論文 十勝沖地震で被災した鉄筋コンクリート橋脚の地震時応答解析によ る被害分析

藤田 康平^{*1}·冨 健一^{*2}·糸山 豊^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨:+勝沖地震で被災した鉄筋コンクリート橋脚に対して,当該地点付近で観測した基盤波と地盤条件を考慮した地表面波により地震時応答解析を実施し,被害状況との検証を行った。また,長周期成分による影響を検証するために,他の長周期地震動や内陸型地震動による解析も実施した。その結果,+勝沖地震作用時では実被害と概ね同じ損傷が発生する解析結果が得られた。また,長周期地震動と橋脚の固有振動数が近似する場合は最大加速度がほぼ同じ地震動でも応答値が大きく異なることが明らかとなった。

キーワード:十勝沖地震,鉄筋コンクリート橋脚,被害分析,長周期地震動

1. はじめに

2003 年に発生した十勝沖地震では,比較的固 有周期の長い鉄道橋や道路橋の長大橋で大きな 被害が発生した。被害内容としては,写真-1 に示すような鉄筋コンクリート橋脚の柱部にお ける曲げ破壊,橋脚天端の支承部の押し抜きせ ん断破壊の発生等が報告¹⁾されている。

+勝沖地震により観測された地震動は、概ね 継続時間が長くやや長周期の波動成分を含むこ とから、海溝型巨大地震特有の典型的性質を有 している。土木構造物以外では、タンク内の石 油がスロッシング現象(液面揺動)を起こして 火災が発生する被害が報告されているが、これ は十勝沖地震が長周期成分を多く含んだ地震動 であった影響と推測されている。十勝沖地震に



より大きな被害が発生した橋は、大きな河川に 架橋されている規模の非常に大きい構造物であ り、固有周期が比較的長い。よって、被災した 原因の一つとして、十勝沖地震の特徴である長 周期成分の影響があると推測される。

そこで本研究では、十勝沖地震で被災した鉄 筋コンクリート橋脚に対して、当該地点付近の 地盤特性を考慮した地表面地震波による動的応 答解析を実施し、解析結果と被災状況の整合や、 長周期成分を多く含む地震動と構造物の地震挙 動の関係を調べた。また、比較対象として、近 年発生した大地震である兵庫県南部地震や土木 学会コンクリート標準示方書²⁰(以下、コン示 と記す)により示されている海洋型地震動や内 陸型地震動、道路橋示方書³⁰(以下、道示と記 す)に示されている海溝型巨大地震による解析 も実施した。

2. 解析手法

解析手法として,材料非線形性を考慮した立 体骨組みモデルによる地震時応答解析法を用い た。

解析対象は、被災した道路橋の内、鉄筋コン

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻(正会員) *2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 都市循環システム工学専攻(正会員) *3 名古屋工業大学大学院助手 工学研究科 社会工学専攻 修(工)(正会員) *4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科 社会工学専攻 Ph. D.(正会員) クリート橋脚の段落とし部が曲げ破壊を起こし た千代田大橋 P13 とした。千代田大橋の全体一 般図を図-1に示すが、P13 は十勝川右岸側の 高水敷に架橋されている5 径間 PC 単純T桁を 支持する橋脚であり、張出式小判型橋脚(ケー ソン基礎)より構成される。

解析モデルは、図-2に示すように橋脚とそ れが支持する上部構造重量でモデル化している。 支承と上部工重心位置までは剛部材でモデル化 し、上部工重心位置にP13橋脚が支持する上部 工重量を支持させている。また、剛部材と橋脚 天端はピン結合としている。塑性化すると思わ れる柱部はファイバーモデルでモデル化した。柱基 部はケーソン基礎により完全に固定されている 条件とした。

ファイバー要素には、コンクリートおよび鉄 筋の材料非線形履歴モデルを考慮する。鉄筋お よびコンクリートの材料非線形モデルは、東京 大学コンクリート研究室で開発された鉄筋コン クリートの構成則⁴⁾である図-3に示すような COM3 モデルを用いる。減衰モデルは、要素別 剛性比例減衰により評価した。

応答計算では各時刻における変位履歴と橋脚 面のファイバーモデルにおける各セルの応答ひ ずみ,橋脚断面のせん断力が得られる。橋脚の 損傷度合は,各セル要素に発生する圧縮ひずみ



が終局ひずみに達しているかどうかについて判 定する。せん断に対しては,橋軸方向と橋軸直 角方向の各方向に作用するせん断力と,算定式 から得られるせん断耐力を比較することで,橋 脚柱の地震時のせん断に対する安全性を評価す る。橋脚のせん断耐力は,コン示に基づき,コ ンクリートの寄与分とせん断補強筋の寄与分の 和から求めた。なお,本研究では,解析ツール として UC-WIN/FRAME (3D)を使用した。

3. 対象高架橋

本研究で解析対象とした高架橋の概要を表-1に示す。

対象高架橋は昭和41年に架橋されており,す べての橋脚で鉄筋材料は強度の低い丸鋼である。 また,橋脚の中間付近で断落としを行っていた。







(b)鉄筋

図-3 ファイバーモデルに用いる材料構成則



柱基部より 2.5m 地点の段落とし部の配筋状態 は柱基部の半分の鉄筋量となっており,地震時 の弱点になる可能性が高い構造となっていた。

4. 入力地震動加速度

本研究で用いた地震動加速度の概要を表-2 に示す。また,便宜的に各地震動加速度を表中 に示す通り1~9地震動と称することとする。卓 越振動数は,それほど顕著に表れていないもの についても表記した。

地表面相当の入力地震動加速度について、1 ~4 地震動は工学的基盤面の地震動加速度を推 定し、千代田大橋架橋地点の地盤条件を考慮し た地震応答解析⁵⁾を行うことにより求めた。1 地震動についてはK-NET⁶⁾の地中データを使用 し、地盤の地震応答解析により工学的基盤面の 地震動に変換したものを使用した。2 地震動は、 これまでの国内の主要な強震記録と各地の断層 パラメータを用い推定した^{7),8)}。1~2 地震動は 基盤面での断層方向とその直角方向の成分から 地表面の加速度を算出したため、水平2方向を 同時入力して解析を行った。コン示および道示 の地震動による解析は、橋軸方向、直角方向の 2 方向に対してそれぞれ実施した。

5. 解析結果および考察

各地震動における橋脚天端の変位,断落とし 部のせん断力,コンクリートの最大圧縮ひずみ, 鉄筋の最大引張ひずみの算出結果を表-3に示 す。解析結果によると,コン示や道示の模擬地 震動の方が過去の地震動より非常に大きな応答 となっており,模擬地震動は安全側の設定とな っていることが判った。本稿では,被害状況と 解析結果の整合,橋脚の振動特性と地震動の卓 越振動数の影響,地震動の加速度波形の与える 影響について考察する。

5.1 被害状況と解析結果の整合

推定した1.十勝沖地震動を千代田大橋 P13 橋 脚に作用させた場合の解析結果から推測される 損傷と,実際の損傷結果の比較を表-4に示す。

解析結果によると, 柱基部でかぶりコンクリ ートが剥離するような大きなひずみは発生して いないのに対し, 断落とし部で発生したコンク リートの最大圧縮ひずみは終局ひずみを超えて いた。よって, 解析上においても断落とし部で

千代	田大橋 側	橋梁部(昭和41年竣工)		
橋種		5径間単純PCT桁橋		
橋長		40+40+40+40+40=200m		
地盤種別		Ⅱ種地盤		
支承条件		固定・可動		
	橋脚形式	小判柱式橋脚		
	基礎形式	ケーソン基礎		
下並了	使用材料	コンクリート σ ck=21N/mm2		
나바고		鉄筋 SS400 (丸鋼)		
	鉄筋量	柱基部 : φ22ctc100		
		段落とし部:φ22ctc200		
固右国期	橋軸方向	0.442sec(2.262Hz)		
回行问册	直角方向	0.191sec(5.236Hz)		

表-1 対象構造物の概要

地震友	発生日	最大加速度(gal)		卓越振動数(Hz)	
地展石		LG	TR	LG	TR
1. 十勝沖地震	2003/9/26	263	282	3.381	2.539
2. 兵庫県南部地震	1995/1/17	357	435	0.488	1.453
3. コン示・海洋1		505	505	0.330	0.330
4. コン示・海洋2	/	511	511	1.514	1.514
5. コン示・内陸1	/	921	921	1.343	1.343
6. コン示・内陸2		982	982	0.513	0.513
7. 道示・ I – II – 1(海洋型)	/	363	363	0.378	0.378
8. 道示・ I – II−2(海洋型)	\sim	385	385	0.195	0.195
9. 道示・Ⅰ-Ⅱ-3(海洋型)		365	365	0.366	0.366

表-2 解析地震動の概要

表-3 各地震動における解析結果一覧

	橋脚天端		断落とし部						
地震名	最大変位(mm)		応答せん断力(kN)		コンクリートの最大圧縮ひずみ(μ)		鉄筋の最大引張ひずみ(μ)		
	LG	TR	LG	TR	LG	TR	LG	TR	
1. 十勝沖地震	22.4	18.0	1158	2912	2417	2417	11894	11894	
2. 兵庫県南部地震	84.0	26.5	2316	3403	4926	4926	23525	23523	
3. コン示・海洋1	157.8	41.6	1733	3906	5120	3923	46350	25863	
4. コン示・海洋 2	73.4	32.5	1363	3844	2283	3102	20043	20678	
5. コン示・内陸1	*	193.8	*	3544	*	76701	*	93801	
6. コン示・内陸2	267.8	59.0	1832	4546	15191	7614	75187	40070	
7. 道示・Ⅰ-Ⅱ-1(海洋型)	260.7	13.1	1614	4180	14248	1340	74389	6612	
8. 道示・Ⅰ-Ⅱ-2(海洋型)	*	20.0	*	3266	*	1953	*	11670	
9. 道示・Ⅰ-Ⅱ-3(海洋型)	305.5	15.4	1701	3073	21086	1567	82142	8027	
許容値	_	_	838	1374	2000	2000	8450	8450	

※:コンクリートが破壊状態となり、ファイバーモデルによる解析が収束しなかったケース。

かぶりコンクリートの剥落が発生する結果となった。これは、現場での損傷結果と一致している。また、ファイバーモデルによる段落とし部のひずみ分布を図ー4に示すが、終局ひずみを超える範囲は一部分となっており、現場での曲げ損傷状況が部分的であったことから、解析モデルが曲げ損傷状況を概ね再現できている結果となった。

以上より,曲げ挙動としては概ね被災状況を 再現できる結果となった。しかし,せん断に関 しては,応答せん断力はせん断耐力を超えてせ ん断破壊が発生する結果となっており,実挙動 と矛盾する結果となっている。これに関しては, 小判型断面のせん断耐力算出式が確立しておら ず矩形換算によりせん断耐力を算出しているこ と,および,コンクリート部の材料強度が経年 変化により増加していること等により,計算式 より算出される耐力よりも大きなせん断耐力を

地震動	200 加速度(cm/s ²) 							
損傷状況			解析上での想定される結果					
かぶりコンクリートの剥落		リートの剥落	コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ以上					
軸方向鉄筋のはらみだし		のはらみだし	軸方向鉄筋が降伏応力以上					
段落し部		Fし部	解析結果	限界値				
コンクリートの圧縮ひずみ(μ)			-2417	-2000				
鉄筋の引張ひずみ(μ)			11894	8450				
せん断力(kN)			1060	840				
柱基部		基部	解析結果	限界値				
コンクリートの圧縮ひずみ(μ))圧縮ひずみ(μ)	-512	-2000				
鉄筋の引張ひずみ(μ)			801	8450				
せん断力(kN)			1420 1110					





有していることが理由として考えられるが,そ の明確な原因については今後の課題とする。

以上より,本解析においては,現地の段落と し部の部分的な曲げ破壊被害の状況を概ね再現 できる3次元解析モデルの構築を行うことがで きた。ただし,ケーソン基礎の挙動が橋脚の地 震時挙動にどのような影響を与えるか,および, 地震時に作用するせん断力と鉄筋コンクリート 橋脚のせん断耐力の関係については,今後の課 題である。

5.2 地震動の固有振動数による応答値の影響

橋脚の固有振動数と作用する地震動の固有振 動数との関係に着目して考察する。橋脚の橋軸 方向に着目して解析結果と地震動の固有振動数 を比較すると,最大加速度がほぼ近似している コン示の海洋型地震動作用時に際して,応答値 は3地震動の方が4地震動よりも非常に大きく なっている。それぞれの地震動の周波数領域に おける加速度を図-5~6に示すが,周波数が 卓越する領域は3地震動で0.3~0.8Hz,4地震 動で1.2~2.2Hz となっており,同程度の最大加 速度となっている海洋型地震動においても卓越 振動数が異なっているのが判った。

橋脚の弾性応答時における橋軸方向の固有振 動数は 2.262Hz であるが、橋脚は柱部が塑性化 していくと同時に変形が大きくなり、振動数が 変化していく。3~4 地震動作用時の橋脚天端の 加速度をフーリエ変換した結果を図-7~8に 示すが、橋脚の最大圧縮コンクリートひずみが 許容値を若干越える程度の損傷が発生する4地 震動の場合で,応答加速度から推測できる橋脚 の卓越振動数は 1.0Hz 程度以下となっており、 弾性応答している場合に比べて振動数が小さく なっている, すなわち, 長周期化していると判 断できる。よって,加速度が大きな周波数領域 が 0.3~0.8Hz である 3 地震動において応答値が 非常に大きくなるのは、橋脚の柱部が塑性化し た際の振動数と近似してくるため、共振現象が 起こっているためであると考えられる。

この結果より、本研究の対象橋脚のような弾

性応答時には比較的短周期な挙動を示す鉄筋コ ンクリート橋脚においても、塑性化するレベル の地震動が作用し、塑性化した時の橋脚の振動 が作用地震動の振動と近似したときには、より 大きな応答値が発生することが確認できた。

5.3 地震動の加速度波形が与える影響

最大加速度が同程度の地震動において,内陸 型地震動の場合と海洋型地震動の場合の加速度 波形が橋脚の応答に与える影響を考察する。

最大加速度が同程度の2地震動(内陸型)と 7 地震動(海洋型)地震動のフーリエ解析結果 を図-9~10に示す。先述したとおり,P13橋 脚は塑性化した際には振動数が1Hz以下とな る振動特性を有していることから,加速度が大 きな周波数が1Hz以下となっている7地震動の 応答値が応答値は非常に大きくなっている。

また,7 地震動の加速度波形と橋脚天端の応 答変位波形を図11~12に示す。7 地震動は地震 発生時間においてほぼ同程度の加速度が数秒お きに発生する長周期地震動であるが,橋脚天端 の応答変位は途中から非常に大きな応答値に変





化している。この応答値が大きくなる時間は, 鉄筋が降伏応力度に達し, コンクリートのひず みが増大する時間とほぼ一致している。つまり, 鉄筋が降伏応力に達し, 橋脚の耐力が失われて いくと塑性変形により鉄筋コンクリート橋脚が 長周期化するので, 同程度の地震動が継続して 発生する長周期地震動に対して共振し, 応答値 が大きくなる傾向となることが判った。

5. まとめ

+勝沖地震で被災した河川内橋梁の鉄筋コン クリート橋脚を対象として,実際に生じた地震 動や示方書の模擬地震動を用いて3次元非線形 動的解析を行った。その結果,以下の結論が得 られた。

- (1)当該地域の地盤特性および観測地震動を 用いて算出した地表面地震動により地震 時応答解析を行った結果,曲げ挙動につい ては実被害とほぼ同じように部分的な損 傷が発生するという結果が得られ,3次元 解析モデルの妥当性が確認できた。しかし, 基礎に関する地震時挙動の影響や地震時 に作用するせん断力と橋脚のせん断耐力 の関係については、今後の課題である。
- (2)本研究の対象橋脚のような弾性応答時には比較的短周期な挙動を示す鉄筋コンクリート橋脚においても、塑性化するレベルの地震動が作用し、塑性化した時の橋脚の振動が作用地震動の振動と近似したときには、より大きな応答値が発生することが確認できた。
- (3) 塑性化した鉄筋コンクリート橋脚天端の 応答変位波形によると,鉄筋が降伏応力に 達し,橋脚の耐力が失われていくと塑性変 形により橋脚天端の変位が増大し,橋脚の 挙動が長周期化するので,地震発生時間に おいてほぼ同程度の加速度が数秒おきに 発生する長周期地震動作用時のほうが内 陸型地震動作用時よりも大きな応答値に なることが判った。



図-12 7 地震動作用時の橋脚天端の変位

<参考文献>

- 1) 土木学会: 2003 年に発生した地震によるコン クリート構造物の被害分析, 2003.
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書 耐震性 能照査編, 2002.4
- 3)日本道路協会:道路橋示方書·同解説 I ~ V, 2002.3
- 4)岡村甫,前川宏一,鉄筋コンクリートの非線 形解析と構成則,技報堂出版,1991.5
- 5) 杉戸真太ほか:周波数特性を考慮した等価ひ ずみによる地盤の地震応答解析法に関する一 考察,土木学会論文集 No. 493/III-27, pp. 49-58, 1994. 6
- 6)防災科学技術研究所K-NETホームページ: http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/
- 7)古本吉倫ほか:非定常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討,土木学会第53回年次学術講演会講演概要集,I-B,pp.550-551,1998.10
- 8) 古本吉倫ほか:兵庫県南部地震により被災したコンクリート橋脚地点における強震動シミュレーション,平成11年度自然災害総合研究班中部地区シンポジウム発表論文集,pp. 35-44,1999.12