

# 高架料金所における耐震設計手法

大阪建設局総務部用地調査課 鬼川 講三

## 要 旨

阪神高速道路は大阪・神戸地域に広がる都市高速道路である。1995年の兵庫県南部地震では、道路構造物に大きな被害が発生したが同時に道路上の施設である料金所にも多くの被害が発生した。標準的な料金所は角型鋼管柱とH形鋼梁からなる鉄骨造平屋建て 約200㎡の規模であり、高速道路入り口に車線を跨いで設けられている。都市高速道路が被災後の救援・復興に果たす役割は極めて大きいので大地震時において料金所の被害が道路機能の障害にならないようにすることは重要である。料金所が被害を受けたことを契機に設計方法を見直す必要が認識された。

キーワード：被害分析に基づく設計手法の提案

## はじめに

地震による被害を正確に調査解析しその特徴を把握すると共に、その被害に至ったメカニズムを解明する事は重要である。

都市高速道路として重要な役割の一端を担う料金所を道路構造物の一部としてとらまえてその機能を確保させるべき構造設計方法を見直すと共に、実際の詳細設計の提案を行うものである。

### 1. 数量的分析

#### 1-1 調査対象

料金所は、収受員の居室であるブースとそれを覆う屋根架構で構成されているが本検討の対象となるのは後者である。

阪神高速道路の料金所は全部で122箇所ある。この内120箇所について詳細な調査を行った。

#### 1-2 料金所の損傷の特徴

以下に地震による料金所架構の損傷の特徴について示す。

##### (1) 損傷部位

料金所架構の損傷部位は大きく以下のように分類できる。

- ・柱脚
- ・梁柱仕口
- ・上記以外の構造躯体
- ・仕上, その他

それぞれの部位の損傷が全体の損傷の中でどれくらいの比率であったかを調査した結果を図1-1に示す。同一架構で複数の損傷部位が存在する場合は重複して集計している。この結果より、損傷部位は柱脚が最も多い。

##### (2) 柱脚種別

柱脚の種別は以下の2つに分けられる。

- ・根巻き柱脚
- ・露出柱脚

(なお、料金所は土木構造物上に設置されるので

埋込み柱脚はない。)

それぞれの損傷状況を調査した結果、根巻き柱脚には全く損傷は生じておらず損傷は露出柱脚のみ生じていた。これは、露出柱脚に被害が集中していたことが明らかである。

(3) 露出柱脚の損傷種類

露出柱脚の損傷は以下の種類があった。

- ・アンカーボルトの伸び
- ・アンカーボルトの破断
- ・モルタル破損

(ベースプレートには顕著な損傷例がなかった。)

それぞれの損傷種類が露出柱脚全体の損傷の中でどれくらいの比率であるかを調査した結果を、図1-2に示す。同一柱脚に複数の損傷種類が存在する場合は、重複して集計している。

これらの結果より、損傷種類はアンカーボルトの伸び、破断の順に多いことがわかる。

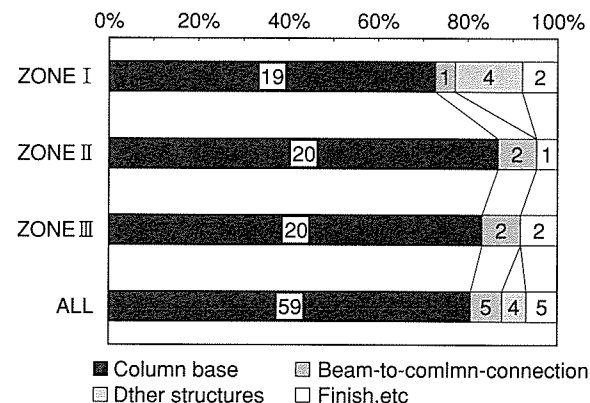


図1-1 損傷部位

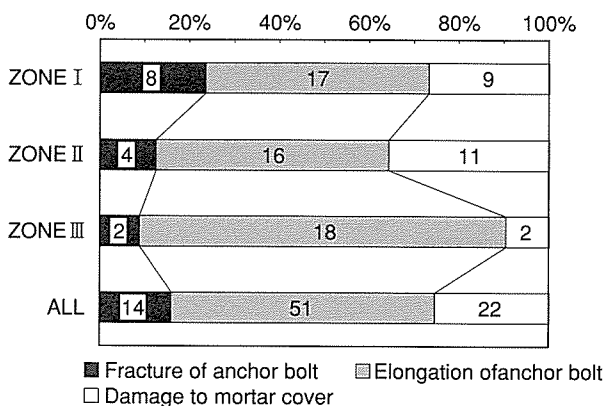


図1-2 露出柱脚の損傷例

1-3 料金所の損傷と道路構造物の関係

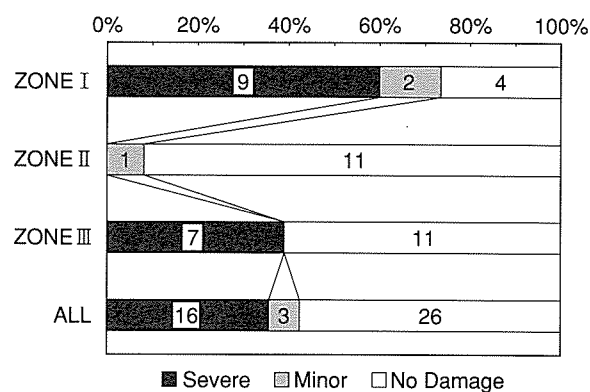
(1) 地上/高架による被害率

料金所は、地上の道路にあるか、または高架の道路構造物上にあるかにより、以下の2つの種別に分けられる。

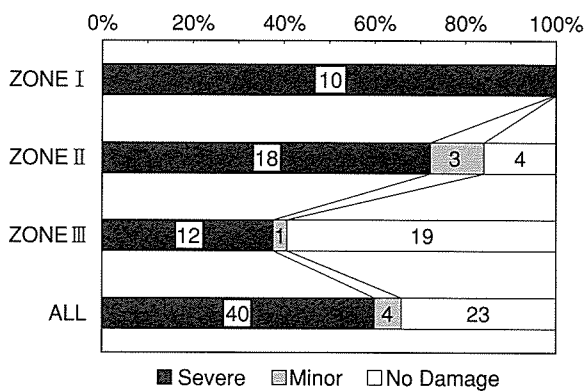
- ・地上料金所
- ・高架料金所

地上料金所、高架料金所のそれぞれの損傷状況を図1-3に示す。

これらの結果より、高架料金所は地上料金所に比べ、高い被害率を示している。



地上料金所の被害率



高架料金所の被害率

図1-3 料金所の被害率

(2) 道路構造物の構造種別・架構形式と被害状況

高架料金所の下部道路構造物の構造種別、架構形式は、鉄筋コンクリート造(RC造)単柱、RC造ラーメン、鉄骨造(S造)単柱、S造ラーメンの4種類である。

これらの下部道路構造物の構造種別、架構形式と被害状況について調査を行ったが両者の関連は認められなかった。

### (3) 道路構造物の地盤面からの高さ被害状況

高架料金所の下部道路構造物の地盤面からの高さ被害状況について調査を行ったが両者の関連は特に認められなかった。

## 1-4 料金所の損傷と地動加速度の関係

最大加速度がほぼ同程度とみなせるゾーンを設定し、それぞれのゾーンにおける被害状況を調査した。

最大加速度分布は、大林組技術研究所「平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書」を参考にした。ただし、ゾーン分けに際し北神戸線の料金所については加速度記録は200~400GALの範囲であるが次の理由により他の同じ加速度レベルの地域とは区別することとした。

- ・この地域が全体として地震の被害が少なかったこと。
- ・北神戸線は全て地上であり高架料金所が全くないこと。

ゾーンは以下のように設定した。

- ・ゾーン I：400GAL以上
- ・ゾーン II：200~400GAL
- ・ゾーン III：200GAL以下
- ・ゾーン IV：200~400GAL（北神戸線）

これらを図1-4に示す。

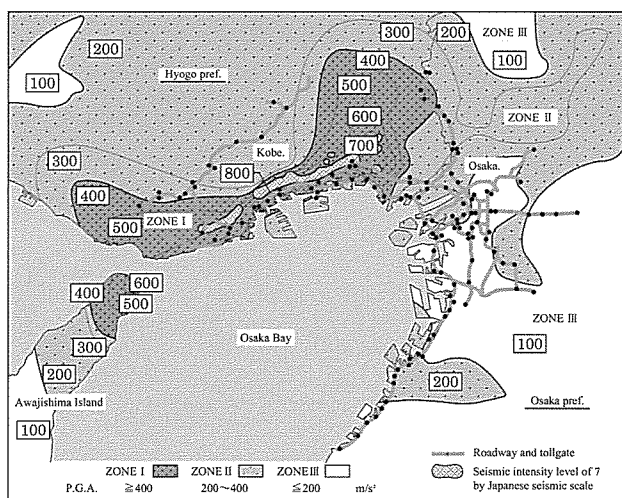


図1-4 ゾーン分布図

それぞれの加速度のゾーンにおける料金所の被害状況を図1-5に示す。

これより被害数及び被害率は加速度の大きな地域ほど大きい。

ゾーンIVは加速度の値としてはゾーンIIに相当するが、被害率は最も小さい。

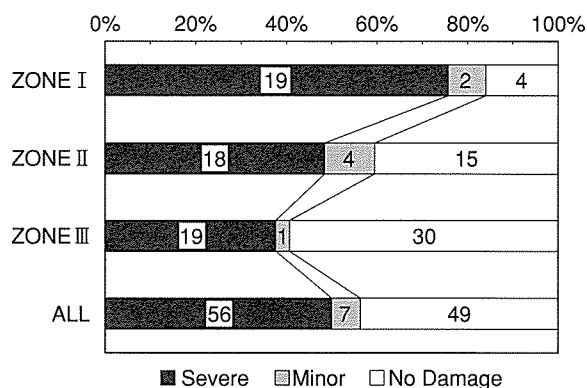


図1-5 最大地動加速度によるゾーニングと被害率

## 1-5 結果の要約

料金所架構の兵庫県南部地震における被害に関する数量的調査の結果は以下のように要約できる。

- ・料金所架構で損傷が生じた部位は主に柱脚である。
- ・柱脚は露出柱脚と根巻き柱脚があるが、損傷が生じたのは露出柱脚のみであり、根巻き柱脚には全く損傷はなかった。
- ・露出柱脚における損傷は、主にアンカーボルトにおいて生じた。
- ・高架料金所は地上料金所に比べて被害が多い。
- ・地震の最大加速度に応じて被害率は高くなる。

## 2. 解析的検討

### 2-1 検討対象

被害のメカニズムを解明するため、非線型地震応答解析による検討を行った。

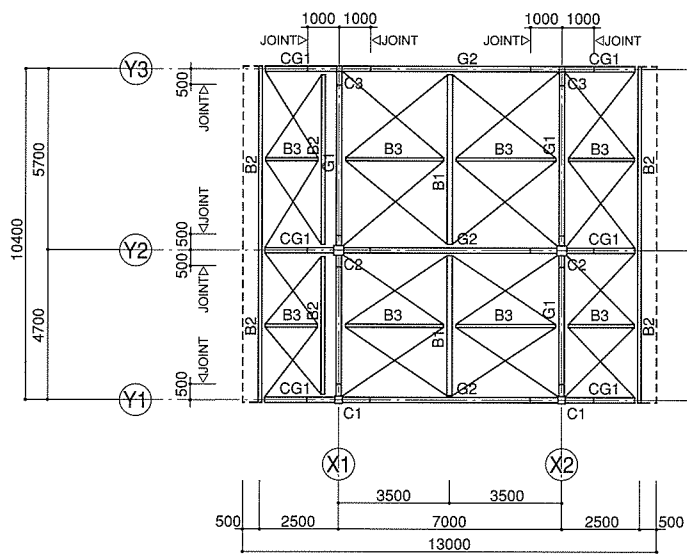
検討対象として柱脚に被害を受けた高架料金所から代表的なものを3ヵ所選定した。ここではそのう

ちの1つで震度7の地域に位置する生田川料金所（神戸市中央区）について示す。（図2-1）

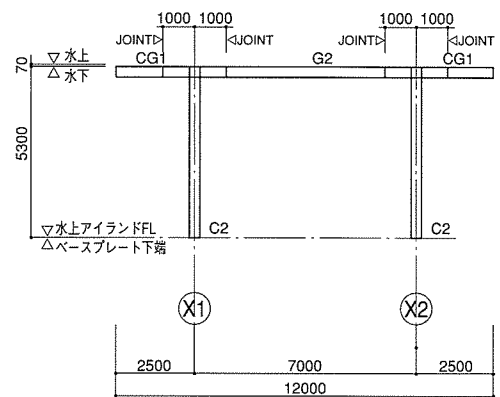
生田川料金所は、1スパン×2スパンの平面形をした鉄骨平屋建て約140㎡の建築物で標準的な規模と形状である。柱脚はすべて露出柱脚となっている。6本の柱のうち4本は橋桁上の鉄筋コンクリート床版にアンカーボルトで接合され、残りの2本は橋桁に取り付けられた鉄骨の梁に高力ボルトで接合されている。料金所下部の道路構造物の構造は、橋桁が鋼梁の上に鉄筋コンクリート床版をのせたもの、橋脚が鉄筋コンクリート造の独立柱

である。

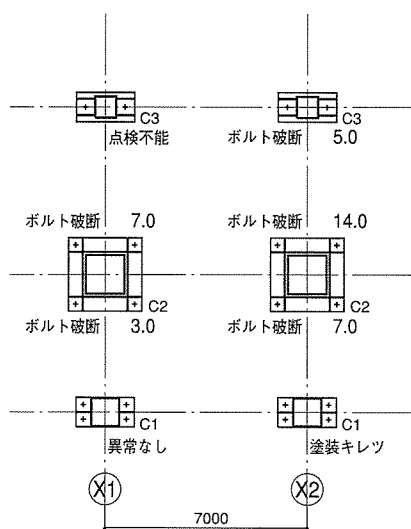
地震時の被害としては、柱脚の12本のアンカーボルトのうち5本でネジ部が破断し、他の5本で3～14mmの伸びが生じた。残りの2本は調査ができなかったため不明である。高力ボルト接合の柱脚に損傷はなかった。いずれの柱もベースプレートの変形やナット損傷は見られず柱脚の残留変形もなかった。また、上部架構にも残留変形はなく、柱や梁にも損傷はなかったが設備機器の取り付け部は一部破損していた。



屋根伏図 1:200



Y2通軸組図 1:200



ベースプレート伏図 1:20

・数字はアンカーボルトの伸びを示す

図2-1 生田川料金所

## 2-2 検討方法

被害調査で露出柱脚に被害が多く見られたため、柱脚の固定度に着目し以下の3つの解析方法により検討を行なった。

- (1) 原設計と同じく設計水平震度0.3の水平力で柱脚をピン支点としたモデルによる静的解析 (図2-2)
- (2) 同じ水平力に対して柱脚を半固定(ばね支点)としたモデルによる静的解析(図2-3)
- (3) ランプマス型振動モデルによる動的解析 (図2-4)

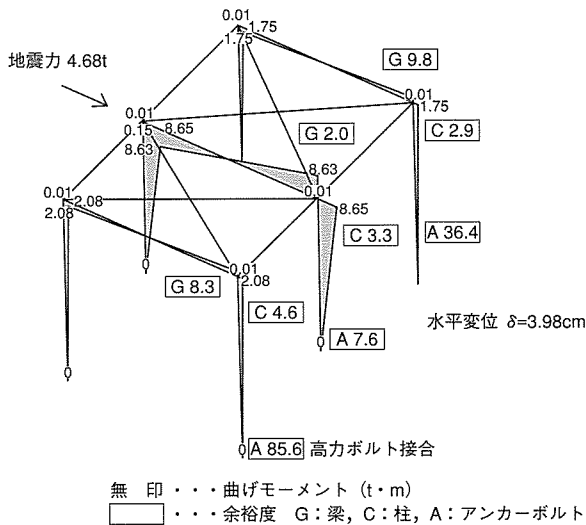


図2-2 柱脚ピン支点

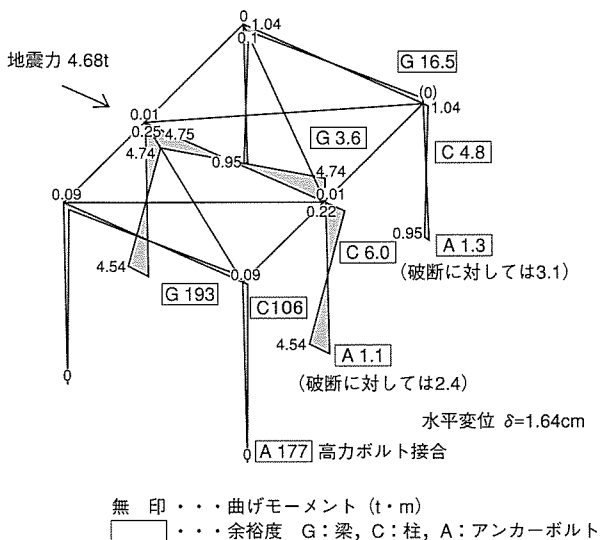


図2-3 柱脚半固定(ばね支点)

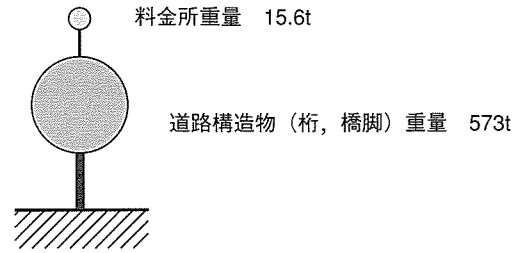


図2-4 ランプマス型振動モデル

## 2-3 検討結果

### 2-3-1 静的解析結果

設計用地震力は45.9kN (4.68tonf)である。図中に示す「余裕度」は、部材の許容耐力(R)と解析から得た応力(S)との比率(R/S)を示している。

柱脚ピン支点の場合、設計用地震力の応力に対して梁・柱にはおよそ2~10倍の耐力の余裕がある。これは、建物の変形制限で部材が決定されているためである。アンカーボルトについても7倍以上の余裕がある。これに対して柱脚を半固定とした場合、アンカーボルトに引抜き力が作用することになるため耐力の余裕度は1.1~1.3と小さくなる。この余裕度から換算するとアンカーボルトは水平震度0.3~0.4で許容耐力に達し、0.7~0.9で破断にいたると推定される。

### 2-3-2 動的解析結果

振動モデルは料金所と道路構造物をそれぞれ1つの質点にモデル化した2質点系せん断型モデルである。

- ・料金所の質量は15.6tonである。剛性は、アンカーボルトの降伏耐力と架構の終局耐力を折れ点とするトリリニアアの復元力特性を持つものとする。
- ・減衰定数は2%とする。
- ・道路構造物の質量は573tonである。
- ・剛性は、橋脚のひび割れ耐力と終局耐力を折れ点とするトリリニアアの復元力特性を持つものとする。
- ・減衰定数は5%とする。
- ・入力地震波は、生田川料金所付近で観測されたものを最大加速度400Galに基準化して用いる。

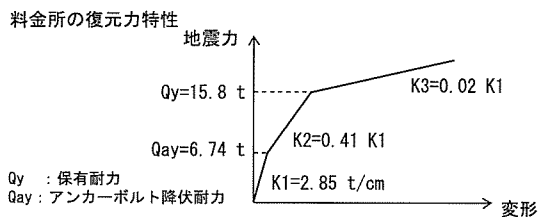


図 2-5 料金所の復元力特性

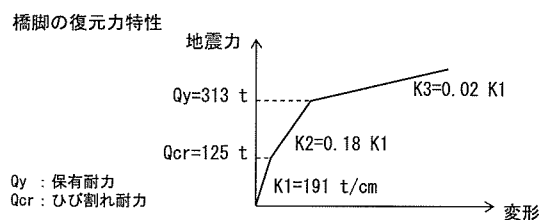


図 2-6 橋脚の復元力特性

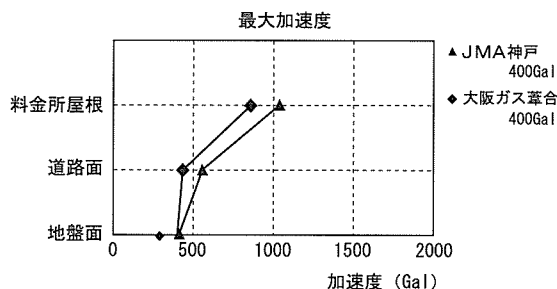


図 2-7 最大加速度

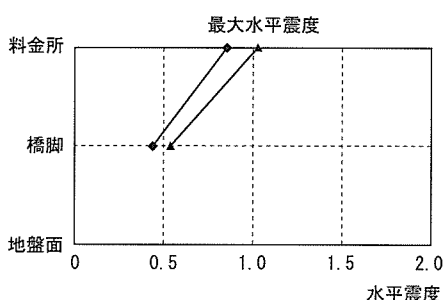


図 2-8 最大水平震度

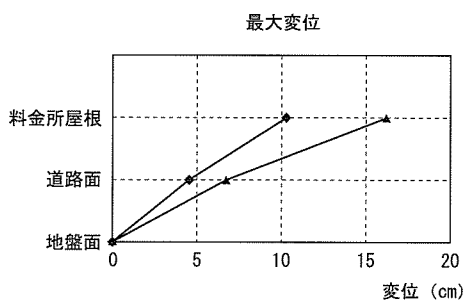


図 2-9 最大変位

図 2-5 から図 2-9 の結果から料金所に作用した地震力は、水平震度にして 0.85~1.0 であり静的解析と比較するとアンカーボルトが破断する大きさである。これは、実際の被害状況と対応している。

### 2-4 被害のメカニズム

料金所の柱脚は、ピンとして設計されてきたが実際にピンだとするとアンカーボルトには梁・柱以上に強度上の余裕があり被害状況と対応しない。これに対して柱脚を半固定とすると、柱脚に曲げモーメントが発生し、これによりアンカーボルトに引抜き力が生じる。このため、梁・柱が降伏する以前にアンカーボルトが降伏・破断することになる。動的解析によればアンカーボルトに被害が生じる程度の地震力は受けたと推定され、被害状況とほぼ対応する結果となっている。

以上により、柱脚（特にアンカーボルト）に被害が多かった原因は次の 2 点と考えられる。

- 1) 設計では考慮していなかった引抜き力がアンカーボルトに作用した。
- 2) その引抜き力がアンカーボルトの強度上の余裕を超える大きな力であった。

### 3. 被害状況のまとめ

数量的分析と解析的検討から被害状況をまとめると次のようになる。

- 1) 地震の最大加速度が大きい地域ほど料金所の被害も多い。両者には明らかな相関関係が見られる。
- 2) 料金所の被害は露出柱脚に集中し、特にアンカーボルトに多い。これは設計上の仮定と実際との違いからアンカーボルトに大きな力が作用したためである。これに対してもともと固定として設計した根巻柱脚には被害が全くない。
- 3) 高架料金所と地上料金所では高架料金所の被害率が高い。これは、高架料金所では下部の道路構造物により地震の加速度が増幅されるためである。
- 4) 高架料金所において、下部の道路構造物の構造種別、形式、高さなどと料金所の被害の関連はみられない。

## 4. 設計用水平震度の提案

地上料金所に比べて高架料金所に被害が多かったことを踏まえて、高架料金所の設計用震度の見直しを行なった。

### 4-1 検討方法

高架料金所と道路構造物をそれぞれ1質点とする2質点系せん断型モデルにより、動的解析を行なった。

料金所は、標準料金所を1つ設定し、質量と剛性を求めた。道路構造物は、橋脚の構造種別と固有周期をパラメータとしてモデルを設定した。

構造種別は鉄筋コンクリート構造と鋼構造の2種類、固有周期は0.4秒、0.6秒、0.8秒、1.0秒、1.2秒の5種類とした。

入力地震波の大きさは、中地震として100Gal、大地震として500Galとした。

### 4-2 検討結果

検討結果を図4-1から図4-4に示す。橋脚の固有周期が長くなるにしたがい、料金所の応答値が小さくなることが見て取れる。図4-2において、0.6秒で応答値が大きくなるのは、料金所の固有周期0.35秒と橋脚の初期固有周期0.33秒が近いためである。水平震度の最大値は中地震で1.72、大地震時では2.5であった。大地震時では数センチの残留変形が生じた。

### 4-3 設計用水平震度の提案

料金所の耐震性の目標は、中地震に対して補修不要、大地震に対して補修により使用可としている。解析結果からすると設計用水平震度を1.5とすれば中地震に対してはほぼ弾性範囲となるし、大地震に対しても、終局耐力に至らないか至っても大きな残留変形は残らない程度であり、耐震目標をみとることができる。

この解析結果や建築に関する法令・基準を参考にして、今回、高架料金所の設計用水平震度（許容応力度設計用）として1.5を提案した。

地上料金所については被害がほとんどなかったため、これまでと同じく設計用水平震度（許容応力度設計用）は0.3とした。

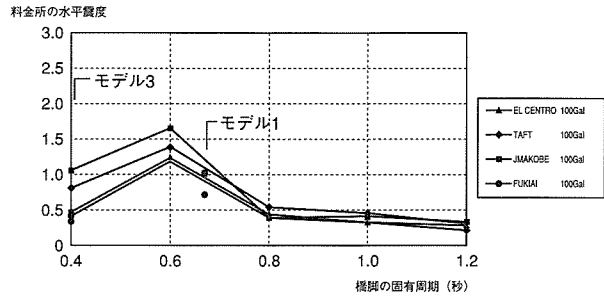


図4-1 中地震時（RC造橋脚）の解析結果

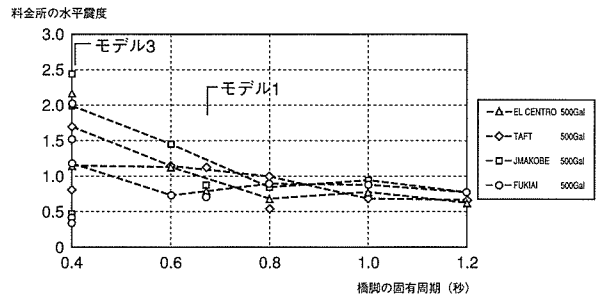


図4-2 大地震時（RC造橋脚）の解析結果

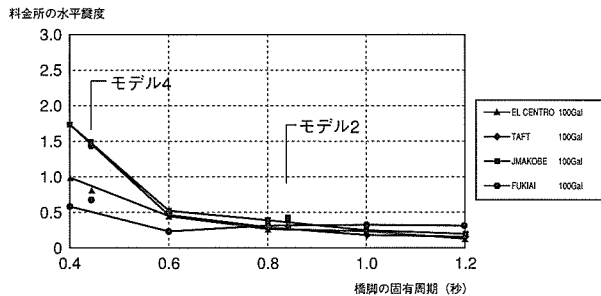


図4-3 中地震時（S造橋脚）の解析結果

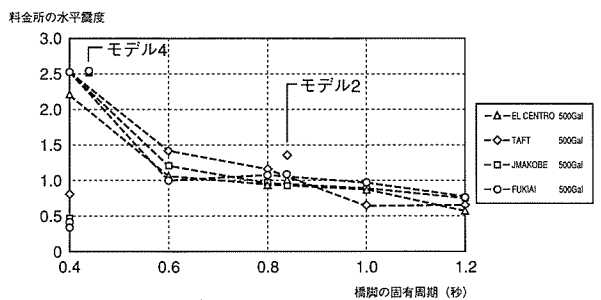


図4-4 大地震時（S造橋脚）の解析結果

## 5. 柱脚形式の提案

露出柱脚のアンカーボルトに被害が多かった原因は、柱脚の設計がピン支点（曲げモーメントが発生しない）としながらも、水平力、引き抜き及び料金所の施工上からディテールにおいて半固定

の構造となっており、実質柱脚には曲げモーメントが発生していた。特に高架料金所では、道路構造物により地震の加速度が増幅され設計値より大きい地震力が発生し、被害が集中したものと推定される。

よって、その改善案として次の2点を重要視する事とした。

- (a) 固定柱脚とする。
- (b) 固定度を考慮して設計を行ない、かつ、大地震時にも破断しないような変形能力のあるディテールとする。

高架料金所での固定柱脚は、道路構造物に曲げモーメントが生じるが、料金所の現況に即した柱脚固定度を評価する事で応力伝達が明快に検証できると共に、柱脚への応力負担が適切に設計できるため、鉄骨量を現状とそれほど変えずに耐ラップができるので、望ましい柱脚形式といえる。

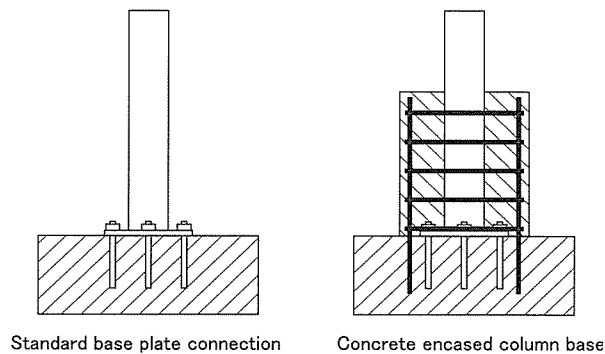


図5-1 柱脚タイプ

固定とする方法は、鉄筋コンクリートを根巻する方法と鋼製の既製品を用いる方法があるが、車の走行によるナットの緩みや雨水・排気ガスによる劣化などの耐久性能を考えると根巻のほうが優れている。以上の理由により、料金所の柱脚形式として根巻柱脚を提案した。(図5-1)

## 6. 結語

兵庫県南部地震における阪神高速道路料金所の被害調査を行ない、被害の特徴とそのメカニズムを分析した。その結果から、(1)柱脚の固定度に関する設計仮定と実際との違い(2)道路構造物の応答によって料金所構造物への地震入力が設計値よりも大きくなった。この2点が主な要因であることが明らかとなり、今後の対策として料金所の設計用水平震度と柱脚形式を見直し、新規路線の料金所及び立替計画の料金所は見直した設計で実施し、既存料金所においては検討した主旨に従い適切な補強工事等を計画的に実施している。

## 参考文献

- 1) 金多他：3号神戸線料金所耐震構造検討業務報告書，阪神高速道路公団，(財)阪神高速道路管理技術センター，1996.3
- 2) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.

# Methods for Earthquake-Resistant Design in Elevated Toll Booth Structures

Kouzou ONIKAWA

The Hanshin Expressway is an urban motorway that runs through the Osaka and Kobe areas. The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake (Kobe Earthquake) caused major structural damage to the expressway (Watanabe et al.1997). At the same time, heavy damage was sustained to tollgate structures set up on the roadway. A standard tollgate is a one-story steel-frame structure, with square tube columns and wide flange beams, of approximately 200 square meters in building area, and is located over the traffic lanes at the entrance to the expressway. It is important to ensure that damage to tollgates does not become an obstacle to the traffic on the expressway in case of a major earthquake because urban motorways carry out a significant role in the rescue and recovery operations after an earthquake. Because of the damage sustained to tollgates during the Kobe Earthquake, it is recognized that the design method should be revised.