

(108) 中柱のあるボックスカルバートの地震応答解析

大林組技術研究所 正会員 松田 隆
正会員 岡野 素之
正会員 後藤 洋三

1. まえがき

兵庫県南部地震では、一部の地下鉄道用ボックスカルバートの中柱がこれまで経験されたことのない大きな被害を被った¹⁾。筆者らは、この種の地下構造物に生じた損傷の要因は、主に水平動によって発生するせん断力が保有強度を超えたためと推定し、そのメカニズムを把握することを目的に地震応答解析を行った。本報告は、加速度・変位応答および断面に発生する応力度に関する解析結果ならびに、鉄筋コンクリートのせん断強度と発生した応力度との比較から損傷の要因を推定した結果を報告するものである。

2. 解析方法

解析モデルは、中柱を有す2層の鉄筋コンクリートのボックスカルバートである(図-1)¹⁾。中柱はB1F部分が鉄筋コンクリート製で、B2F部分が鋼管製である。ボックスカルバートの外寸は、幅15.6mおよび高さ12mとし、上床はGL-5mに位置するものと仮定した。解析は2次元の平面ひずみ状態で行うもので、側壁・床版・中柱に関しては梁要素を用いてモデル化している。ただし、中柱(0.75m×1.5m断面)については、奥行き方向5mピッチとし、解析ではその断面特性を単位奥行き当たりに換算してモデル化した。

地盤構成は、ボックスカルバート上床までの表層5m部分は埋戻し層とし砂質土を、それ以深(GL-36mまで)を砂礫にそれぞれ仮定した。また、地下水位はGL-4mに設定した。

地盤物性値は、表層の砂層のVsを180m/secに、砂礫層については拘束圧依存性を考慮し設定した²⁾。設定したVsを図-1に示す。地盤物性の非線形性は、水平地震動入力時に等価線形化法で考慮し、上下動入力時には水平地震動入力時の収束剛性と減衰を用いた。このとき、砂礫層のひずみ依存性に関しては文献2)を参考に設定した。境界条件は、側面を伝達境界で、底面を粘性境界で与えている。

入力地震波は、兵庫県南部地震においてポートアイランドで観測された加速度波形を入射波に分離した波形を用いた³⁾(図-2)。このとき、最大振幅は水平地震動で610Gal、上下地震動で180Galである。

解析は、水平地震動と上下地震動に関して個別に実施し、最終的な検討にはそれぞれの解析結果を時

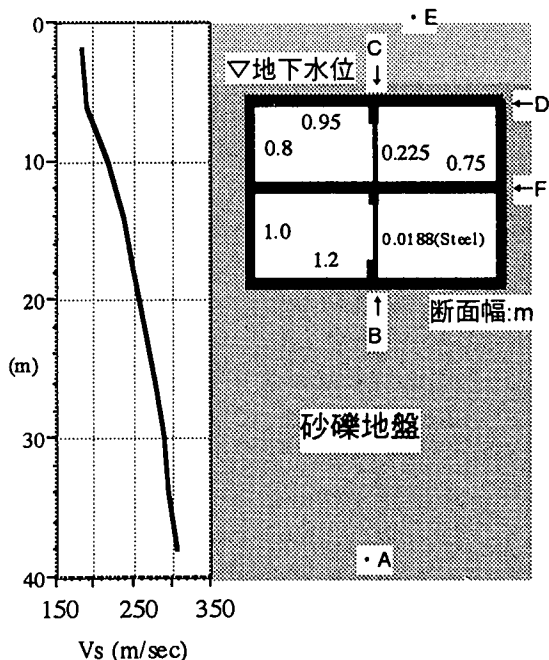


図-1 解析モデル

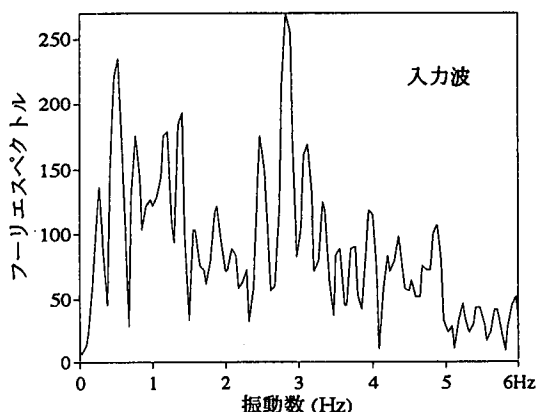


図-2 入力波の振動特性

刻歴で加え合わせた値を用いた。

3. 解析結果

水平動入力時の等価線形解析における収束剛性を用い算定した強震時の伝達特性を図-3に示す。ここで仮定した地盤の固有振動数は0.98Hzである。

図-4に自由地盤の最大加速度の分布をそれぞれ示す。水平動入力時には、A(GL-36m)の610galに対して地表(E)では1017galと約1.7倍となる。ボックスカルバートの存在している区間においては、上層に向かって減衰する傾向であるが、表層区間では水平動と上下動共に増幅する特性がみられる。

図-5に地盤およびボックスカルバートの水平方向の応答加速度波形を示す。ボックスカルバートと地盤の応答波形はほぼ同様な位相特性を示すことが分かる。

図-6にボックスカルバートの水平方向変位波形を示す。図-6の上2段はボックスカルバート下部底板(B)に対する上床板(FおよびD)の相対変位波形を、下2段は絶対変位をそれぞれ示している。最大相対変位量は7.9cmであり、ボックスカルバートのある区間の平均的なせん断ひずみは 5.3×10^{-3} となる。このひずみ値はかなり大きく、充分コンクリートの塑性域に達しているものと考えられる。

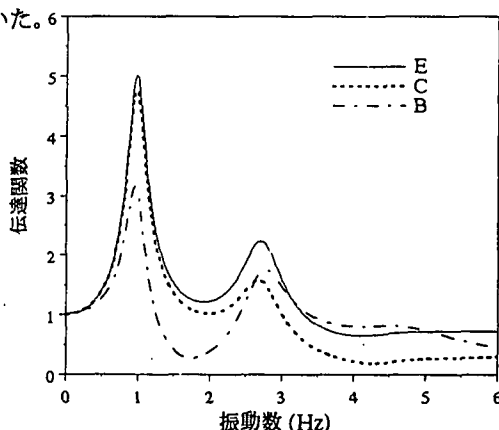


図-3 地盤の伝達関数

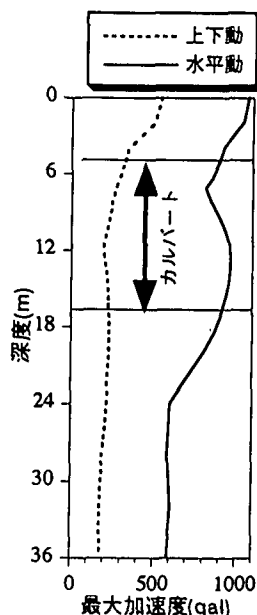


図-4 地盤の最大加速度

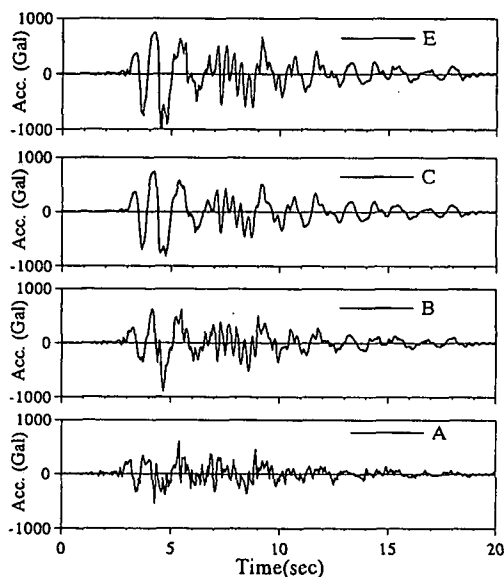


図-5 地盤とボックスカルバートの加速度応答

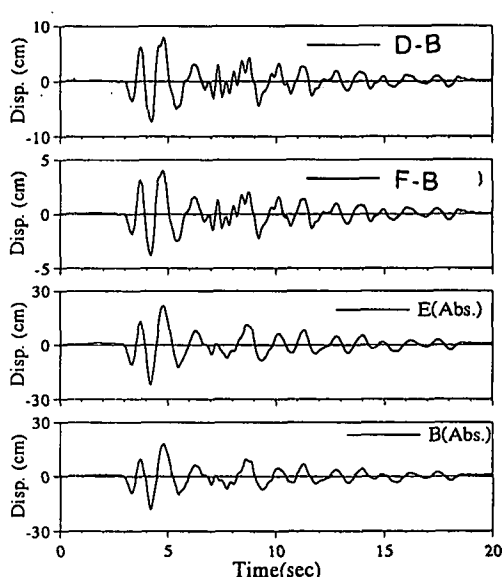


図-6 ボックスカルバートの応答変位

図-7に上下方向の加速度と変位応答波形を示す。地表面では約10秒間にわたって大きな増幅を示していること、中心部Cより端部Dのほうが水平動によるロッキングの影響を受け大きな変位振幅を示すことが分かる。

図-8に最大変位の分布図を示す。図から、ボックスカルバート全体は地盤の変位に追従し変形しているが、中柱は側壁の変形とやや異なり、途中で折れるような変形パターンを示している。これは、側壁が前述したように地盤の変形に追従するのに対して、中柱は上下および中間のスラブの変形に影響され、その変形が側壁より増幅されるためと考えられる。

ボックスカルバートに発生する断面力 L と部材強度 R の比 L/R によって、各部位の安定性を検討した。まず、鋼管の強度は、引張降伏応力度として R_{as} を 2400kgf/cm^2 、せん断強度 R_{ss} を 1400kgf/cm^2 とした。鉄筋コンクリートの圧縮強度 R_{ac} は 240kgf/cm^2 とした。鉄筋コンクリートのせん断強度 R_{sc} は以下に示すACIの終局せん断耐力に関する基準で評価した(式(1))。この基準では軸方向力 N_u のせん断耐力に与える効果を線形に仮定している。各部材の評価式は式(2)、(3)に示すように、軸応力の関数であり、常時および主に上下動による動的な軸応力の影響を受ける。

$$R_{sc} = V_c + V_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

R_{sc} : 終局せん断耐力

V_c : コンクリートが受持つせん断力

$$V_c = 2(1 + N_u/2000A_g) \times (f_c')^{0.5} b_w \times d$$

(in,lb,psi単位)

N_u : 軸方向力、 A_g : 部材断面積、 d : 断面の有効高さ、 b_w : ウェブ幅、 f_c' : コンクリート圧縮強度

V_s : せん断補強筋が受持つせん断力

$$V_s = A_v \times f_y \times d / s \quad \text{(in,lb,psi単位)}$$

f_y : せん断補強筋の降伏強度、 A_v : 区間 s でのせん断補強筋の断面積、

s : せん断補強筋の間隔、 b_w : ウェブ幅

(中柱) $R_{sc1} = 7.41 + 0.0472 \sigma_n \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots\dots (2)$

(側壁) $R_{sc2} = 8.66 + 0.0466 \sigma_n \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots\dots (3), \sigma_n: (\text{常時} + \text{地震時}) \text{の軸応力度}$

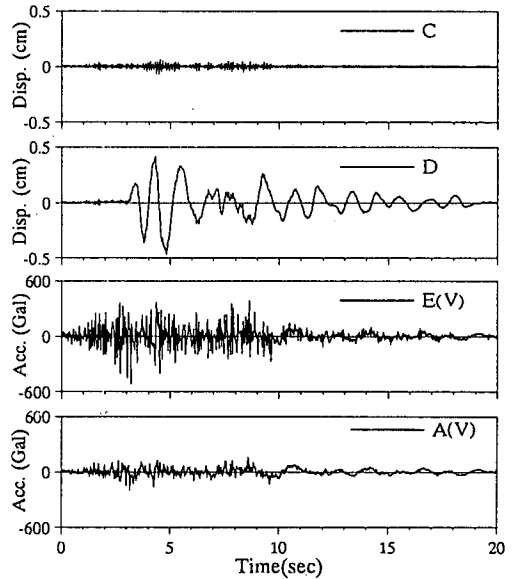


図-7 上下方向の応答変位と加速度

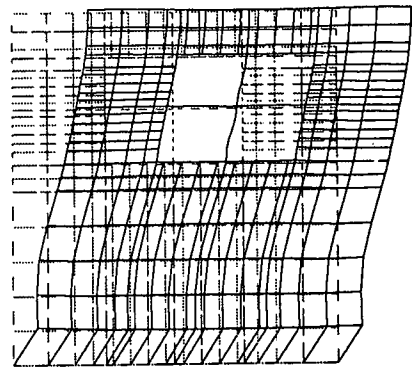


図-8 変形図

中柱と側壁に生じる応力度 L と強度 R との比 L/R の分布を図-9に示す。この比 L/R が1以上になることは破壊につながる危険性を意味している。この図から、鉄筋コンクリート製のBIF部分の中柱では、せん断応力に関する L/R は約2.7であり、このことがボックスカルバートの損傷を受けた原因と推定できる。これに対して、側壁のせん断応力に関する L/R は床版との接合部で大きくなるものの1を下回るかやや越す程度で、大きな損傷がなかった事実と合致する。軸圧縮応力に関する L/R は0.2以下であり、圧縮に関する破壊強度に対して十分な余裕が有ることが示されている。

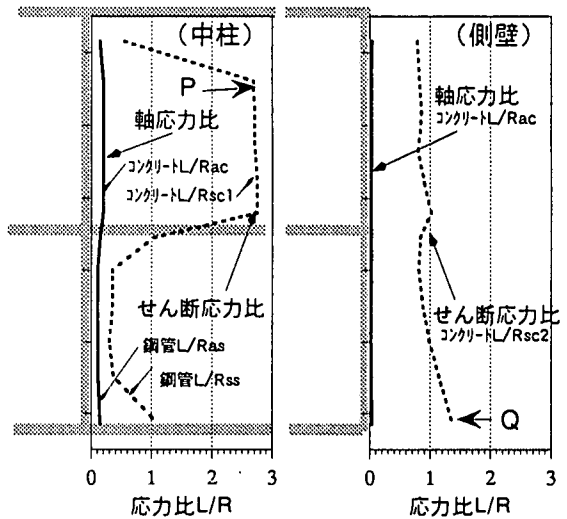


図-9 ボックスカルバートの強度比分布

図-10に応力比 L/R の経時変化を示す。この図からも、中柱Pのせん断応力比は何度も1を越え、この部分に大きなせん断力が作用し損傷につながったと推定できる。側壁下部Qにおいても L/R は1をやや越える時があるが、その回数は少ない。また、中柱には側壁に比べ大きな軸力が短周期成分の振動を伴い作用することが分かる。

4. まとめ

今回の地震によるボックスカルバートの中柱の被害には、上下動による軸圧縮応力より水平動によるせん断応力が大きく影響したことが示された。また、2次元の動的解析によって地下構造物の地震時安定性の評価が可能であることが示された。た

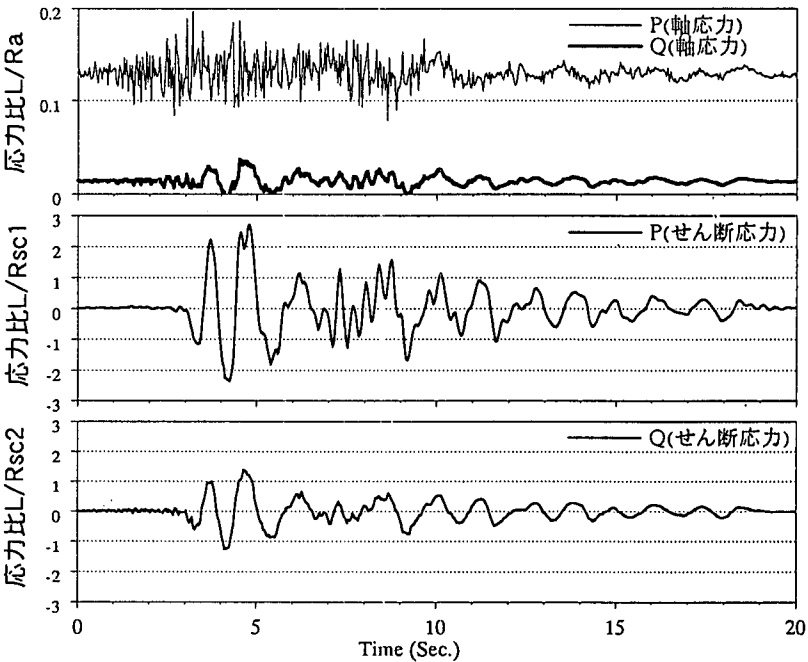


図-10 強度比の経時変化

だし、地盤条件や入力地震動の設定など、仮定の領域を出ないものがあることをお断りしておく。この点を今後明確にし、部材の変形性能と破壊過程を考慮などを含めさらに検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1)神戸市交通局：神戸市営地下鉄被害状況等報告、1995年2月
- 2)Hatanaka, et al.: Engineering properties of undisturbed gravel sample, 1992 10th WCEE Vol.3 p1281
- 3)江尻他：ポートアイランド鉛直方向地震観測記録を用いた基盤入射波分離の試み、1995年土木学会年講I部門