2007 年能登半島地震で被災を受けた能登島大橋 RC 橋脚の被害について

竹田周平¹,幸左賢二²

Syuhei TAKEDA¹ and Kenji KOSA²

1 福井工業大学工学部土木環境工学科

²九州工業大学工学部建設社会工学科

2007年3月25日に石川県能登半島付近を震源とする地震が発生した.この地震では能登道路の盛土部の 崩壊・港湾の液状化や一部橋梁の被害が確認された.著者らはこれまでに,能登島と本土に架かる能登島 大橋の被害や,この橋梁位置における強地震動の簡易手法による再現と橋梁の被害分析を実施した.本論 文では,これらの分析結果と復興状況について報告するものである.

キーワード:橋梁被害,復興調査,橋脚被害,コンクリート橋

1. はじめに

2007年3月25日09時41分,能登半島沖を震源(震源深さ 11km)とするマグニチュードM6.9の地震が発生し、穴水 町他2カ所で震度6強を観測した.今回の本震は,西北西--東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型であった.またこの能 登半島においては、過去に被害をもたらしたM6.0以上地 震は数回発生しているものの,M7.0を超える地震は発生 していないとみられ,今回観測された地震が過去最大のも のとなった. この地震により, 死者1名, 負傷者336名, 住 宅全壊580棟,住家半壊1,063棟などの被害が発生した1). また,液状化の発生,道路盛土の崩壊が発生した.特に能 登半島を縦貫している有料道路における高盛土では、大規 模な盛土崩壊が発生している²⁾.橋梁の被害においては, 能登島大橋 (PCT桁+PCフレーム) やツインブリッジ (斜 張橋) において損傷が発生したが、早期復旧が可能の限定 的な被害であった. ここでは、被害概要や観測記録・構造 物の被害概要を述べるとともに,長大橋である能登島大橋 の被害とその復興について報告する.

2. 地震概要と地震動記録

(1) 地震の概要

本震について,発生時刻は2007年3月25日09時41 分,震源位置は能登半島沖(37°13.2′N 136°41.1′E),震 源深さは11km,また地震の規模を示すマグニチュードは M6.9 であった.図-1 に近年に発生した地震の震源位置を 示すが,過去約100年間でM6クラスの地震が6回発生 しており,被害地震という観点で見れば必ずしも地震活動 が低い地域であるとは言えない.また余震について,最大 震度5弱以上のものは3回発生しており,それぞれのマグ ニチュードはM4.8~M5.3 であった.余震の分布を図-2 に示す.余震分布から,ほぼ北東南西方向に走向をもつ南 東落ちで傾斜する節面が断層面であることが示され¹⁾,精 密な余震分布³¹と海底に確認されていた活断層⁴⁾⁵⁾との 空間分布の対応から,海底断層の深部延長で能登半島地震 が発生したと考えられている.



図-2 余震の分布図

(2) 強地震観測記録

強地震観測について、石川県内においては気象庁(以下 「JMA」と称す)、独立行政法人防災科学技術研究所、自 治体震度計による地震観測が合計 62 地点で実施されて いる.これらの地震計設置位置を図-3 に示す.震度分布 は、石川県輪島市・七尾市・穴水町で震度6強、志賀町・ 能登町・中能登町で震度6弱を記録したほか、北陸地方 を中心に北海道から中国・四国地方にかけて震度5強~ 震度1を記録した.また震度6強を記録したのは、輪島 市門前町走出(計測震度6.4)、穴水町大町(計測震度6.3)、



七尾市田鶴浜町(計測震度 6.2),輪島市鳳至町(計測震度 6.1)の4 箇所である.なお,自治体震度計による計測震度 は地震・火山月報(防災編)⁶⁾を参照した.最大加速度は, SI-01(門前町走出)において 1,304cm/s² を記録したのが最 大であり,ISK005(穴水),ISK006(富来)で 900cm/s² と越 える大きな最大加速度を記録した.最大速度はISK005(穴 水)で 103cm/s を記録したのが最大であり,JMA-01(輪島 市鳳至町)でも 100cm/s に近い値が記録された. 代表的な 観測記録(JMA-01:輪島市鳳至町)と応答スペクトル²⁾ を図-4に示す.

(3) 能登島大橋の被害概要

能登島大橋(昭和57年架設)は、七尾湾中央部に位置 する能登島と本土を結ぶ3径間連続PCラーメン橋と前後 の計18径間のPCT単純桁橋からなる全長L=1,050mの海 上橋である.図-5に橋梁側面図を示す.また写真-1に橋 梁概観、写真-2に橋脚基部のひび割れ状況を示す.文献 ⁷⁾によると以下の被害が報告されている.図-5に示す桁橋 の橋脚(P4・6・7)とラーメン橋と単純橋の掛違い橋脚 (P10)、ラーメン橋の中間橋脚(P11)の計4基に比較 的顕著な損傷がみられた.P6・P7では、基部コンクリー トの剥落とひび割れ,鉄筋のはらみだし、内3本の破断と フーチングとの境界部直近で帯鉄筋1本の破断が確認さ れた.

P10 では、中間段落とし部で曲げ、せん断ひびわれが みられ、橋軸直角方向地震動の影響によるものと判断され る.調査の結果、損傷が大きいP7・P10 も大きな残留変 形等もなくモルタル等による断面補修とひび割れ注入に より当面の供用に必要な耐荷力は確保できると考えられ



る.

図-5 橋梁側面図



写真-1 橋梁概観



写真-2 橋脚基部ひび割れ

3. 能登島大橋の被害分析

(1) 架橋位置における強地震動の再現

被害損傷の分析に先立ち,著者らの文献⁸⁾に基づき,能登島大橋の入力地震動の設定を行った.ここでは,Kik-net で観測された能登町柳田の地中観測データ(NS方向)を 用いた.

最初に、柳田で得られた地中部の観測データに基づき震 源位置における基盤波形を作成し、その後震源より43km 離れた能登島大橋の基盤波形を作成した. ここでは, この 観測記録を工学基盤面での距離減衰を考慮して福島・田中 式により最大加速度を調整し, 地震動を推定する手法を採 用した. 地表面波形については、作成した能登島大橋位置 における基盤波形を基に、FDELを用いて各ボーリング位 置における地表面特性を考慮して地表面波形を作成した. 代表的な地表面における時刻歴加速度波形を図-6に示す が,ここに示す並行方向は橋軸方向を,直交方向は橋軸直 角方向を示している.なお,波形の推定について,最終的 な地震動の方向は, NS・EW方向から橋梁の解析方向を考 慮し変換している.この作成した地表面波形を基にh=5% としたときの加速度応答スペクトルを図-7に示す.この図 より、構造物の減衰特性が5%であると仮定すると、約1.0g 程度の地震力が作用したと推測できる.



図-6 代表的な地表面波形(3径間連続フレーム部) (上段:橋軸方向,下段:橋軸直角方向)







図-7 加速度応答スペクトル(h=5%) (上段:橋軸方向,下段:橋軸直角方向)

観測される損傷		①軸方向鉄筋破断お よび躯体傾斜	②鉄筋はらみ出し	③かぶりコンクリー ト剥離	①斜めひび割れ貫通	⑤斜めひび割れ (貫通せず)	③水平ひび割れのみ
通常の場合	倒面図		RE USANL	<u>9=3766</u>		34	
p≧ 0.5%	正面図						
軸方向鉄筋比山	個面図		7A				
小の 場合 0.5%	何面図						
被災度		A:大被害	B:中被害	B:中被害	C : 小被害	C:小被害	C:小被害
残留狭度		Py以下	PyllF	1. 0Py	1. 1Py	Pu	Pu
税留変形性能 <u>δu-#</u> tu-δy ×100 (%)		0%	0 %	10%	30%	50%	70%
	(調) 調査される石 通常の場合 P.≧ 0.5% 株 方向鉄筒比小の 場合 P.≦ 0.5% 株 2.5% た 2.5% 株 2.5% た	(調されら根本) 通信() のまた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 の うた。 うた。 の うた。 うた。 うた。 うた。 うた。 うた。 うた。 うた。	(調告:1-6:30:K C)MD://eds:##### (調告:1-6:30:K C)MD://eds:##### (1) (1) (2) (1) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2)	(i) (i) <td>All Control (Control (Contro) (Control (Contro) (Control (Control (Control (Cont</td> <td>All Columb / declarational columb / declarational c</td> <td>All Columbration and and an and an and and and and and</td>	All Control (Control (Contro) (Control (Contro) (Control (Control (Control (Cont	All Columb / declarational columb / declarational c	All Columbration and and an and an and and and and and

図-8 鉄筋コンクリート橋脚の被災度判定表

(2) 能登島大橋の被害損傷の分析

(a) 解析対象橋脚と着眼点

ここでは、被災を受けた代表的な橋脚である P4, P6, P7 の 3 基の損傷分析を考察する.対象とした 3 基の橋脚 は、損傷の程度がランク B と判定され、主鉄筋のはらみ だしや座屈・一部の帯鉄筋の破断が確認されている²⁾.図 -8 に、鉄筋コンクリート橋脚の被災度判定表⁹⁾を示す. この図より、被災したランク B は観測される損傷の②か ら④に範囲に位置すると想定される.

以上を踏まえ,被害損傷の分析は,能登島大橋に入力さ れたであろう地表面波形(再現波形)に基づき動的応答解 析を実施し,着目橋脚の動的応答性状や柱基部の変形特性 や応答変位,さらには隣接する上部構造間の相対変位量の 結果から,被害分析を行う方法とした.

(b) 解析手法とモデル及び解析プログラム

解析法は時刻歴応答解析である Newmark-β 法(β=0.25), 積分時間間隔はΔt=0.002s とし、橋脚の柱部材のみ非線形 要素を与えた.また解析では2次元によりモデル化を行い, Kik-net より再現した地表面波形をオリジナル波形として 入力することで,橋脚基部の応答塑性率や橋脚の残留変位, せん断力などの解析結果との実際の被害との関係を検討 した.さらに桁間の相対変位量の算定では、上部構造位置 における応答相対変位(標準の遊間:50mm)を求め実際 の被害との関係を検討した.モデル化について,能登島大 橋の基礎は鋼管杭基礎で,海底からFooting 位置までは突 出した形状となっており,流体との連成についても十分に 検討を行う必要があるが,今回の解析では杭が突出した状 態であるものと仮定し,基礎をSRモデルで簡便に設定し た.なお,解析プログラムは動的解析ソフトウェア DYMO¹⁰を使用した.

(c) 解析結果

表-1 に解析結果を,図-9 に代表的な橋脚の水平力と水 平変位との関係を示す.なお図-9 に示す δ_u は終局変位 (Type II 相当) を示す. 被害が最も大きかった P7 橋脚の 応答塑性率 u は橋軸方向で 9.43 程度であり、これは残留 変形性能の観点から考察すると約 30%と評価され、概ね 被災度判定表の損傷状態と相関した結果を得た. 同様に P6 橋脚の橋軸方向の応答塑性率 µは 14.93 程度であり, 残留変形性能で示すと約 25%となる. せん断力について は、対象橋脚の橋軸方向で S=2,015kN~2,270kN 程度、直 角方向で S=2,372kN~2,740kN 程度であり、それぞれの橋 脚のせん断耐力以下であった.図-10に、時刻歴応答変位 図を示す.ここに離反側とは落橋方向を,接触側とは桁端 部の衝突方向を示している. この図(a)と(b)より, P6 橋 脚では最大相対変位(接触側)でδ_{max} =17.9mm, P7 橋脚 では δ_{max} =46.5mm となる結果を得た.ここで得られた結果 より、地震発生時が3月末であることを踏まえると、上部 構造の温度変化による伸びは小さいと推定されるが、P7 橋脚部では, 桁遊間の標準値である 50mm に対して約36% 程度であり,桁間衝突は発生していないものと推測できる. しかしながら、P8橋脚上の桁遊間に着目するとほぼ 50mm であり,温度変化の変位の影響を考慮するとある程度の桁 間衝突が発生したと推測される.このような相対変位の違 いは、図(c)に示す位相ずれ(約7.5sからP8の変位のず れ)でも確認できるように、橋脚の固有周期特性の違いが 要因である.以上より,解析結果と実際の被害との関係を 考察すると、P8 橋脚上のゴムパットの可動支承と上部構 造間のずれが確認されていることから, 概ね動的挙動を再 現出来ていると評価できる.

										
	橋脚番号	P4	P6	P7	P8					
橋軸方向	応答塑性率	12.39	14.93	9.43	4.67					
	残留変位 [<i>m</i>]	0.044	0.033	0.040	0.045					
	せん断力 [<i>kN</i>]	2,177	2,015	2,081	2,270					
直	応答塑性率 	3.80	4.09	3.09	1.97					
角 方	残留変位 [<i>m</i>]	0.010	0.007	0.009	0.011					
向	せん断力 [<i>kN</i>]	2,563	2,372	2,424	2,740					





図-10 時刻歴変位図



写真-3 補強後の橋脚

4. 能登島大橋の復興状況

平成21年11月に能登島大橋の復興状況を確認するため に現地踏査を実施した.この結果、橋脚柱部は概ね鉄筋コ ンクリートによる巻立て補強が完了していた.また,これ らは海上に位置しており耐久性向上のためか,コンクリー トの表面には塗装が施されていた.代表的な橋脚の補強後 の状況を写真-3に示す.

5. まとめ

本論文では,能登半島地震の概要と観測記録,橋梁の被 害概要,また数値解析による分析を実施した.この結果, 今回の解析では,簡易的なモデルや仮定条件に基づき損傷 分析を実施しているため,詳細な動的挙動や損傷度評価を 適切に評価している点について課題は残っているものの, 定性的ではあるが実際の被害を数値解析により概ね再現 できた.

謝辞

気象庁および防災科学技術研究所より公表されている 地震観測記録を使用しました.また、金沢大学の宮島昌克 教授・村田晶助教には、地震被害の情報を提供して頂き、 同大学の深田宰史准教授より能登島大橋の構造に関する データの提供を頂きました.橋脚の被害分析では、土木研 究所堺淳一主任研究員より貴重な助言を頂きました.ここ に記して感謝いたします.

参考文献

- 災害時地震・津波速報 平成19年(2007年)能登半島地震、 災害時自然災害報告書2007年第1号(対象地域:石川県)、 気象庁、2007.
- 土木学会・地盤工学会:2007年能登半島地震被害調査報告 書、平成19年10月.
- 3) S.Sakai, A. Kato, T. Iidaka, T. Iwasaki, E. Kurashimo, T. Igarashi, N. Hirata, T.Kanazawa and the group for the joint aftershock observation of the 2007 Noto Hanto Earthquake (2007), Highly resolved distribution of aftershocks of the 2007 Noto Hanto Earthquake by a dense seismic observation, submitted to Earth Planets Space.
- 片川秀基・浜田昌明・吉田進・廉澤宏・三橋明・河野芳輝・ 衣笠善博(2005)、 能登半島西方海域の新第三紀〜第四紀地質 構造形成、 地学雑誌、114、5、791-810.
- 6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2007)、2007 年能 登半島地震「能登半島の地質」、地質調査総合センター (http://www.gsj.jp/jishin/noto/noto1.html).
- 6) 気象庁:平成19年3月 地震・火山月報(防災編), p.49, 2007.
- 大技術資料、平成19年能登半島地震緊急調査報告、pp.6-11、 2007.6.
- 8) 竹田周平、幸左賢二、村田 晶、長尾亮太、宮島昌克、北浦 勝:2007年能登半島地震で被災を受けた長大橋を対象とした 入力地震動の推定、第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等 構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp249-252、 2008.1.
- 9) 社団法人日本道路協会:道路震災対策便覧(震災復旧編)平成18年度改訂版、平成19年3月.
- 財団法人土木研究センター:橋の動的耐震設計法マニュアル 「動的解析体験版ソフウェア"DYMO"」 (http://www.pwrc.or.jp/dymo.html).