

1. まえがき

これまでに地震被害例の調査から構造物は種類によらずその被害は地盤条件の不連続な所で上下逆転型地盤で生じ易いこと、構造物の変形状態は地盤構造に対応すること及びその被害発生に地盤変位（不同変位とすべり等）が大きく関係すること等を推察してきた^{1) 2)}。今回は兵庫県南部地震で被害を受けた構造物と地盤の関係と、地盤条件の不連続点を構造物自体が作って被害が発生したと思われる事例について述べる。

2. 各種構造物の被害と地盤の関係の考察

(1) 被害と地盤の関係

神戸地区の各種構造物の被害箇所^{3) - 6)}を地盤概要図等^{7) - 10)}にプロットしてみると、地盤条件の不連続なところで被害が多く発生していることが分かる。すなわち、被害は玉石地帯と砂・粘土層あるいはまさ土層の境界部や、砂州と粘土多質地の境界部等で発生している。さらに、砂・礫等からなっていて地盤がよい自然堤防や扇状地等と、地表面は砂・礫層で覆われているが、その下に粘性土層・腐植土層が堆積して地盤がよくない埋没谷（の盛土地）の境界部や、埋没谷で生じている¹¹⁾。この砂・礫層等の下には粘性土層が堆積し、それは海に向かうにつれて厚くなっているといわれている¹⁰⁾。構造物が異種の地盤に支持されている場合（以後、異種支持地盤状態にあると称する）や埋没谷上にある場合等に被害が出やすいことが分かる。異種支持地盤状態にある場合は地盤の水平、上下方向の不同変位によって、構造物に引っ張り力や圧縮力あるいは不同沈下や捩じれ力等が作用して被害が発生することが考えられる。また、各種構造物の変状状況^{3) - 8)}をみると、平面的な異種地盤の境界線と構造物の交差の仕方に応じた変形状態となっており、地盤境界と平行に構造物があると境界に平行あるいは直角方向に構造物が変状し、地盤境界と構造物が直交していたりすると構造物は軟らかい地盤上で変状し、地盤境界と構造物が斜交していたりすると構造物に捩じれ等が生じているものが多い¹¹⁾。

(2) 地盤条件の不連続点を構造物自体が作ったと思われる事例

表層の砂礫質土層の下に軟弱な粘性土層（腐植土層も含む）があると、地震のとき表層のある広範囲（例えば、埋没谷全体の）の砂礫質土層がその粘性土層を境にして（滑り面のようにして）動くが、その動きは硬い地層（自然堤防や岩盤や玉石層、厚い砂礫層等）や、基礎のしっかりした建物や橋脚等基礎の不動点になるようなもので止められて、その建物や橋脚等が衝撃でも受けたかのように被害を受けているものがある¹²⁾。橋梁の橋桁や橋脚、建物等が軸直角方向に崩壊、圧壊等の甚大な変状を起こしたところでは、脇に支持杭等の基礎のしっかりした建物や橋梁があることも多い（例えば、阪水高架橋、六甲道駅、石屋川車両基地と付近の高架橋、大石東町付近の高架橋、大開駅トンネル等^{3) - 6)}）。衝撃力は相手が動かないほど大きく作用するので、基礎のしっかりした建物や橋梁（盛土も含む）は不動点に近い状態になって、地盤の動きそれもある比較的広い範囲の地盤がマスとなって動くのを止めるため近傍の構造物基礎に衝撃を与えて構造物を押し潰すような大きい力が発生することが考えられる。あるいはその力は地盤の衝撃的な側方流動を急激に止めることによって発生することも考えられる。桁・中間梁・フーチングと柱が剛結状態にある門型ラーメンの高架橋では基礎がしっかりといるとそれ自体が構造的に地盤に拘束されて不動点のようになっていること、しっかりした基礎を持つ2本の橋脚のうち一方の橋脚はさらに不動点の機能を強めているかもしれないし、支持層まで根入れされた井筒基礎や大型の群杭基礎（例えば、高速深江出入口付近の高架橋等⁵⁾）はそれ自体が剛性が大きく不動点となりやすいので地盤の動きを止めて、しかも地盤の動きを止める面積が大きいので大きい力を受けること等が考えられる。地中の大開駅トンネルのような大きいトンネル躯体

体もそれ自体が不動点の役目を果して、埋没谷等の埋積地盤の動きを急に止めて大きい力を受けることがあるようである。この大開駅トンネルの中柱の斜め亀裂をみると西側と東側で傾斜方向が異なり、それは地上の建物が東側では北側にあり西側では南側にあることと対応しているようである。なお、高架橋等の片側に建物があるとき、建物の下の地盤は杭基礎等があるためその動きが拘束されること、あるいは建物の脇の地盤が高架橋等の方向に動いても建物で抑止されて高架橋等に影響を及ぼさないこと、建物の無い方の地盤は高架橋等の方向に動いて高架橋等に荷重を及ぼすこと等が考えられる。

(3) 過去の地震被害事例等

過去の地震被害²⁾を調べると、砂や礫等からなる砂礫質土層（粗粒土層）の下に軟弱な粘性土層（腐植土層も含む）がある上下逆転型地盤で、昔の摩擦杭より最近の長い完全支持杭、根入れの深い井筒等の基礎を有する構造物にも被害が目立つのは、以上に述べたことと関係があるのかもしれない。例えば、1982年の浦河沖地震のとき静内橋で橋脚の段落とし部にX型のせん断亀裂が、1987年の千葉県東方沖地震で水深第1高架橋の橋脚にX型のせん断亀裂等が生じているが、ともに支持層まで届くしっかりした深い基礎を有しており、両者の地盤が似ていて砂や礫からなる土層の下に軟弱な粘性土層がある。なお、両者の近くに無被害の橋梁があり、前者の近くには砂州の上に杭を用いず直接基礎で作られた静内川橋梁があり、後者の近くには長い杭基礎を持つが地盤は軟弱な粘性土と腐植土からなる水深第2高架橋がある。また、旧帝国ホテルやラテンアメリカタワー（メキシコシティ）はともに極軟弱地盤に剛な基礎と基盤に届かない短い摩擦杭で建てられていたが、大地震で被害を受けていない^{12) 13)}。静内川橋梁や帝国ホテル、ラテンアメリカタワーは地震のとき地盤と一緒に動いたので、地盤から大きい力を受けなかったようにも考えられる。また、完全支持杭の基礎を持つ水深第2高架橋では表層地盤全体の土が軟らかいので地盤が動いても表層地盤の圧縮性が大きくて高架橋に力を及ぼさなかったものと考えられる。なお、橋脚の鉄筋の段落とし部で水平亀裂が発生した武庫川橋梁は深いケーソン基礎を有しているが、この下流側にある古い作りの甲武橋は殆ど被害を受けていない。これまで述べた理由から甲武橋は基礎が直接基礎かそれに近い簡単な杭基礎であったため被害が発生しなかったのではないかと考えられる。

3. あとがき

以上に、兵庫県南部地震による構造物の被害も地盤の影響が大きく地盤条件の不連続点で多いこと、さらに地盤条件の不連続点を構造物基礎自体が作ったと考えられる例もあることを述べてきた。基礎が支持層まで達していると構造物が基盤に拘束されて不動点の役目を果たす度合いが大きくなり、地盤の動きを止めて地盤から大きい力を受ける場合があること、あるいは支持層まで達しない短い杭基礎をもつ建物は基盤に拘束されないで地盤と同じ動きをして地盤から受ける力が小さいこと、さらに軟弱な粘性土層や腐植土層よりも砂礫質土層は構造物を押す力が大きいこと等が推定される。以上の調査結果は運輸省鉄道施設耐震構造検討委員会で検討されたものではありません。おわりに、以上の調査に当たってお世話になった多くの方々

参考文献 (1)那須誠：地震被害発生箇所の地盤構造，第8回日本地震工学シンポジウム(1990)論文集，pp.43-48，1990.12. (2)那須誠：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.35-40，1994.5. (3)土木学会，土質工学会等発行の阪神大震災に関する調査報告会資料，1995. (4)地質調査会社，建設会社，コンサルタント会社等発行の阪神大震災に関する調査記録集，1995. (5)新聞社等発行の阪神大震災に関する新聞，週刊誌等あるいは記録集，1995. (6)地震直後の航空写真，1995. (7)藤田和夫：神戸地域の地質，地域地質研究報告，地質調査所，1983. (8)土地条件調査報告書（大阪地区），第1編総説，第2編調査報告，建設省国土地理院，1983.3. (9)土地条件調査報告書付図（京都・播磨地域），国土地理院，1986. (10)神戸市編：神戸の地盤，1980. (11)那須誠：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，No.30，pp.75-78，1995.7. (12)那須誠：阪神・淡路大震災への地盤の影響と被害機構の推定，阪神・淡路大震災に関する学術講演会，土木学会，C-8，1996.1，投稿中. (13)那須誠：建物の地震被害と地盤構造，鉄道総研報告，Vol.4，No.4，pp.35-44，1990.4. (14)那須誠：地震被害と地盤条件（その2），第23回土質工学研究発表会，No.313，pp.823-824，1988.6.