

(142) 中空断面RC高橋脚の耐荷力・変形性能の照査と弾塑性地震応答解析

大阪市 正員 藤澤 悟 中部大学工学部 正員 山田 善一
 京都大学工学部 正員 家村 浩和 立命館大学理工学部 正員 伊津野和行

1. はじめに

山岳部、溪谷部に建設される橋梁には中空断面高橋脚が採用されることが多い。しかし中空断面のRC橋脚に関して、塑性域における変形性能の照査や強震時の極限性状についての検討は現在のところほとんど実施されていない。本研究ではRC部材をファイバー要素に分割し、コンクリート・鉄筋の応力ひずみ関係構成則を用いて部材の耐荷力、および変形性能を照査するファイバーモデル解析手法を用いることにより、中空断面RC高橋脚の耐荷力、極限変形性状について照査した。また関東地震規模を想定した保有耐力レベルの地震波(Ⅱ種地盤)に対する橋軸直角方向の弾塑性地震応答解析を行って、橋脚の地震応答性状について検討した。

2. 中空断面高橋脚の弾塑性地震応答解析

本研究の解析モデルは図1に示す3径間連続PCラーメン橋における中空断面高橋脚である。橋脚モデルを図2に示す。本橋脚は高さ0m-25mまでが中実部で高さ25m-90mまでが中空部となっている。また、高さ6.5m, 12.5m, 28.5mの各断面で主鉄筋(SD345, D51)の段落とを行っている。主要断面の配筋状況を表1に示す。橋脚天端には死荷重反力9939tonfが作用している。主鉄筋量の違いによる影響を検討するため、橋軸直角方向のみに配筋したモデル(ケースA)、橋軸方向・直角方向の両方に配筋したモデル(ケースB, C)の2種類を設定した。またコンクリートは圧縮強度が300kgf/cm²で、応力ひずみ関係はKent, Parkモデルを用いた。ケースA, Bでは横拘束度を低く、ケースCでは横拘束度を高く設定した。計算ケースを表2にまとめる。横拘束度が高くなると応力低下域の勾配が緩やかになる。中空部では空洞に面したコンクリートの圧縮応力が解放されるため、中実部に比べて横拘束度を低く設定している。鉄筋・コンクリートの応力ひずみ関係を図3, 4に示す。橋脚をファイバー要素に分割して、これらの応力ひずみ関係を用いることにより、与えられた曲率に対して外力軸力と内力とが釣り合うように断面中央のひずみを修正しながら次式により橋脚各断面のモーメント曲率関係

(M-φ関係)の計算を行う。

$$N = \sum (f_c \cdot A_c + f_{unc} \cdot A_{unc} + f_{st} \cdot A_{st}) \quad (1)$$

$$M = \sum (f_c \cdot A_c + f_{unc} \cdot A_{unc} + f_{st} \cdot A_{st}) \times y_i \quad (2)$$

ここで N:軸力、M:抵抗モーメント、f_c, A_c:拘束コンクリートの

応力・面積、f_{unc}, A_{unc}:非拘束コンクリートの応力・面積、f_{st}, A_{st}:鉄筋の応力・面積、である。M-φ関係は図5のようにコンクリートひび割れ点、主鉄筋の降伏点、コンクリート応力最大点(非拘束コンクリート圧壊)、終局点(拘束コンクリート圧壊)の4点を結んだ直線で表現される。M-φ関係より荷重-変位関係包絡線が得られ、最大点指向型トライリニアモデルを履歴モデルとして非線形地震応答計算を行い、橋脚の耐震安全性

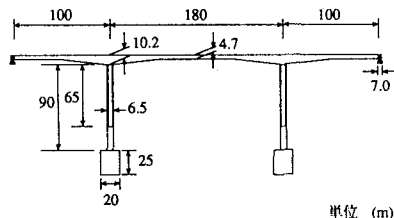


図1. 橋梁モデル全体図(3径間PCラーメン橋)

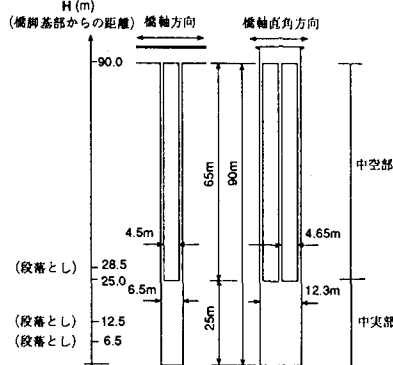


図2. 橋脚モデル全体図

表1. 主要断面の配筋状態

高さ	断面状況	軸力 N(tonf)	配筋 D51 SD345
0.0m	中実部	21289.625	431本
6.5m	中実部	19990.437	369本
12.5m	中実部	17791.813	308本
25.0m	中空部	16292.750	308本
28.5m	中空部	15950.625	287本
90.0m	中空部	9939.000	287本

表2. 解析を行った計算ケース

	配筋方向	中実部 コンクリート	中空部 コンクリート
ケースA	橋軸直角方向	拘束(弱)	非拘束
ケースB	橋軸方向・直角方向	拘束(弱)	拘束(弱)
ケースC	橋軸方向・直角方向	拘束(強)	拘束(強)

を検討する。以上の解析の流れをフローチャートとして図6に示す。

3. 解析結果

橋脚基部と高さ25mの中空部の断面の曲率モーメント関係(図7)をケースAとCについて検討する。ケースAについて、中実部では鉄筋降伏後、モーメントのわずかな増加に対して、曲率は極めて大きく上昇する。中空部では、降伏点以降、比較的小さな曲率でコンクリート応力最大、終局状態になり、降伏点以降の回転性能に乏しい。ケースCでは橋軸方向、直角方向の両方に配筋しており、橋軸方向の鉄筋が応力を負担するため、抵抗モー

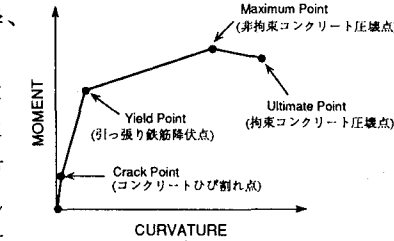


図5. 各断面のモーメント曲率関係

メントは橋軸直角方向のみの配筋した場合と比べて全体的に50%程度上昇している。また、最外縁の主鉄筋が降伏した後も、曲率が急激に増大することなく抵抗モーメントは上昇の傾向を示す。次に抵抗モーメントを高さ方向に連続的に図示した図8について検討する。この図により段落とし部ごとに抵抗モーメントが減少することがわかる。しかし中空、中実変化点での抵抗モーメントの減少はさほど大きくない。この図よりひび割れは橋脚基部で、降伏は2回目の段落し部で生じるが、応力最大状態、終局状態は、ケースBとCの比較より、横拘束筋の拘束度により変動し、横拘束効果が弱いと中空部に限界状態が生じることがわかる。横拘束鉄筋量を多くすることにより、コンクリート

応力最大点以降の応力低下勾配が緩やかになるため、最外縁のコンクリートが圧壊しても、内部のコアコンクリートが受け持つ応力があまり小さくならないために、抵抗モーメントの減少が小さくなる。よって、横拘束度を高めることにより最大時発生位置を基部に近い断面に移すことができるので十分な横拘束鉄筋の配置が橋脚の耐震性を高める上で有効である。次に高さ方向の曲率(図9)を検討する。中空部では曲率が激減していることに注意を要する。中空部はコンクリートの面積が小さく、非拘束コンクリート圧壊時の圧縮部コンクリートの応力分布は図10のように複雑になり、また最大応力状態になっているファイバー要素が、

曲率の増大に従って最外縁から空洞部に達することにより、内力である軸力は急激に減少する。中空部は鉄筋の降伏以降、変形性能に乏しく、またコンクリート応力が最大となった後、脆性的な破壊性状を示すため、終局状態までの挙動を考える場合は、十分な横

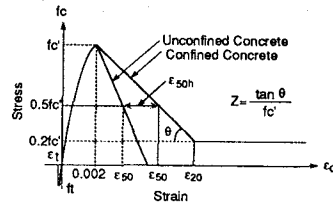


図3. コンクリートの応力ひずみ関係

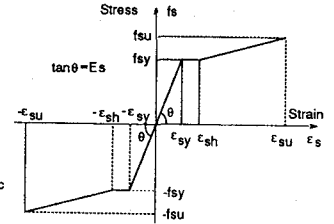


図4. 鉄筋の応力ひずみ関係

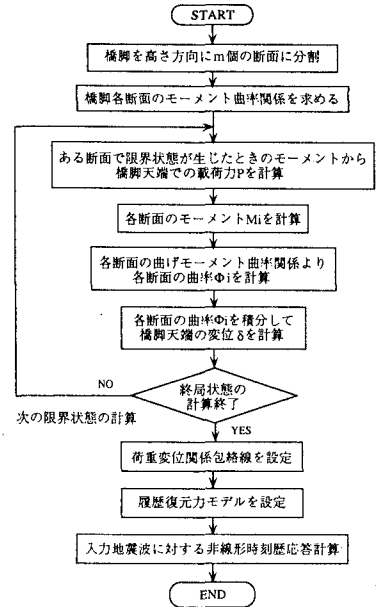


図6. ファイバーモデル解析から非線形地震応答計算までのフローチャート

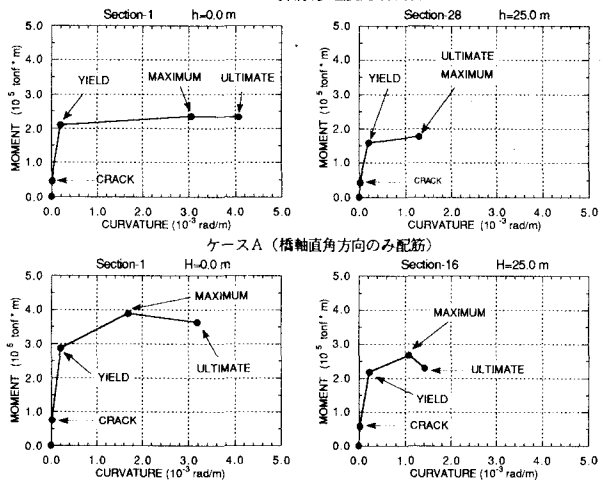


図7. 各断面のモーメント曲率関係

拘束を確保し、応力低下を小さくすることが必要である。次に橋脚頂部に水平力が作用したときの各種限界状態における曲率分布

(図11)を検討する。応力最大状態が発生した断面より上部に等価ヒンジ長の範囲に渡って塑性回転が集中するという仮定をしているため、最大応力時と終局時の曲率の分岐がみられる。一般に橋脚基部に近いほど曲げモーメントが大きいので曲率は大きく、上部に向かうほど小さくなるが、段落としのある断面ごとに曲率は階段状に増加している。この段落としによる影響により、基部より高さ12.5mでの曲率が橋脚内で最も大きくなる。

これらのモーメント曲率関係から得られる荷重変位関係包絡線を用いて、ケースAとCについて保有耐力レベルの地震波(Ⅱ種地震)(図12)に対する弾塑性地震応答解析を行った。この地震波形は耐用期間に比べて希に発生する大規模地震として、関東地震クラスのを想定し、建設省土木研究所耐震研究室で作成されたものである。ここでは橋脚自重を考慮し、降伏時の変形状態を1次モード形状として算出した換算重量を用いることにより、1自由度系として解析を行った。換算重量は11978tonfとなり、桁のみの重量よりも約20.5%の荷重増加が生じる。また上部工重量、曲げ変形量ともに大きいため、P-Δ効果を考慮して耐力を低減した荷重変位関係包絡線(図13)を用いた。粘性減衰は履歴減衰が大きくなることからゼロとした。地震応答解析結果を図14に示す。変位の時刻歴波形は周期3~4秒の緩やかな応答を示している。入力加速度の最大値が400galを

越えるのに対し、最大応答加速度はケースAで183gal、ケースCで255galである。橋脚の固有周期が比較的長いことにより橋脚の応答加速度は小さい。応答変位は降伏点をわずかに越え、靱性率(最大応答変位/降伏変位)による評価では、ケースA、Cともに軽微な損傷が生じたと判断される。しかし、履歴減衰による減衰定数が16%とかなり大きかったため、ひび割れ点を除いた包絡線による地震応答(ケースA', ケースC')を行った。解析結果は履歴減衰が小さくなるため応答変位が大きくなり、靱性率はケースA'で2.0、ケースC'で2.3となり、中

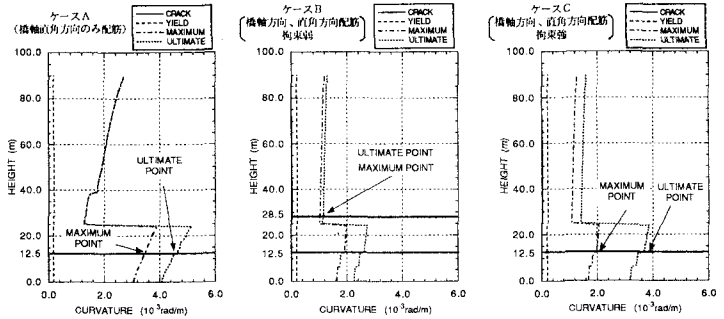


図8. 各種限界状態における各断面の抵抗モーメント

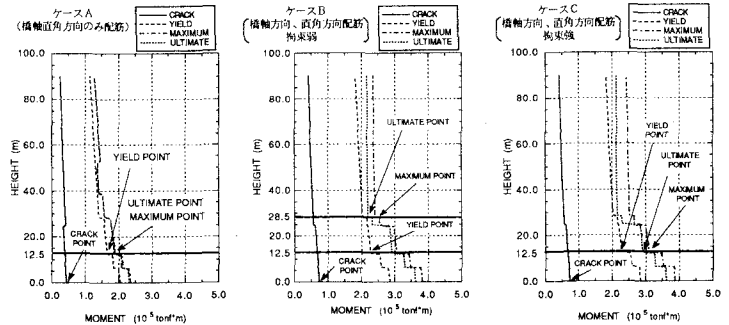


図9. 各種限界状態における各断面の曲率

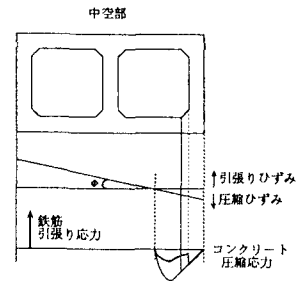


図10. 非拘束コンクリート圧縮時の中空部コンクリート応力分布

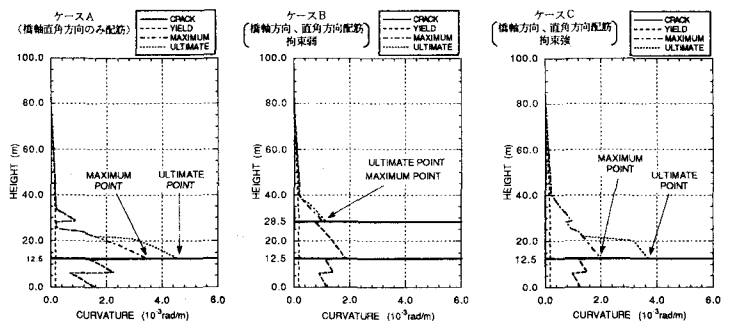


図11. 橋脚頂部に水平力が作用したときの曲率分布

かなり大きかったため、ひび割れ点を除いた包絡線による地震応答(ケースA', ケースC')を行った。解析結果は履歴減衰が小さくなるため応答変位が大きくなり、靱性率はケースA'で2.0、ケースC'で2.3となり、中

程度の損傷が生じたと判定される。応答変位は、ひび割れ点の設定により大きく変化することに注意が必要である。またケースAの荷重変位包絡線は、P-Δ効果を考慮すると降伏点以降、耐力が低下するため、降伏点を大きく越える場合は橋軸直角方向のみの配筋では耐震的に危険であると言える。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する。

①. 中実部では降伏点以降の変形性能が大きく、また非拘束コンクリートが圧壊した後も荷重が大きく減少することなく、変形性能を有しているのに対し、中空部では降伏以後、中空部の半分程度の変形でコンクリートの

圧壊が生じ、応力最大状態となった後は脆性的破壊形状を示すため、耐震上靱性に乏しい。

②. 橋軸方向、直角方向の両方配筋を考慮した場合、横拘束鉄筋量を増加することにより、コンクリート応力最大点、終局点生起位置が中空部から中実部に移動し、中空断面高橋脚の耐震性には横拘束鉄筋量が大きな影響を及ぼす。

③. P-Δ効果を考慮すると橋軸直角方向のみの配筋では降伏点以降、耐力が低下するため、耐震的に危険である。

④. 中空断面高橋脚は、長周期の地震応答特性から、保有耐力レベルの巨大地震に対する応答加速度は比較的小さく、橋脚に生じる損傷は軽微な損傷～中程度の損傷に留まり、崩壊に至ることはない。

〈参考文献〉

- (1) R. Park and T. Paulay : Reinforced Concrete Structures, Wiley-Interscience, August, 1974.
- (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2月.
- (3) 土木学会関西支部共同研究グループ報告書、橋梁構造物の総合健全性評価に関する調査研究、平成2年6月.

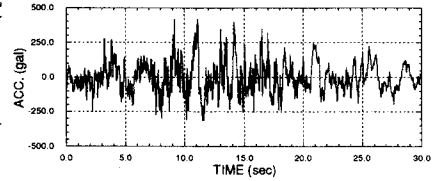
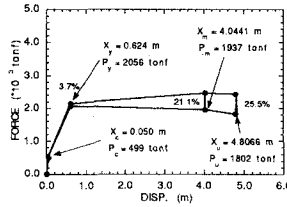
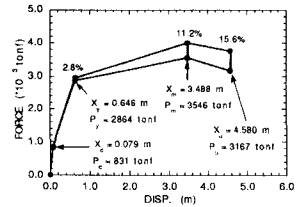


図12. 入力地震動の加速度波形 (保有耐力レベル・Ⅱ種地盤)

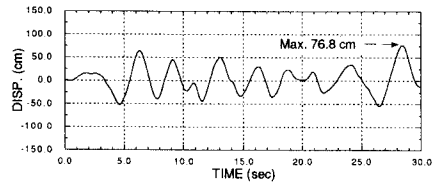
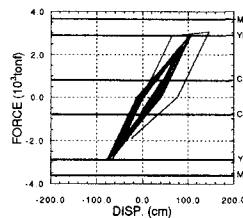
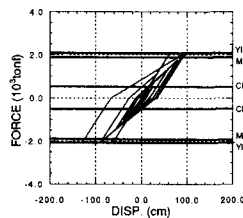
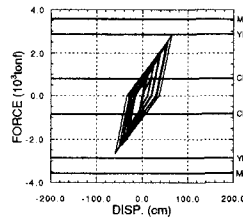
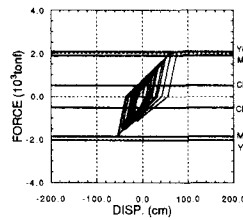


ケースA (橋軸直角方向のみ配筋)

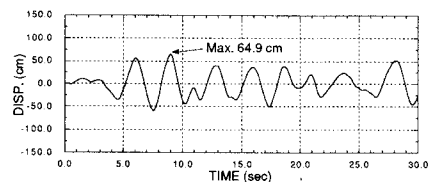


ケースC (橋軸方向、直角方向配筋、拘束強)

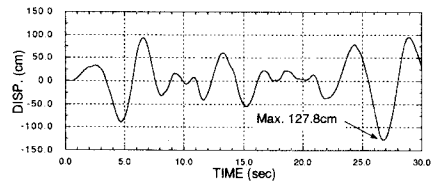
図13. 荷重変位関係包絡線



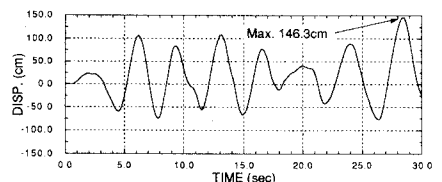
ケースA (橋軸直角方向のみ配筋)



ケースC (橋軸方向、直角方向配筋、拘束強)



ケースA' (コンクリートひび割れ点なし)



ケースC' (コンクリートひび割れ点なし)

図14. 地震応答解析結果 (履歴曲線と時刻歴応答波形)