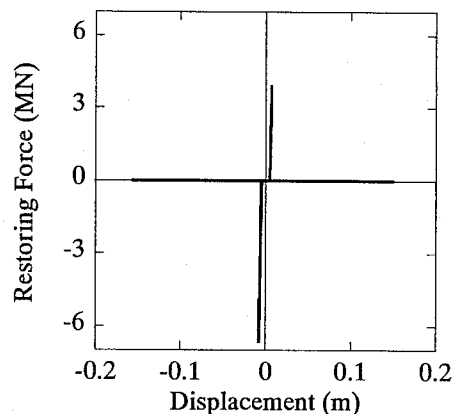
(b) 橋軸直角方向

図-7 伸縮継手の作用力

の時点でフィンガーは曲げ降伏強度 $P_v=6.65$ MNに達した。このため、2.16秒以降には橋軸直角方向に対するフィンガーとしての効果は失われ、橋軸直角方向の遊間0.005 mをはるかに超えて大きく相対変位

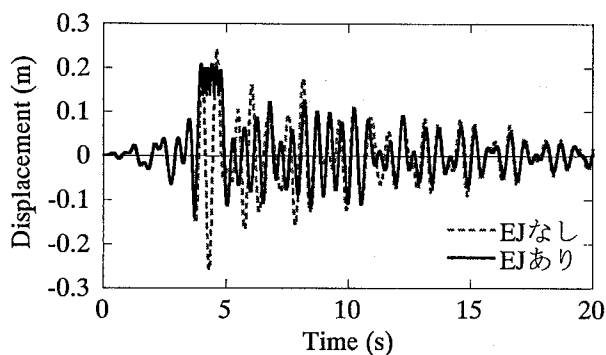


(a) 橋軸方向

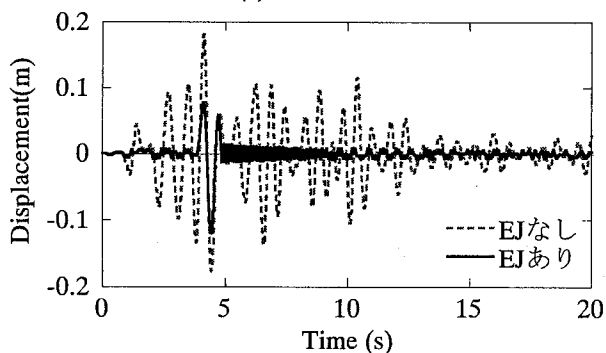


(b) 橋軸直角方向

図-8 伸縮継手の作用力と変位

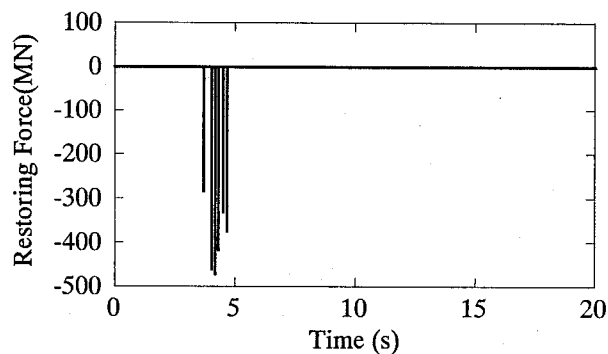


(a) 橋軸方向

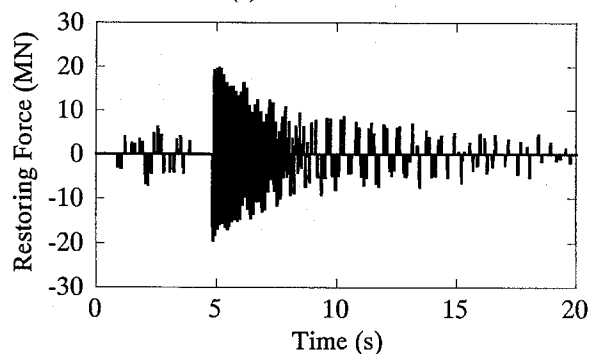


(b) 橋軸直角方向

図-9 伸縮継手の相対変位



(a) 橋軸方向



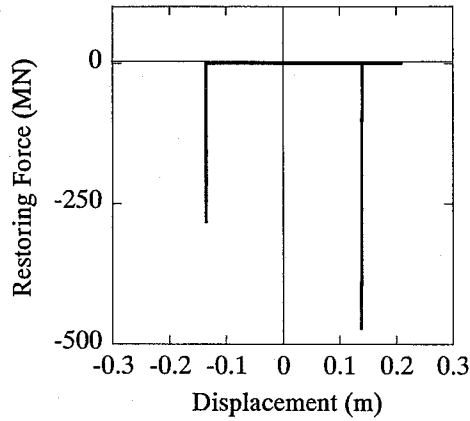
(b) 橋軸直角方向

図-10 伸縮継手の作用力

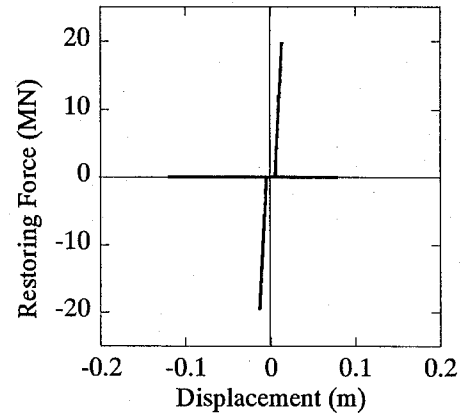
が生じている。一方、橋軸方向には、3.72秒の時フィンガーの根元どうしで衝突し、285 MNの作用力を受けたが、フィンガーの座屈強度 $P_u=551$ MNには達しなかったため、フィンガーは破壊しなかった。3.89秒でフィンガーが抜け出し最大相対変位は0.21 mに達した。その後、4.04秒の時に相対変位は0.14 mに戻ったが、橋軸直角方向には0.005 mより大きくずれていたため、フィンガー間で衝突が生じ、座屈強度 (275.5 MN) を超えたため、フィンガーは破壊した。このため、これ以降は橋軸方向にも伸縮継手としての機能は失われた。図-8は、伸縮継手の相

対変位とフィンガーの作用力の履歴を表したものである。

次に、橋軸方向の座屈強度と橋軸直角方向の曲げ降伏強度をそれぞれ10倍にし、橋軸方向および橋軸直角方向にフィンガーが壊れないという条件で解析を行った。図-9及び図-10は伸縮継手の相対変位と作用力の関係を示した結果である。図-9から分かるように、3.71秒の時、フィンガーは橋軸方向の根元で衝突する。衝突力は283 MNであり、座屈強度を超えなかった。3.88秒になると、橋軸直角方向の相対変位が初めてこの方向の遊間である0.005 mを大

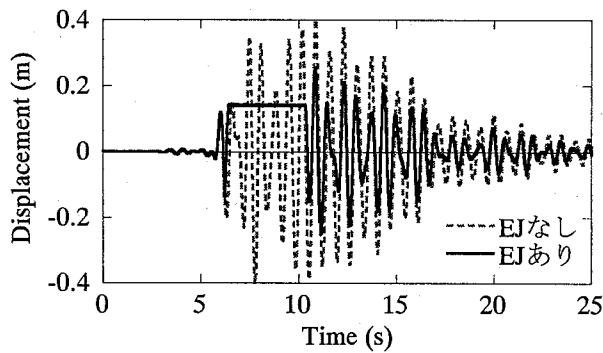


(a) 橋軸方向

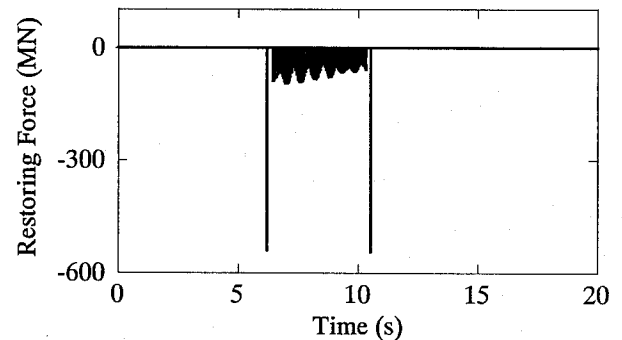


(b) 橋軸直角方向

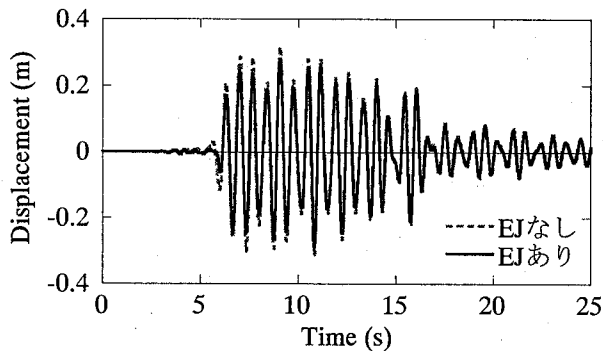
図-11 伸縮継手の作用力と変位



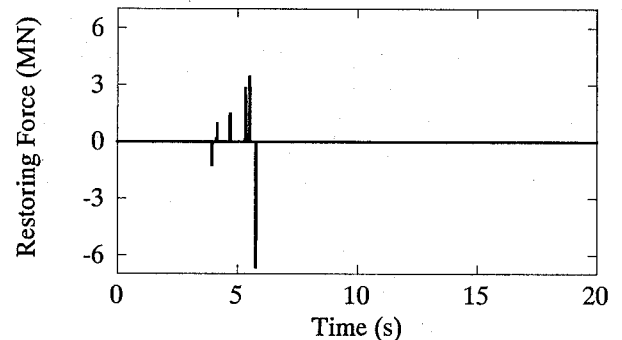
(a) 橋軸方向



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向



(b) 橋軸直角方向

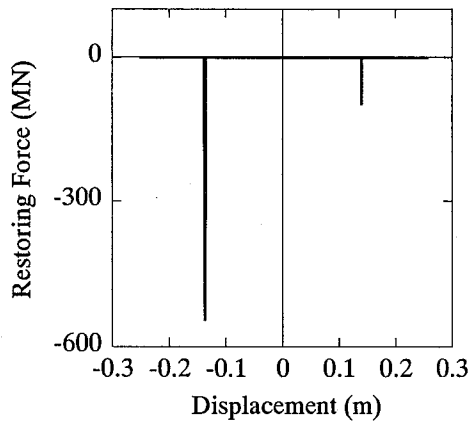
図-12 伸縮継手の相対変位

図-13 伸縮継手の作用力

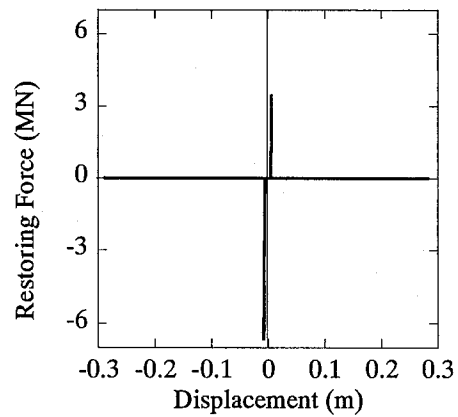
きく超え始めるが、これはこの時刻になると、橋軸方向の相対変位が0.14 mを超え、フィンガーが抜け出したためである。この結果、フィンガーは元のかみ合わせに戻ることができず、3.88～4.82秒の間にはフィンガーどうしが5回衝突し、最大作用力は472 MNに達する。時刻4.82秒になると、橋軸直角方向の相対変位は0.005 mに戻り、フィンガーは橋軸方向にも元のかみ合わせに戻るが、この直後の4.85秒に橋軸直角方向には19.4 MNの作用力が生じ、0.013 mの曲げ変形が生じる。伸縮継手が桁間の相対変位を拘束する結果、橋軸及び橋軸直角方向には伸縮継

手がない場合に比較して、桁間相対変位は小さい。図-11は伸縮継手の相対変位とフィンガーの作用力の履歴を表したものである。

神戸海洋気象台記録を入力した場合の応答は、図12、図-13、図-14に示すとおりである。この場合には、5.75秒の時点で、フィンガーが橋軸直角方向に曲げ降伏し、このため、橋軸直角方向には伸縮継手は大きくずれる。一方、橋軸方向には、6.2秒でフィンガーの根元で衝突が起き、535 MNの作用力が生じる。6.4秒になると橋軸方向の相対変位が0.14 mを超え始め、橋軸直角方向にも遊間0.005mをはるか

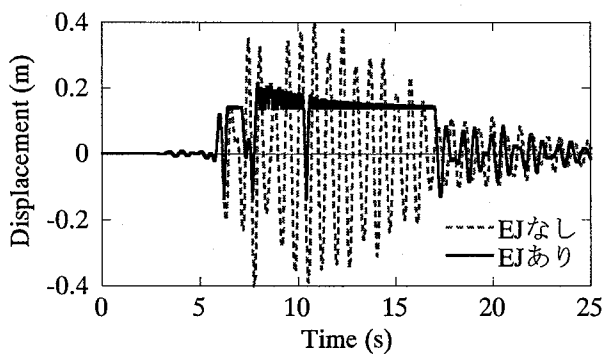


(a) 橋軸方向

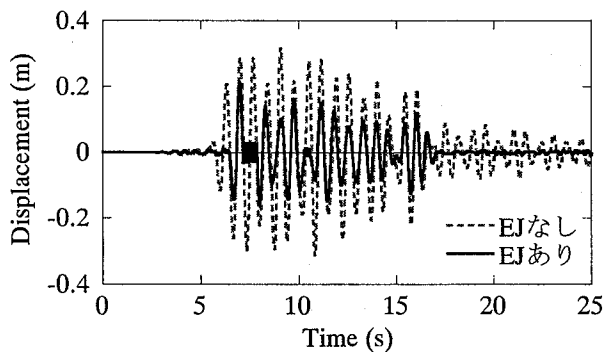


(b) 橋軸直角方向

図-14 伸縮継手の作用力と変位

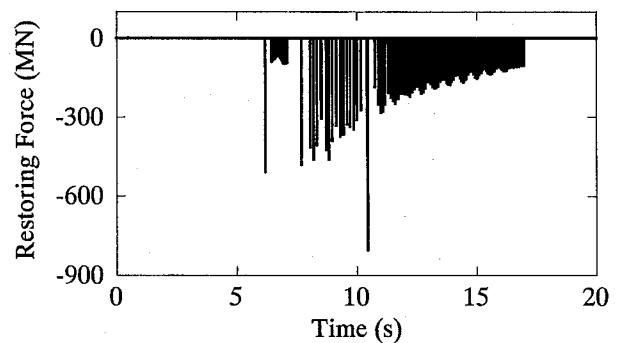


(a) 橋軸方向

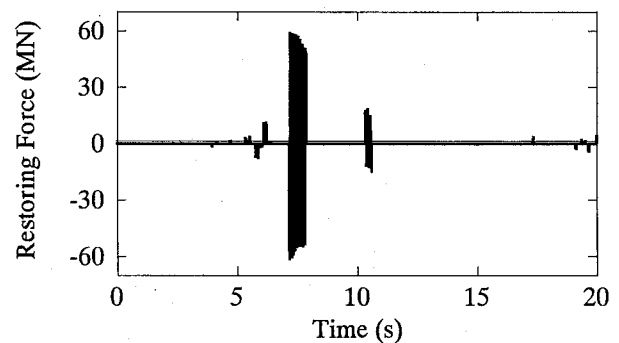


(b) 橋軸直角方向

図-15 伸縮継手の相対変位



(a) 橋軸方向



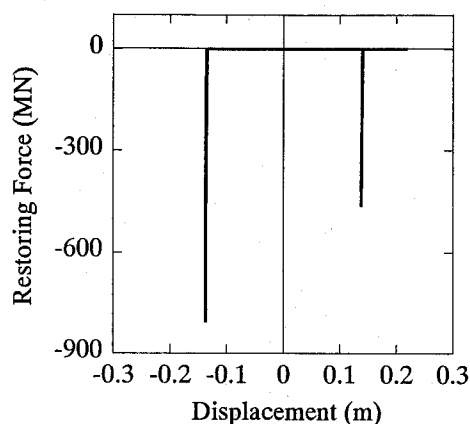
(b) 橋軸直角方向

図-16 伸縮継手の作用力

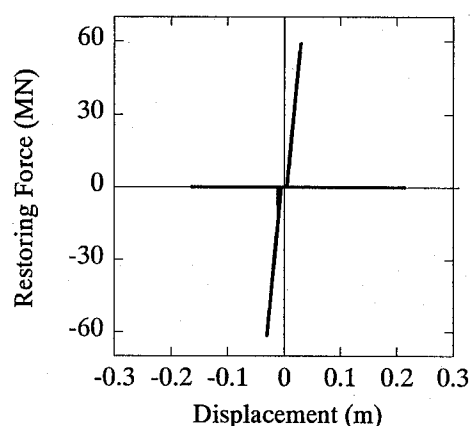
に超えるずれが生じたため、フィンガーは橋軸方向に元のかみ合わせに戻れず、10.34秒までフィンガーどうしで衝突が起こる。10.35秒になると、フィンガーは橋軸方向に元のかみ合わせに戻り、10.5秒ではフィンガーの根元どうしが衝突する結果、フィンガーが座屈する。これにより、橋軸方向にもフィンガーの拘束が失われ、橋は自由に振動する。

これに対して、伸縮継手の橋軸方向の座屈強度と橋軸直角方向の曲げ降伏強度をそれぞれ10倍に増加させた場合の応答が図-15、図-16、図-17である。時刻6.21秒に、フィンガーの根元で衝突が起こり、

時刻6.40～7.11秒ではフィンガーが橋軸方向に抜け出し、橋軸直角方向にずれる結果、フィンガーどうしが衝突する。時刻7.14秒になると、フィンガーは元のかみ合わせに戻るが、橋軸直角方向には59 MNの作用力が生じ、0.027 mの大きい曲げ変形が生じる。また、時刻7.65秒ではフィンガーの根元で衝突が生じ、時刻7.86秒になると、フィンガーは橋軸方向に再び抜け出し、橋軸直角方向に相対変位が生じる結果、時刻10.3秒までフィンガー間で衝突が生じる。その後もとのかみ合わせに戻り、時刻10.42秒では、フィンガーどうしが根元で衝突する。同様



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-17 伸縮継手の作用力

に、10.56～17秒の間にも橋軸方向のフィンガーの抜け出しと橋軸直角方向への相対変位が生じる結果、フィンガー間に衝突が生じる。

5. 結論

本研究では、フィンガー型伸縮継手が橋梁全体系の応答に及ぼす影響を検討するため、フィンガー型伸縮継手の非線形履歴モデルを開発し、2連の桁からなる線形構造系を対象に、その特性を検討した。本解析の結果から得られた結論は以下の通りである。

- 1) フィンガー型伸縮継手が存在すると、橋軸方向圧縮側に桁どうしが衝突する前に伸縮継手が接触し、実質的に桁間の衝突が生じる。
- 2) フィンガー型伸縮継手は、橋軸直角方向の桁間の相対応答変位を大きく拘束する。また、一度、橋軸方向にフィンガーが抜け出し、橋軸直角方向にも遊間を上回る相対変位が生じると、フィンガーは元のかみ合わせに戻ることができないため、フィンガーどうしの中で衝突が起こる。
- 3) 伸縮継手は、橋梁全体系の応答に大きな影響を

与えるため、耐震性評価には伸縮継手の影響を考慮する必要がある。

謝辞：本研究に際し、(株)長大の矢部正明氏から伸縮継手の特性に関していろいろご教示頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松本崇志，川島一彦：支承及び落橋防止構造の逐次破壊を考慮した橋梁の地震応答，土木学会地震工学論文集，[29]，CD-ROM，pp.971-980，2007.
- 2) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，1995.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋伸縮継手便覧，1970.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 5) (社)日本橋梁建設協会：鋼橋伸縮継手設計の手引き，2005.