第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

要求性能を踏まえたボックスカルバート軸直角方向の地震時損傷シナリオの設定に関する検討

廣江　亜紀子[1]・大住　道生[2]・小野　友彰[3]・高松　芳徳[4]

[1]正会員　修（工）　国立研究開発法人土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　主任研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
[2]正会員　博（工）　国立研究開発法人土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
[3]非会員　修（工）　（一社）道路プレキャストコンクリート製品技術協会
（〒101-0062　東京都千代田区神田駿河台３丁目５番地１）
[4]正会員　（一社）道路プレキャストコンクリート製品技術協会
（〒101-0062　東京都千代田区神田駿河台３丁目５番地１）

1. はじめに

ボックスカルバートは地中に設置される構造物であり，これまでのボックスカルバートの地震による被害は軸方向の継手部の被害が多い．しかし，近年ボックスカルバートは大型化してきており，兵庫県南部地震における大開駅の被災事例[1)]のように軸直角方向に被害が発生した事例もあることから，大型のボックスカルバートの軸直角方向に対して耐震設計法を検討する必要がある．八ツ元ら[2)]は正負交番載荷実験によるボックスカルバートの地震時の損傷の進展過程の把握と2次元骨組み解析による再現解析を試みている．しかし，耐震設計法の検討にあたっては，大型のボックスカルバートを使用するため要求性能を明らかにし，それを満足しない避けるべき状態を把握することも必要となる．カルバートに対する要求性能は，道路土工構造物技術基準・同解説[3)]（以下，土工基準）にて規定がなされており，使用目的との適合性，構造物の安全性について，安全性・使用性および修復性の観点から要求性能と，要求性能に対する限界状態が規定されている．しかし，要求性能を満足する状態の具体的な考え方は示されていない．

そこで本研究では，大型のボックスカルバートの内部およびボックスカルバート上を道路として使用する場合を対象に，地震時のボックスカルバートの軸直角方向の耐震設計法の検討の一環として，要求性能とそれを満足するための状態を具体化するための検討を実施した．さらに，カルバートの崩壊に至るまでの損傷の進展の各段階における，地震発生から復旧までのシナリオ（以下，損傷シナリオ）を整理し，要求性能に照らして，できるだけカルバートに求められる機能が損なわれない，あるいは仮に損われても速やかに機能回復できることを観点として，避けるべき損傷位置の特定を試みた。さらに，頂版，側壁および隅角部を模擬した実大部分試験体を用いて正負交番載荷試験を行い，破壊性状の確認を行った．

2. 道路構造物を構成するボックスカルバートの要求性能の具体化

地震時にボックスカルバートに働く作用として想定されるのは，土工基準より，カルバートの自重，カルバート上面・下面・側面からの土圧と水圧，浮力，側面からの地震時土圧と地震による慣性力とされている．これらの作用を想定した上で，ボックスカルバート内またはボックスカルバート上を道路として使用する場合の，地震時における要求性能の具体化について検討を行う．

カルバートに対する要求性能は土工基準にて，道路土工構造物の安全性，使用性，修復性の観点から，性能１～３と，それらに対応するカルバートの限界状態が設定されている（**表-1**）．ここから，性能お

表-1 土工基準における要求性能と限界状態

道路土工構造物の要求性能		カルバートの限界状態
性能1	道路土工構造物が健全である，又は，道路土工構造物は損傷するが，当該道路土工構造物の存する区間の道路としての機能に支障を及ぼさない性能	カルバートが健全である，又は，カルバートは損傷するが，当該カルバートの存する機関の道路としての機能に支障を及ぼさない限界の状態
性能2	道路土工構造物の損傷が限定的なものにとどまり，当該道路土工構造物の存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが，すみやかに回復できる性能	カルバートの損傷が限定的なものにとどまり，当該カルバートの存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが，すみやかに回復できる限界の状態
性能3	道路土工構造物の損傷が，当該道路土工構造物の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが，当該支障が致命的なものとならない性能	カルバートの損傷が，当該カルバートの存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが，当該支障が致命的なものとならない限界の状態

表-2 ボックスカルバートの内部および上部を道路として使用する場合の具体の要求性能とその判別方法の例

要求性能	カルバートの状態	判定
（1）カルバート上道路の使用性（カルバート上の道路を使用できるか）	■通行に影響のない変形に留まる	○
	■軽微な変形を補修すれば通行に影響はない	△
	■通行に支障のある段差が発生	×
（2）カルバート内道路の使用性（カルバート内の道路を使用できるか）	■通行に影響のない変形に留まり、建築限界を満足	○
	■軽微な変形を補修すれば通行に影響はなく、建築限界を満足	△
	■通行に支障のある段差が発生	×
	■建築限界を侵す変形が発生	×
	■上記以外に通行に支障のある損傷が発生	×
（3）水密性の保持	■カルバート内部へ水・土砂が流入しない	○
	■軽微な漏水はあるが、簡易な補修により止水可能	△
	■カルバート内部へ水・土砂が流入する	×
（4）早期機能回復性	■内空からの点検のみで応急復旧可能、かつ内空から恒久復旧可能（復旧後は建築限界を侵さない）	○
	■カルバート内の空間を支保工等で保持、内空から応急復旧作業可能	△
	■支保工等での保持ができず、内空からの緊急措置・応急復旧不可。掘削必要。	×
	■機能回復はできない	×

凡例　○：左記の性能を満足する　△：左記の性能を条件付きで満足する　×：左記の性能を満足しない

よび限界状態を区分する「道路としての機能」に着目する．ボックスカルバート内またはボックスカルバート上を道路として使用する場合の「道路としての機能」には，カルバート本体の耐荷性能がまず挙げられる．これについては，土工基準にカルバートの構成要素の限界状態とその照査項目・照査手法が示されている．そこで，ここでは，構造体としての耐荷性能以外に要求される性能として，ボックスカルバート内またはボックスカルバート上を道路としての使用が可能であるか，損傷したとしても早期に機能回復が可能であるかの観点で検討することとした．道路として使用可能であるためには，ボックスカルバート内を道路として使用する場合は建築限界を満足できる内空断面を保持すること，路面に車両が通行できないほどの段差が発生しないこと，地下水の流入を防ぐために水密性を保持していることが求められる．ボックスカルバート上の道路の使用性を保つためには，ボックスカルバートの変形に伴い車両が通行できなくなるような段差が発生しないことが求められる．また，早期に機能を回復するためには，内空からの応急復旧や恒久復旧が可能であることが求められる．これらを踏まえ，耐荷性能以外の，ボックスカルバートの内部および上部を道路として使用する場合の具体の要求性能と，その性能を満足するかの判別方法の例を**表-2**のように整理した．

3. 要求性能に基づく損傷シナリオの検討

表-2に基づき要求性能を満足するかを判別し，ボックスカルバートの変形に伴い隅角部・隅角付近の側壁一般部・頂版中央および側壁一般部に塑性ヒンジが発生していく各過程における損傷シナリオを**図-1～3**のように整理した．**図-1～3**では横軸を時間，縦軸を通行機能として，地震発生から応急復旧，恒久復旧に至るまでに通行機能がどのように推移するかを定性的に示した．せん断損傷が生じる場合には，カルバートの大きな変形や，貫通ひび割れによる土砂や水のカルバート内への流入が想定されるため，カルバートの機能維持と早期の機能回復ができず，要求性能を満足できないと考えられる．そのため，

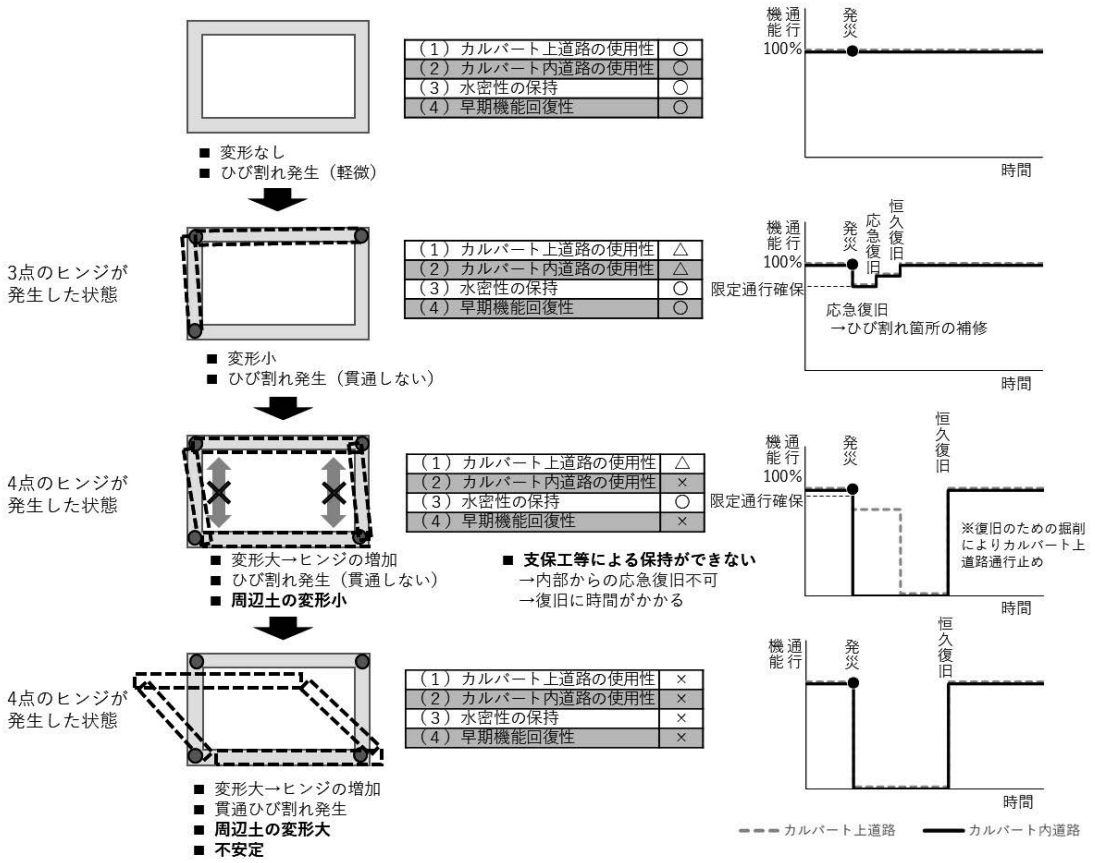


図-1　隅角部に塑性ヒンジが発生する場合の損傷シナリオ

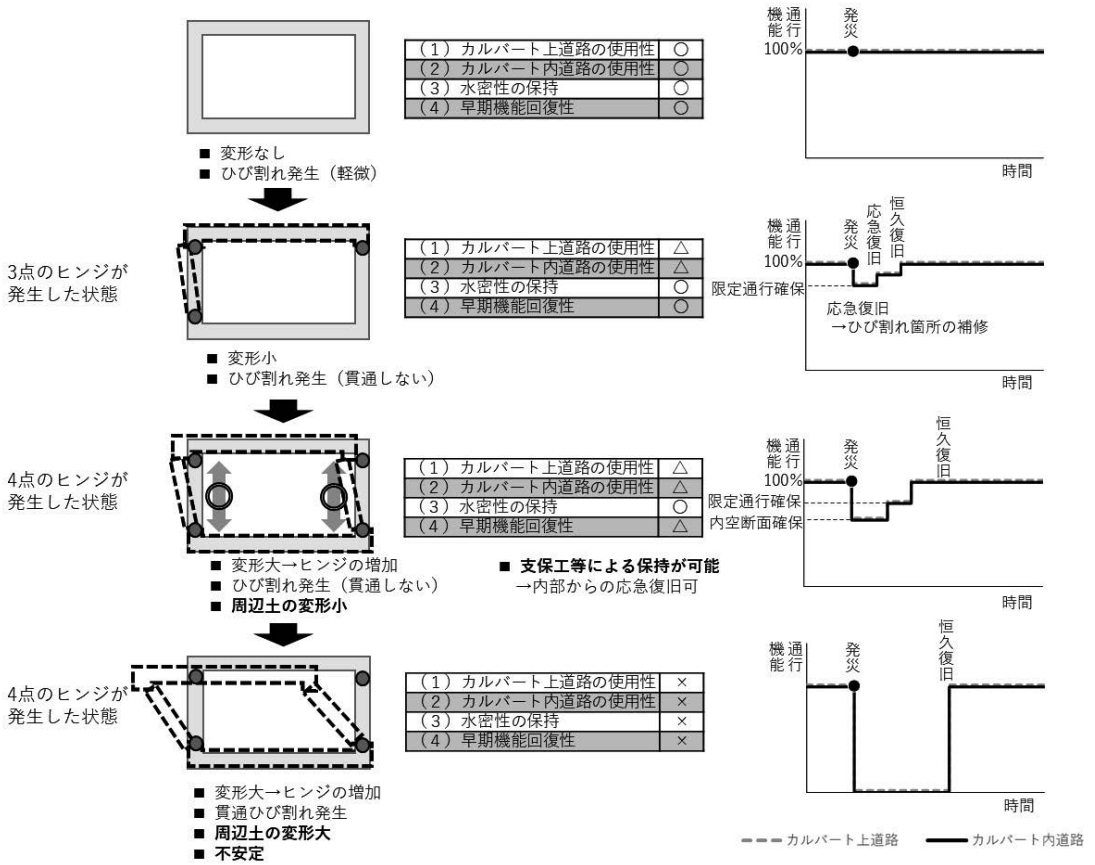


図-2　隅角付近の側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合の損傷シナリオ

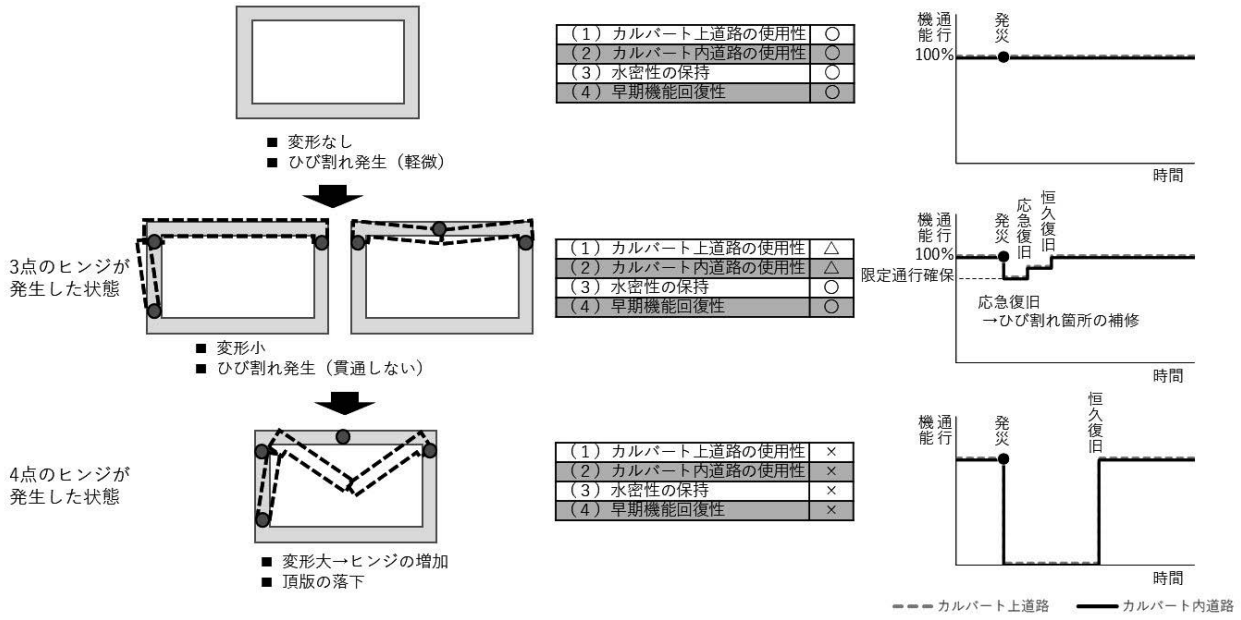


図-3　頂版中央と側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合の損傷シナリオ

損傷シナリオの検討は曲げによる塑性ヒンジの発生を対象とした．

(1) 隅角部に塑性ヒンジが発生する場合

隅角部に塑性ヒンジが発生する場合を**図-1**に示す．変形が小さく，貫通ひび割れが発生しない場合にはひび割れの補修等で応急復旧が可能と考えられる．変形が大きくなり塑性ヒンジが隅角部4点に発生した場合，建築限界を侵す変形が発生する可能性がある一方，隅角部に塑性ヒンジが発生しているため，支保工等でカルバート内の空間を保持することは難しい．その場合，カルバート内からの応急復旧ができず，カルバート内の道路の通行機能を回復するには掘削等が必要となる．それに伴い，仮にカルバート上の道路を地震発生後に限定的に使用できたとしても，カルバート内の道路の復旧作業の期間中はカルバート上の道路も通行止めをする必要があり，結果として全面復旧に至るまでに時間がかかることとなる．塑性ヒンジが隅角部4点に発生した状態で周辺土の変形も大きい場合は，カルバート自体が不安定となり，通行機能が完全に喪失することが想定される．この一連の流れは，隅角部付近の頂版および底版の一般部に塑性ヒンジが発生する場合も同様となる．

(2) 隅角付近の側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合

隅角付近の側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合を**図-2**に示す．この場合，(1)と同様，変形が小さく，貫通ひび割れが発生しない場合にはひび割れの補修等で応急復旧が可能と考えられる．変形が大きくなり塑性ヒンジが隅角部付近の側壁一般部4点に発生した場合は，建築限界を侵す変形が発生したとしても，損傷のない頂版および底版の間に支保工等を設置することで，カルバート内の空間を保持し，内側から応急復旧することが可能であると考えられる．塑性ヒンジが隅角部付近の側壁一般部4点に発生した状態で周辺土の変形も大きい場合は，(1)と同様にカルバート自体が不安定となり，通行機能が完全に喪失することが想定される．

(3) 頂版中央および側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合

頂版中央および側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合を**図-3**に示す．塑性ヒンジが3点の段階として，側壁に3点塑性ヒンジが発生する場合と，側壁2点と頂版中央に塑性ヒンジが発生する場合が考えられるが，変形が小さく，貫通ひび割れが発生しない場合にはひび割れの補修等で応急復旧が可能と考えられる．しかし，変形が大きくなり塑性ヒンジが4点に発生した場合には，頂版が落下する可能性があり，通行機能が完全に喪失することが想定される．この場合，カルバート内とカルバート上の道路の全面的な恒久復旧には時間がかかると想定される．

(4) 損傷シナリオ検討のまとめ

損傷シナリオの検討の結果から，変形が小規模でひび割れが軽微な場合には、塑性ヒンジが3点発生しても道路としての使用が可能であり，恒久復旧までの時間も短期間になると考えられるが，変形が大

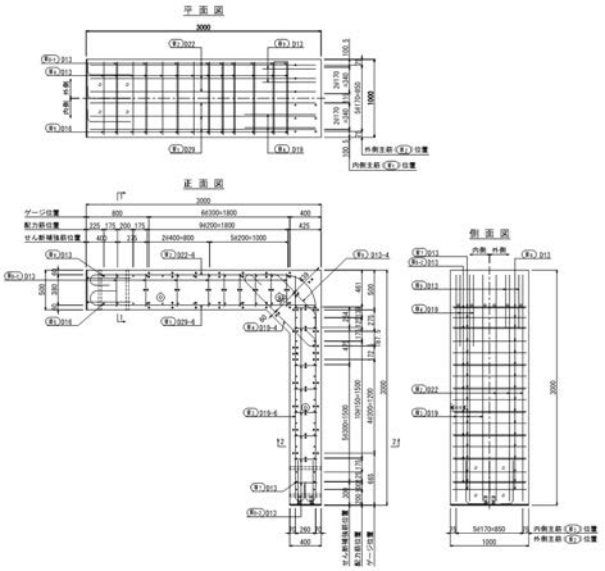


図-4　試験体概要

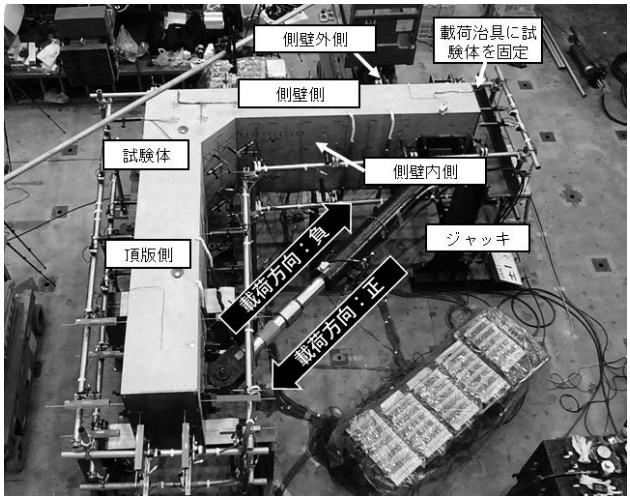


写真-1　試験体のセットアップ状況

きくなり塑性ヒンジが4点発生する場合には，通行機能の確保に大きな差が出ることが明らかとなった．

地震が発生したとき，一般にどの段階の損傷になるかを制御することはできないため，最も要求性能を満足できる可能性の高い損傷シナリオを選択する必要がある．検討の結果から，周辺土の変形が大きい場合はカルバートが不安定となり要求性能を満足できないものの，側壁に塑性ヒンジが発生する場合のみ，4点塑性ヒンジが発生する段階までの損傷に至ったとしても，支保工等で内空断面の保持することで通行機能を確保することができ，1. で示した要求性能を満足できると考えられる．一方で，隅角部に塑性ヒンジが発生する場合と，頂版中央および側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合は，塑性ヒンジが4点発生すると通行機能が著しく低下する．このことから，隅角部や頂版における損傷の発生は避け，側壁に塑性ヒンジを発生させることが望ましいと考えられる．ただし，ここでは支保工等で内空断面を保持する具体の方法や補修方法は検討を行っていないので，別途検討する必要がある．

4. ボックスカルバート隅角部の模型実験

現行の設計に沿って設計されたボックスカルバートの隅角部の実物大模型を作成し，損傷の発生位置や破壊性状の確認を行った．

(1) 試験体

試験には，**図-4**に示すL字型の鉄筋コンクリートの試験体（設計基準強度40N/mm^2，試験時の圧縮強度50.4N/mm^2）を用いた．寸法，配筋等は現行の基準に従って設定した．

(2) 載荷方法

試験体のセットアップ状況を**写真-1**に示す．試験体の側壁側の端部を固定し，それ以外の部分は架台にテフロンシートを敷いた上に試験体を設置することで，自由に挙動できるようにした．載荷方法は，設置したジャッキによりL字の開閉方向に載荷をする正負交番繰り返し載荷とした．載荷は変位制御で行い，正側載荷時の側壁側ハンチ端の鉄筋が降伏ひずみ（材料試験結果より，1992μ）に達したときの載荷点間の距離の変化量9.8mmを基準変位δ_yとした．載荷ステップは基準変位を整数倍した変位を3回ずつ作用させるものとした．

(3) 実験結果

図-5に荷重および変位の関係を示す．ここで，変位は載荷点間の距離の変化量であり，載荷正方向時の変化量を正，荷重は正方向に載荷するときを正としている．今回の実験では，$2\delta_y$の正側1回目の載荷で最大141.6kNとなり，$2\delta_y$の正側2回目で121.5kNにピークが低下した．その後$7\delta_y$までは荷重が保持された．$6\delta_y$の3回目終了時に側壁内側のかぶりコンクリートの一部が剥落した．$7\delta_y$負側2回目でさらに側壁内側のかぶりコンクリートが大きく剥落し，鉄筋のはらみ出しが確認された．$7\delta_y$正側3回目で耐力低下が認められたため実験を終了した．実験終了時の試験体の状況を**写真-2**に，側壁内側・外側の損傷状況を**写真-3**，**4**に示す．損傷の状況から，破壊形態は曲げ圧縮破壊と考えられる．

(4) 実験結果のまとめ

今回の実験では，損傷が隅角部近くの側壁に集中し，特に側壁内側での損傷が大きい結果となった．

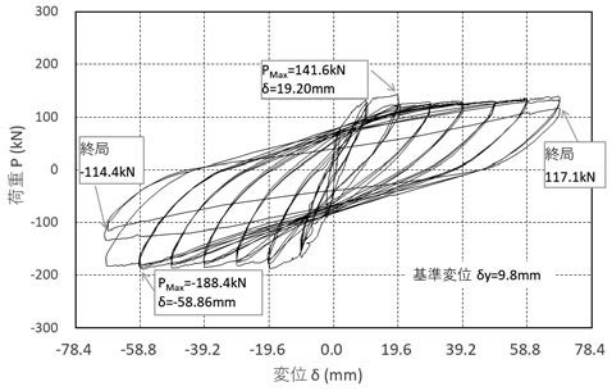


図-5　荷重-変位関係

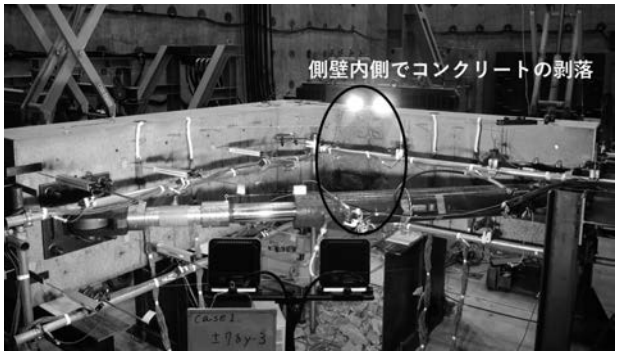


写真-2 試験終了時の試験体の状況

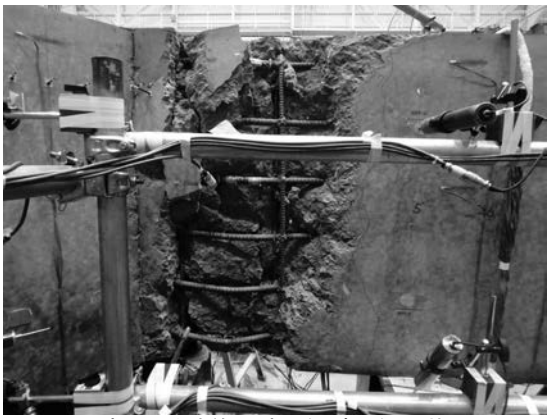


写真-3 試験終了時の側壁内側の状況

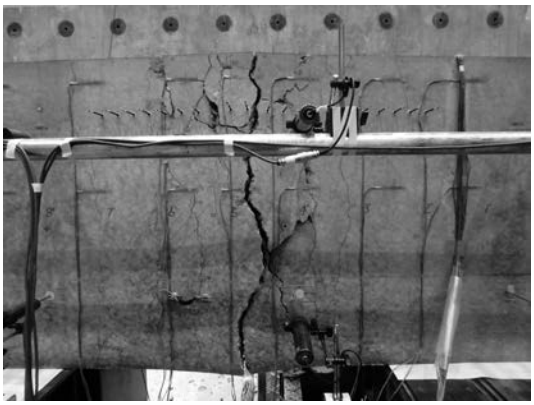


写真-4 試験終了時の側壁外側の状況

これは，一般のカルバートの設計を参考に頂版に比べて側壁の部材厚が小さい設計としたこと，側壁外側に比べ内側の鉄筋径を細くしたことが影響していると考えられ，今回の試験体の条件においては，3.で示したカルバートの要求性能を満足できる位置に損傷を誘導できると考えられる．なお，載荷試験において，$2\delta_y$の正側2回目の載荷でピークの低下が確認されたことについては，鉄筋の付着切れが懸念されるが，試験後に実施した解体調査ではその兆候が確認できなかったことから，原因についてはさらに検討する必要がある．

5. まとめ

本研究では，ボックスカルバート内およびボックスカルバート上を道路として使用する場合を想定し，軸直角方向の地震による損傷について，具体の要求性能と要求性能を踏まえた損傷シナリオの検討を行った．さらに，実験によりカルバートの破壊性状の確認も行った．本研究で得られた知見は以下である．

1) ボックスカルバート内およびボックスカルバート上を道路として使用する場合，道路としての使用性，水密性の保持，早期機能復旧性が，耐荷性能以外の要求性能として挙げられる．
2) 損傷シナリオの検討により，ボックスカルバートの隅角部付近の側壁一般部に塑性ヒンジが発生する場合は，損傷が発生したとしても要求性能を満足できると考えられる．
3) カルバートの隅角部を模した試験体を用いて正負交番載荷試験を行ったところ，隅角部付近の側壁一般部に塑性ヒンジが発生することが確認できた．

ただし，損傷シナリオの検討において，具体的なカルバートの内側から損傷を補修する方法や損傷したカルバートを支保工等で支持する方法は想定していないため，実現可能な方法を検討し，損傷シナリオを更新していく必要がある．

謝辞：本研究は（一社）道路プレキャストコンクリート製品技術協会との共同研究の一環として実施した．

参考文献

1) 廣戸敏夫，飯田廣臣，中村晋，小向将介：神戸高速鉄道・大開駅の地震被害，土と基礎，No. 44，vol.3, pp. 40-42, 1996.
2) 八ツ元仁，藤原慎八，星隈順一，谷口哲憲，北村岳伸，玉越隆史：1連道路ボックスカルバートの地震時限界状態の評価に関する研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），71巻3号，pp.295-314
3) 社団法人日本道路協会：道路土工構造物技術基準・同解説，2019.