

論文 RC 橋脚の損傷に及ぼす衝撃的上下動の影響に関する一考察

宮本文穂*¹, 小野紘一*², 北村八朗*³, 井上正一*⁴

要旨：昨年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震では、本格的な横揺れを感じる前に衝撃的な縦揺れを感じたという多くの人の証言があるように、一瞬の衝撃的上下動が構造物に作用した結果、被害を予想外に大きくしたのではないかという懸念もある。本研究はこのような背景のもとで、特に鉄筋コンクリート（RC）橋脚を対象としたモデルによる力積の考え方に基づく運動量保存則の適用により、衝撃的上下動初期におけるRC橋脚内への引張損傷発生の可能性およびそれがRC橋脚の損傷、破壊メカニズムにどのように関与したか明らかにしようとしたものである。

キーワード：兵庫県南部地震、RC橋脚、衝撃的上下動、引張損傷、破壊メカニズム

1. はじめに

本研究は、大都市直下型といわれる兵庫県南部地震で発生した可能性のある衝撃的な上下動が道路橋RC橋脚の損傷、破壊メカニズムにどのように関与したかを簡単なモデルによって解析的に明らかにすることを試みたものである。すなわち、高速道路高架橋RC製単柱橋脚を例として、運動量保存則の適用によって衝撃的な上下動によって生じる軸引張力が柱部材に引張ひび割れ損傷を発生させたり、破壊の発端になりうるかを解析したものである。

2. 地震動の概要

兵庫県南部地震のメカニズムは、神戸周辺に存在する多くの活断層の内のいくつかが動いたことによるものであるとの考え方が支配的となってきており、その運動は突き上げおよび横ずれ型である。そのため、今回の地震の特徴として上下方向の大きな最大加速度および最大速度が観測されている。一例として、神戸市本山観測点では、速度計の許容範囲40kineを振り切る鉛直震動が生じており、また、神戸海洋気象台でも加速度波形を積分して求めた鉛直方向の最大速度が約40kineに達していることが明らかになっている¹⁾。このため、今回の地震による被災構造物の中には大きな水平2方向地震動だけでは説明し難い事例も見られ²⁾、何らかの形で衝撃的上下動の影響があった可能性を否定できないと考える。すなわち、高架橋RC製橋脚柱部の中間部や上部で全周にわたる水平ひび割れや被りコンクリートの剥離、鉄筋の降状およびはらみだし、内部コンクリートの剥落といった被害が多数みられた事例に対しては、損傷、破壊のメカニズム解明が完全に明らかになっているとは言い難い現状にある。

* 1 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科、工博（正会員）

* 2 京都大学教授 工学部地球工学科 土木システム工学専攻、Ph. D（正会員）

* 3 大阪ガス（株）土木建築技術チーム マネージャー、工学士（正会員）

* 4 鳥取大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

3. 衝撃的上下動によるRC単柱橋脚損傷の可能性の検討

3.1 解析モデルおよび解析方法

衝撃的上下動によるRC単柱橋脚損傷の可能性を検討するにあたって、ここでは、簡単化のために橋脚フーチング部および杭部を剛体と見なし、これらを含む岩盤質量のある部分が橋梁上部工を含む橋脚柱、梁部に上下動として衝撃的（衝突問題として）に作用する結果、力積の考え方が適用できるものと仮定した。すなわち、図1に示すようにRC単柱橋脚全体を、その柱部をばね（ばね定数 k_c ）で、上部工および梁部分を質点、 m で、フーチング部以下を剛体で、それぞれモデル化し、剛体と見なした部分からの上下（突き上げ）運動量（ $M \cdot V$ ）がモデル化した系全体で保存されるとして橋脚コンクリート柱部に発生する軸方向応力の内、主として軸引張応力に注目して引張ひび割れ損傷発生の可能性を試算した。

3.2 RC橋脚柱部に生じる引張応力の算定

図1に示すRC橋脚全体モデルの質点 m に運動量保存則により、上向きに初速度 v_0 が作用するとして、コンクリート柱部の引張ひずみ ϵ_c および応力 σ_c を以下のように算定した。

まず、図1のばね-質点系の運動エネルギー保存則より、次式が得られる。

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}k_c \left(\frac{mg}{k_c} \right)^2 = \frac{1}{2}k_c h^2 + mg \left(\frac{mg}{k_c} + h \right) \quad (1)$$

ここで、 m ：上部工および梁部の総質量(tf)

v_0 ：初速度(m/s)

k_c ：コンクリート柱部のばね定数(tf/m)

$$k_c = E_c A_c / L$$

E_c ：コンクリートの弾性係数(tf/m²)

A_c ：コンクリート柱部の断面積(m²)

h ：ばねの最大伸び(m)

g ：重力加速度(m/s²)

とする。

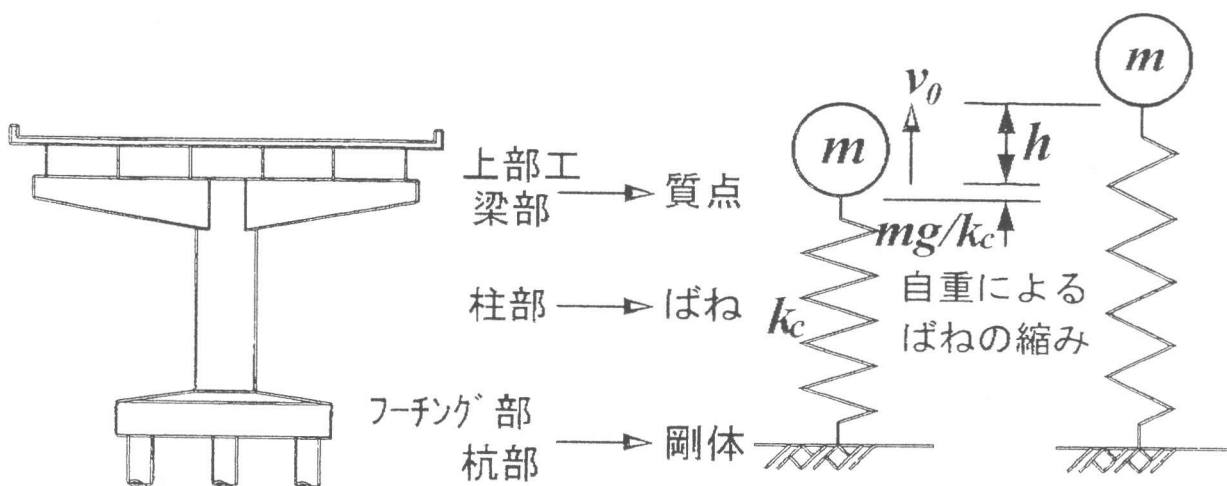


図1 RC橋脚の解析モデル

式(1)を h について解くと、次式が得られる。

$$h = -\frac{mg}{k_c} + \sqrt{\frac{m}{k_c}}v_0 \quad (2)$$

従って、コンクリート柱部に生じる引張ひずみ ϵ_c は、次式によって得られる。

$$\epsilon_c = \frac{h}{L} = \frac{1}{L} \left(-\frac{mg}{k_c} + \sqrt{\frac{m}{k_c}}v_0 \right) \quad (3)$$

ここで、 L はコンクリート柱部の長さ (m) である。

式(3)を利用して、コンクリート柱部に生じる引張応力 σ_c を求めると、次式のようになる。

$$\sigma_c = \epsilon E_c = \frac{E_c}{L} \left(-\frac{mg}{k_c} + \sqrt{\frac{m}{k_c}}v_0 \right) \quad (4)$$

ここで、コンクリート柱部に生じる引張応力 σ_c がコンクリートの引張強度 f_t を上回る場合に、RC柱部に全周にわたる水平の引張ひび割れ損傷が発生すると仮定した。

表1 RC丸単柱橋脚の構造諸元、材料特性など

上部工重量	$W_1 = 445(\text{tf})$
梁部重量	$W_2 = 130(\text{tf})$
質点の質量	$m = 58.7(\text{tf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m})$
柱部直径	$D = 2.5(\text{m})$
断面積	$A_c = 2.5^2 \cdot \pi / 4 = 4.9(\text{m}^2)$
鉄筋量	$A_s = 665(\text{cm}^2)$
柱部の長さ	$L = 7.2(\text{m})$
弾性係数	$E_c = 3.0 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$
ばね定数	$k_c = E_c A_c / L = 2.0 \times 10^6(\text{tf}/\text{m})$
重力加速度	$g = 9.8(\text{m}/\text{s}^2)$

3.3 ケーススタディー

上述の簡単なモデルによる解析手法の有効性を検討するため、今回の地震で被災したRC橋脚の中から丸単柱橋脚で、しかも全周にわたる水平ひび割れの発生した橋脚を例にとり、コンクリート柱部に生じる最大引張応力を計算した。表1に対象橋脚の諸元および材料特性などを示す。

表1の構造諸元などを用いて、式(4)より算定したコンクリート柱部に生じる引張応力 σ_c と質点 m の初速度 v_0 との関係を示したものが図2である。これより、コンクリートの引張強度 f_t を $20 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ と仮定すると、初速度 v_0 が約 15 kine を越えるとコンクリート柱部に引張ひび割れ損傷が生じる可能性があることがわかる。

ここで、一例として初速度 $v_0 = 40(\text{kine}) = 0.4(\text{m}/\text{s})$ を与えた場合を考えると、コンクリート

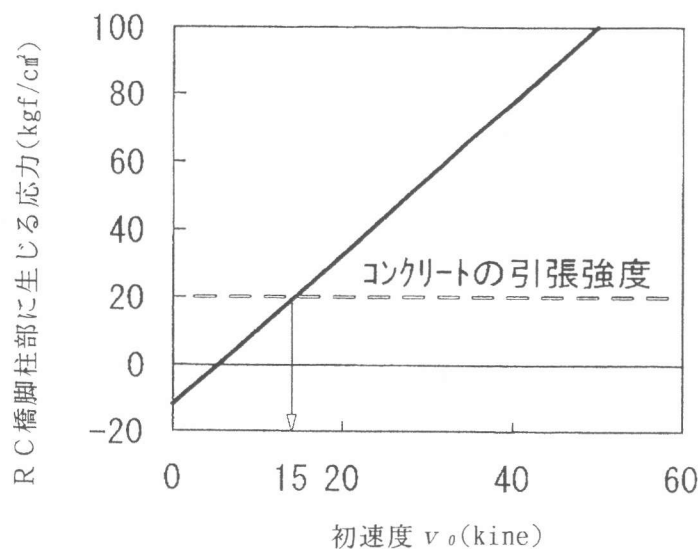


図2 初速度 v_0 と RC 橋脚柱部に生じる応力の関係

柱部に生じる瞬時的な最大引張応力 σ_c は、

$$\sigma_c = 78(\text{kgf/cm}^2)$$

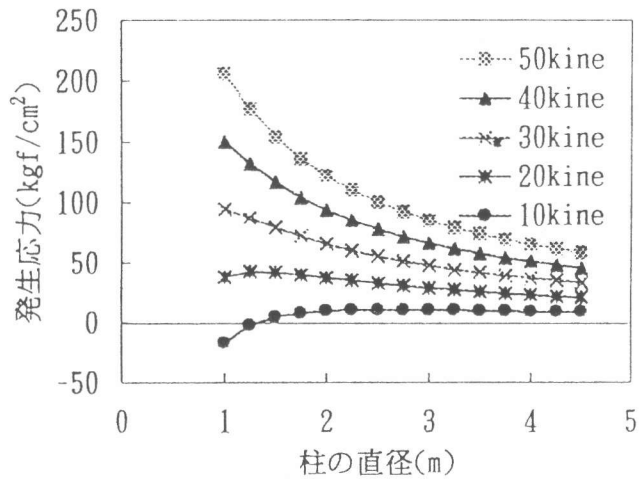
にも達すると考えられることより、瞬時に全周にわたる水平ひび割れが生じることになる。これと同時に、引張力全てが柱部に配置されている軸方向鉄筋に移行すると仮定すると、軸方向鉄筋の最大引張応力 σ_s は、

$$\sigma_s = \sigma_c \times A_c / A_s = 5700(\text{kgf/cm}^2)$$

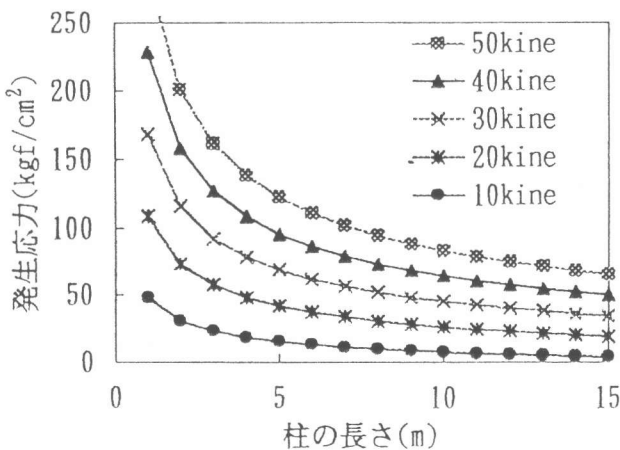
にも達することになる。従って、コンクリート柱部には全周にわたる水平ひび割れが生じるとほぼ同時に軸方向鉄筋が瞬時に降状域に達することになる。このようなことを考慮すると、コンクリート柱部で軸方向鉄筋の段落とが行われている場合には、鉄筋量の少ない柱上部や中央部の鉄筋が先に降状し、この部分を起点にして橋脚が大きく被災する可能性があるという結論に至る。

図3(a)~(c)は、RC橋脚のコンクリート柱部の直径、長さおよび上部工総重量が異なる場合のコンクリート柱部に発生する引張応力の変化をそれぞれ示したものである。これらより、初速度 $v_0=20\text{kine}$ 以上の場合では、コンクリート柱部の直径が小さいほど、また上部工総重量が大きいほど大きな瞬時的な最大引張応力が生じる傾向が認められる。また、初速度 $v_0=10\text{kine}$ 以下の場合では、コンクリート柱部の直径が小さくなるほど、また上部工総重量が大きくなるほど自重の影響の割合が大きくなり瞬時的な最大引張応力が小さくなる傾向を示す。一方、コンクリート柱部の長さについては、初速度に関係なくその

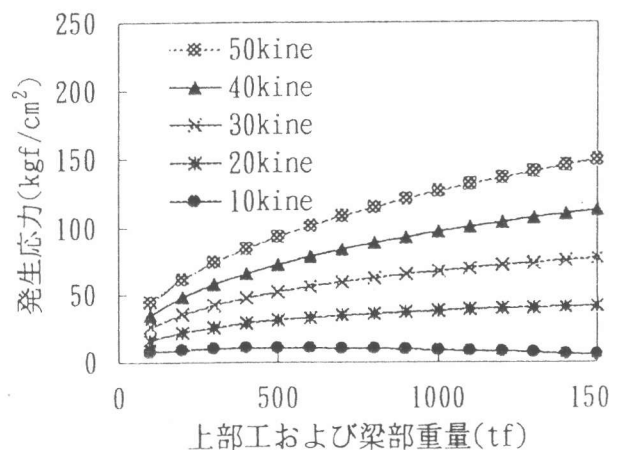
長さが短くなるほど大きな瞬時的な最大引張応力が生じる傾向を示している。例として、コンクリート柱部の直径が2~4m、柱長が3~10m、上部工総重量が300~1000tfの範囲をとると、 $v_0=20\text{kine}$ 程度の衝撃的な上下動によって、概ね20~30kgf/cm²の瞬時的な引張応力がコンクリート柱に生じることになる。



(a) コンクリート柱の直径の影響



(b) 橋脚長さの影響



(c) 上部工および梁部総重量の影響

図3 RC橋脚コンクリート柱部に発生する引張応力の変化

4. 初期引張損傷が破壊メカニズムに及ぼす影響評価

上述までの検討結果をふまえ、衝撃的な上下動によって生じる軸方向引張応力に水平動を伴った場合のRC橋脚の破壊に及ぼす影響について解析的な検討を加えてみる。ここで適用した解析手法は、多質点系骨組み構造モデルを利用したもので³⁾、衝撃的な上下動の速度の一例として、 $v_0=10\text{kine}$ を作用させた軸方向引張力のもとで神戸海洋気象台で測定されたNS成分を入力地震動として加えた。

図4および図5は、水平動による発生断面力と、衝撃的な鉛直速度が与えられたときの軸力作用時の曲げおよびせん断耐荷力とを比較したものである。ここで、解析に用いた補強鉄筋の配筋条件は、表2に示すようにコンクリート柱部の下端より2.5mまたは5.5mの位置で軸方向鉄筋の段落としが行われている場合の2種類を想定した(解析では鉄筋の定着長を考慮して、剛性変化位置を2.0m, 5.0mと表現している。)。また、図6および図7は、終局曲げ耐荷力に対する発生曲げモーメントの比率(曲げ耐荷力比 R_b)、終局せん断耐荷力に対する発生せん断力の比率(せん断耐荷力比 R_s)の柱部高さ方向分布を示したものである。ここで、終局曲げおよびせん断耐荷力は土木学会コンクリート標準示方書に準じて算定した。これより曲げ耐荷力比は、発生曲げモーメントの最も大きい柱下端部よりも軸方向鉄筋段落とし部の方が大きくなっている。この傾向は特に鉄筋の段落としを柱上部に設けた配筋で顕著に現れており、段落とし部付近において曲げ耐荷力比 R_b が2.3程度を示している。一方、せん断耐荷力比は柱上部ほど大きくなっている。この傾向は特に鉄筋の段落としを柱上部に設けた配筋で顕著に現れており、段落とし部付近においてせん断耐荷力比 R_s が2.3程度を示している。これらの結果より、衝撃的な上下動を受けるRC橋脚では、鉄筋の段落とし部から曲げ破壊あるいはせん断破壊の起きる可能性が高いことがわかる。特に、柱上部付近で軸方向鉄筋の段落としを行った場合にはこの段落とし部で曲げ破壊あるいはせん断破壊が先行して起きる可能性がかなり高くなると推定される。なお、上下動の有無が橋脚のひび割れ発生および鉄筋降伏に及ぼす影響については、動的弾塑性FEM解析によって文献4)で検討を行っており、上下動の大きさによっては無視できない影響があることを明らかにしている。

5. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめると以下のようなになる。

- ①兵庫県南部地震で観測された上下動の速度範囲内で、これを衝撃問題として取扱い、運動量保存則を適用した簡単なモデルを用いて検討した結果、全周にわたるひび割れの発生する可能性がある。
- ②衝撃的な上下動による軸方向引張応力によってRC橋脚に全周にわたるひび割れが発生すると曲げあるいはせん断破壊を生じ易くなり、その位置は軸方向鉄筋段落とし部と一致し易い傾向がある。

表2 耐荷力計算に用いたコンクリート柱部の鉄筋量

(a) 軸方向鉄筋

段落とし高さ	下端から2.5m	下端から5.5m
柱下端～段落とし	655cm ² (1.3%)	655cm ² (1.3%)
段落とし～柱上端	477cm ² (0.97%)	328cm ² (0.67%)

()内は A_s/A_c (%)

(b) 帯鉄筋(間隔30cm)

段落とし高さ	下端から2.5m	下端から5.5m
柱下端～段落とし	3.98cm ²	3.98cm ²
段落とし～柱上端	3.98cm ²	1.99cm ²

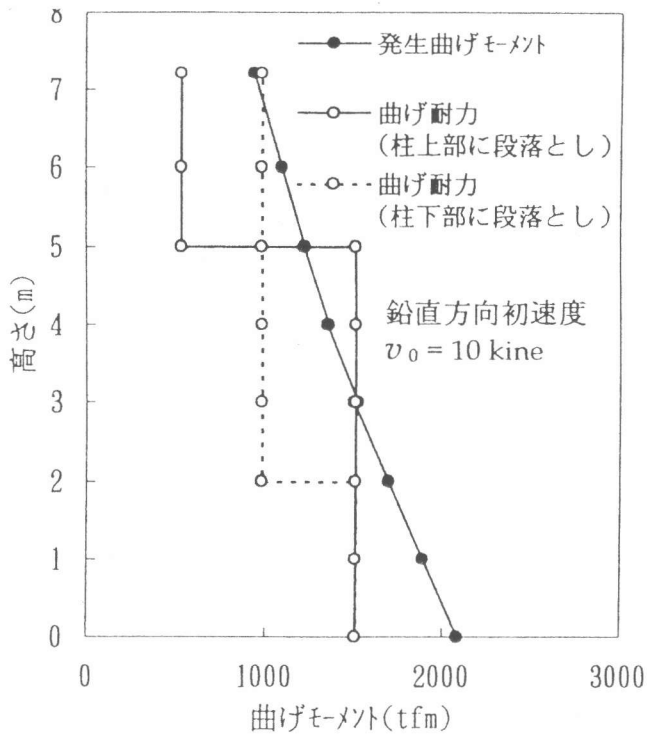


図4 発生曲げモーメントと曲げ耐荷力の関係

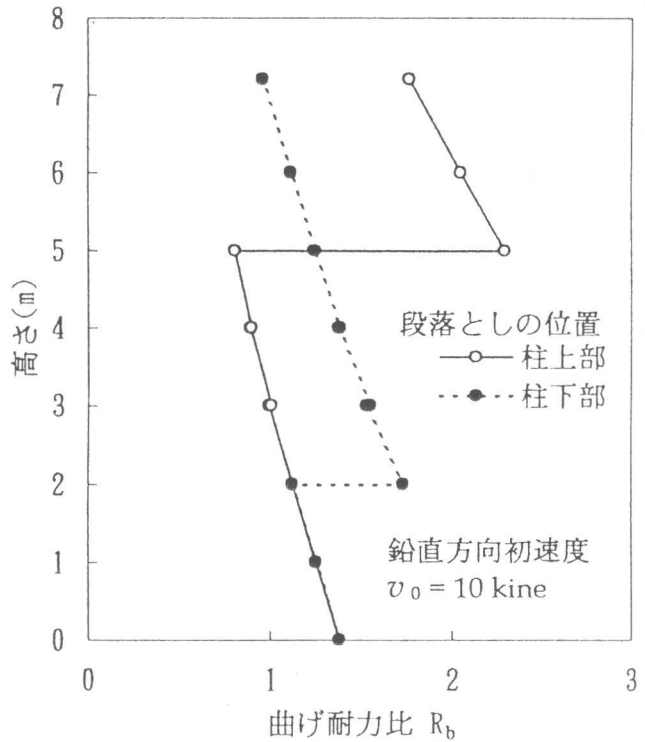


図6 曲げ耐荷力比の比較

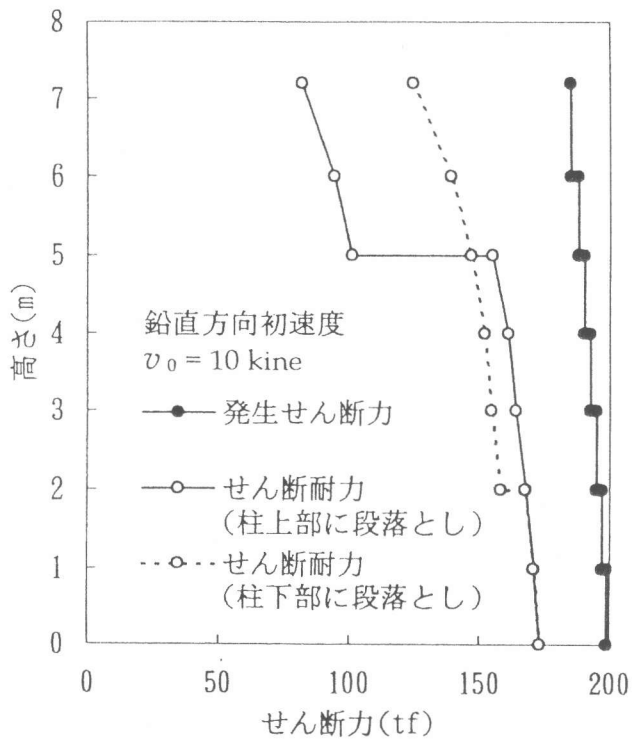


図5 発生せん断力とせん断耐荷力の関係

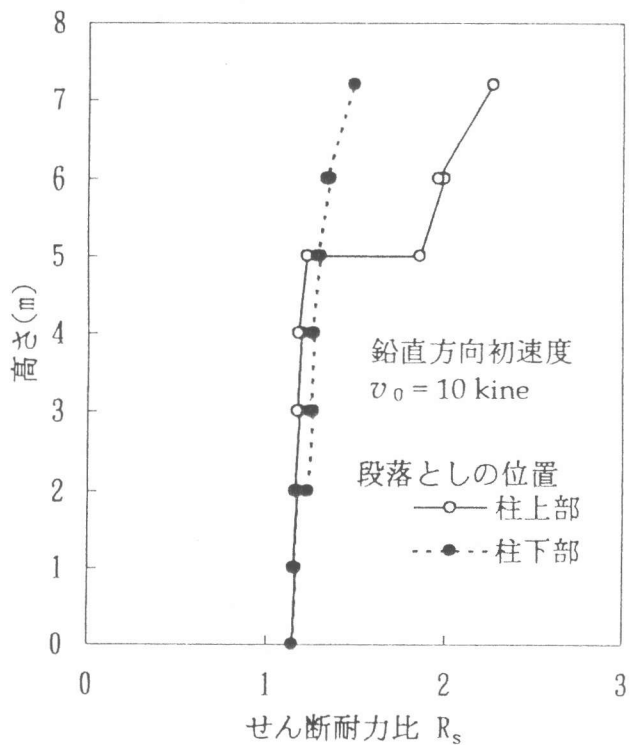


図7 せん断耐荷力比の比較

参考文献

[1]神戸大学工学部建設学科土木系教室:兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報), 1995. 3.
 [2]園田恵一郎, 小林治俊:兵庫県南部地震における土木構造物の地震衝撃破壊について, 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会資料, 1995. 4.
 [3](社)JCI近畿支部:土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会中間報告, 1995. 12.
 [4]三木博之:既存RC橋脚の地震時挙動と耐震性評価に関する研究, 神戸大学卒業論文, 1995. 9.