

橋梁の 2011 年東北地方太平洋沖地震等による被害と地盤の関係

那須 誠¹

1)フェロー会員 博士(工学) 元前橋工科大学教授 (〒359-0021 埼玉県所沢市東所沢2-34-8)

1. まえがき

これまでに、地震被害の事例調査から橋梁等の構造物の地震被害は地盤の不連続点で多いことを明らかにするとともに、それらの地盤・橋梁において実施した常時微動測定や地震応答解析、地盤の不連続点における歪と被害形式の関係の分類等を行って、本シンポジウム等で既に発表してきている¹⁾。今回は 2011 年東北地方太平洋沖地震による橋梁等の被害個所として、仙台東部道路東部高架橋、新幹線花橋院架道橋、国道 4 号線大仏大橋、首都高速湾岸線荒川湾岸橋、首都高速湾岸線(西)大黒ジャンクション連結路、東京ゲートブリッジ、東京タワー、その外に兵庫県南部地震で被害を受けた新幹線番田高架橋等を取り上げてそれらの地盤を調べた。その結果いずれも地盤の不均質な所あるいは不連続点で被害が発生していることが認められたので、その結果を報告する。

2. 被害構造物と地盤の関係事例

以下に、橋梁等の被害と地盤の関係を述べる。

(1) 仙台東部道路東部高架橋

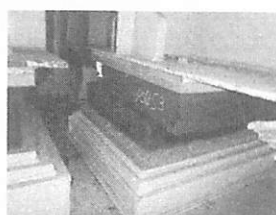


図-1 橋脚 P52 のゴム支承の破断状況²⁾

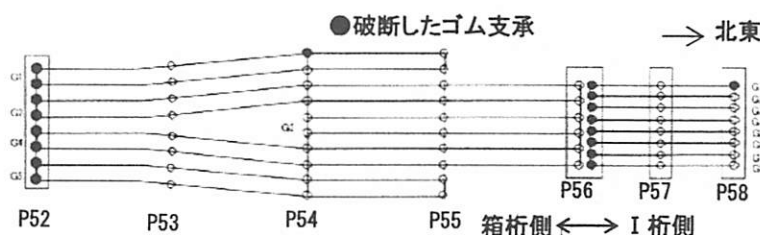


図-2 ゴム支承破断位置図(平面略図)²⁾

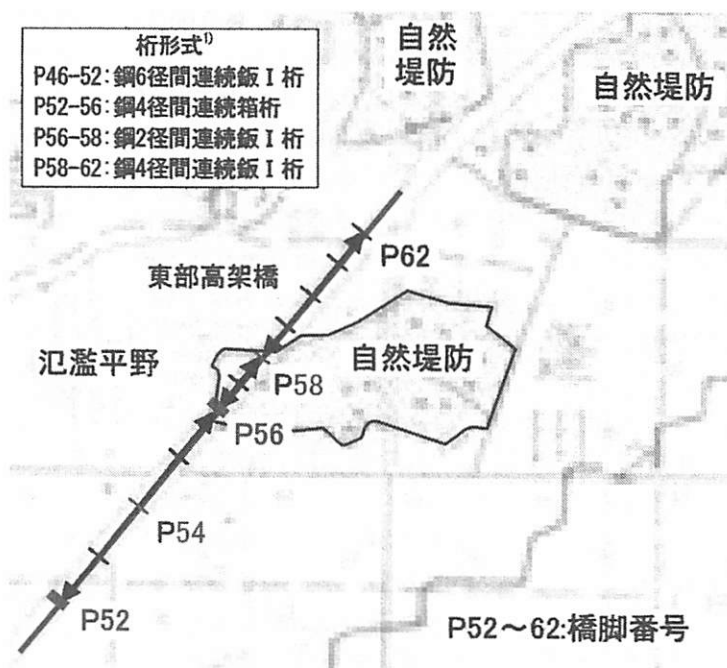


図-3 仙台東部道路東部高架橋の地盤(文献2, 3)集成)⁴⁾

2011 年東北地方太平洋沖地震で仙台東部道路東部高架橋において桁全体の横ずれや積層ゴム支承の破断・亀裂等が発生した(図-1)²⁾。ゴム支承破断は橋脚 P52, 54, 56, 58 上で発生し(図-2²⁾)、その内 P52(箱桁側), P56(I 桁側)の支承は 8 ケ全部破断した。ここで損傷発生区間の地盤状態を示す図-3⁴⁾をみると、橋脚 P52, 54 は氾濫平野にあることしか分らないが、橋脚 P56 と P58 は氾濫平野と自然堤防の境界部、即ち地盤の不連続点にあり、不同地盤変位で被害が発生しやすいところである。しかも、橋脚 P56(I 桁側)で支承 8 ケ全部破断し損傷状態が最も大規模で、橋軸直角方向に大きくずれたのは地盤の不連続点にあったことと対応すると考えられる⁴⁾。なお、橋脚 P52, 54 上での被害には橋脚 P52-56 間の連続桁が影響したことも推察される。

(2) 新幹線花橋院架道橋

花橋院架道橋(Bv)終点方支承部がずれ、その上部で軌道狂いが発生した(図-4⁵⁾, 5²⁾)。その架道橋(以下、Bv と称す)は尾根状地形の先端部を切土で走る在来線の東脇につくられている。図-6 の地質図⁶⁾はその地形状態も示す。花橋院架道橋の起点方橋脚と終点方橋脚付近(図-6 の a, b 地点)の土質柱状図(図-7)をみると、ともに DG 層(洪積砂礫層)の N 値に幾つかの極小値がみられるが、その極小値を通る直線(図中の下限包絡斜線)はそれぞれ深さ方向に強度増加傾向と減少傾向を示す。従って、橋脚の支持層は相対的に起点方が良好地盤で、終点方が動きやすい地盤で、地震で終点方橋脚付近の地盤が比較的大きく動いて、桁ずれや軌道狂いが発生したことが推察される⁴⁾。あるいは、この付近の地盤は地震で動きやすい地盤であるが起点側橋脚付近に建物があるため、地盤の動きがその建物で抑制されて終点側橋脚付近の地盤が相対的に大きく動いたため、結果的に終点側橋脚基礎が地盤から比較的大きい偏土圧(受動土圧)を受けて桁ずれ等が発生したことも推察される。なお、上記の 2 つの被害発生機構は類似と考えられる。

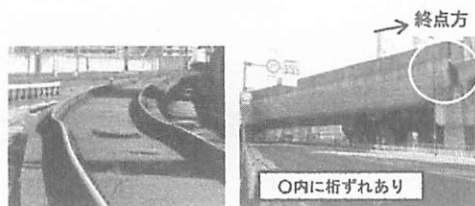


図-4 軌道変位⁵⁾

図-5 架道橋(南東面)²⁾

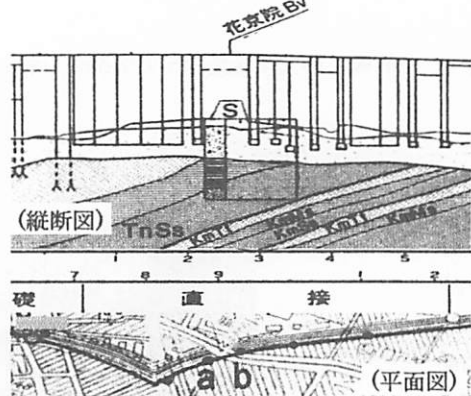


図-6 地質状態^{4), 6)}

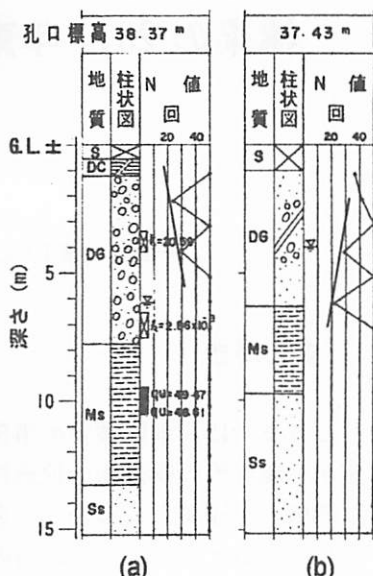


図-7 a, b 地点の土質柱状図^{4), 6)}

(3) 国道 4 号線大仏橋

大仏橋では上り線と下り線で損傷状況がかなり異なり、下り線に損傷が集中(下弦材、床版・トラス格点部、橋脚の打ち継目の全周亀裂、橋台前面護岸部)したことが報告されている^{4), 7)}。

(a) 図-8に示すように、大仏橋は阿武隈川の川幅の狭窄部から拡大部する所にあり、これは1964年新潟地震による昭和橋の落橋箇所(図-9¹⁰⁾)と類似である。昭和橋の地盤内には図-10に示すように腐植土層が堆積している。腐植土層は川幅の変化点で流速が遅くなったりするところに堆積しがちで、昭和橋ではこの層が地震時にすべり面になったために落橋したことが考えられている¹¹⁾。



図-8 大仏橋の位置地形図(b図にa図の橋を追加)



図-9 昭和大橋周辺の新旧地形¹⁰⁾

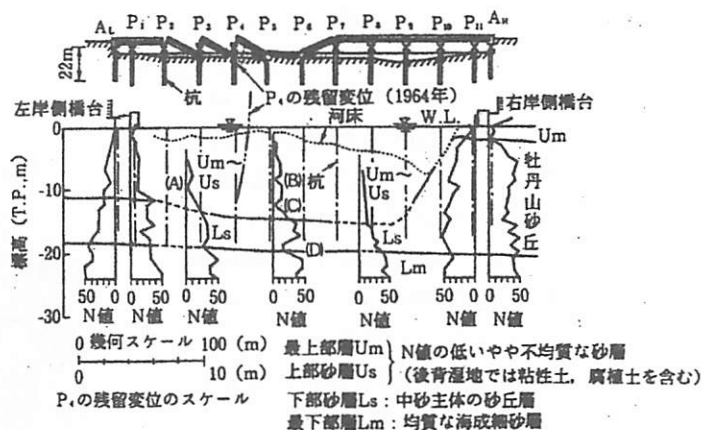


図-10 昭和大橋の変形状態と地盤¹¹⁾

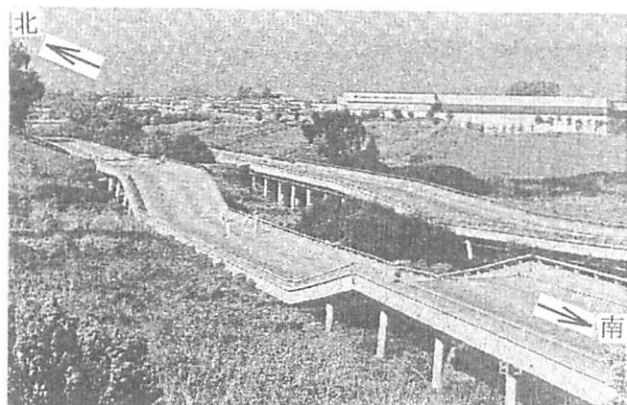


図-11 ストラプスルー橋¹²⁾

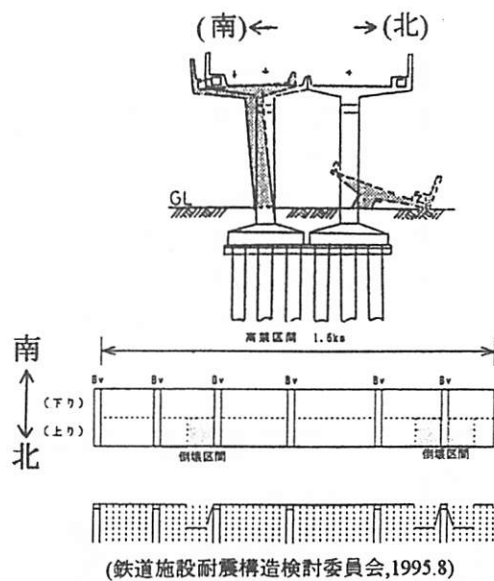


図-12 阪急西宮高架橋の被害状況¹²⁾

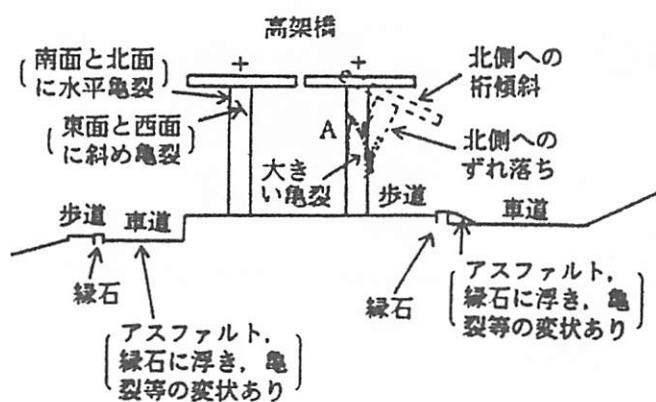


図-13 六甲山麓南斜面での高架橋被害¹²⁾

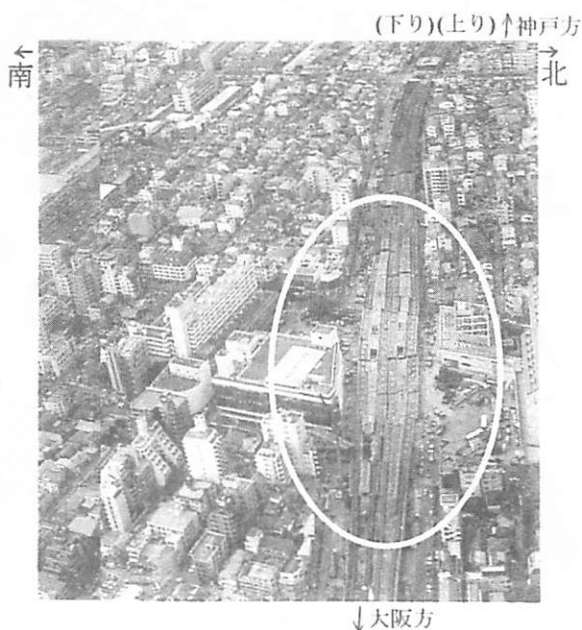


図-14 六甲道駅高架橋(円内は被害範囲)¹²⁾

(b) また、大仏橋のように並列橋梁の被害状況がかなり違う事例は過去の地震でも幾つかみられる¹²⁾。例えば、1989年ロマプリエタ地震でストラブスルー橋(図-11)は北行車線橋梁よりも南行車線橋梁の方の被害がかなり大きく、中央部分が落橋した。1995年兵庫県南部地震で阪急西宮高架橋(図-12)では上り線橋脚がせん断破壊し、桁は北側に移動や傾斜、沈下したが、下り線橋脚の被害程度は北側橋脚より軽い。その外に、六甲山麓南斜面での並列高架橋では図-13に示すような現象が発生し、図-14は六甲道駅高架橋の変形に脇の建物が影響したことを示している。その内、ストラブスルー橋と阪急西宮高架橋はともに橋軸直角方向(谷軸方向)に大きく変位した。地盤はストラブスルー橋では腐植土含む地盤、阪急西宮高架橋では埋没谷地盤で共に地震時に動きやすい地盤である。地震で動きやすい地盤が谷筋方向に動いたとき被害の酷い方の橋梁基礎に止められたため、基礎に強い偏土圧が作用して被害が発生し、さらに脇の被害程度の軽

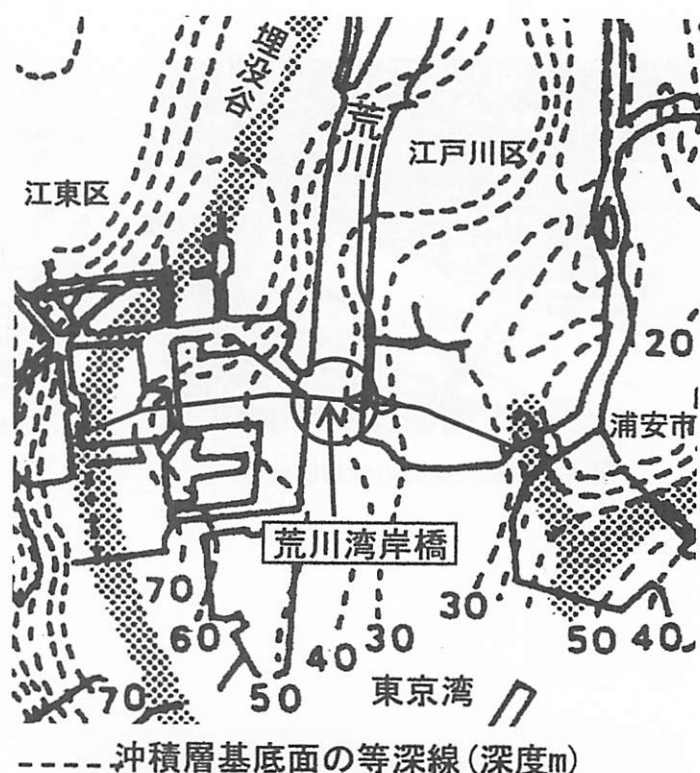


図-15 荒川湾岸橋の位置と地盤(文献14)に追加)⁴⁾



(損傷位置(O印)付近の拡大図)

図-16 大黒JCT(破線円内)の地盤(文献13, 14)を集成)⁴⁾

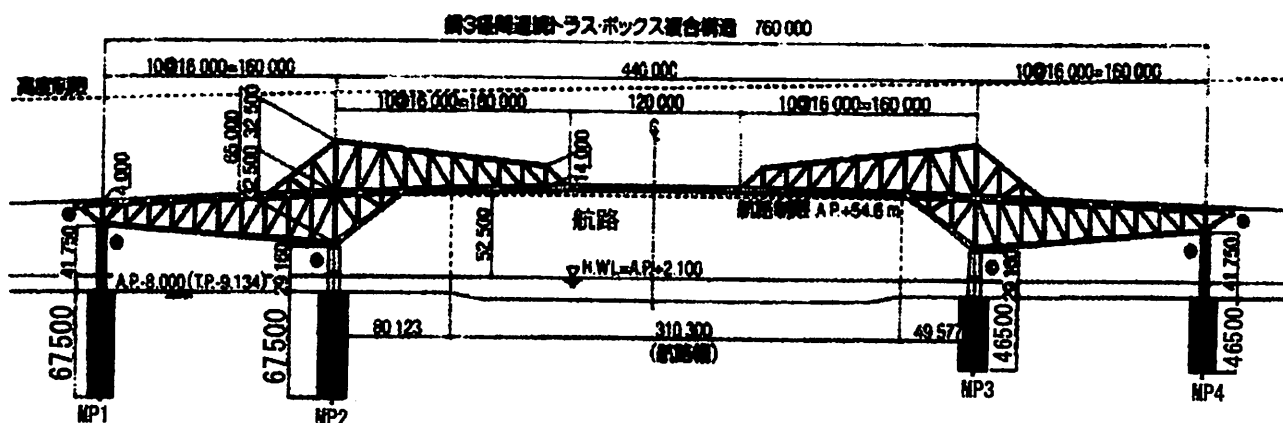


図-17 東京ゲートブリッジの構造と地盤¹⁵⁾

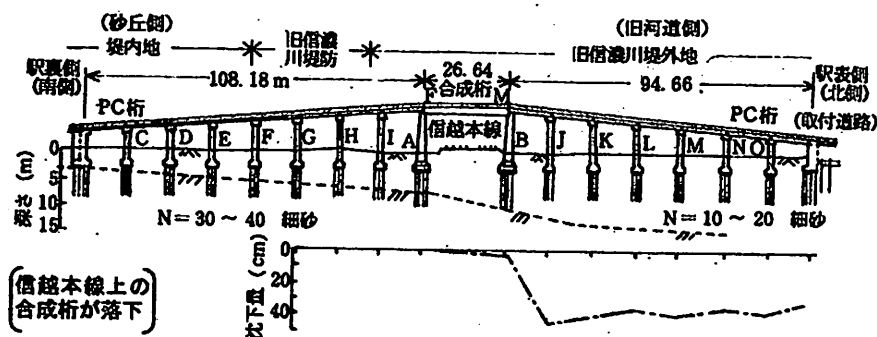


図-18 東跨線橋(笹口跨線橋、1964年新潟地震)¹⁶⁾

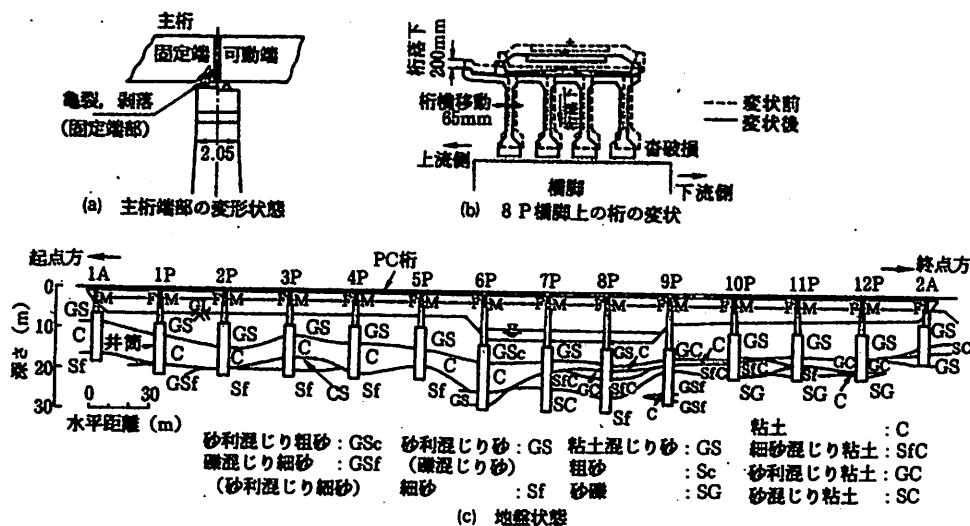


図-19 利別川橋梁(1993年釧路沖地震)¹⁷⁾

い橋梁基礎も地盤動を止める機能を発揮して、被害が生じること等が考えられている¹²⁾。

以上より、大仏橋でも(a)、(b)と同様の現象が発生したことが推察される。

(4) 首都高速湾岸線荒川湾岸橋

荒川湾岸橋で支承部と格点等の継ぎ手部等で損傷が発生したが、それらは河道の東側で多い(全19ヶ所の内16ヶ所)¹³⁾。図-15の首都高速(緑線)の荒川湾岸橋の位置と地盤をみると、荒川湾岸橋は埋没谷斜面部につくられ、しかも湾岸橋の西半分の谷斜

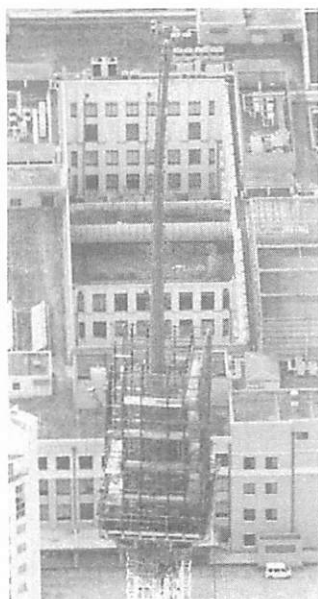


図-20 東京タワーのアンテナ部分(工事用足場付)¹⁸⁾

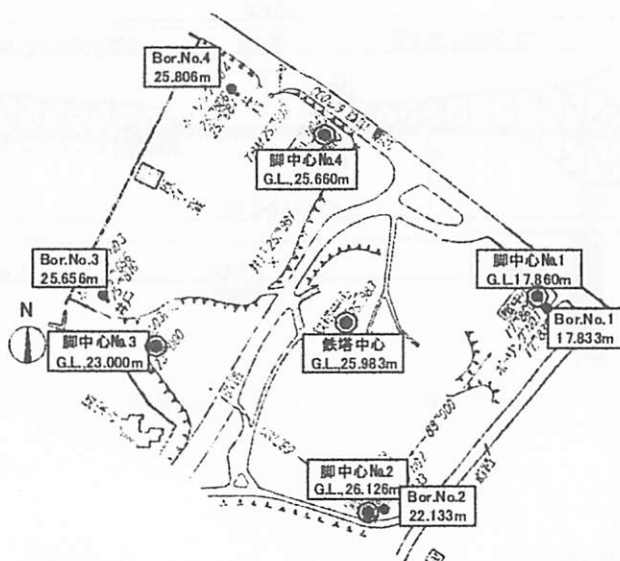


図-21 東京タワーの調査地点位置図(建設時点)²⁰⁾



図-22 東京タワー(○内)の位置地形図²¹⁾

面傾斜が比較的緩く、東半分の傾斜が比較的急であり、損傷は埋没谷斜面部の傾斜の急な東半分が多いことが分かる⁴⁾。

(5) 首都高速湾岸線(西)大黒ジャンクション連絡路

首都高速湾岸線大黒ジャンクション(JCT)の連絡路の橋梁で支承部が損傷した¹³⁾。図-16は大黒ジャンクション基底面の傾斜部に当たり、荒川湾岸橋の地盤と類似であり、共に不同地盤変位が発生しやすい地盤に相当する⁴⁾。

(6) 東京ゲートブリッジ

東日本太平洋地震で東京ゲートブリッジに航路の両脇橋脚上等でずれ等が発生したといわれている⁴⁾。図-17¹⁵⁾をみると、航路両脇の主橋脚MP2とMP3の長さ(それぞれ67.5, 46.5m)に約21mの差があり、地震で両橋脚間に大きい変位差(水平、鉛直)が発生して、橋梁の支承部等にずれ等が発生したことが推察される⁴⁾。なお、このように橋脚の支持層深さが異なるところで被害を受けた橋梁の例として、1964年新潟地震によって落橋した東跨線橋(笹口跨線橋、図-18)¹⁶⁾と、支承部にずれや沈下が発生した1993年釧路沖地震による利別川橋梁(図-19)¹⁷⁾が挙げられる。

(7) 東京タワー先端部の折れ曲がり

2011年東北地方太平洋沖地震で東京タワー(高さ

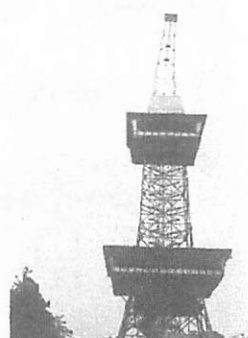


図-23 八戸タワーの傾斜状態²⁶⁾

333m)の先端部約5mが東側に約2度傾いた¹⁸⁾。タワーは丘陵地(地盤面標高 T. P. 18m)に建っており、正面出入口は1階で駐車場出入口は2階に位置する¹⁹⁾。新聞発表(図-20)¹⁸⁾や位置図(図-21)²⁰⁾、地形図(図-22)²¹⁾、空中写真等をみると、東側に谷状地形があってタワーの東側の脚が最長で(水平材間隔6段)、他の3本の脚はそれより短い(同5段)。一般に脚は長い方が短い脚より比較的軟らかい挙動を示すし、谷状地形の地盤も他の地盤より比較的軟らかいことが多いため、今回もそれらのことが影響して地震で先端が東側に曲がったものと思われる。

なお、1968年十勝沖地震の際に八戸遊園地のタワーが不同沈下で曲がる被害が出たり^{22), 23)}、1978年宮城県沖地震の際に旧河道埋立地・地山境界部

で支柱座屈が生じた仙台市ガス局ガスホルダーの例²⁴⁾と類似地盤状態であることが推察される。即ち、前者の八戸タワー展望塔のトラス部材が座屈し最上部が傾いた(図-23²⁶⁾)。 (その時の被害状況は鉄骨座屈による上層部の傾斜, タワー最下部主材の座屈, 水平材降伏等)。足元の地盤に生じた不同沈下によって上方部材が急に細くなっている部分に過大応力が発生したため折れ曲がったと言われている^{22), 23)}。それは地質図等²⁴⁾によると、洪積層台地(低位段丘堆積物, 砂及び礫)と沖積層谷底平野(砂・礫及び泥, 長根堤跡)の境界部に存在していたため発生したことが推察される。

(8)新幹線番田高架橋

1995 年兵庫県南部地震で東海道新幹線番田高架橋が被害(499K440～590M)を受けているが、図-24²⁸⁾の被害区間の地質図をみると、左側(起点側)の沖積粘土層(Ac 層)の右端側と、右側(終点側)の沖積粘土層(Ac 層)の左端側の間に砂層 As 層が存在する区間で被害が発生していることが分かる。また、図-25 をみると、軟弱な粘土層の端部で被害を受けている。震央方向とほぼ直角方向に揺れている。

3. あとがき

以上に述べた 2011 年東北地方太平洋沖地震等による橋梁被害はいずれも地盤の不連続点とみなされる位置で発生しており、不同地盤変位等が原因で被害を受けたことが考えられるし、東京タワーも過去の類似のタワーの地震被害と同様に一様でない地盤で被害が発生している。即ち、橋梁もタワーも過去の地震被害と同様の地盤で被害が発生していることが推察さ

(大阪東北部) 番田高架橋被害位置

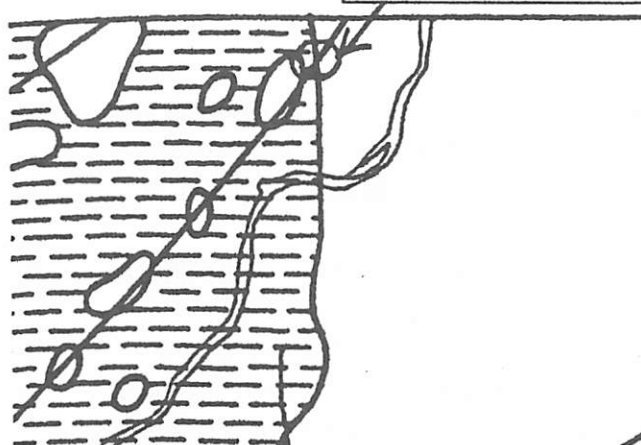


図-25 軟弱な粘土層の分布地域(破線は N 値 0 を含む粘土層分布地域)²⁸⁾

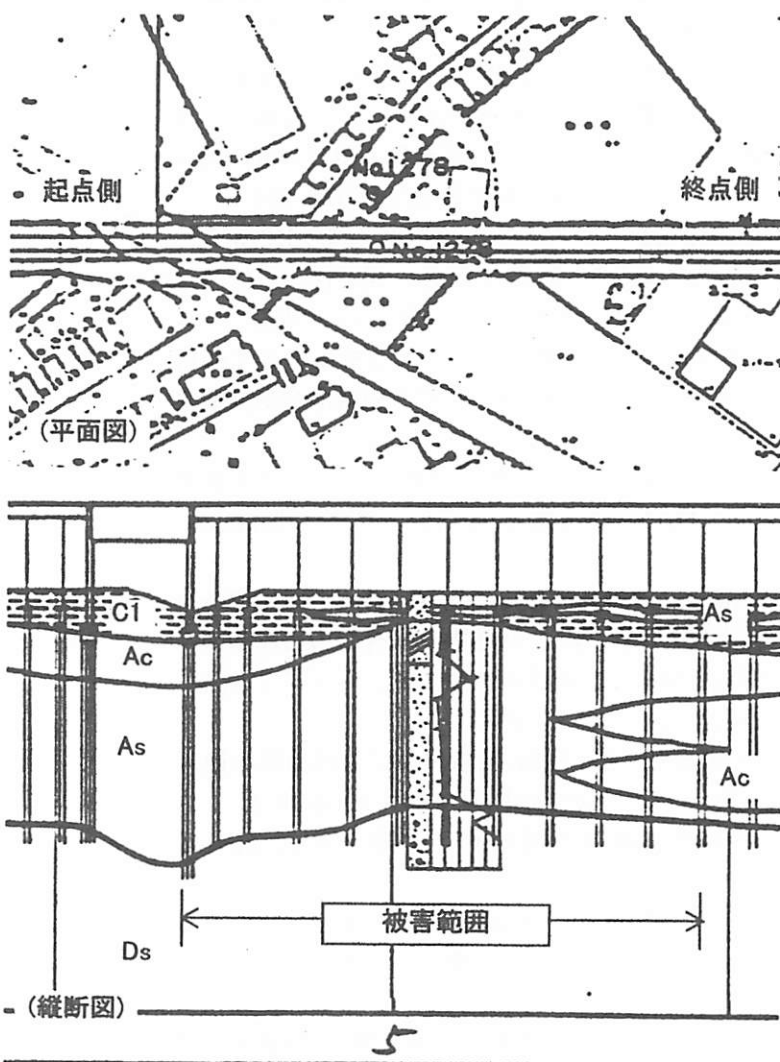


図-24 新幹線番田高架橋の被害範囲と地質(499K440～590M、1995 年兵庫県南部地震、文献 27)に追加)

れた。終わりに、以上の調査でお世話になった(株)長大の矢部正明博士他の方々及び文献の著者に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠: 地盤不連続点に着目した橋梁の地震被害機構の推定, 第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 (2011 年 7 月), pp. 437-444, 2011. 7.
- 2) 土木学会鋼構造委員会編: 東日本大震災鋼構造物調査特別委員会報告書, 2012. 2.
- 3) 治水地形分類図, 仙台東北部, 調査年度 1977 年.
- 4) 那須誠: 2011 年東北地方太平洋沖地震による橋梁被害と地盤の関係, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, I-254, 2012. 9.
- 5) 東日本大震災による地上設備の被害と復旧状況について, JR 東日本 Home Page, 2011. 4. 5.
- 6) 東北新幹線地質図 (桑折・有壁間), 国鉄仙台新幹線工事局, 1981.
- 7) 矢部正明・塚本英子他: 周辺状況から推定した 2011 年東北地方太平洋沖地震による道路橋の挙動, 第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, p. 161-168, 2011.
- 8) 地図閲覧サービス, 2.5 万分 1 地形図, 2012. 3. 5.
- 9) 2 万分 1 地形図, 福島, 2 万分 1 迅速図フランス式彩色地図, 1891 (明治 24) 年測量, 国土地理院.
- 10) 那須誠: 1964 年新潟地震による橋梁の落下機構の考察, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, I B-121, 1998. 10.
- 11) 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
- 12) 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. 1.
- 13) 平野廣和, 香月智編: 関東および信越地域の被害概要 (速報), 土木学会関東支部 H. P., 2011. 4.
- 14) 貝塚爽平編: 東京湾の地形・地質と水, p. 55, 築地書館, 1993.
- 15) 港湾空港技術研究所編: 沿岸域の開発プロジェクトと新しい技術の発展に関する国際シンポジウム配布資料, 2010.
- 16) 那須誠: 橋梁の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 11, pp. 27-36, 1991. 11
- 17) 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. 05, pp. 35-40, 1994. 5
- 18) 震災で曲がった先端改修 東京タワー上部に足場, MSN 産経ニュース, 2012. 4. 7.
- 19) 東京タワー, WIKIPEDIA, 2011. 4. 11.
- 20) 池田末造東京タワーの施工について, 建築雑誌 74 (869), pp. 13-18, 1959. 4. 20
- 21) 国土地理院編: 2.5 万分 1 地形図, 東京西南部, 2001 年修正測量, 2003. 1. 1 発行
- 22) 日本建築学会編: 1968 年十勝沖地震災害調査報告, 1968. 12.
- 23) 那須誠, 事羽矢洋: 建物の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 4, 1990. 4.
- 24) 那須誠: 各種工場の地震被害と地盤条件変化点の関係, 土木建設技術発表会 2008 概要集, IV-3, pp. 241-248, 土木学会, 2008. 11.
- 25) 20 万分 1 地質図, 八戸, 地質調査所, 1991. 3
- 26) 河上房義: 東北地方における 1968 年十勝沖地震災害の概要, 土木学会誌, 53-7, pp. 109-116, 1968. 7.
- 27) 新幹線防災管理図, 1994.
- 28) 土地条件調査報告書 (大阪地区), 国土地理院, 1983. 3.