

有メナーゼヒンジUBRC柱の開発

京都大学 ○高橋良和 1*
京都大学 植村佳太 1*
京都大学 五島健斗 1*
京都大学 山本伸也 1*

埋込コンクリートヒンジ RC柱 UBRC機構
設計基準外事象 危機耐性 メナーゼヒンジ

研究の目的

東日本大震災は数々の想定を越える事象を引き起こした。このような経験を経て、以降、設計で考慮するような事象を越えた事象（設計基準外事象）についての関心が高まり、「危機耐性」という概念が共有されるようになった。これは構造物の耐震性の観点で言えば「設計基準外の地震動が構造物に作用し確保されるべき安全性がたとえ損なわれた場合でも、直ちに危機的な状況に陥らないようにするべき」という考えである。従来型 RC 柱は設計で想定するレベル2地震動に対しては塑性ヒンジを形成してエネルギーを吸収し、軸力・せん断力伝達機能を維持するように設計されているが、設計基準外事象において塑性ヒンジにさらなる負荷が加わったときに塑性ヒンジがこれら機能を維持することは保証されていない。よってその場合、RC 柱に生じる破壊形態は不定であり危機的な状況に陥る可能性もある。そこで申請者らは、設計基準事象に対して確実に塑性ヒンジ部でエネルギー吸収能力を発揮するのに加え、設計基準外事象に対しても軸力とせん断力を確実に伝達することを保証し、さらに弾力的な復元力を有する高耐震性能橋脚「有メナーゼヒンジUBRC柱」を開発することを目的とした。

研究の内容

有メナーゼヒンジ UBRC 柱では、設計で想定した地震動に対しては、あくまで従来の RC 柱と同様に塑性ヒンジを形成して抵抗するが、想定と異なる地震動が発生して通常の耐震設計で照査された機構が損なわれた場合は、メナーゼヒンジとアンボンド芯材によるフェールセーフ機構へと移行し、柱の崩壊を防ぐ機能を発揮する構造となっている。そのため、現行の耐震設計を満足した上で設計基準外事象に対応することができる。

研究初年度は、提案する有メナーゼヒンジ UBRC 柱の開発に向け、塑性ヒンジの損傷が進展した場合でも基部に配置したメナーゼヒンジによる軸力・せん断力の伝達機構へと移行する有メナーゼヒンジ RC 柱の開発を中心とした。有メナーゼヒンジ RC 柱という名称では、従来のメナーゼヒンジ部に切り欠き部を有するロッカー柱と同じ構

造と誤解されることもあるため、以降、「埋込」メナーゼヒンジ RC 柱という名称を用いることとする。

研究二年目は、初年度に実施した埋込メナーゼヒンジ RC 柱のヒンジ機構を更に一般化した埋込コンクリートヒンジ RC 柱として、埋込コンシデールヒンジ RC 柱および埋込アンカーバー RC 柱を作成し、その性能を確認するとともに、埋込メナーゼヒンジ UBRC 柱を設計、製作して正負交番載荷実験を行い、期待した性能が発揮できるかを検証した。

埋込コンクリートヒンジ RC 柱として、今回実施した検討の範囲でもっとも効果的に機能したのは、埋込メナーゼヒンジ RC 柱である。従来、メナーゼヒンジは、柱とフーチング間に設けた切り欠き部に X 字の鉄筋のみを配置して回転変形の集中を図り、ヒンジ機構を実現していた。本研究では、切り欠き部を有さない通常の RC 柱内部にメナーゼヒンジが埋め込まれていることから、大変形時での回転変形がメナーゼヒンジ筋の交叉部で生じるよう、基部での破壊性状を適切に制御する課題に取り組んだ。結果、従来型 RC 柱では、設計範囲外である 35mm 振幅以降の挙動において、設計範囲内の挙動で形成した塑性ヒンジ機構の損傷がさらに進行し、柱とフーチング間の変位が軸直角方向にずれ、軸方向変位も急激に増大したのに対し、埋込メナーゼヒンジ RC 柱では、従来型 RC 柱以上の変形まで載荷し、水平復元力低下も同程度であったにも関わらず、損傷はメナーゼヒンジ交叉部に集中し、軸・軸直角方向における相対変形も増加していないことから、ヒンジ機構の保持が確認できる新しい構造の開発に成功した。

埋込コンクリートヒンジ RC 柱として、コンシデールヒンジ、またアンカーバーヒンジによる機構を採用した供試体を作成し、その性能について検討した。いずれの RC 柱も設計基準事象に対する性能はほぼ同等であり、付加したコンクリートヒンジ機構は設計基準外事象に対して機能することを確認した。ただし、埋込コンシデールヒンジ RC 柱は、 $10\delta_y$ まではコンシデールヒンジによるヒンジ機構を発現したものの、それ以上の変形ではヒンジ定着部内のコンクリートが破壊し、急激に軸変形防止機

能を失う結果となった。また埋込アンカーバーRC柱は、鉄筋座屈後7 δy サイクルで基部に大きなせん断ひび割れを生じ、以降せん断ずれとねじれが支配的な変形を示した。原因は周囲のコアコンクリートの拘束がなくなったことでアンカーバーがせん断変形しやすくなってしまったためと考えられる。

埋込メナーゼヒンジRC柱は塑性ヒンジの2機能(エネルギー吸収能・ヒンジ機能)の内、ヒンジ機能を保証するものだが、ヒンジ構造自体は復元力を持たないためP- Δ 効果で自己倒壊する恐れがある。そこでアンボンドPC鋼棒芯材を用いるUBRC機構で自己倒壊しない最低限の復元力を確保することを目的とした、埋込メナーゼヒンジUBRC柱の開発を行った。設計基準事象に対し、埋込メナーゼヒンジUBRC柱は、UBRC構造の特徴である、RC構造が降伏後の正の二次剛性が発現した骨格曲線を有し、設計基準外変位では、埋込メナーゼヒンジRC柱と同様、一定の安定した緩やかな荷重低下を示すとともに、軸・軸直角方向における相対変形も増加していないことから、ヒンジ機構の保持性能を発揮した。さらに、塑性ヒンジが純粋なヒンジに近づく20 δy を越えるような大変形領域においても、UBRC機構によりP- Δ 効果を打ち消すほどの正の復元モーメントを付与することができたことを確認した。

研究の成果、新発見

本研究では、設計基準外事象に対してRC柱のヒンジ機構を保証することを目的として3種類の埋込コンクリートRC柱の開発を行うとともに、大変形時でもP- Δ 効果による倒壊を防ぐ程度の復元力を有する埋込メナーゼヒンジUBRC柱の開発を行った。結果、以下のことが明らかとなった。

埋込メナーゼヒンジRC柱は、軸方向鉄筋の座屈発生前における挙動では、メナーゼ筋を配置した分、最大荷重は増加するものの、通常のRC柱と同傾向の荷重-変位関係を示すことがわかった。そのため、有メナーゼヒンジRC柱は、設計上の想定内の変形に対しては、通常のRC柱と同様の挙動を示すことがわかった。通常のRC柱では、柱の大変形時における柱基部周辺の更なる塑性化により塑性ヒンジがヒンジとしての機能を失い、柱基部において軸変形およびせん断変形が生じるのに対し、有メナーゼヒンジRC柱では、通常のRC柱に比べ、大変形時における柱基部の軸変形、せん断変形が大幅に抑制された。さらに、柱基部において、メナーゼ筋の交差部を支点としたヒンジ機構が明確に発現している様子が確認された。このことから柱基部にメナーゼヒンジを配置することで、RC柱に設計上の想定を超える大変形が生じた場合でも、

安定した塑性ヒンジ形成を保障できることが示された。

埋込コンシデールヒンジRC柱は6 δy で座屈後、螺旋筋上部を回転中心としたヒンジ機構を発現し、せん断変形及び沈下を10 δy まで防止した。しかし、11 δy サイクルからコンシデール筋の曲げ変形が螺旋筋部から拡幅部に広がっていき高さ100mm位置で座屈を起こし、周囲のコアコンクリートを押し割ることで急激に軸力伝達機構が失われ、大きな沈下を起こしてしまった。しかしコンシデール筋の座屈が内巻きスパイラル筋などで抑制された構造であれば、安定したヒンジ機構を維持できる可能性は十分にあるため更なる検討が必要と思われる。

埋込アンカーバーRC柱は座屈後、アンカーバー周囲のコアコンクリートが崩壊したことでアンカーバーに作用するせん断力のせん断スパンが伸びた結果、アンカーバーの降伏荷重が減少し、区間的なせん断変形が生じてしまいヒンジ機構を発現できなかった。アンカーバーをヒンジ部材として機能させるには、アンカーバー周囲のコンクリートの残存状態をコントロールすることでせん断スパンが伸びないようにし、アンカーバーが一点で回転するように誘導する構造が必要であると思われる。

埋込メナーゼヒンジUBRC柱は座屈後にヒンジ機構を発現し軸力及びせん断力を伝達することで、安定した回転変形によって変形を吸収した。またUBRC機構により弾性的な復元力を確保することで、基部が純粋なヒンジに近くなった大変形領域(20 δy)でも柱の安定性を担保することに成功した。このことは設計基準外事象に対してヒンジ機構を発揮する埋込コンクリートRC柱のヒンジ部が純粋なヒンジになりP- Δ 効果により不安定化する状況を防止する構造といえる。なおPC鋼棒の応力状態は引張側では解析と概ね一致したが、圧縮側では解析より小さい値になった。より正確に設計するためには、シース管内の遊びを考慮したモデルを使用すべきと考えられる。

今後の予定

埋込コンシデールヒンジRC柱は、ヒンジ機構に指向性がないため、水平二方向に大きく振動する地震応答に対してメナーゼヒンジより有利に機能すると期待できる。研究の範囲ではヒンジ定着部の損傷により期待した性能は発揮できなかったため、構造詳細を再検討し、再び載荷実験したいと考えている。

謝辞

本研究は一般財団法人大成学術財団の助成を受けて実施した。謝意を表します。