

論文 修正圧縮場理論による実 RC 橋脚のせん断耐力評価

水田崇志*¹・小林和夫*²・幸左賢二*³・安田扶律*⁴

要旨：兵庫県南部地震によりせん断および曲げせん断によって損傷した阪神高速3号神戸線内RC橋脚のせん断耐力および損傷形態を把握するために、修正圧縮場理論による解析的検討を行った。まず、単調水平載荷試験された実RC橋脚に対する耐力評価解析を行った結果、帯鉄筋応力度等で解析値と実験値がほぼ一致し、理論の適応性を確認した。そこで、兵庫県南部地震により曲げせん断およびせん断によって損傷した実RC橋脚を対象に解析を行い、ひびわれ傾斜角等によりそのせん断耐力および損傷形態を把握した。

キーワード：修正圧縮場理論、単柱式RC橋脚、せん断破壊、曲げせん断破壊

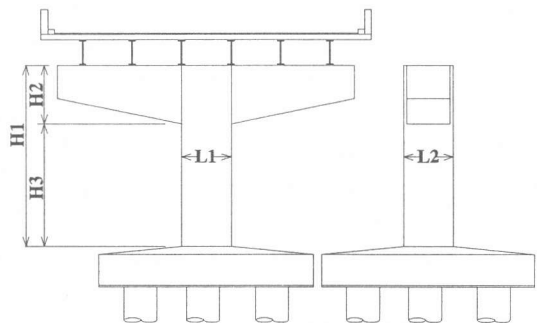
1. はじめに

従来の道路橋示方書^[1]コンクリート標準示方書^[2]のせん断耐力算定式は、終局状態に着目した実験式かつひびわれ傾斜角を45°としたトラス理論に基づいた強度累加式により構成されている。また、近年では終局せん断耐力を、解析的に評価しようとする試みがされており、その1つに修正圧縮場理論(Collinsモデル)^[3]が挙げられる。修正圧縮場理論は、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をマクロ的に捉え、力のつり合いおよびひずみの適合条件によりせん断耐力を導く手法である。本論文は、せん断および曲げせん断によって損傷したRC橋脚を修正圧縮場理論を用いて解析的に検討したものである。

2. 解析諸元

解析検討はRC単柱式橋脚の3基を対象とした。構造諸元および構造概略寸法図をそれぞれ表-1、図-1に示す。

梅田入路橋脚は単調水平載荷試験され、曲げせん断破壊した橋脚であり、神P227および神P270橋脚は兵庫県南部地震により曲げせん断およびせん断によって損傷した橋脚である。なお、曲げせん断破壊とは、道路橋示方書^[1]



記号	梅田入路	神 P227	神 P270
H1	11.0m	10.5m	9.6m
H2	1.3m	3.4m	3.5m
H3	9.7m	7.1m	6.1m
L1	2.0m	3.0m	4.2m
L2	2.0m	3.0m	3.5m

図-1 構造概略寸法図

*1 (株)オリエンタルコンサルタンツ関西支社総合技術部、工修(正会員)

*2 大阪工業大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 阪神高速道路公団復旧建設部工事課、Ph.D(正会員)

*4 阪神高速道路公団工務部設計課、工修(正会員)

に基づき曲げ損傷からせん断破壊移行型の破壊形態を意味する。

(1) 梅田入路橋脚

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^[4]に基づいて設計されている。断面形状は直径2.0mの円形断面であり、段落しを有するRC単柱式橋脚である。軸方向鉄筋は柱基部で径29mmの異形鉄筋が53本、段落し部で28本配置されている。帯鉄筋は柱全長にわたって径16mmの異形鉄筋が30cm間隔で配置されており、現在のRC橋脚と比べると少ない配筋量となっている。なお、鉄筋のかぶり(鉄筋圆心位置からの距離)は10cmである。解析に用いたコンクリートの圧縮強度および鉄筋降伏点強度は試験値を採用し、それぞれ355kgf/cm²および3800kgf/cm²である。また、軸力は上部工を撤去した状態で試験を行っているため無視した。

(2) 神P227橋脚

本橋脚は、3.0m(橋軸)×3.0m(直角)の矩形断面で、段落しを有さないRC単柱式橋脚である。軸方向鉄筋は径32mmの異形鉄筋が142本配置されており、帯鉄筋は径16mmの異形鉄筋が25cm間隔で配置されている。なお、鉄筋のかぶりは10cmである。解析に用いたコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏点強度は設計基準値を採用し、それぞれ270kgf/cm²、3000kgf/cm²とした。また軸力は上部工重量1100tfとした。

(3) 神P270橋脚

本橋脚は、4.2m(橋軸)×3.5m(直角)の矩形断面であり、段落しを有さないRC単柱式橋脚である。軸方向鉄筋は径32mmの異形鉄筋が170本配置されており、帯鉄筋は径16mmの異形鉄筋が25cm間隔で配置されている。なお、鉄筋のかぶりは10cmである。解析に用いたコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏点強度は設計基準値を採用し、それぞれ270kgf/cm²、3000kgf/cm²とした。また、軸力は上部工重量1370tfとした。

表-1 解析対象橋脚の構造諸元対象

対象橋脚	断面形状	断面寸法(m)	軸方向引張鉄筋比		帯鉄筋比(体積比)		損傷状況	損傷方向
			橋軸(%)	直角(%)	橋軸(%)	直角(%)		
梅田入路	円形	φ2.0	0.271[0.143]		0.168		曲げせん断	—
神P227	矩形	3.0×3.0	0.317	1.023	0.189	0.095	曲げせん断	直角
神P270	矩形	4.2×3.5	0.242	0.307	0.075	0.091	せん断	橋軸

[]段落し部の軸方向鉄筋比 矩形断面の軸方向引張鉄筋比は側方鉄筋を無視
 曲げせん断損傷型：曲げ損傷からせん断破壊移行型 せん断破壊損傷型：帯鉄筋降伏によるせん断破壊

3. 梅田入路橋脚に関する検討

3.1 実験結果

水平載荷試験は、既設上部工撤去後、試験対象橋脚と反力装置の橋脚の上部をPC鋼棒により水平に連結し、相互に引き合う形式で単調載荷した。

図-2に実験最大荷重除荷後のひびわれ状況図を示すが、曲げひびわれは帯鉄筋間隔よりも若干大きな約50cm間隔で発生している。荷重75tf付近までは橋脚下端付近の曲げひびわれを除いて、目立った損傷は見られなかった。荷重100tf付近から柱の変形が顕著になり、その後段落し部近傍の曲げひびわれが斜め下方に進展した。このひびわれは、荷重13



図-2 ひびわれ状況

3tfで断面中央まで進展したがこの時点で荷重保持が困難となり、実験を終了した。

段落し位置における帯鉄筋ひずみは荷重120tfまでほとんど発生しないが、その後荷重増加に伴って急激に進展し、実験最大荷重133tf付近では1000~1500 μ に達した。圧縮側コンクリートのひずみは柱下端よりもむしろ段落し部近傍で最大(1900 μ)となり、また同様に、軸方向鉄筋の引張ひずみも段落し位置で最大となり、材料強度試験に基づく降伏ひずみ($\epsilon_{sy}=1800\mu$)を大きく超えた。

以上の結果より、梅田入路橋脚は初期段階では曲げひびわれが先行したものの、実験最大荷重時には軸方向鉄筋応力度および帯鉄筋応力度、ひびわれ傾斜角の進展から判断して、軸方向鉄筋の降伏以降からせん断力の影響により曲げせん断破壊の途中段階であったものと推察される。

(2) 解析結果

帯鉄筋応力度と作用せん断力の関係およびひびわれ傾斜角と作用せん断力の関係を図-3、図-4に示す。

実験最大荷重時133tfに着目すると、実験値の帯鉄筋応力度および、ひびわれ傾斜角は、それぞれ2700kgf/cm²、70°となっている。これに対して帯鉄筋応力度およびひびわれ傾斜角の解析値はそれぞれ1740kgf/cm²、54°となった。この解析値と実験値では若干異なるものの、実験値では局部応力であるのに対して解析上では平均応力であることや、帯鉄筋応力度の増加傾向が比較的一致していることを考慮すれば、定量的には一致しているものと考えられる。

コンクリートが負担する抵抗せん断力(せん断ひびわれ発生荷重)は解析値で約100tf、コンクリート標準示方書式および実験値で110tfとなり、いずれも良く一致した。これに対して終局時のせん断耐力は解析値で約150tfとなるが、コンクリート標準示方書式で177tfとなり、解析値がやや小さくなっている。

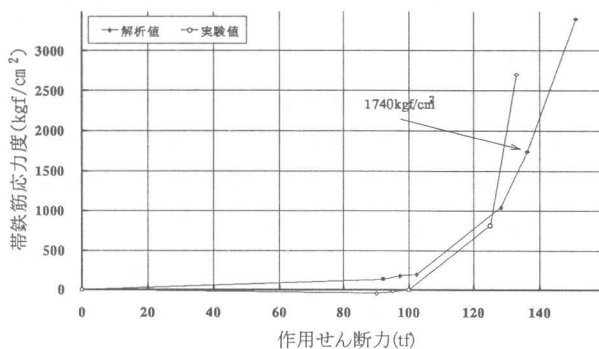


図-3 帯鉄筋応力度と作用せん断力の関係

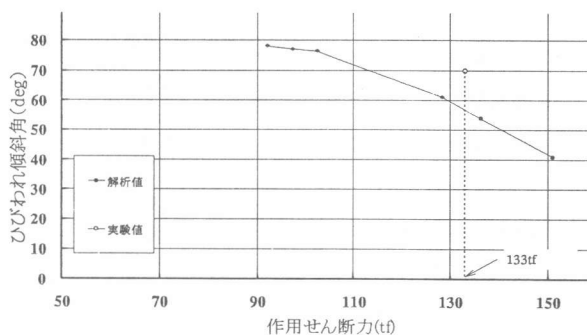


図-4 ひびわれ傾斜角と作用せん断力の関係

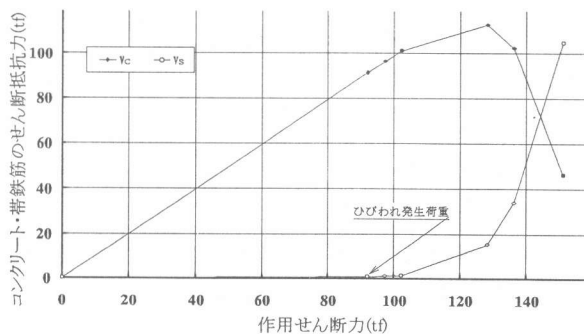


図-5 $V_c \cdot V_s$ と作用せん断力の関係

これは、図-5に示すようにCollinsモデルによる解析の場合には、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、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° 実験最大荷重133tfで実験を終了しているが、解析では実験最大荷重以降もひびわれ傾斜角が小さくなり、さらに、20tf程度のせん断耐力が存在する結果となった。

以上よりCollinsモデルを用いて円形断面RC橋脚のせん断性を評価した場合は、終局状態については議論が残るものの、ひびわれ傾斜角および実験最大荷重状態を定量的に評価できるものと考えられる。

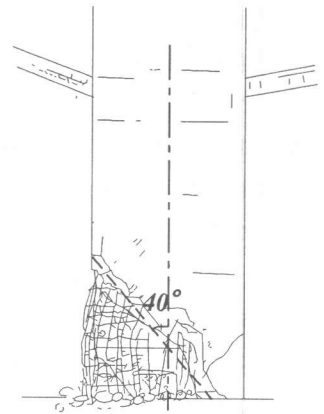


図-6 損傷状況図

4. 神P227橋脚

4.1 損傷状況

本橋脚の損傷状況を図-6に示す。主として橋軸直角方向に軸方向鉄筋の座屈が認められ、かぶりコンクリートも4面剥離し、損傷度の高い橋脚であった。また、残存ひびわれ傾斜角は約 40° であった。そのため、損傷形態は曲げひびわれ発生後に正負交番荷重によってせん断耐力が低下した曲げとせん断の複合型損傷と推定された。

4.2 解析結果

ひびわれが部材中心線と交差する位置を検討断面（せん断スパン7m）とし、その橋軸直角方向の解析結果を図-7、8、9に示す。図-7より、帯鉄筋応力度は作用せん断力250tfから発生し、その後増加している。図-9よりコンクリートのせん断抵抗力は、作用せん断力350tfまでは単調に増加し最大値に達するが、その後減少している。また、この最大値付近から帯鉄筋によるせん断抵抗力が発生している。

実橋脚の損傷状況から、残存ひびわれ傾斜角は約 40° となっており、このひびわれ傾斜角に着目すると、

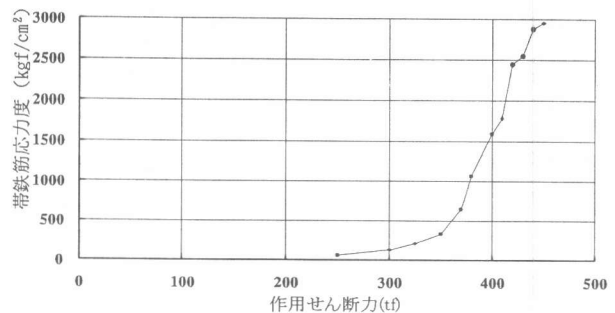


図-7 帯鉄筋応力度と作用せん断力の関係

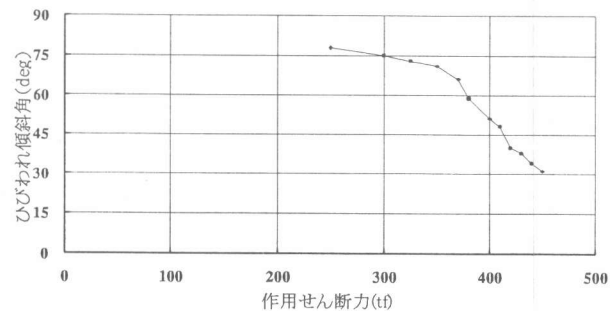


図-8 ひびわれ傾斜角と作用せん断力の関係

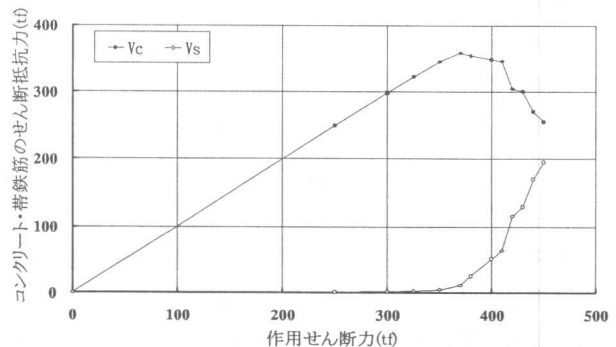


図-9 $V_c \cdot V_s$ と作用せん断力の関係

作用せん断力は図-9より約420tf($V_c=310\text{tf}$, $V_s=110\text{tf}$)、帯鉄筋応力度は図-8より約2500kgf/cm²となった。これより、この時点の帯鉄筋応力度は作用せん断力に対して急激に増加する領域であるものの、帯鉄筋は降伏点強度($\epsilon_{sy}=3000\text{kgf/cm}^2$)には達しておらず、せん断破壊近傍の状態であったものと推察される。

帯鉄筋降伏時を終局時とした場合、終局せん断耐力およびひびわれ傾斜角は、それぞれ450tf($V_c=250\text{tf}$, $V_s=200\text{tf}$)、31°となり、本橋脚はその後も約30tfせん断耐力を有する結果となった。ただし、修正圧縮場理論では正負交番荷重の影響が考慮されず、今後の課題である。

5. 神P270橋脚

5.1 損傷状況

本橋脚は橋軸方向に損傷しており、損傷状況を図-10に示す。損傷形態は、柱中心付近からせん断ひびわれが発生し、斜め下方に鋭角的に進展したせん断破壊型の損傷である。また、かぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈等は見られず、その損傷度は比較的小さい橋脚であった。

5.2 解析結果

ひびわれが部材中心線と交差する位置を検討断面(せん断スパン6m)とし、その橋軸方向の解析結果を図-11、12、13に示す。

実橋での残存ひびわれ傾斜角は、約30°であり、解析上の帯鉄筋降伏時(3000kgf/cm²)におけるひびわれ傾斜角(32°)と良く一致した。また、この時の軸方向鉄筋応力度の解析値は855 kgf/cm²であり、比較的小さな弾性領域内の値を示した。解析結果より、本橋脚は曲げによる影響は少なく、主にせん断力により支配された損傷形態であり、帯鉄筋は降伏している状態であるものと考えられる。したがって、Collinsモデルではせん断損傷型RC橋脚のせん断耐力を評価できるものと考えられる。

図-13にはコンクリート標準示方書(土木学会式)、道路橋示方書によるせん断耐力算定値を併せて示す。これより、終局時(帯鉄筋降伏時)に

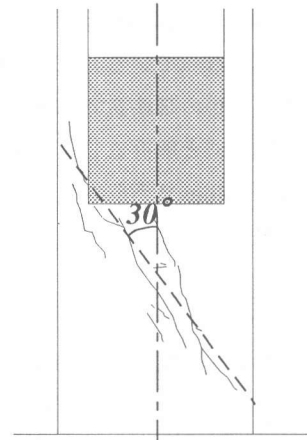


図-10 損傷状況(神P270橋脚)

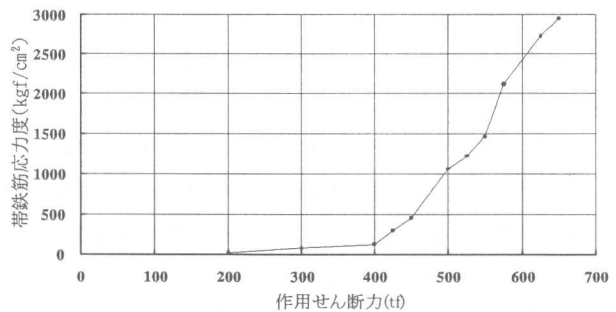


図-11 帯鉄筋応力度と作用せん断力の関係

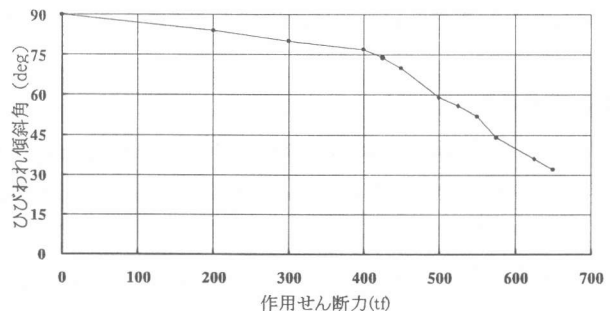


図-12 ひびわれ傾斜角と作用せん断力の関係

着目するとコンクリートのせん断抵抗力(V_c)は解析値および土木学会値でそれぞれ335tf、387tfとなっており、解析値の方が小さくなった。帯鉄筋のせん断抵抗力は、解析値($V_s=315$ tf)が土木学会値($V_s=192$ tf)よりも大きくなった。また、終局せん断耐力で比較すると解析値では $V=650$ tf、土木学会値では $V=579$ tfとなり、解析値の方が10%程度大きくなっている。なお、道路橋

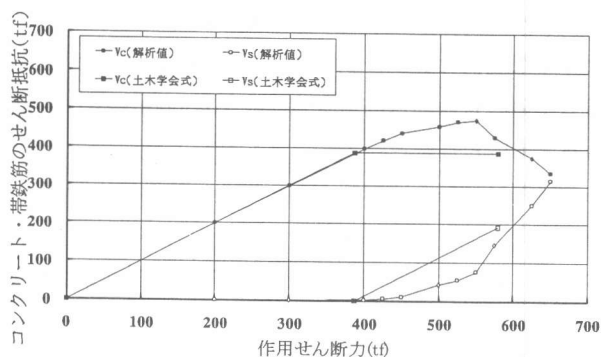


図-13 $V_c \cdot V_s$ と作用せん断力の関係

示方書算定値の帯鉄筋降伏時のせん断耐力は、解析値および土木学会値よりも大きくなっている。

土木学会式と解析値では、終局せん断耐力および各せん断抵抗力の分担が異なる結果となった。これは、Collinsモデルが作用せん断力に対してひびわれ傾斜角およびひびわれ幅の影響が考慮されるためであると考えられる。

6. まとめ

実橋橋脚を対象としたCollinsモデルによる解析的検討により得られた結果を以下に示す。

- ①梅田入路橋脚の一方単調載荷試験を対象とした解析では、せん断ひびわれ発生荷重100tf、実験最大荷重時の帯鉄筋応力度は 1740 kgf/cm^2 となり、実験結果ではそれぞれ110tf、 2700 kgf/cm^2 となり定量的に一致した。
- ②神P227橋脚の橋軸直角方向を対象とした解析結果より、実橋脚の残存ひびわれ傾斜角 40° では、帯鉄筋応力度は 2500 kgf/cm^2 (解析値)で、帯鉄筋は降伏しておらず、終局まで約30tfのせん断耐力を有する結果となった。
- ③せん断損傷型の神P270橋脚を対象とした解析結果より、終局時(帯鉄筋降伏時)のせん断耐力が650tf($V_c=335$ tf、 $V_s=315$ tf)、ひびわれの傾斜角が 32° は、実橋脚のひびわれの傾斜角 30° とほぼ一致した。また、この場合には帯鉄筋降伏時のせん断耐力は650tfとなり、土木学会算定値(579tf)よりも10%程度大きくなった。
- ④以上より、実橋脚を対象としたCollinsモデルによる解析で、正負交番荷重下において曲げせん断複合型の損傷形態に対してはさらに検討すべき問題があるものの、実橋脚の損傷形態および終局せん断耐力を定量的に評価できるものと考えられる。

【参考文献】

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，平成8年
- [4] 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，昭和31年