

ダメージフリーRC橋脚の開発

川島一彦¹・永井政伸²

¹フェロー 工博 東京工業大学大学院理工学研究科教授 土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 修(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻(現;首都高速道路公団)
(〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚と呼ぶ）の変形性能を向上させるためにいろいろな工夫が凝らされている。基本的には帯鉄筋量を増やし、コンクリートの横拘束を高めることにより RC 橋脚に繰り返し水平力が作用した場合の最大耐力以後の耐力低下を小さくしようということがこの基本である。また、インターロッキング橋脚^{1),2)}や塑性ヒンジ領域において、軸方向鉄筋をアンボンドにし、降伏や破断を遅らせ、RC 橋脚の変形性能を向上させる試み³⁾、高強度芯材をアンボンドにした橋脚⁴⁾、PC 鋼棒を入れた残留変位を少なくした橋脚^{5),6)}、部分的に高密度に拘束した橋脚⁷⁾等の開発も行われている。

これらはいずれも塑性ヒンジにおけるコンクリートの塑性変形性能を向上させることにより RC 橋脚としての変形性能を増大させようとするものである。しかし、いかに横拘束筋によりコアコンクリートに対する横拘束を高めても、塑性ヒンジ化することとはすなわちコアコンクリートに損傷が生じることであり、一般に大規模地震後には復旧が必要となる可能性がある。

このため、塑性ヒンジ領域のコンクリートを大きな塑性変形の繰り返しに耐える材料によって代替し、かつ鉄筋コンクリートとしての曲げ抵抗機能を失わなければ、RC 橋脚はコンクリート部に損傷を生じることなく変形性能を保持することができると考えられる。このようなことが実現できれば、地震後にも大規模な復旧を必要とせずすみむことができると期待される。

本研究は、上記の発想のもとに、単柱式 RC 橋脚を対象に、塑性ヒンジ領域のコンクリートを変形性能に富む他の材料に置き換えることによって、4%程度のドリフト（橋脚の水平変位/高さ）にまで橋脚躯体コンクリートが圧壊することなく水平力の繰り返しに耐えることができ、地震後にも大規模な復旧が不要な RC 橋脚を提案し、こ

の実現性を実験、解析の両面から検討した結果を報告するものである。

2. 基本コンセプト

橋脚基部の塑性ヒンジ領域におけるコンクリートの損傷を軽減するためには、この箇所におけるコンクリートに代えて繰り返し荷重に対して安定した変形性能に富み、さらに耐久性にも問題のない材料を用いることが考えられる。橋脚に水平力が作用した場合の曲げ圧縮に対してはこの部材の圧縮変形により、曲げ引張に対しては軸方向鉄筋の引張により抵抗すれば、軸方向鉄筋に著しい座屈や破断が生じるようになる状態に至る手前では、橋脚としての変形性能を確保しつつ、コンクリートの剥離や圧壊等の損傷を防止できると期待される。

ここでは、最初の検討であることと後述するように高ひずみ領域における圧縮変形性能に関する研究例⁸⁾があることから、橋梁用免震支承に用いられる高減衰ゴムを用いることとする。高減衰ゴムは、80%程度までの圧縮変形の繰り返しに耐え、さらにエネルギー吸収があり、上記の材料として優れていると考えたためである。

3. 実験供試体及び実験方法

以上のコンセプトに基づく新型橋脚の実現性を検討するために、図-1、表-1に示すように5体の供試体を製作した。いずれの橋脚も400mm×400mmの正方形断面で、橋脚基部から載荷点までの高さは1350mm（せん断支間比は3.75）である。軸方向鉄筋としてはD13(SD295A)を20本配置した。軸方向鉄筋比は1.58%である。また、帯鉄筋としてはD6(SD295A)を高さ方向に50mm間隔で配置した。帯鉄筋比（体積比 ρ_s ）は0.79%である。普通ポルトランドセメントを用い、実験当日の強度は、21.9～23.9MPaである。

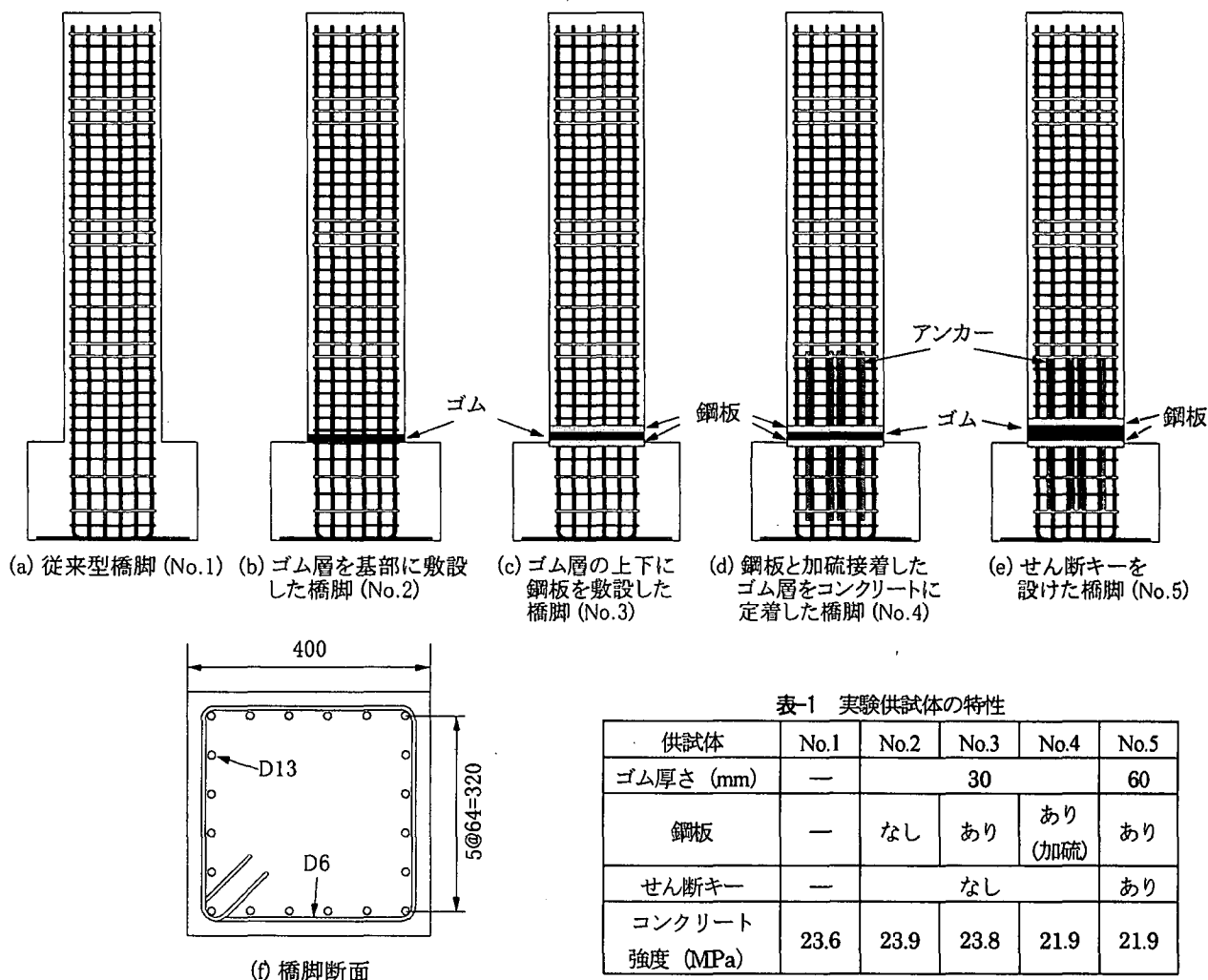


表-1 実験供試体の特性

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
ゴム厚さ (mm)	—	30			60
鋼板	—	なし	あり	あり (加硫)	あり
せん断キー	—	なし			あり
コンクリート 強度 (MPa)	23.6	23.9	23.8	21.9	21.9

5体の供試体の内訳は、ゴム層を用いない従来型の橋脚1体 (No.1) とゴム層を用いた新型橋脚4体 (No.2～No.5) である。新型橋脚4体については、ゴム層の厚さを変えると同時に、鋼板、ゴム層と鋼板の加硫接着、せん断キーの有無をパラメーターとしている。ゴム層としては橋梁用免震支承に用いられるせん断弾性係数が1.2MPaの一般的な高減衰ゴムを使用した。ゴム層の厚さは、30mmとした場合を基本 (No.2～No.4) とし、この他に60mmの場合についても一例 (No.5) だけ検討した。実橋とは異なり、模型橋ではゴム層が薄いため、積層化はさせず、1層だけのゴム層とした。軸方向鉄筋を通すためにゴム層および鋼板にあけた穴の径は23mmであり、軸方向鉄筋とゴム層および鋼板間には基本的に付着は存在しない。

ゴム層だけを橋脚基部に設置した場合がNo.2、ゴム層からコンクリートに均等に応力が作用するように、ゴム層の上下面に厚さ28mmの鋼板を敷いた場合がNo.3である。鋼板はコンクリートとゴム層間に置かれているだけで、いずれとも定着されていない。上下の鋼板と加硫接着する場合 (No.4) には、図-2に示すように、鋼板に径

20mmのアンカーを12本取り付け、橋脚躯体、フーチングに定着した。

せん断キーとしては実橋ではRC製突起が想定されるが、小型の模型ではこれをモデル化することが困難であるため、ここでは、図-3に示すように、2枚の鋼板を用いて凹凸式のせん断キー (100mm×100mm×高さ40mm) を製作した。載荷方向、これに直角方向にともに2mmの遊間を設け、これ以上のせん断変位は生じないようにした。せん断キーはゴム層厚が60mmの場合 (No.5) に使用している。ただし、この場合にはゴム層と鋼板は加硫接着されていない。

実験では、一般的な都市高架橋を想定し、橋脚基部で応力が1.5MPaとなるように一定軸力を作用させた状態で、一定振幅変位漸増方式によりドリフト0.5%に相当する6.75mm (道路橋示方書の定義による初降伏変位は4.1mm、降伏変位は4.6mm) を基準変位として、この整数倍の変位振幅でそれぞれ3回ずつの水平力を作用させた。ただし、従来型の供試体 (No.1) では、実験上の手違いによりドリフト0.25%に相当する3.38mmを基準変位として繰り返して水平力を作用させた。

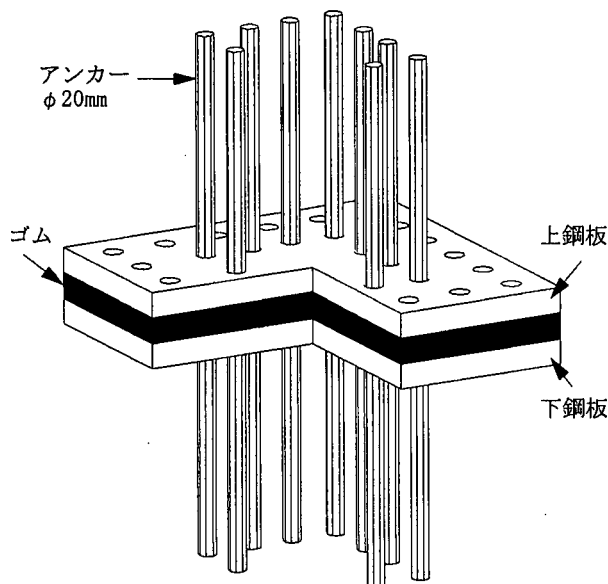


図-2 ゴムに加硫接着した鋼板の定着 (No.4)

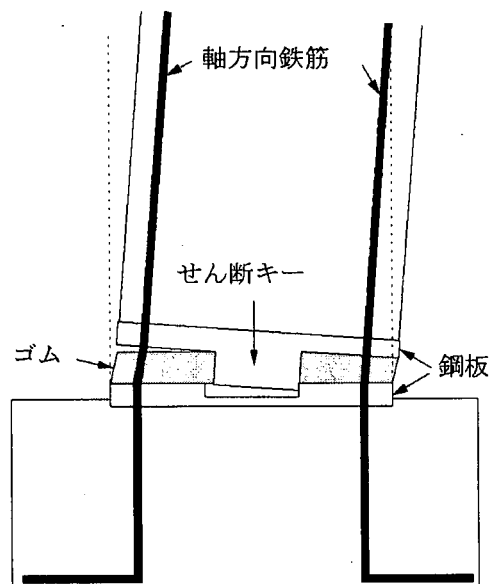
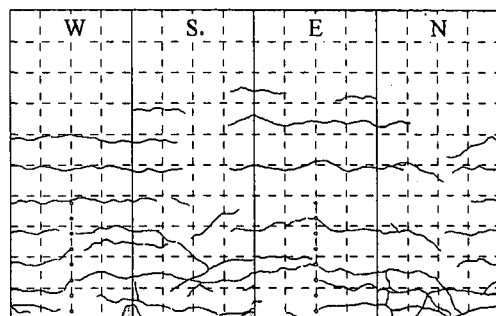
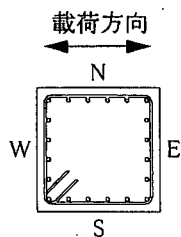


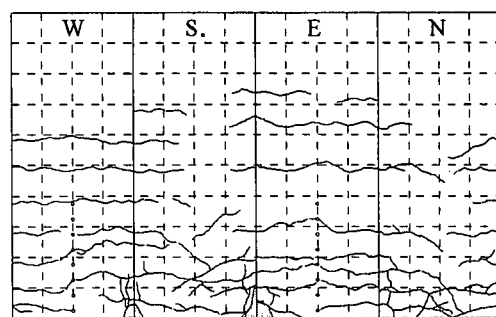
図-3 せん断キー (No. 5)

4. 繰り返し載荷実験からみた耐震性

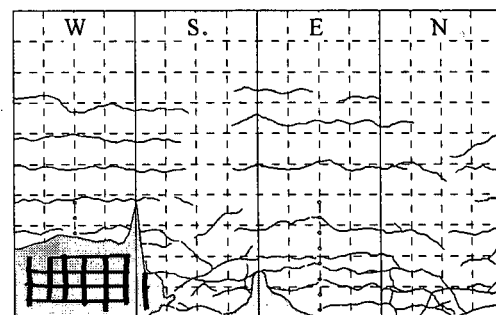
従来型の橋脚 (No.1) では、図-4 に示すように載荷変位の増大に伴って、水平曲げクラックからかぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋の座屈へと損傷が進展した。図-4 は供試体の4面の損傷を展開図として示したもので、載荷はEW方向に行っている。最終的には橋軸直角方向(NS方向)への傾斜が大きくなったため、ドリフト3.5%で載荷を打ち切っている。かぶりコンクリートの剥離は2.5%ドリフトの段階では生じていないが、載荷を終了した3.5%の段階では橋脚基部から300mm程度の範囲で生じている。ただし、主鉄筋はまだ破断していない。荷重作用点における水平力～水平変位の履歴は図-5に示すとおりであり、1%ドリフト程度で曲げ耐力はほぼ一定とな



(a) $dr = 2.5\%$



(b) $dr = 3.0\%$



(c) $dr = 3.5\%$: 載荷終了

図-4 従来型橋脚 (No. 1) の損傷 (載荷方向はEW)

り、その後、載荷を打ち切った3.5%ドリフトまでこの耐力を維持している。

以下、ゴム層上下に鋼板を敷いた場合の効果、ゴム層と鋼板を加硫接着した場合の効果、せん断キーの効果に関して示す。

(1) ゴム層の上下に鋼板を敷いた場合の効果

ゴム層を単に橋脚基部に設置した場合 (No.2) とゴム層の上下に鋼板を敷いた場合 (No.3) の比較から、ゴム層上下の鋼板の効果を検討してみる。ドリフト2.0%および2.5%時の損傷を比較すると、図-6の通りである。ゴム層だけを橋脚基部に設置した場合には、曲げ圧縮縁においてゴム層が大きく塑性変形し、載荷変位の増大とともに

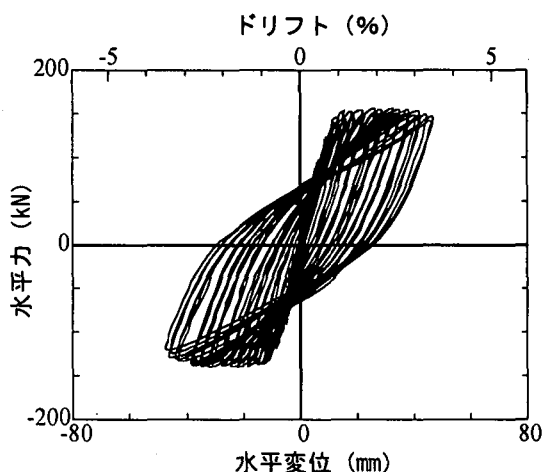


図-5 従来型 (No.1) の水平力～水平変位の履歴

に次第に外側に大きくはらみ出すようになる。ドリフトが2%に達した段階でかぶりコンクリートが剥離し、橋軸直角方向への傾斜が大きくなったため、ドリフト2.5%で載荷を打ち切った。水平力～水平変位の履歴曲線を示すと図-7(a)の通りであり、最大耐力は100kN(正側), 115kN(負側)とそれぞれ従来型の64%, 82%に過ぎない。

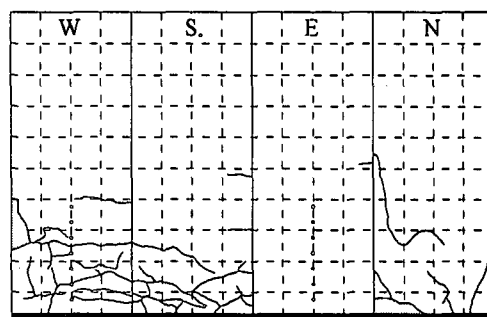
これに対して、ゴム層の上下に鋼板を敷いた場合には、載荷変位の増大に伴って、鋼板とゴム層間で滑りが生じるようになり、さらに橋脚躯体部が鉛直軸周りに回転するようになった。

以上のように、ゴム層を設置するだけであったり、ゴム層の上下に鋼板を敷設するだけでは、橋脚躯体とフーチング間の結合が不十分なため、ゴム層や軸方向鉄筋の塑性変形が進むにつれてゴム層と鋼板間の滑りや鉛直軸周りの橋脚躯体の回転、橋軸直角方向の傾斜が生じる等して、結果として従来型橋脚に比較して変形性能は向上せず、耐力も低い値にとどまる。

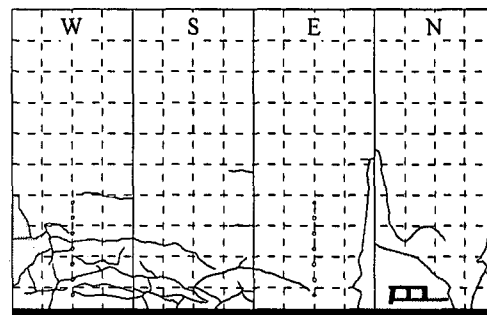
(2) ゴム層と鋼板を加硫接着した場合の効果

ゴムと鋼板を加硫接着し、ゴム層が引張力にも抵抗できるようにした場合 (No.4) の損傷状況が、図-8 である。ここには示さないが、2.5%ドリフトまではわずかな水平曲げひび割れしか生じない。ドリフトが3%に達すると、ひび割れ数が多少増加するが、まだ、かぶりコンクリートは健全であり、開発目標とした4%ドリフトまでこの状態は変化しない。4.5%ドリフトに達して、軸方向鉄筋が1本破断し、5%ドリフトに達するとかぶりコンクリートも剥離し始めて、耐力低下が著しくなったために載荷を終了した。ただし、上述した No.2 や No.3 橋脚のように橋軸直角方向や鉛直軸周りの回転は最後まで生じなかった。

水平力～水平変位の履歴曲線は図-9 に示すようになる。ドリフト4%で最大耐力に達し、最大耐力は、正側には

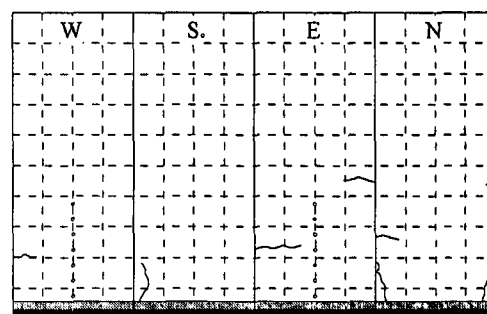


(a) $dr = 2.0\%$



(b) $dr = 2.5\%$: 載荷終了

(1) ゴム層を単に橋脚基部に敷設した場合 (No. 2)



(a) $dr = 2.0\%$

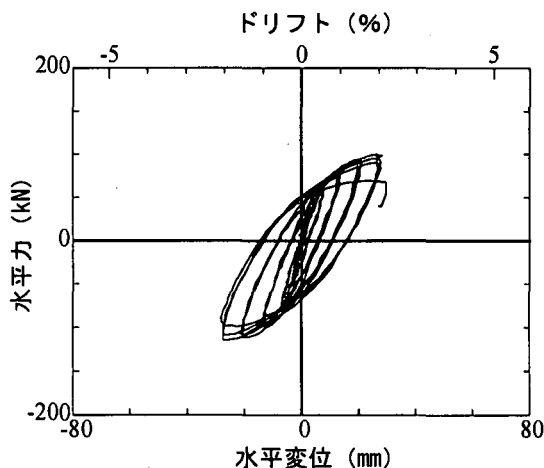


(b) $dr = 2.5\%$: 載荷終了

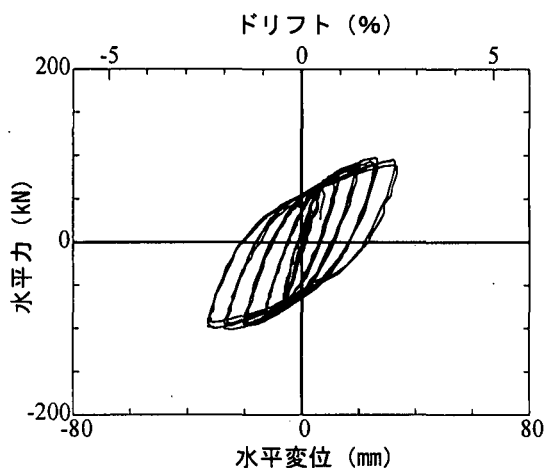
(2) ゴムの上下に鋼板を敷設した場合 (No. 3)

図-6 損傷状況からみたゴム層の上下に鋼板を敷設する効果

146kN, 負側には156kNと従来型橋脚のそれぞれ93%, 111%となっている。この程度の曲げ耐力の低下であれば、従来型橋脚よりもわずかに断面寸法を大きくすれば対応でき、損傷が軽減できることのメリットを享受することができる。4.5%ドリフトに達すると、軸方向鉄筋が1本破断し、その後、曲げ耐力は低下していく。



(1) ゴム層を単に橋脚基部に敷設した場合 (No. 2)



(2) ゴム層の上下に鋼板を敷設した場合 (No. 3)

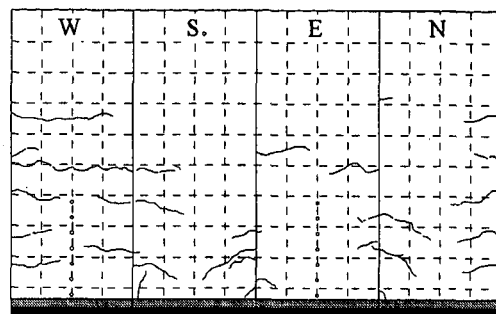
図-7 水平力～水平変位の履歴曲線から見たゴム層の上下に鋼板を敷設する効果

(3) せん断キーの効果

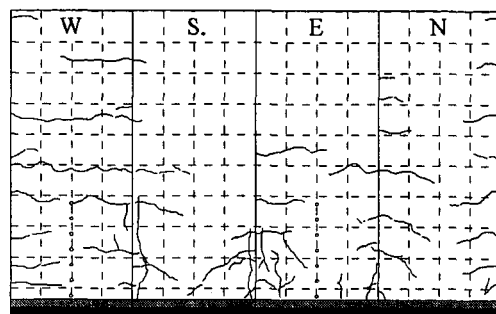
ゴム層を 60mm と厚くしたことによるせん断変形を抑えるために、橋脚底面にせん断キーを設置した場合 (No.5) の損傷状況、水平力～水平変位の履歴曲線をそれぞれ図-10、図-11 に示す。この場合には、ゴム層のせん断変位が 2mm に制限される結果、前述の No.3 橋脚のように大きなゴム層と鋼板間の滑りは生じず、また、鉛直軸周りの橋脚躯体の回転も生じなかった。このため、橋脚躯体の損傷はほとんど生じていない。しかし、No.3 橋脚と同様に、橋脚躯体とゴム層の結合が軸方向鉄筋のダウエル作用だけであるため、载荷の進展に伴って徐々に橋軸直角方向の傾斜が増大し、最終的に 3.5% ドリフトで载荷を打ち切った。

(4) 等価剛性および履歴吸収エネルギー

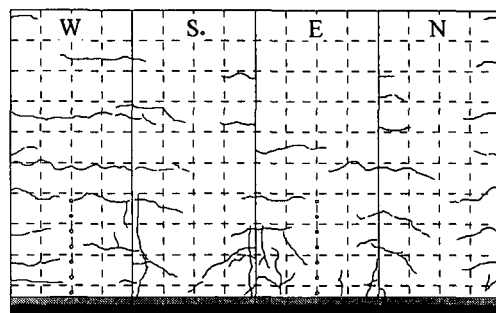
上述したように、ここで提案する橋脚では従来型橋脚よりも曲げ耐力が低下するが、これが水平方向の等価剛性にどの程度影響するかを検討するために、ここでは従来型橋脚 (No.1) とゴム層と鋼板を加硫接着した橋脚



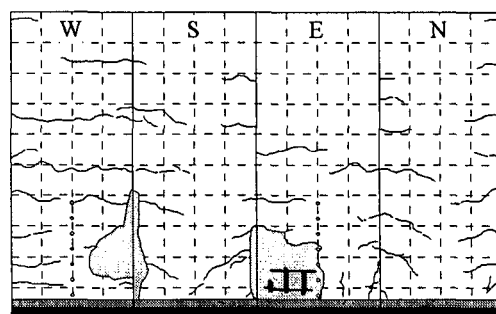
(a) $dr = 3.0\%$



(b) $dr = 4.0\%$



(c) $dr = 4.5\%$



(d) $dr = 5.0\%$: 载荷終了

図-8 鋼板とゴム層を加硫接着した場合 (No. 4) の損傷 (载荷方向は EW)

(No.4) を対象に、履歴曲線の最大変位点、最小変位点を結んだ線分の勾配を等価剛性と定義し、これを比較してみた。この結果を図-12 に示す。これによれば、ドリフトが 0.5～2% 程度の範囲ではここで提案する橋脚は従来型橋脚よりも等価剛性は 20% 程度小さいが、ドリフトが 3% に達すると両者の差はほとんどなくなる。また、履歴曲線の面積から各载荷ステップにおける最初に繰り返しの履歴吸収エネルギーを求め、これを比較した結果が図-13 である。これによれば、履歴吸収エネルギーは従来型橋脚に比較して遜色ないレベルであるということが

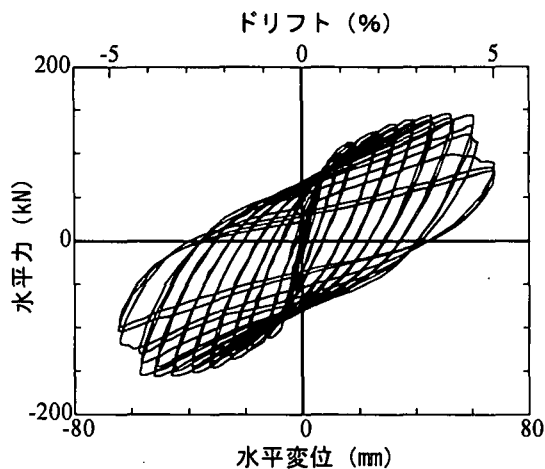
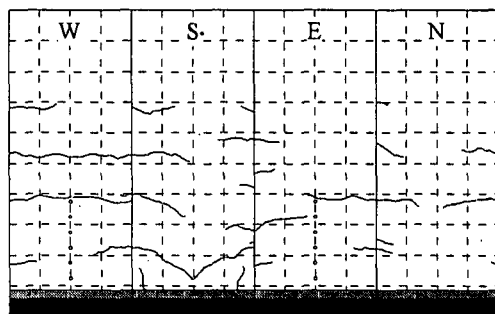


図-9 鋼板とゴム層を加硫接着した場合 (No. 4) の水平力～水平変位の履歴曲線



(a) $dr = 3.5\%$: 載荷終了

図-10 せん断キーを設けた橋脚 (No. 5) の損傷 (載荷方向は

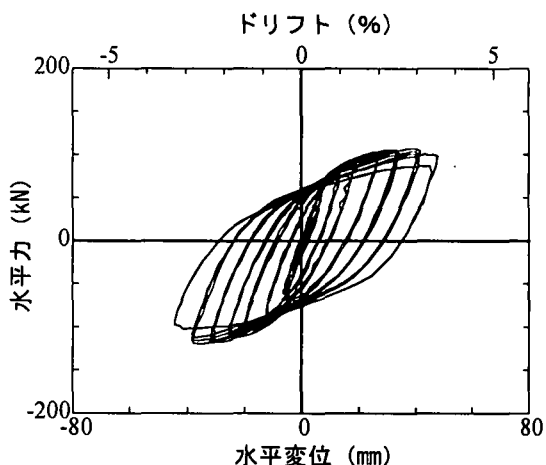


図-11 せん断キーを設けた橋脚 (No. 5) の水平力～水平変位の履歴曲線

できる。これは、橋脚のエネルギー吸収の大部分は軸方向鉄筋の塑性変形によって起こるものであり、No.4 供試体でも軸方向鉄筋の塑性変形は従来型の橋脚と同様に起こっていたためである。

5. ファイバー要素解析

(1) 解析モデルおよび解析法

実験結果の抵抗メカニズムを検討するために、橋脚模型を図-14 に示すように、ゴム層および塑性ヒンジ区間に

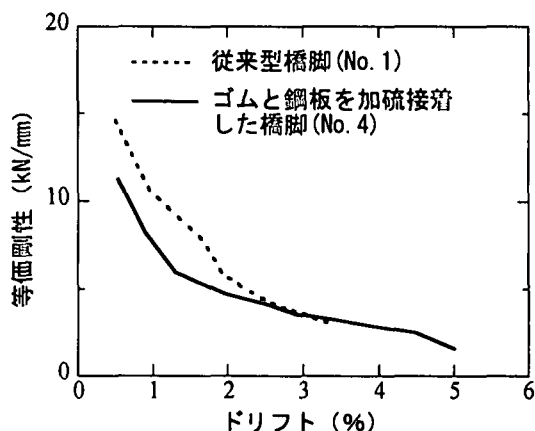


図-12 等価剛性の比較

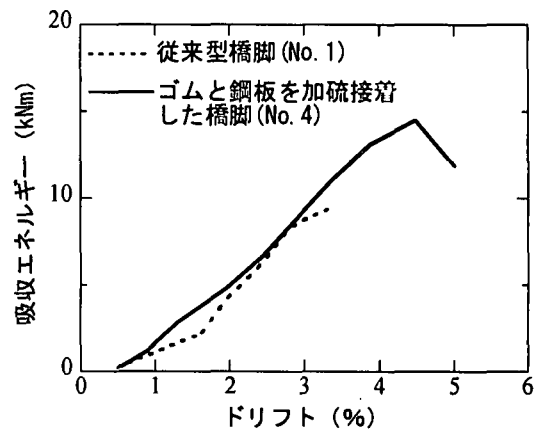


図-13 履歴吸収エネルギーの比較

存在する橋脚躯体はファイバー要素で、またこれより上部の橋脚躯体は降伏剛性を有する弾性梁要素でモデル化した。

コンクリートの応力～ひずみ関係は、コアコンクリートとかぶりコンクリートに分けてモデル化した。Hoshikuma らの提案式⁹⁾に基づき、コアコンクリートの最大圧縮応力 σ_{cc} 、そのときのひずみ ε_{cc} 、下降勾配 E_g を求めた。ただし、Kent and Park¹⁰⁾に基づいて、最大圧縮応力 σ_{cc} に達した後は、下降勾配 E_g を保ったまま応力は σ_{cc} の20%まで直線的に低下し、それ以後はひずみが増加しても $0.2\sigma_{cc}$ の値を保つと仮定した。また、コアコンクリートおよびかぶりコンクリートの除荷、再載荷履歴には堺らのモデル¹¹⁾を用いた。これは帯鉄筋で横拘束されたコンクリートの圧縮実験に基づいて提案されたモデルであり、除荷、再載荷が繰り返す場合の塑性点ひずみ、除荷点における応力を精度よく表すことができる。軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係は、Bauschinger 効果を考慮できる Menegotto-Pinto モデル¹²⁾を用いた。

ゴム層の応力～ひずみ関係は、弾性バイリニア型にモデル化した。

(2) 解析結果

以上の仮定のもとに、まず従来型橋脚 (No.1) の水平力～水平変位の履歴曲線を解析し、これを図-5 に示した

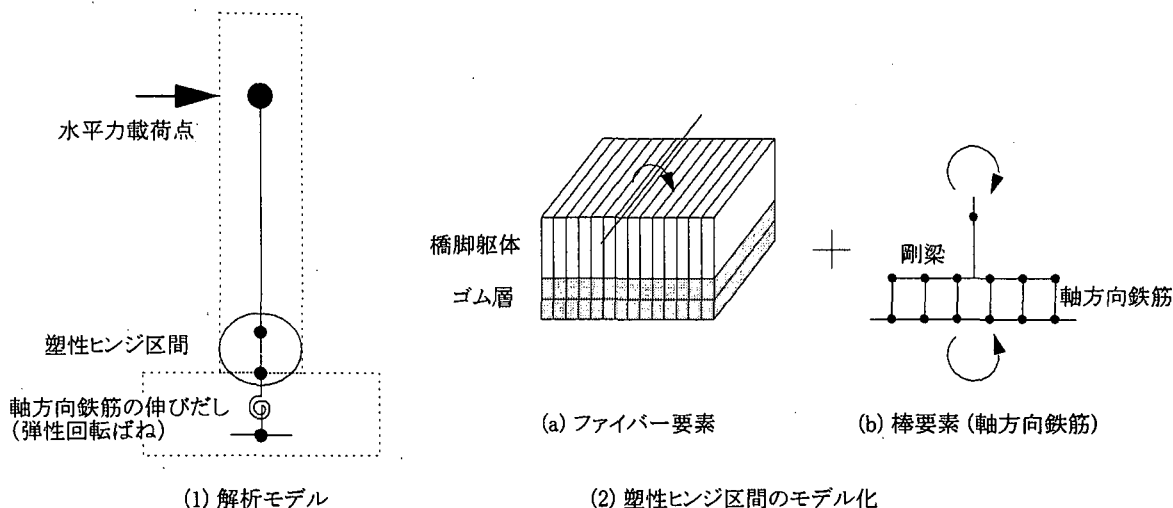


図-14 ファイバー要素を用いた解析モデル

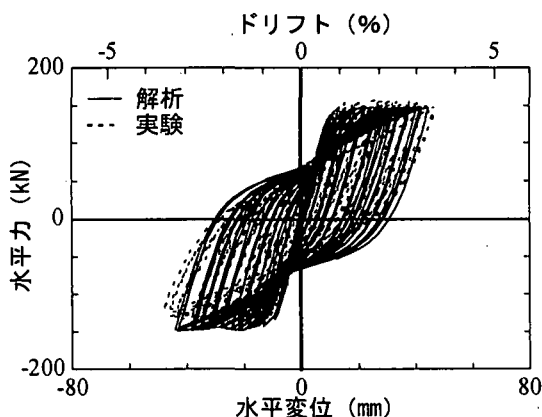


図-15 水平力～水平変位の履歴曲線の比較 (No. 1)

実験値と比較すると、図-15 のようになる。除荷や再載荷課程を含めて、解析で求めた履歴曲線は全体としてよく実験結果と一致している。図-16 は解析で求めたそれぞれ最外縁位置における橋脚基部から 200mm の範囲のコアコンクリートおよびかぶりコンクリートの応力～ひずみ履歴である。比較すべき実験データはないが、ドリフト 3%では、コアコンクリートのひずみは約 0.013 となり、応力は最大応力 σ_{cc} の 1/4 程度にまで低下している。このとき、かぶりコンクリートのひずみは約 0.017 に達しており、応力は完全に 0 となっている。このような状態は、図-4 に示した損傷状況と矛盾しない。

鋼板とゴム層を加硫接着した橋脚 (No.4) に対して水平力～水平変位の履歴曲線と解析値を比較すると、図-17 のようになる。解析によって求めた履歴曲線はドリフト 4.5%まではよく実験結果と一致している。ドリフト 5%になると一致度が低下するが、これは軸方向鉄筋が破断したのに対して解析ではこの効果を考慮していないためである。図-18 は解析で求めたコンクリートの応力～ひずみ履歴を示した結果である。ドリフトが 4%に達してもコアコンクリートのひずみは 0.013 に過ぎず、応力は最大応力 σ_{cc} に達していない。ドリフトが 4.5%になってようやく

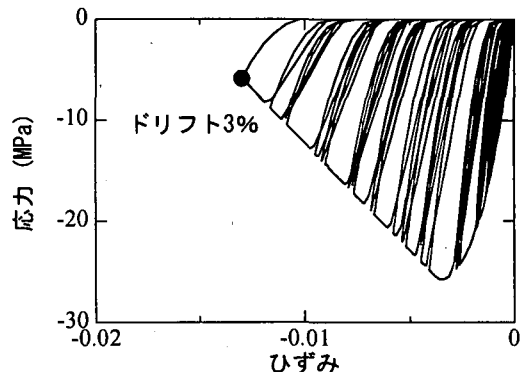


図-16 解析で求めたコアコンクリートの応力～ひずみ履歴 (No. 1)

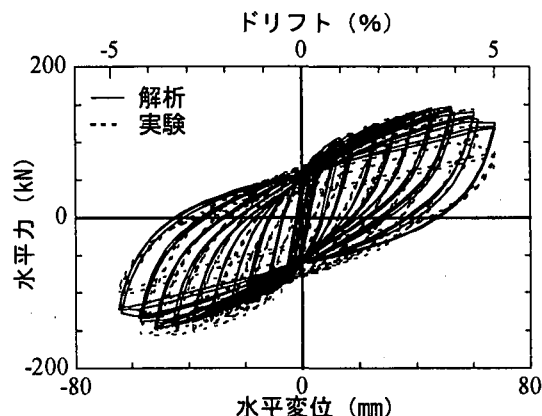


図-17 水平力～水平変位の履歴曲線の比較 (No. 4)

最大応力に達する程度である。上述したように、従来型橋脚 (No.1) ではすでにドリフト 3%で応力は最大応力を通り越し、最大応力の 1/4 にまで低下していることから明らかのように、No.1 橋脚に比較して No.4 橋脚では橋脚躯体コンクリートに生じるひずみは顕著に小さくなっている。これが、ゴム層を設置したことによる効果であり、ゴム層に変形を集中した結果、橋脚躯体の損傷を軽減できたことを表している。なお、かぶりコンクリートもドリフトが 4%になってはじめて最大応力に達し、ドリフト 4.5%になるとひずみは約 0.007 となり応力が 0 になる。これは、図-8 に示したように、ドリフト 5%になってかぶりコンクリートが剥落したという損傷状況と矛盾して

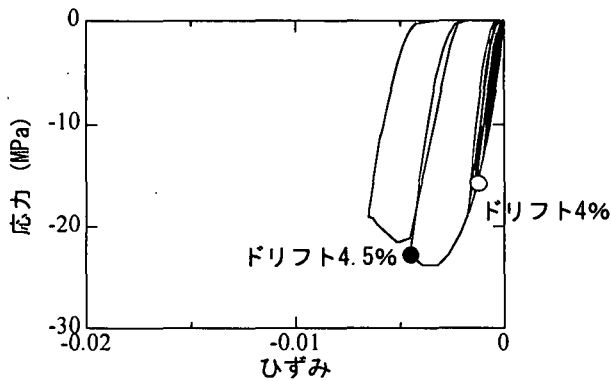


図-18 解析で求めたコアコンクリートの応力～ひずみ履歴 (No. 4)

いない。

6. 結論

塑性ヒンジ区間のコンクリートを変形性能に富む材料で代替することにより、ドリフトで4%程度の変位に追従し、かつ、地震後に大規模な復旧を必要としない橋脚を開発することを目標として、橋梁用免震支承に一般的に用いられる高減衰ゴムを用いたゴム層を単柱式橋脚に採用した新形式の橋脚を提案し、この実現性を模型を用いた繰り返し載荷実験とファイバー要素解析に基づいて検討した。本検討から得られた結論は、以下の通りである。

- 1) ゴム層を設置したり、その上下に鋼板を敷設するだけでは、フーチングと橋脚躯体の結合が弱く、繰り返し載荷に伴って軸方向鉄筋が降伏するにつれて橋脚躯体とゴム層（あるいは鋼板）間に滑りが生じたり、鉛直軸周りに橋脚躯体が回転したりして、橋脚としての十分な変形性能を確保できない。
- 2) ゴム層の上下面に鋼板を加硫接着し、これを橋脚躯体、フーチングにアンカーで定着すれば、かぶりコンクリートには軽微な水平曲げクラック以上の損傷が生じない状態で、橋脚はドリフトで4%までの水平変位に追従することができる。
- 3) 上記2)の構造では、橋脚の水平変位の大部分はゴム層と軸方向鉄筋の塑性変形によって与えられる。ゴム層から上方に位置する橋脚躯体の曲げ変形による水平変位はわずかであり、橋脚躯体はほとんど剛体的に回転する。
- 4) ファイバー要素解析を用いることにより、実験で得られた水平力～水平変位の履歴特性を比較的よい精度で解析することができる。

謝辞：本実験に際しては、(株)ブリジストンの須藤千秋、潤田久也、加藤亨二氏等にゴム層の製作等につき、ご支援いただきました。東京工業大学理工学研究科土木工学専攻の庄司学助手（現：筑波大学）を始め、堺淳一、渡邊学歩、細入圭介、植原健治、畑田俊輔、山岸睦功、松

川亮平氏には模型製作や繰り返し載荷実験、ファイバー要素解析につきご支援を賜りました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤倉修一，川島一彦，庄司学，張建東，武村浩志：インターロッキング式帯鉄筋を有する RC 橋脚の耐震性，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.71-88，2000。
- 2) 柳下文夫，田中仁史，Park, R.：インターロッキングスパイラル筋を有する鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.91-103，2000。
- 3) 川島一彦，細入圭介，庄司学，堺淳一：塑性ヒンジ区間で主鉄筋をアンボンドした鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.45-64，2001。
- 4) 家村浩和，高橋良和，曾我部直樹，鶴飼正裕：アンボンド高強度芯材を用いた RC 橋脚の高耐震化に関する基礎的研究，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計法に関するシンポジウム，pp.433-438，2000。
- 5) Ikeda, S.：Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium, Vol.2, pp.879-884, 1998。
- 6) 池田尚治，森拓也，吉岡民夫：プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.40，No.5，pp.40-47，1998。
- 7) 剣持安伸，川島一彦：部分拘束を加えた中空断面 RC 橋脚の耐震性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.57-69，2000。
- 8) 潤田久也，川島一彦，庄司学，須藤千秋：高面圧を受ける直方体ゴム製緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究，土木学会論文集，No.661/I-53，pp.71-83，2000。
- 9) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.：Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997。
- 10) Kent, D. and Park, R.：Flexural Members with Confined Concrete, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, 1971。
- 11) 堺淳一，川島一彦，庄司学：横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化，土木学会論文集，No.654/I-52，pp.297-316，2000。
- 12) Menegotto, M. and Pinto, P. E.：Method of Analysis for Cyclically Loaded RC Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, Proc. LABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, pp.15-22, 1973。