

(23) 3次元有限要素法を用いた地震荷重を受ける橋梁の動的解析

DYNAMIC ANALYSIS OF BRIDGE UNDER EARTHQUAKE LOAD BY 3-D FEM

野沢勝利*, 石川雅美*, 田口幸良**, 安藤浩平***

Shori NOZAWA and Masami ISHIKAWA and Yukiyooshi TAGUCHI and Kohei ANDO

* 東急建設株式会社 施工本土木部土木設計部 (〒150 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

** 日本クレイ株式会社 インダストリ総括部 (〒222 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-5-5 住友不動産新横浜ビル)

*** 日本イーエスアイ株式会社 (〒151 東京都渋谷区上原 2-47-18 ウェル上原ビル)

キーワード：有限要素法，地震，橋梁，動的解析

(FEM, earthquake, bridge, dynamic analysis)

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震においては多くの橋梁が甚大な被害を受け、なかには落橋防止装置が設置されているにもかかわらず、桁が落下に至るものもあった。大地震に対しても桁の落下を確実に防止するためには、まず桁が落下に至るメカニズムを十分に明らかにしておく必要がある。桁の落下は橋脚が破壊する場合を除き、地盤条件の変化¹⁾や橋脚の剛性の変化²⁾により橋脚間の開きが大きくなることが考えられているが、これに加えて桁どうしの衝突³⁾が考えられている。すなわち、図-1に示すように連続する桁が次々に衝突して変位が増大するのではないかとという新たな要因が示唆されている。

本研究は、地震時の桁移動、桁どうしの衝突がどのように生じているか、また、桁がかりがいかなる理由によって減少するかを解析により検証し、落橋のメカニズムの解明を試みたものである。本研究では5つ単純桁のモデルを用い、桁どうしの衝突の影響を検討した。なお、解析には接触を考慮した3次元有限要素法を用いた。

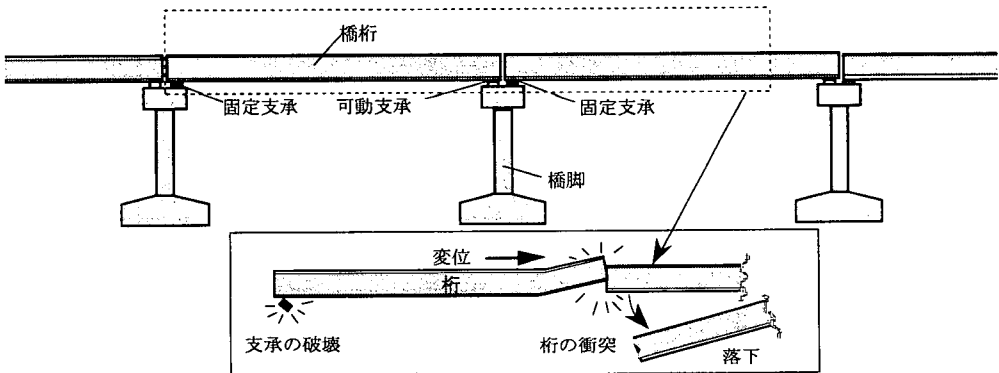


図-1 桁どうしの衝突による落橋のイメージ

2. 解析モデル

図-2に解析したモデルの一般図を示す。橋脚の高さ13.6m、桁がかりを1.20mとした。各部材の材料物性および要素タイプは表-1に示すように、橋脚はRC単柱とし、単位体積重量を2.3tf/m³、初期弾性係数E=2.0×10⁴kgf/cm²、ポアソン比ν=0.167の弾性体とした。したがって、橋脚の塑性変形や破壊については考慮していない。桁は鋼製の6主桁を想定しているが、解析モデルではこれを直方体のソリッドとし表した。ただし、主桁や床版などからなる実形状

から重量を算出し、モデルの直方体がその重量325tfになるようにモデルの単位重量を仮定した。また、弾性係数とポアソン比については鋼の物性である $E=2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.300$ を用いた。実際の構造条件とは異なるが簡略化のため、可動支承側の桁は桁と橋脚頂部との間の摩擦係数で表し、落橋防止工については考慮しないこととした。さらに、固定支承については水平荷重が一定の値を越えたとき、破壊して桁が橋脚から解放されるものとした。固定支承破壊後の桁と橋脚頂部の摩擦係数は0.5と仮定した。

表-1 各部材の材料物性および要素タイプ

	想定材料	弾性係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	密度 D (kg/cm ³)	要素タイプ	材料特性
橋脚	RC	2.0×10^5	0.167	2.30×10^{-3}	3次元ソリッド	弾性
桁	合成桁	2.1×10^6	0.300	4.61×10^{-4}	3次元ソリッド	弾性
固定支承	鋼	一定以上の水平荷重で破壊			リベット	
地盤	N値20程度の地盤	圧縮側 $8.40 \times 10^6 \text{kgf/cm}$, 引張側 0			バー	弾性

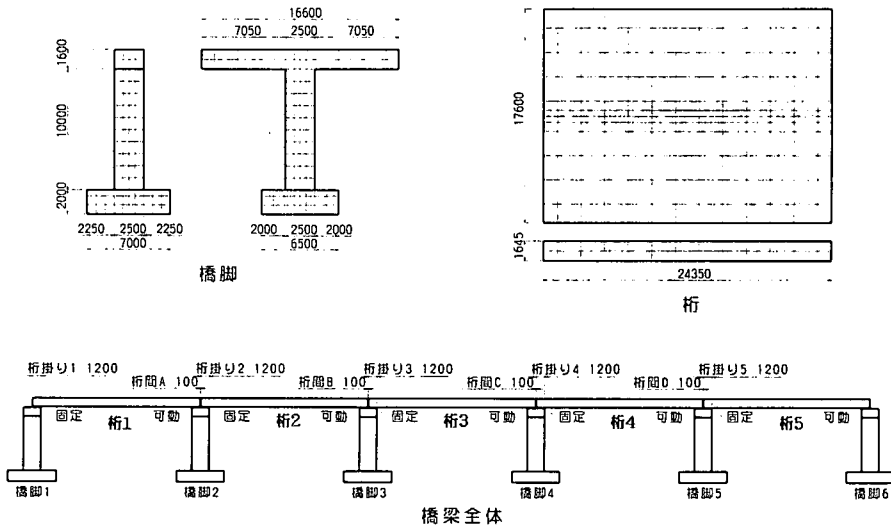


図-2 モデル一般図

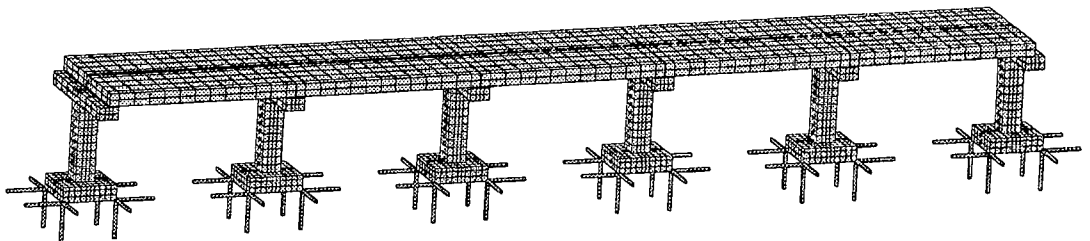


図-3 モデル全景

また、図-3に示すように地盤として橋脚の基礎底部4角に長さ5mのバー要素を3方向に設けN値にして20程度の圧縮強度をもたせた。さらに地盤のバー要素の先端に大きな質量をもつ質点をつけ、この質点に図-4に示す兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台で得られた加速度を3方向に入力した。入力加速度の最大は橋軸方向で 818cm/s^2 である。ただし、一番左の橋脚だけ地盤が不連続であるとして、これを地震波を入力しないかたちで表現した。

後述の考察では、図-2に示したようにそれぞれの桁どうしのあきを桁間A、B、C、Dと呼び、固定支承側の桁がかりをそれぞれ、桁がかり1、2、3、4、5と呼ぶことにする。

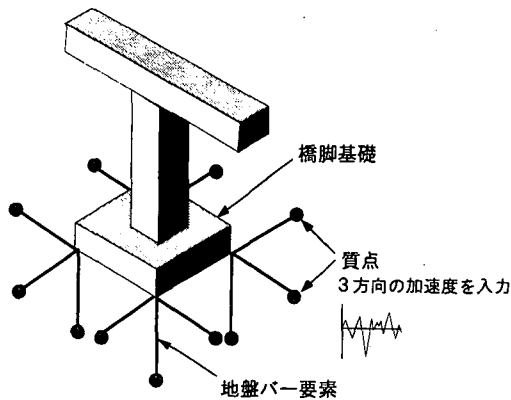


図-3 地震波の入力方法

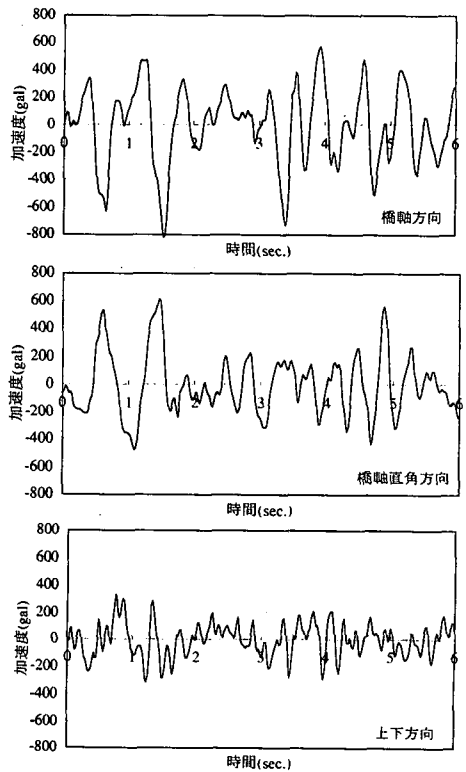


図-4 入力地震波

3. 解析結果

3.1 桁どうしの衝突による影響について

まず、桁どうしの衝突に着目した解析結果について述べる。この解析では、可動支承の摩擦係数を0.15と一定とし、固定支承を180tf（解析モデルは6主桁を想定しており、1つの沓あたりの最大耐力を30tonと仮定）で破壊されるものとした。なお、固定支承の破壊後の摩擦係数を0.5と仮定した。以下ではこの解析ケースをケース1と呼ぶ。

各桁の固定支承側の桁がかりの変動を図-5に示す。また、

橋脚の頂部の変位を図-6に示す。桁がかりの初期値は120cmであり、桁がかりが0cm以下になると桁の落下ということになる。この解析では桁がかりの最小値は56.4cmであった。桁がかりの変化が現れるのは0.44秒であり、この段階までに固定支承が破壊していることが分かる。

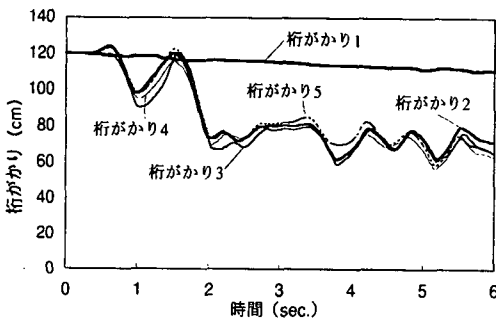


図-5 桁がかりの変化(ケース1)

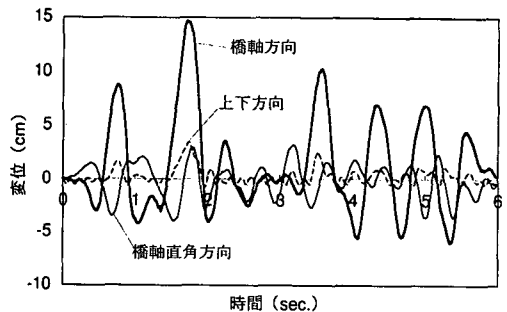


図-6 橋脚2の頂部の変位

図-7~10に対面する桁端の橋軸方向の変位を示す。なお、桁の両端には厚さ0.5cmの接触要素を定義しているので、解析上の桁間のあきは9cmとなっている。図-7の桁間Aでは、桁どうしの接触は確認できなかったが、図-8~10より桁間B, C, Dでは明らかに桁どうしが接触していることが確認できる。しかし、これらの図から明らかになように、接触によって変位量が著しく増大するといった現象は生じていない。また、図-11に示すように接触は桁端の外桁付近で生じてはいるものの、面どうしが激しく衝突するまでには至っていない。

図-12に各桁間の隣り合う桁端の分離を示す桁間が0cmとなるとところが桁どうしの接触があったところである。

これによると、0.76秒で桁間C、1.48秒で桁間D、2.38秒で桁間C、3.76秒で桁間D、5.12秒で桁間Bの桁どうしが接触しており、桁間C、D、C、D、Bの順番で接触している。それゆえ、連続した桁が次々に衝突した状態にはなっておらず、また桁どうしが連続して衝突して変位が増大する現象も認められなかった。しかしながら、著者等が以前に

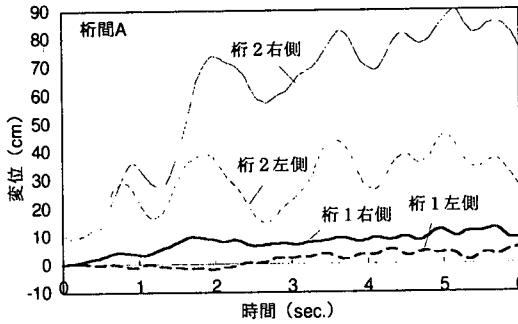


図-7 桁端の変位 (桁間A)

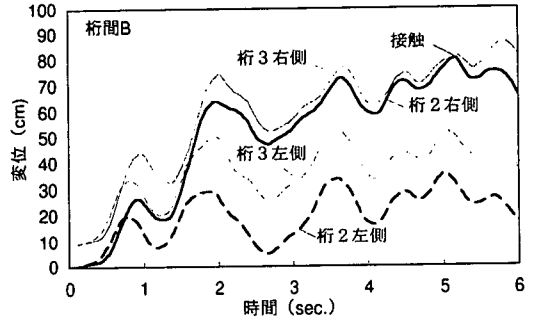


図-8 桁端の変位 (桁間B)

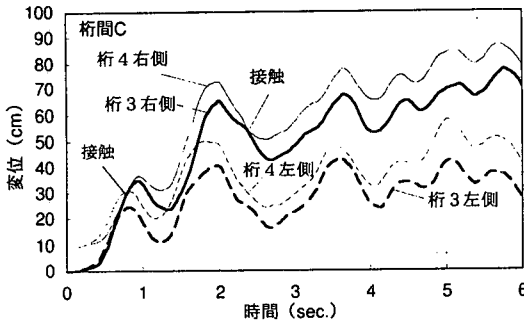


図-9 桁端の変位 (桁間C)

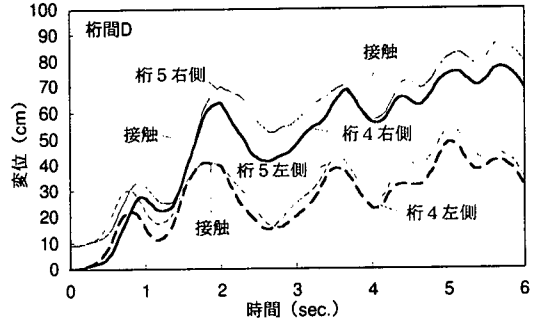


図-10 桁端の変位 (桁間D)

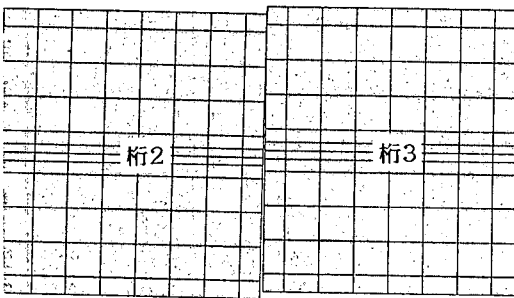


図-11 桁端の接触状況 (桁間B)

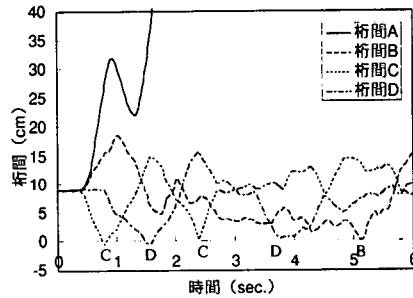


図-12 桁間の変化 (ケース1)

行った6主桁の詳細モデルを用いた解析⁹⁾においても、ここで示した解析と同程度の接触が生じたが、その接触によって桁がある程度の座屈変形を起こしていることを確認している。

連続した桁どうしの激しい衝突は地震荷重が大きくなった場合生じるのではないかと考え、橋軸方向の加速度を1.3倍にして解析を行った。しかしながら、この場合にも桁の変位の急激な増大を伴うような桁どうしの衝突は確認できなかった。この解析の桁がかりの変化を図-13に示す。この図から各桁の固定支承側の桁がかりはケース1に比べ全体的に振幅が大きく、桁ごとにばらつきが見られる。また、桁がかりの最小値は40.3cmとケース1よりも小さくなっており、本解析で仮定した条件の下では桁がかりの減少には桁どうしの衝突よりも地震荷重の大きさの方が大きく影響していると考えられる。以下ではこの解析ケースをケース2と呼ぶことにする。

3. 2 支承の条件による影響について

本解析で仮定している条件の下では桁の変位の急激な増大や桁がかりの著しい減少には桁どうしの衝突よりも地震の揺れに大きく影響を受けていると思われる。すなわち、図-5に示したように、桁がかりは1.5秒から2.0秒にかけて急激に減少しており、これは図-6の橋脚頂部の変位が1.5から2.0秒にかけて大きく変化しているのに対応している。そこで、以下では桁の落下に対して直接的な指標である桁がかりに着目し、これがどのような因子により変化するかを検討する。

地震荷重の大きさの他に、桁がかりに最も大きな影響を及ぼすと考えられるのは支承の水平耐力及び摩擦係数である。

そこで、まず可動支承の摩擦係数を0.5として解析を行った(ケース3)。それ以外の条件はケース1と同じである。その結果、桁がかりの最小値は83.8cmであり、図-14に示すようにケース1に比べて2秒以降の振幅はさほど変わらないが、1~2秒にかけての桁がかりの減少が小さく抑えられている。また、桁どうしの衝突による桁の変位への影響は認められなかった。

次にケース4として固定支承の水平耐力を増加させ、固定支承の沓ひとつあたりの破壊強度を150tonと仮定して解析を行った。それ以外の条件はケース1と同じである。各桁の固定支承側の桁がかりを図-15に示す。桁がかりの最小値は8.2cmであり、桁が落下するまでには至っていないものの、極めて危険な状態となっている。このモデルでは桁がかりを120cmとしているが、道路橋示方書に規定されている⁹⁾支間長より計算される必要長は $Se=82\text{cm}$ であり、本解析での桁の橋脚に対する相対変位はこの値を大きく上回っている。これは、本解析ケースで桁がかりの変化が現れ始めるのは0.74秒であり、これまでの解析ケースよりも遅くなっており、固定支承が破壊されるまでにエネルギーが蓄えられ一気に解放されたためではないかと考えられる。また、2秒以降では桁ごとにかかりのばらつきが見られるが、この場合にもやはり桁どうしの衝突による桁の変位への影響は認められなかった。

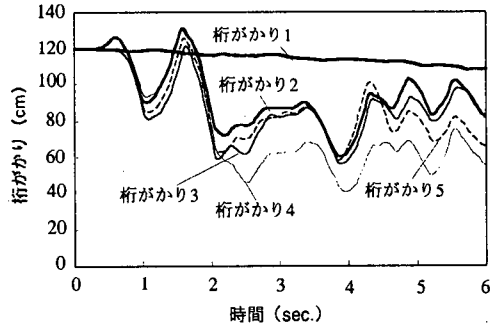


図-13 桁がかりの変化(ケース2)

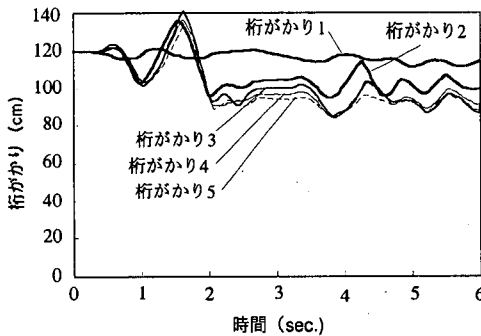


図-14 桁がかりの変化(ケース3)

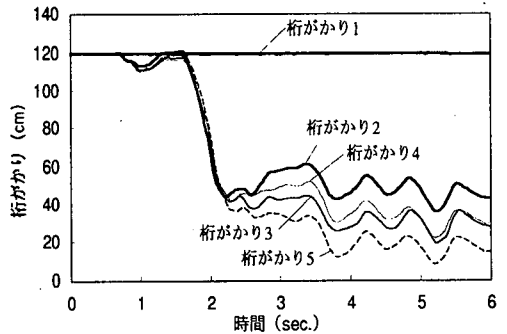


図-15 桁がかりの変化(ケース4)

4. 桁がかりに関する考察

得られた解析結果から地震荷重を受ける橋梁の挙動について考察する。今回の解析では、どの解析ケースにおいても桁の変位や桁がかりの減少に大きく影響を及ぼすような桁どうしの衝突は確認できなかった。すなわち、桁がかりの減少のメカニズムは図-16に示すようなものであった。まず、地震荷重により固定支承が破壊され、桁が橋脚から解放される。桁が移動し、場所によっては隣り合う桁どうしが接触する。逆向きに変形する橋脚に摩擦力で引っ張られて、桁が移動する。橋脚が元の方向へ戻ろうとするが、桁には慣性力が働いており桁と橋脚の間にずれを生じる。その結果、桁がかりが減少するといったメカニズムである。

表-2 解析条件と桁がかりの発生時刻及び最小値

解析ケース	支 承		地震荷重倍率	桁 が かり	
	固定支承水平耐力	可動支承摩擦係数		変化発生時刻 (秒)	最小値 (cm)
ケース 1	180tfで破壊	0.15	1.0	0.44	56.4
ケース 2	180tfで破壊	0.15	1.3	0.44	40.3
ケース 3	180tfで破壊	0.50	1.0	0.46	83.8
ケース 4	900tfで破壊	0.15	1.0	0.74	8.2

表-2に、これまでに行った解析ケースの解析条件と桁がかりの変化発生時刻及び最小値をまとめて示す。ケース2の桁がかり最小値はケース1よりも小さく、桁がかりの減少は地震荷重の大きさに影響を受けていることが分かる。ケース3では桁がかりの変化発生時刻はケース1と変わらないが、桁がかりの最小値は大きくなっている。これは、図-16の(4)の段階で桁と橋脚との摩擦力が大きく現れ、ずれが小さく押さえられたためだと思われる。ケース4では桁がかりの減少がかなり激しい。これは固定支承が切れるための地震荷重が大きく、解放された桁に大きな慣性力が働いたためであろう。

以上のように、地震時における橋梁の桁がかりの減少には支承の最大耐力や摩擦係数が大きく影響することが確認できた。

5. まとめ

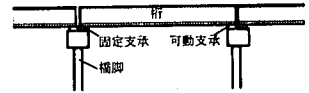
3次元有限要素法により、地震時に桁が落下する一因として連続する桁どうしが衝突し玉突状態となり変位が増大するという現象を検討するため、桁どうしの接触を考慮した動的解析を行った。その結果、本研究で仮定した条件においては、桁どうしの接触は生じているものの、玉突状態と衝突により桁の水平変位が急激に増大するといった現象は認められなかった。さらに桁の落下のメカニズムを検討するため、桁がかりに影響を及ぼす因子として支承の最大耐力や摩擦係数をパラメータとして解析を行った。その結果、固定側の支承の最大耐力が大きくなると、破壊時に放出されるエネルギーが大きくなり桁がかりが危険な状態になることが明らかになった。また、早い段階で支承が破壊する場合には、可動側の支障の摩擦が小さい方が桁がかりが少なくなることも確認された。

3次元有限要素法により、地震時に桁が落下する一因として連続する桁どうしが衝突し玉突状態となり変位が増大するという現象を検討するため、桁どうしの接触を考慮した動的解析を行った。その結果、本研究で仮定した条件においては、桁どうしの接触は生じているものの、玉突状態と衝突により桁の水平変位が急激に増大するといった現象は認められなかった。さらに桁の落下のメカニズムを検討するため、桁がかりに影響を及ぼす因子として支承の最大耐力や摩擦係数をパラメータとして解析を行った。その結果、固定側の支承の最大耐力が大きくなると、破壊時に放出されるエネルギーが大きくなり桁がかりが危険な状態になることが明らかになった。また、早い段階で支承が破壊する場合には、可動側の支障の摩擦が小さい方が桁がかりが少なくなることも確認された。

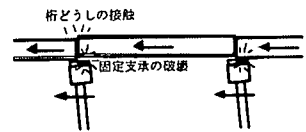
参考文献

- 1) 那須誠：阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定，阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集，1996年1月
- 2) 金子巷，勝川藤太：高架橋の橋軸直角方向の地震分担力に関する一考察，阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集，1996年1月
- 3) 日経コンストラクション，pp.56～pp.61 1995年6月9日号
- 4) 石川雅美，野沢勝利，田口幸良：地震による橋桁の落下シミュレーション，PUCA '95 Proceedings，1995.11
- 5) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，社団法人日本道路協会，1990年2月

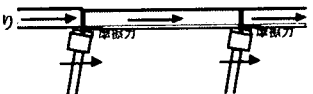
(1) 初期状態



(2) 地震荷重により固定支承が破壊



(3) 桁と橋脚の摩擦力により桁が引張られる



(4) 橋脚のみが戻り桁がかりが減少する

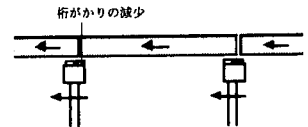


図-16 桁がかりの減少のメカニズム