

橋梁の地震被害機構と地盤の関係

前・前橋工科大学 フェロー会員 那須 誠

1. まえがき

各種構造物の地震被害が地盤不連続点で多いが¹⁾、地盤不連続点では不同変位が発生し、せん断歪あるいは垂直歪が集中するところである。今回地盤不連続点に着目して橋梁等の被害機構の推定を試みた。

2. 橋梁に地震被害と地盤の関係

被害調査に基づく、橋梁の地震被害が発生しやすい地盤構造と基礎の関係等を図1～5に示す^{1)~3)}。

- 1) 橋梁の地震被害は図1に示すように地盤の不連続点(硬軟地盤境界部)で生じやすい。また図2に示すように低強度粘土や腐植土からなる軟弱粘性土層(C.L.)厚さの急変部のある地盤や軟弱粘性土層を部分的に挟む地盤、例えば砂・礫層(S.G.L.)の下に軟弱粘性土層がある互層地盤(上下逆転型地盤)等で多く、水平・鉛直方向に不連続な地盤(不均質地盤)で生じやすい。
- 2) 橋梁地震被害と地盤強度の深度分布との関係を見ると、図3(1)のように地盤強度が深さ方向に一定、あるいは比例する場合に被害が少なく、図3(2)のように地盤強度の極小値等(図2の軟弱粘性土層からなる)が途中深さにある場合に発生しやすい。
- 3) 地震被害発生の有無を基礎と地盤との関係でみると、図4(各土層は傾斜している場合もある)のようになり、図4(a)～(c)に示すように表層が水平・鉛直両方向に連続な(均質な)地盤では、橋梁は基礎が無い場合(直接基礎等)と基礎がある場合(例えば支持杭や摩擦杭等)とにかかわらず地震被害が極めて少ない。
- 4) 図4(d)～(f)のように水平方向に連続で、鉛直方向に不連続な地盤では、杭が無い場合(d)と摩擦杭の場合(e)は被害が少なく、(f)のように支持杭となっている場合は橋梁に被害が多くみられる。
- 5) 水平方向に不連続な地盤では、例えば図4(g)～(i)のように硬地盤の左側がGS(砂、礫層)の下にSC層(軟弱粘土、腐植土層)がある互層からなる場合とそれが単層の軟地盤の場合、即ち水平方向に硬地盤と軟地盤(互層、単層)が接している場合、その境界部にある橋梁は杭の有無に係わらず被害を受けやすい。橋梁が硬軟地盤境界部の軟地盤側のみにある場合も被害を受けやすい。

6. 橋梁の地震時変形パターンは地盤構造に対応する

橋梁等の杭の亀裂等の損傷は埋立地盤等で地盤と杭やフーチングの間に空隙があるところでも多

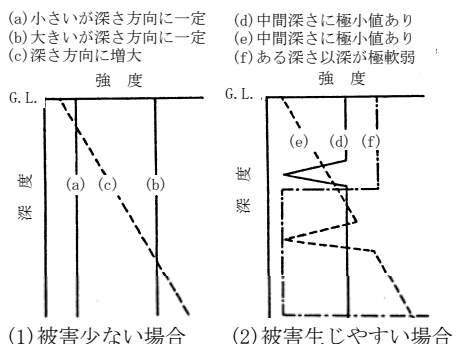


図3 地盤強度の深度分布と地震被害の関係¹⁾

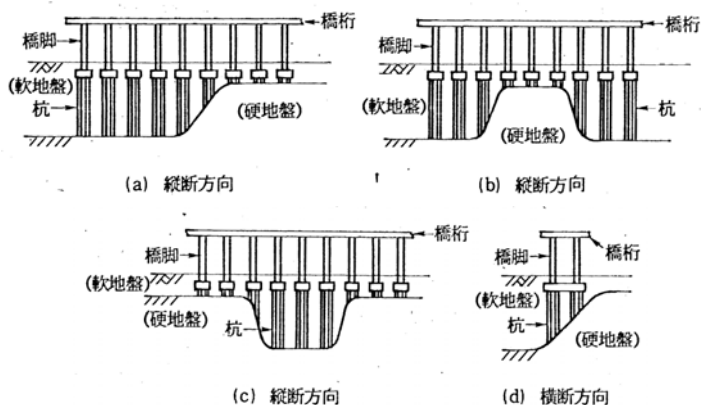


図1 橋梁に地震被害が発生しやすい地盤

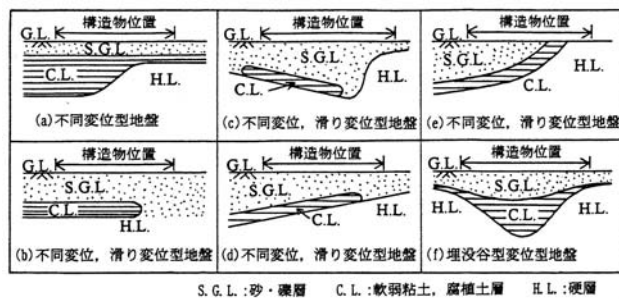


図2 橋梁等の構造物に地震被害が生じやすい地盤土層構成¹⁾

い。フーチングが自然堆積の比較的硬い砂礫層等にある場合は杭よりも構造躯体に損傷が多い。それらは地盤からの力の作用点が杭であるかフーチング基礎であるか異なるためと推定される。

7) 被害が水平・鉛直両方向の不連続地盤で生じやすいのは軟弱土層厚さ変化点では地震時に不同変位が大きく発生するし、薄い低強度土層は地震時に迂り面のようになり、その上の圧縮性が比較的小さくて横方向地盤反力係数が大きい砂・礫層等が比較的大きく動いて基礎に大きい偏土圧を作用させるためと考えられる。

	基礎無し(直接基礎)	基礎有り(摩擦杭)	基礎有り(支持杭)
連続地盤	(a) 無被害 G.L. 構造物 硬地盤あるいは軟地盤 硬地盤	(b) 無被害 G.L. 構造物 杭 軟地盤 硬地盤	(c) 無被害 G.L. 構造物 軟地盤 杭 硬地盤
不連続地盤(互層地盤)	(d) 無被害 G.L. 構造物 GS SC 硬地盤	(e) 無被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤	(f) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤
不連続地盤(不均質地盤)	(g) 被害 G.L. 構造物 GS SC 硬地盤	(h) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤	(i) 被害 G.L. 構造物 GS 杭 SC 硬地盤

- (1) 構造物には盛土、建物、橋梁等を含む。
- (2) 基礎には杭、井筒、地下室等を含む。
- (3) G.L.: 地盤面, GS: 砂、礫層, SC: 軟弱粘土、腐植土層
- (4) (g)～(i): 異種支持地盤
- (5) (g)～(i)において、GS+SCが軟地盤(SC)の単層の時も被害有り。

図4 構造物に地震被害が発生しやすい地盤と基礎構造の関係¹⁾

キーワード: 橋梁, 地震被害機構, 地盤, 不連続点, 不同変位, せん断歪, 垂直歪

連絡先: 所沢市東所沢 2-34-8

8) 図 4(f)の砂・礫層の下に軟弱な粘性土層がある地盤でしっかりした基礎を持つ橋梁が地震被害を受けやすいのは、その基礎・橋梁系が不動点になってその周囲の地盤と一種の不連続点(人工的な境界部)をつくるためと考えられる。その脇に基礎のしっかりした別な橋梁や建物等の構造物(図 5)があるといっそう著しい被害が生じるのは、橋梁自身が地盤に作った不動点機能を脇の構造物がさら強めるためと考えられる。

9) 表層地盤が硬地盤あるいは軟弱層のみからなるとき被害が発生しないのは、前者の場合には直接基礎を持つ橋梁は地盤の動きに追従して地盤から力(偏土圧等)を受けないためであり、後者の場合には軟弱層は地盤反力係数が小さく地盤から基礎が受ける力(偏土圧等)が小さいためと考えられる。

3. 橋梁の地震被害機構の推定

地盤の不連続点では図 6 のように地震時の変位変化(不同変位)が大きく、その変位勾配(微分値)の歪も大きく集中する。この歪には図 7(文献 3)を修正)に示すようにせん断歪 γ と垂直歪 ϵ がある。せん断歪は不同沈下量と水平距離の比(図 7(1))で、あるいは紙面垂直方向の水平変位差と水平距離の比(図 7(2))で求められ、垂直歪は紙面平行方向の水平変位差と水平距離の比(図 7(3))で求められる。なお、図 7(2)、(3)では変位方向が逆方向の場合も考えられる。従って、地震時にはせん断歪が関係する地盤の不同沈下や水平変位差で強制的に建物がせん断変形させられたり(図 7(1))、あるいは橋梁が捩れ変形(せん断変形)させられたりして(図 7(2))、被害が発生することが考えられる。また、垂直歪が関係する地盤の水平変位差で発生する、大きい偏土圧(特に圧縮側の受働土圧)が基礎等に作用することによって、基礎あるいは上部工が大きい損傷を受けたり、橋脚間距離の変化による桁落下等が発生したりす

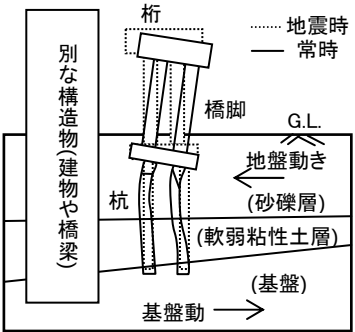


図 5 脇に別な構造物がある橋梁の地震被害²⁾

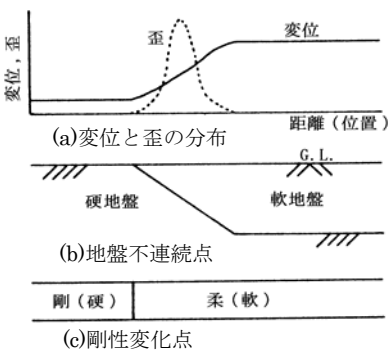


図 6 剛性変化点の変位と歪の分布¹⁾

ること(図 7(3))が考えられる。
図 7 の各作用力は実際には単独でなく複合して作用することが多いと考えられるが、各作用力による被害の主な例として挙げると、図 7(1)には1989年ロサンゼルス地震でのサンフランシスコ・オークランドベイブリッジ被害等、図 7(2)には1968年十勝沖地震での姉沼高架橋被害等、図 7(3)には1964年新潟地震での昭和大橋¹⁾、1995年兵庫県南部地震での新幹線高架橋²⁾、2008年汶川地震での百花大橋(橋長約500m)⁴⁾の落橋等が該当すると考えられる。

4. おわりに

以上のように地盤不連続点の観点から橋梁の地震被害機構の推察を行った。地震被害は不均質地盤での地盤抵抗型橋梁に生じ易く、均質地盤での地盤追従型橋梁に生じ難いと考えられる。今後とも橋梁の安全性・経済性確保のための調査を継続したいと考えている。

参考文献
(1) 那須誠: 地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い, 土木建設技術シンポジウム2003論文集, pp. 299-306, 2003. (2) 那須誠: 橋梁等構造物の地震被害への隣接構造物の影響の考察, 第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 273-280, 2003. (3) 那須誠: 建物の地震被害機構と地盤の関係, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集CD-ROM, 投稿中, 2011. 8. (4) 高橋良和, 川島一彦, 吳智深: 中国四川地震による百花大橋及び回欄立交橋の被害, 第30回土木学会地震工学委員会論文集CD-ROM, No. 5-0005, 2009. 5.

歪			
地盤変位と歪	(1)不同沈下(せん断歪)	(2)紙面垂直方向水平変位(せん断歪)	(3)紙面平行方向水平変位(垂直歪)
地盤変位と歪の求め方 ここで、 V2,V1:鉛直変位 HT2,HT1:紙面垂直方向水平変位 HL2,HL1:紙面平行方向水平変位	鉛直変位差 $\Delta V = V2 - V1$	水平変位差 $\Delta HT = (HT2 - HT1)$	水平変位差 $\Delta HL = (HL2 - HL1)$
	せん断歪 $\gamma V = (V2 - V1) / L$	せん断歪 $\gamma T = (HT2 - HT1) / L$	垂直歪 $\epsilon L = (HL2 - HL1) / L$
作用地震力	せん断力	せん断力	偏土圧(衝撃力)
橋梁の変形	せん断変形(鉛直断面内)	捩れ変形(せん断変形)	橋脚間隔変化等

図 7 地盤の不連続点と橋梁の地震時変形の関係(文献 3)を修正)