

(23) 地震被害への地盤の影響と地震応答解析

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 那須 誠

1. はじめに

これまでに盛土や建物、橋梁等の各種構造物の地震被害の発生しやすい地盤構造（形状と土層構成）が調べられ、被害は地盤構造にもとづく地盤の不同変位や滑り、埋没谷における振動の増幅等によって発生することが推察されている¹⁾。ここでは、1995年兵庫県南部地震によって発生した被害例を地盤に焦点をあてて考察するとともに、橋軸直角方向に変形した橋梁の地震応答解析を行い、橋梁の応答に対する地盤構造の影響を調べた結果について発表する。

2. 1995年兵庫県南部地震の被害と地盤

(1) この地震でも新旧地形図や地盤図等の資料をみると各種構造物の被害の発生が地盤に関係あることが推察される。例えば、橋軸方向の桁の落下は地盤条件の変化点で発生しているのが多く、地盤の伸縮によって発生していることが推定される。橋軸直角方向の橋脚の被害をみると、数本並んだ橋脚のうち片側の橋脚の被害程度が大きいがあるが、それは文献²⁾に述べたような原因で生じたことが考えられる。また、橋脚の橋軸直角方向の被害には、斜め亀裂が発生して鉄筋がN字型になる場合がある（図1(b)）。それは多くの場合地盤の動きと斜め亀裂の発生状態が対応しており、図1(a)に示すように地盤の水平な動きによって橋脚に斜め亀裂が発生して³⁾（以下に述べる橋梁H、F、S等の被害機構も同様と考えられる）、それより上部がずり落ちて生じたことが推定される。

(2) 桁が落下した阪水高架橋(H)と落下していない隣の第2段上高架橋(D)の地盤状態（図2⁴⁾）を比較すると、両地盤の表層部はともに主として砂や礫からなるが、前者の表層部に腐植土層と粘土層があり後者の表層部にはそれらがみられない。即ち、桁落下の被害を受けた阪水高架橋の地盤は、過去の地震で被害が多くみられる上下逆転型の地盤^{1) 5)}になっている。

(3) 深江出入口付近の高架橋(F)の倒壊は芦屋川沿いの自然堤防³⁾の縁付近（図3⁶⁾のA付近）の元川ないし元沼沢地（埋没谷）と思われる所の橋脚（図3のB）から始まっている。その橋脚には主鉄筋の段落し部に南上より北に下がる斜め亀裂が発生している。また、自然堤防は主として砂礫からなるが、倒壊した範囲の地盤には砂層や砂礫層の下に粘性土層が存在しており⁷⁾、その粘性土層の大阪寄りの端部付近で顕著な被害が発生している。

なお、1982年浦河沖地震で静内橋(S)の橋脚の中間部に損傷が発生し、特に橋脚P-3の主鉄筋段落し部の損傷は甚大で、川の流下方向に地震力が大きく作用して、橋軸にたすき掛けの斜め亀裂が発生している（図4）⁵⁾。被害をうけた橋脚は砂州や中州等の縁や両者の中間部に位置し、図4をみると殆どの被害は表層地

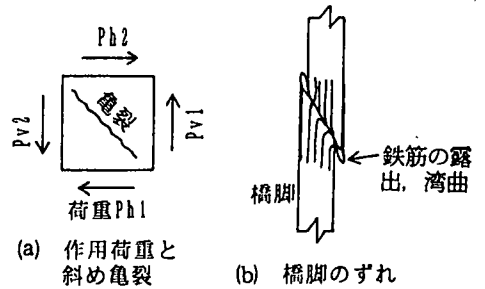


図1 荷重の作用と斜め亀裂発生の関係

(第2段上高架橋)：(阪水高架橋)

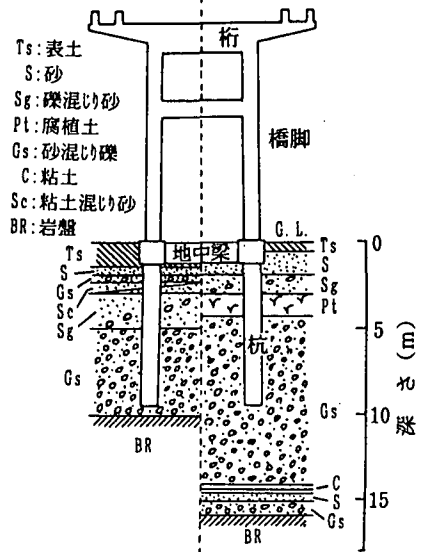


図2 高架橋の地盤状態⁴⁾

盤の砂礫層(Ag-1)の下に比較的薄い沖積粘性土層(Ac)がほぼ水平に堆積している範囲で発生し、その粘性土層の左端の方で特に顕著な被害が発生している。しかし、この橋より河口近くにある静内川橋梁は砂州の上に直接基礎で作られているが無被害であった⁵⁾。

橋梁F, Sの変形と地盤の状態が似ており被害機構も似ていることが推定される。両橋梁は橋軸方向に粘性土層のある所とない所に跨がって作られ橋軸方向に異種支持地盤状態になっており、さらに粘性土層のない所の橋脚の地震時の動きが小さかつコンクリート桁が載っていてトップヘビー状態であったため粘性土層上の橋脚の拘束度が強く、顕著な被害が発生したことも考えられる。

このような地震被害は1978年宮城県沖地震のときの名取川橋梁⁶⁾でもみられるようである。

3. 地震応答解析結果

地盤が砂や礫等の粗粒土からなる土層の下に粘性土層がある上下逆転型地盤が、地震時に橋梁等どのように影響するか調べるため、地盤構造(土層が水平なものと傾斜があるもの、さらに軟弱粘性土層を含むものと含まないもの)と地震波(長周期波と短周期波)を変えて地震応答解析を行っている。ここではとりあえず水平成層地盤の解析結果を述べる。

3.1 解析モデルと入力地震波等

解析モデルは図5に示すように、水平方向24m、鉛直方向20mの2~3層構造の地盤上に直接基礎の橋脚がある2次元Model-1Nと1Rである。Model-1Nの地盤は最上層のN値30の土層とN値50以上の基礎からなり、Model-1Rでは中間付近に軟らかいN値10の粘性土層を挟む。両モデル共通の鉄筋コンクリート製橋脚(幅7~9m、奥行き1.6m、高さ8m)の下部にフーチングがあり、橋脚上には桁や床版等(荷重約390t)が載っている。地盤及び橋脚の物性値を表1に示す。N値10と30の地盤の土の剛性と減衰特性には拘束圧と歪依存特性を考慮した⁹⁾。なお、有限要素モデルは左右対称になるため片側半分のモデルを有限要素化し、地盤の境界条件として側方端をエネルギー伝達境界に底面を粘性境界にした。

入力地震波の長周期成分が卓越する長周期波(1968年十勝沖地震の八戸波⁹⁾)と短周期成分が卓越する短周期波の波形とフーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比を図6に示す。最大値を100cm/s²に調整した地震波を地盤底面から橋軸直角水平方向(紙面に平行水平方向)に振動させて入射した。解析にはMPLUSHを使用し主応力図の作成にFEMPLITを使用した。

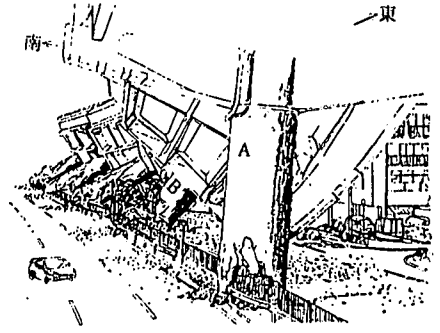


図3 高速道路高架橋の倒壊(写真⁹⁾よりスケッチ)

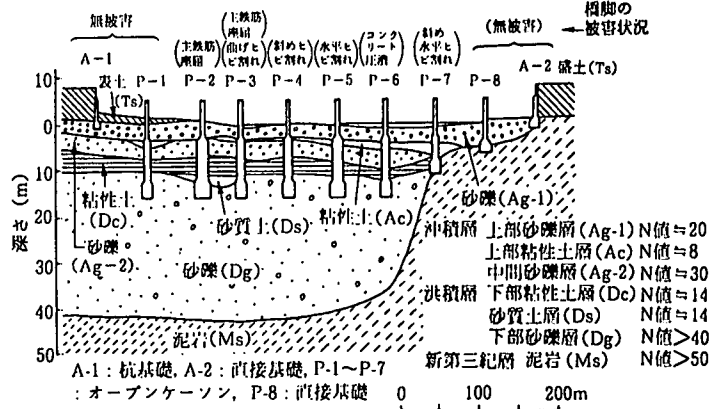


図4 静内橋の被害と地盤状態⁵⁾

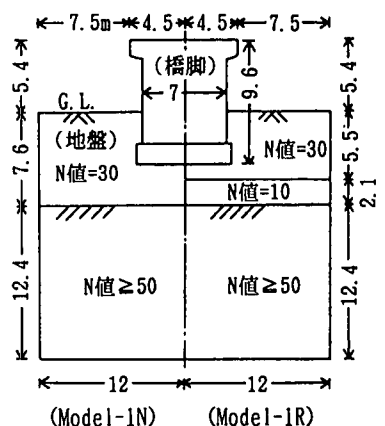


図5 解析モデル

表1 物性値

土質等	密度 (t/m^3)	初期剛性率 (tf/m^2)	絞り比	初期減衰 定数 (%)
鉄筋コンクリート	2.4	900,000	0.2	3
表層(砂礫層, N値=30)	2.0	13,000	0.492	3
中間層(粘性 土層,N値=10)	1.7	2,700	0.492	3
基盤(N値 \geq 50)	2.1	54,000	0.473	3

3.2 解析結果(長周期波入力時)

(1) 応答波形 — 図7に橋脚天端中心の水平方向変位と加速度の応答波形を示す。最大値はModel-1Nで(-0.99~1.29cm, -201~188 cm/s^2)、Model-1Rで(-1.86~1.63cm, -151~172 cm/s^2)であり、変位はModel-1NよりModel-1Rの方が大きい、加速度はModel-1NよりModel-1Rの方が小さい。即ち、表層に比較的軟らかい土層を挟む地盤モデルの方が応答加速度が小さいが変位が大きく、また低振動数成分が卓越する。

(2) 変形状態 — 橋脚天端が左右に最も大きく変位したときの変形図を図8~9に示す。

図8より地盤表層全体が比較的硬い(N値30)ときは、橋脚にロッキング振動が生じるが、図9より表層地盤内に比較的軟らかい土層(N値10)

があるときは、その層にすべり状の変形が生じ橋脚にスウェイ振動(横ずれ振動)も生じることが分かる。従って、前者の橋脚には曲げ振動による水平クラックが発生したり、後者の橋脚には水平力が作用して斜め亀裂が発生することも考えられる。

このように、地盤の中間深さにある粘性土層は地震のときに横方向の振動(横ずれ振動)を発生させる可能性は、既に盛土を対象にした地盤解析でも調べられており、またこのような土層境界部で杭等に亀裂等が発生することも推定されている⁹⁾。

(3) 主応力図 — 図10の主応力図をみると、Model-1Nで最大91 tf/m^2 (圧縮応力)、Model-1Rで最大75 tf/m^2 (引張り応力)の主応力が生じ、Model-1Nではフォーミング底部の右側で、Model-1Rでは橋脚の右下側端部で引張り応力が大きく生じている。なお、他のモデルの解析結果ではあるが、短周期波入力での応力は長周期波入力の数分の1と小さくなっている。

4. おわりに

兵庫県南部地震の橋梁の被害形態が地盤構造と関係あることを推定するとともに、橋軸直角方向の顕著な被害箇所にも過去に地震被害が多い上下逆転型地盤があり、そのため粘性土層が橋梁の地震時挙動にどの様

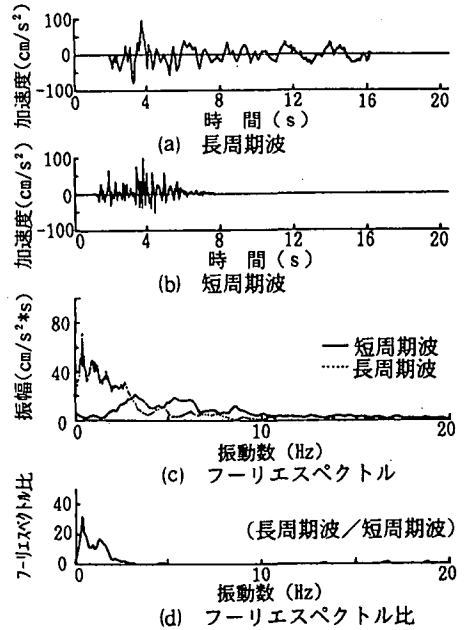


図6 入力地震波

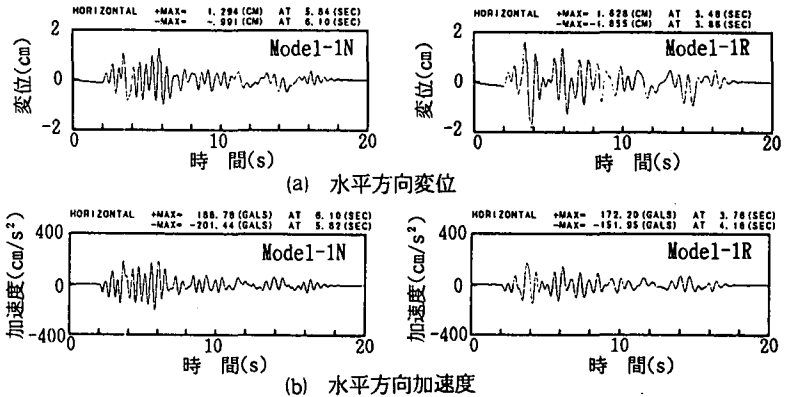


図7 橋脚天端中心の応答波形

に影響するか地盤・橋脚系のモデルを作って地震応答解析で調べた。その結果、長周期波入力の際には短周期波よりも大きい変形が発生するが、表層地盤が比較的硬いときは橋梁にロッキング振動が生じ、場合によっては曲げ振動が生じて水平亀裂が発生すること、表層地盤が上下逆転型になっているときは地盤にさら

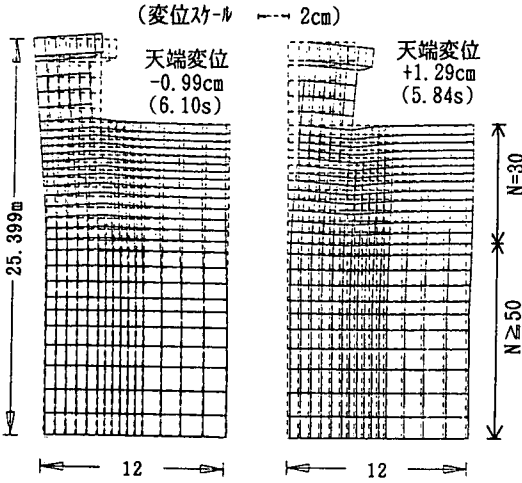


図8 変形図 (Model-1N)

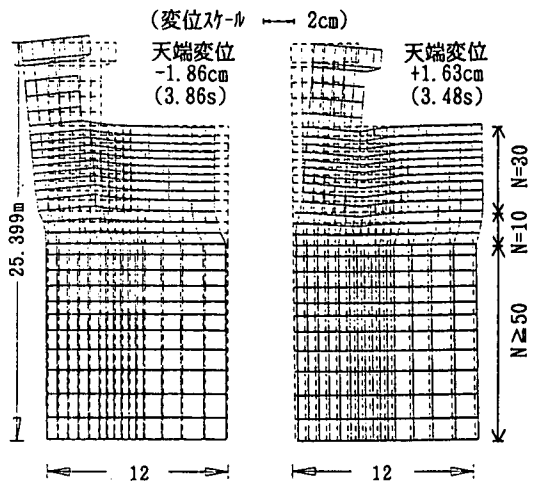
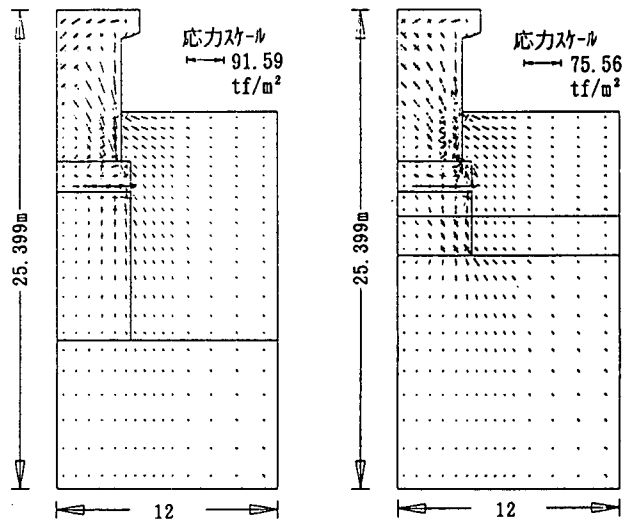


図9 変形図 (Model-1R)

に橋梁にスウェイ振動（横ずれ振動）が生じ、場合によってはその大きい横方向の振動でせん断亀裂が発生することが推定された。なお、地下鉄の被害³⁾も同様な地盤挙動で発生したことが推察される。

また、今回は入力波として1968年十勝沖地震の八戸波を使用した。この地震波と今回の兵庫県南部地震の記録波形（例えば、神戸海洋気象台の記録波形）をみると、両者は詳細には異なるが形状的には主要動の始めの大きな1～3波目位のピーク値の生じ方が似ているようである。なお、今回の解析モデルは兵庫県南部地震の実際の構造物を想定したものではなく、あくまでも試算モデルに過ぎず、実際の構造物でも以上に述べたこと



(a) Model-1N

(b) Model-1R

図10 主応力図

が生じているかどうかは詳細な地盤調査を行った上で実際の地震記録波形を使用して解析を行う必要があるものと考えられる。最後に、以上の調査、解析を行うに当たって大場恒彦日本物理探検(株)探部長、藤川大之NHKディレクター他の方々にお世話になりましたので、厚く御礼を申し上げます。

参考文献 (1)那須：地震被害に及ぼす地盤の影響，RRR, Vol. 51, No. 9, pp. 20-21, 1994. (2)那須：地震による構造物変形への地盤の影響(その2)，土木学会第50回年次学術講演会, I, 1995, 投稿中. (3)那須：地震による構造物変形への地盤の影響，第30回土質工学研究発表会, 1995, 投稿中. (4)朝日新聞, 1995. 4. 7. (5)那須：地震被害形態と地盤形状および土質構成の関係，鉄道総研報告, Vol. 8, No. 5, pp. 35-40, 1994. (6)平成7年兵庫県南部地震，サンデー毎日，臨時増刊, Vol. 74, No. 5, 1995. 2. 4. (7)神戸市企画局編：神戸の地盤, 1980. 3. (8)1978年宮城県沖地震調査報告，鉄道技術研究報告, No. 1111, 1979. (9)那須，田村：盛土の地震応答と地盤構造の関係(その9) — 上下逆転型地盤内の極軟弱粘性土層の影響 —，土木学会第48回年次学術講演会, III-PS5, pp. 10-11, 1993.