

Collins モデルを用いた R C 橋脚のせん断耐力に関する検討

大阪工業大学 小林和夫*
 阪神高速道路公団 林秀侃** 幸左賢二**
 利エンタルコンサルタンツ 水田崇志***

R C 橋脚の地震力作用時のせん断耐力については、寸法、形状、交番繰返しなどの影響により通常の梁部材と異なる挙動を示すことが考えられる。そこで、橋脚の寸法、形状の影響を評価するために、まず実橋を対象とした段落とし部を有する曲げせん断破壊型の単調載荷試験結果を用いて Collins モデルによる耐力評価解析を行った。その結果、耐力、ひびわれ傾斜角などが一致することから実験結果をほぼ再現できうることが明らかとなった。ついで、実橋の1/3スケールの正負交番載荷試験体（基部曲げおよび段落とし部曲げせん断破壊）を用いた解析を実施し、実験結果を同様に定性的には再現できることが明らかになった。

1. まえがき

阪神高速道路3号神戸線は、兵庫県南部地震により、数多くの R C 橋脚が損傷した。その損傷形式は曲げおよび曲げせん断が比率的には多かったが、せん断損傷も見受けられた。せん断損傷橋脚は脆性的に破壊し、極めて危険な状態であることから、R C 橋脚のせん断損傷メカニズムを適切に把握し、せん断損傷を生じさせないための設計手法の確立が望まれる。

R C 構造物のせん断耐力には主鉄筋比、コンクリート強度、帯鉄筋比、断面寸法、断面形状など多くの要因が複雑に影響を及ぼす。このため、現在までその終局耐力評価法には、実験に基づいた経験式を用いるのが一般的である。このような現状に対して、電算機の発達に伴い、解析的に終局せん断耐力を評価しようとする試みが盛んになっており、その一つに Collins らが提案している修正圧縮場理論による手法がある^{1), 2)}。修正圧縮場理論は、ひびわれを離散的にとらえるのではなく、ひびわれの発生しているコンクリート要素をマクロ的にとらえて一種の連続的な要素と考へて、その平均応力、平均ひずみに対する要素内のつり合いおよび変形の適合条件を用い

キーワード：せん断、耐力、耐震

* 工学部, 06-954-4182

** 復旧建設部, 078-331-9801

***大阪支店, 06-350-4375

て解くものである。本報告は、水平載荷試験された実橋 R C 橋脚および1/3スケールの模型実験を対象に、修正圧縮場理論によるせん断耐荷力の解析的検討を行い、R C 橋脚のせん断耐荷力に対する修正圧縮場理論の適応性を検討したものである。

2. 解析手法

1) 応力およびひずみのつり合い関係

修正圧縮場理論では、せん断ひびわれを含んだコンクリート要素に作用する平均的な応力の関係はモールの応力円により次式によって表される。

$$f_2 = (\tan \theta + \cot \theta) v - f_1 \quad (1)$$

f_1 : 主引張応力 f_2 : 主圧縮応力

θ : ひびわれ傾斜角

また同様に、水平方向ひずみ(ϵ_x)および鉛直方向ひずみ(ϵ_y)は、モールの応力円により主引張・主圧縮ひずみおよびひびわれ傾斜角の関係で表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= (\epsilon_1 \tan^2 \theta + \epsilon_2) / (1 + \tan^2 \theta) \\ \epsilon_y &= (\epsilon_1 + \epsilon_2 \tan^2 \theta) / (1 + \tan^2 \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

ひびわれが生じたコンクリート要素内に作用する平均的な応力の鉛直成分は、せん断補強鉄筋によって抵抗する。また、水平成分は、せん断力による水平力(引張力)として作用する。

$$\begin{aligned} f_v &= f_2 \cot^2 \theta - f_1 \sin^2 \theta b_w / A_v \\ N_v &= V \cot \theta - f_1 b_w j d \end{aligned} \quad (3)$$

f_v : せん断補強鉄筋応力 N_v : せん断力による水平力

A_v : スターラップの断面積 b_w : ウェブ幅

2) 応力とひずみの関係

圧縮側の応力とひずみの関係は、道路橋示方書式³⁾を採用し、引張側の応力とひずみの関係は、Collinsらの提案している引張軟化曲線を採用した。

主引張応力(f_1)は、ひびわれ間のコンクリートおよびせん断補強鉄筋によって伝達されるせん断力とひびわれ面を介して伝達されるせん断力と静力学的に等価である必要があるため、両者の小さい方の値により決定される。

なお、Collins式は鉄筋がある程度等間隔に配置された平板に対する実験から導かれたものであり、RCはりのような断面下部に集中的に鉄筋が配置されている部材では、そのまま適用できないものと考え、中村ら¹⁾の解析手法では、独自の引張軟化曲線を採用している。

3) せん断耐力算定式

Collinsらによるせん断耐力算定式は次式によって表される。

$$V = f_1 \cdot b_w \cdot jd \cdot \cot \theta + (f_v \cdot A_v / s) \cdot jd \cdot \cot \theta \quad (4)$$

V : せん断耐力 jd : 内力のアーム長

s : スターラップ間隔

上式に示すように修正圧縮場理論によるせん断耐力算定式は、コンクリートによる抵抗せん断力とせん断補強鉄筋による抵抗せん断力の和からなる強度累加式で表されている。

4) 曲げ、軸力、せん断の関係

一般に、上述したようなせん断力(V)のみが作用する構造物は少なく、軸力(N)や曲げモーメント(M)がせん断力とともに作用するのが一般的である。このような部材でのせん断力により発生する軸方向ひずみは、部材高さ方向で変化し、曲げ引張側で大きく、曲げ圧縮側で小さくなる。これを考慮した解析は、多大な計算時間を要するため、Collinsらは、図-1に示すような簡略化を行っている。

- ・高モーメント域で生じるせん断応力の再分配を無視し、せん断応力を平均化($v = V/b_w jd$)させる。
- ・せん断力によって発生する主応力の水平成分を初期応力とみなし、軸力、曲げによる応力に加算する方法を用いた。この考え方は、発生した様なせん断ひびわれが、断面を貫通すると仮定したものである。

なお、任意断面に対し解析できるように、部材高さ方向に断面を分割して、曲げ、軸力、せん断力のつり合いを計算する断面分割法を採用している。

3. 梅田入路実験結果

1) 構造緒元

水平載荷実験は、図-2に示すように既設上部工撤去後、試験対象橋脚(URP4)と反力橋脚(URP3)の上部をPC鋼棒で水平に連結し、相互に引き合う形式で実施した。対象橋脚は図-3の構造一般図に示すように、 $\phi 2.0\text{m}$ の円形断面を有するRC単柱式橋脚であり、基礎は場所打ちベント杭($\phi 1.0\text{m}$)である。主鉄筋は柱下端でD29-53本、段落とし部でD29-28本配置されており、主鉄筋比は柱下端で1.62%となっている。本橋脚は、昭和40年に建設されており、当時の鋼道路橋示方書を基に設計されているが、現行の道路橋示方書とは以下の点で配筋が異なっている。すなわち、鉄筋変化位置は、柱下端から2.7mとなっており、現行では鉄筋定着長(30ϕ)を考慮するため

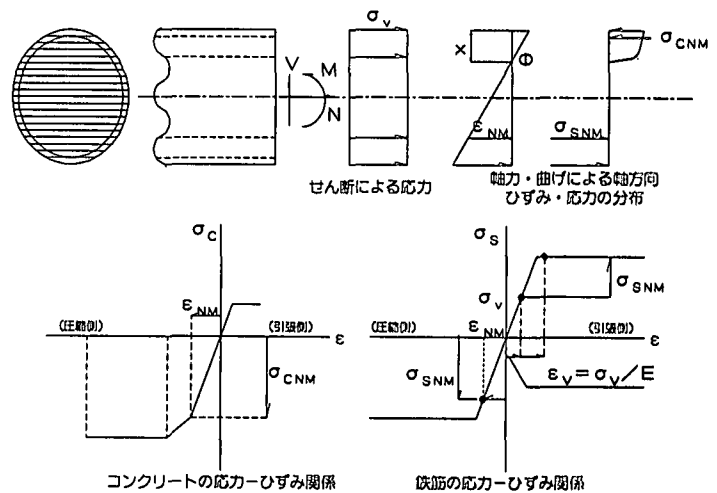


図-1 せん断耐力解析模式図

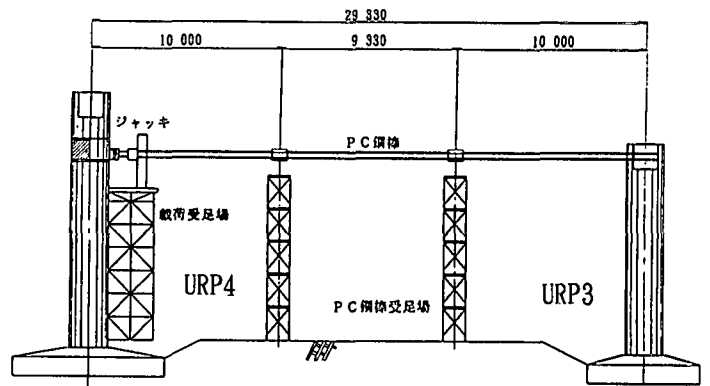


図-2 実験要領図

設計上の柱断面変化位置は基部より1.7mの位置となる。このため、現行設計手法で照査すると、柱基部よりも段落とし部で曲げ破壊するようになる。また、帯鉄筋は柱全長にわたってD16が300mmピッチの少ない配筋となっている。コア試験より求めたコンクリートの圧縮強度は建設後20数年を経ているが設計基準強度 240kgf/cm^2 に比べて50~60%高い値を示している。また鉄筋降伏応力度も 3800kgf/cm^2 と設計基準強度 2800kgf/cm^2 よりもかなり高い値となっている。

2) 荷重方法

水平荷重載荷高さ（PC鋼棒の図心位置の高さ）はURP4橋脚の梁高(1.3m)のほぼ中心に定め、これをURP3橋脚まで水平に延長している。荷重段階は図-4に示すように、5ステップまでは15tf刻みで増加させ最後に最大荷重レベル(ステップ6)まで載荷させる繰返し漸増載荷とした。

3) 実験結果

荷重試験は前記の荷重ステップに基づいて実施されたが、第5サイクル(最大75tf)までは橋脚下端付近の曲げひびわれの発生を除いて目立った損傷は認められなかった。荷重100tf程度から柱の変形が明らかに目視できるようになり、鉄筋変化位置近傍の水平ひびわれも次第に顕著になり、荷重増加とともに水平ひびわれは斜め下方に進展してゆき、腹部まで到着した時点で荷重の保持(133tf)が困難となり実験を終了した。残留最大ひびわれ幅は10mm程度であった。図-5にひびわれ図を示すが、曲げひびわれは水平方向に帯鉄筋間隔30cmより多少大き目の約50cm間隔で発生している。図-6に荷重-変位曲線を示すが、水平変形の変化割合が大きいと認められる3m付近(屈曲点)は、主鉄筋の断面変化位置(2段目鉄筋のカットオフ高さ)2.7mに対応している。鉄筋変化位置付近の帯鉄筋ひずみは120tfまではほとんど発生せず、それ以降急激に増加している。圧縮側コンクリートのひずみは橋脚下端よりもむしろ鉄筋変化位置付近で最大(1900μ)となっている。また、引張主鉄筋のひずみは、材料強度試験に基づく降伏ひずみ($\epsilon_{sy} = 1800\mu$)を最終的に大きく超え、鉄筋変化位置付近で最大値を示している。以上のように、本実験結果は、曲げひびわれが先行するものの、終局時には帯鉄筋の増加およびひびわれの傾斜から曲げせん断破壊と評価できる結果となった。

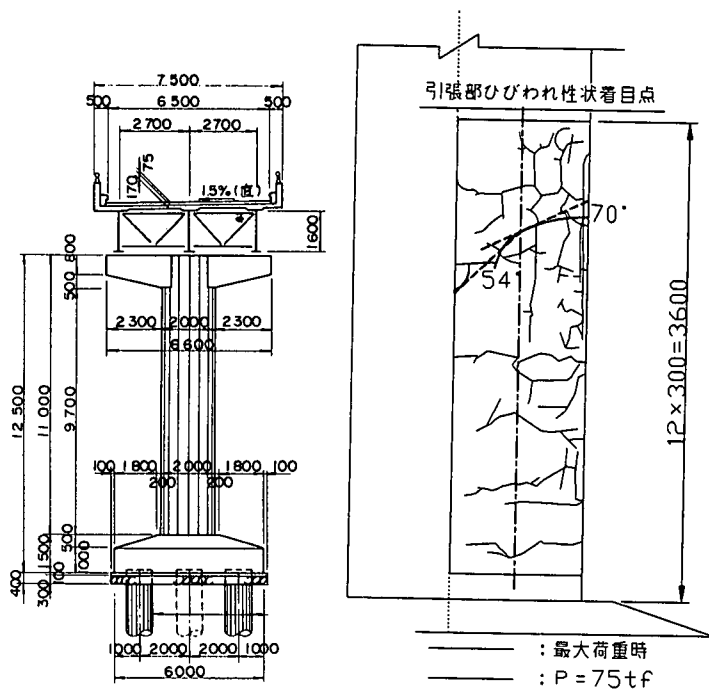


図-3 構造一般図

図-5 ひびわれ図

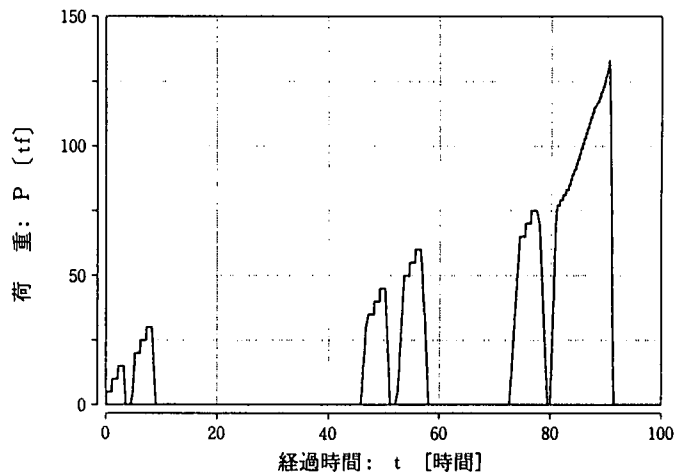


図-4 荷重載荷ステップ図

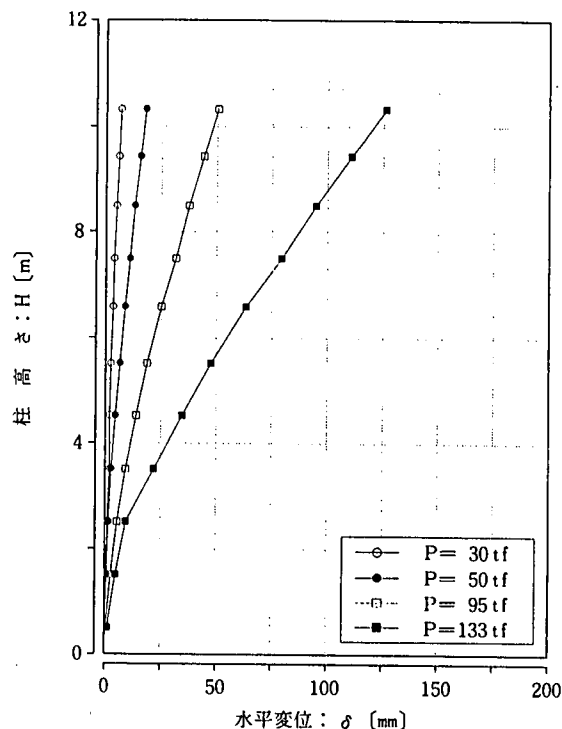


図-6 荷重-変位曲線

4. 梅田入路橋脚解析結果

解析結果を図-7, 8に示すが、実験最大荷重時(133tf)に着目すると、解析値は帯鉄筋応力度 $1740\text{kg}/\text{cm}^2$ 、ひびわれ傾斜角 54° となっているのに対して、実測値ではそれぞれ $2700\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 70° となっており定性的には一致した傾向となっている。また、せん断ひびわれ発生荷重の解析値は100tfとなっており、コンクリート標準示方書式(110tf)および実験結果(110tf)とほぼ一致している。これに対して、終局時ではせん断耐力の解析値は150tfと、示方書式(177tf)に比べてかなり小さくなっている。これは、図-9に示すようにCollinsモデルによるとせん断ひびわれの進行に伴い、ひびわれ幅の増加が考慮されるために、コンクリートのせん断抵抗が小さくなるためと考えられる。また、実験ではひびわれ傾斜角 70° 、最大荷重133tfで実験を終了しているが、Collinsモデルの解析によると、さらにひびわれ傾斜角が急になるとともに、20tf程度の余剰耐力が存在する結果となっている。以上のようにCollinsモデルにより円形断面を評価した結果は、終局状態については議論が残るものの、ひびわれ発生および実験最大荷重状態を定量的には評価できる結果となっている。

5. 大型試験体実験結果

阪神高速道路の標準的なRC橋脚を対象に、配筋状態を実構造物に合わせた比較的大きな試験体(1/3縮尺)を用いて、従来の縮小模型試験体(1/10縮尺)との比較実験を実施し、曲げ変形性能、せん断耐力などの評価を行った。詳細については文献4)に示されているので、ここでは概要のみを示す。材料諸元を表-1に示す。NO. 2, 3は鉄筋径の縮尺率が模型縮尺にできるだけ近くなるようにSD35相当品を用いた。配筋は断面積の相似比を満足するように鉄筋本数を決定した。試験体の加力方法を図-10に示す。柱頭部で軸力を与え交番水平力を加力した。軸力は、フーチング下端で定着し試験体の中心を通るPC鋼材を介して柱頭部のジャッキにより軸応力度換算で $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ に保持した。いずれの試験体においても、計算上の降伏荷重 P_y (柱基部の最外縁鉄筋が降伏する荷重)までは、荷重制御で漸増交番荷重を加力し、降伏荷重以降は、変位制御で降伏時変位 δ_y の整数倍の変位で各10サイクルの交番繰返荷重を加力した。

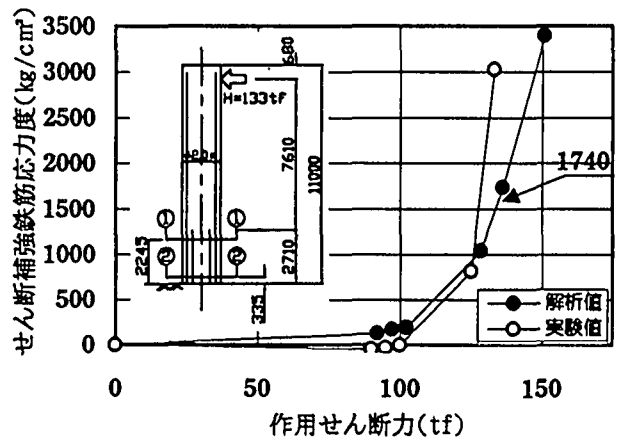


図-7 せん断耐力解析結果

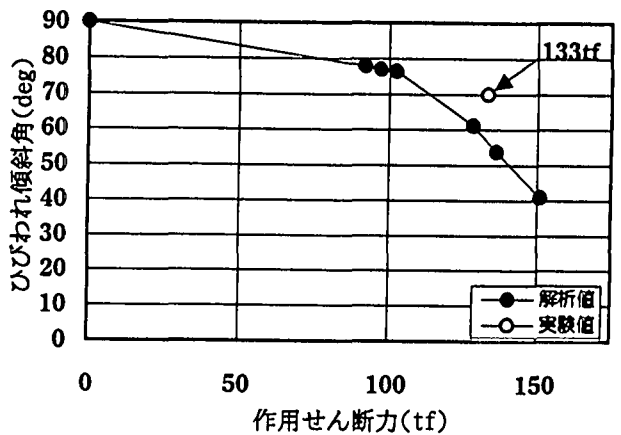


図-8 作用せん断力-ひびわれ傾斜角

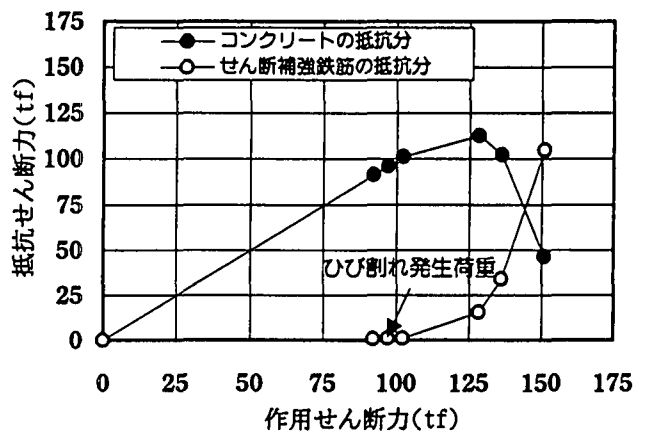


図-9 せん断抵抗分担比

表-1 材料諸元

試験体	縮尺	柱筋配置	段落し	帯鉄筋配置	粗骨材最大寸法
No. 1	1/10	1段 D16	無し	閉合系 D16	20mm
No. 2	1/3	多段 D13	標準位置	非閉合系 D16	20mm
No. 3	1/3	多段 D13	1D下げ	非閉合系 D16	20mm

*d: 橋脚柱径

NO. 1, 2試験体は柱下端で曲げ破壊し、じん性率は5~6と良好な変形性能を示した。NO. 3試験体は段落とし部で柱鉄筋が降伏し、この位置で部材は破壊した。NO. 2試験体に比べ、最大荷重、じん性率ともに低下したが、じん性率は4程度が確保されており、必ずしも脆性的な破壊モードとはならなかった。

6. 大型試験体解析結果

1) NO. 1試験体

図-11にNO. 1試験体の帯鉄筋応力度（基部より10cmの位置）と作用せん断力の関係を示す。帯鉄筋応力度解析値は主鉄筋降伏時(8.13tf)で500kgf/cm²、最大荷重時(11.2tf)で2500kgf/cm²を示し実験値と定性的には一致している。また、ひびわれ傾斜角の実験終了時の計測値は60°であったが、解析値58°とほぼ一致している。

2) NO. 2試験体

図-12にNO. 2試験体の帯鉄筋応力度（基部より216cmの位置）と作用せん断力の関係を示す。帯鉄筋応力度の解析値は、降伏荷重(90.3tf)の100kgf/cm²から最大荷重(122.0tf)で3200kgf/cm²に変化している。実験は曲げ破壊であったが、解析値は計算の曲げ耐力(120tf)以降も計算しており、ほとんど同時にせん断破壊が生じる結果となっている。。また、ひびわれの傾斜角は、降伏荷重時の計測値が65°に対して解析値は60°という結果を示している。実験および解析結果からは終局破壊が曲げせん断型のモードと推察される結果となった。

3) NO. 3試験体

NO. 3試験体は段落とし部で帯鉄筋が降伏し、この位置で終局破壊を生じている。図-13にNO. 3試験体の帯鉄筋応力度（基部より123cmの位置）と作用せん断力の関係を示す。帯鉄筋応力度の解析値は、降伏荷重(75.2tf)の300kgf/cm²から最大荷重(105.0tf)で2000kgf/cm²に変化し、実験値と定性的には一致している。また、ひびわれの傾斜角は、図-14に示すように実験終了時約49°に対して最大荷重時の解析値は35°を示している。コンクリートおよびせん断補強鉄筋の分担せん断抵抗（解析値）を示すと図-15のようになる。作用せん断力の増加に伴ってコンクリートによるせん断抵抗がせん断力の大部分を分担しているが、3試験体とも降伏荷重から最大荷重に至る

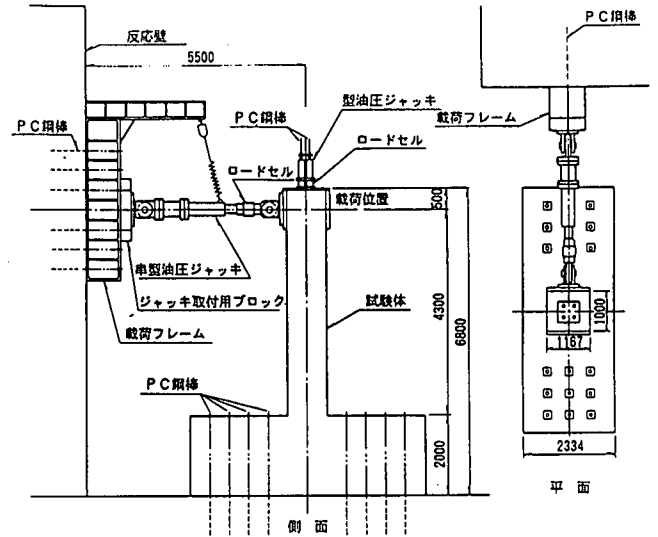


図-10 試験体の加力方法

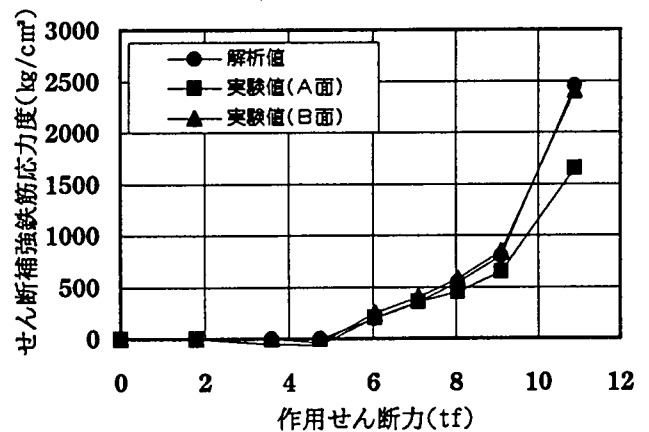


図-11 帯鉄筋応力度-作用せん断力関係

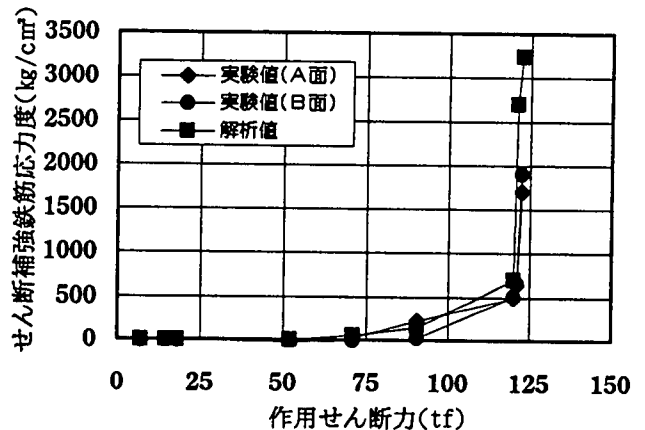


図-12 帯鉄筋応力度-作用せん断力関係

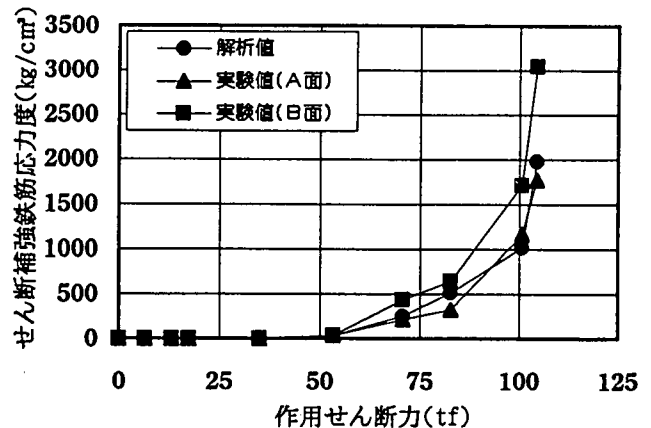


図-13 帯鉄筋応力度-作用せん断力関係

まで、コンクリートのせん断抵抗が減少する傾向を示している。この点については、今後十分に検討を加える必要がある。

7. まとめ

Collinsモデルを用いた実物RC橋脚および大型RC(1/3縮尺)橋脚を対象とした解析により得られた結論は以下のとおりである。

- ①梅田入路部橋脚載荷実験は、荷重100tf程度から柱の変形が明らかに目視できるようになり、鉄筋変化位置近傍の水平ひびわれも顕著になり、荷重増加とともに水平ひびわれは斜め下方に進展してゆき、腹部まで到着した時点で荷重の保持(133tf)が困難となった。
- ②Collinsモデルの解析によると、せん断ひびわれ発生荷重(100tf)、終局せん断耐力時荷重(150tf)となり、定性的には実験結果と一致している。
- ③大型試験体NO.2は、柱下端で曲げ破壊し、じん性率は5程度と良好な変形性能を示した。またNO.3試験体は段落とし部で曲げせん断破壊したが、じん性率は4程度が確保されていた。
- ④大型試験体解析結果は、帯鉄筋応力度およびひびわれ傾斜角は実験結果と定性的には一致する結果が得られた。また、主鉄筋の降伏以降から最大荷重に至るまで、コンクリートの分担せん断抵抗が減少する傾向が認められた。この点については、今後十分に検討を加える必要がある。

参考文献：

- 1)中村・桧貝：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐力評価，土木学会論文集NO. 490/V-23, pp157-166, 1994.5

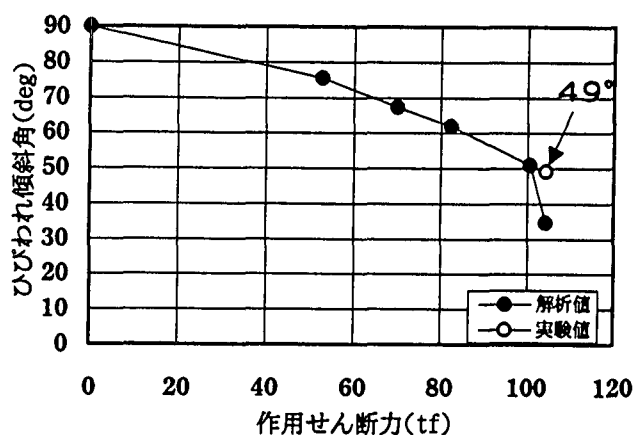


図-14 作用せん断力-ひびわれ傾斜角

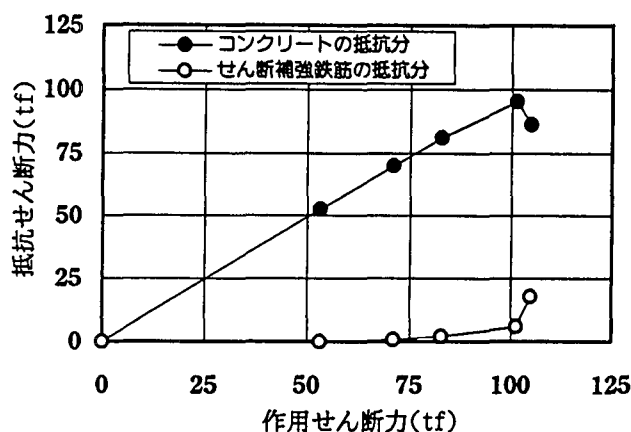


図-15 作用せん断力-抵抗せん断力関係

- 2) Frank J. Vecchio and Michael P. Collins: Predicting the response of reinforced concrete beams subject to shear using modified compression field theory, ACI Structural Journal, 1988, pp. 258-268
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 平成2年
- 4) 幸左・小林・村山・吉澤：大型RC橋脚模型試験体による塑性変形挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, NO.538/V-31, 1996.5

Experimental Study on the shear resistance of RC piers using Collins model

Kazuo Kobayashi, Hidenao Hayashi, Kenji Kosa and Takashi Mizuta

The shear resistance of RC piers to earthquake load is supposedly different from that of beams due to the effect of size, shape and reverse cyclic loading. To evaluate those effects, analytical approach using Collins model was conducted against experimental results of a full-scale pier in which flexural-shear failure occurred at the cut-off point. A good agreement was found between the shear capacity and crack angle of these two results. Next, the same procedure was applied to 1/3 scale large-sized specimens in which flexural failure occurred at the bottom and flexural shear failure occurred at the cut-off point. Again, a good agreement was obtained about the shear capacity and crack angle between the two results, and it was verified that Collins model can be used for quantification of them.