

中国における橋梁の耐震設計法

葛 漢彬¹, 呉 智深², 張 建東³, 川島 一彦⁴, 高橋 良和⁵

¹正会員 名城大学教授 理工学部建設システム工学科（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501）

²正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）

³正会員 江蘇省交通科学研究院副総工務師（〒211112 中国南京市江寧科学園誠信大道 2200 号）

⁴正会員 東京工業大学教授 理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

⁵正会員 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

2008年5月12日午後2時28分（現地時間）に、中国四川省北部の汶川県を震源とするマグニチュード8の、今世紀最大の直下型大地震が発生した。著者らは、文部科学省特別研究促進費プロジェクト「2008年中国四川省の巨大地震と地震災害に関する総合的調査研究」（研究代表者：小長井和男東京大学教授）の社会基盤施設被害調査チーム（ヘッド：川島一彦東京工業大学教授）として、2008年8月9日-14日に現地入りし、橋梁被害を中心に調査してきた。調査成果の速報として2008年9月18日に行なわれた土木学会サマーシンポジウムで発表している¹⁾。また、最近、調査結果の一部をより詳しく分析してまとめたものが土木学会論文集に投稿されている²⁾。

今回の地震で、橋梁においても、多数の多様な被害が発生した^{3), 4)}。文献5)~7)で幾つかの被害例を報告しているが、本稿では、大きな被害に大きく関係する今回の地震動と中国の橋梁耐震設計法の現状について紹介したい。

2. 汶川地震の概要

汶川地震は龍門山断層帯（Longmen Shan Fault）の破壊によるものであり、主断層、本震位置、余震分布を示すと、図-1のようになる⁸⁾。震央は映秀鎮付近であり、ここから北に汶川、綿竹、北川を経て青川

に至る約300kmの範囲に大きな被害を生じた。龍門山断層は、前、中央、後の3本から構成されており、北東-南西走向の低角逆断層と言われている⁹⁾。断層長さは約270kmに達する。被災地は石灰岩質の急峻な山岳地帯であり、斜面には無数の大規模な土砂崩壊の他、山体自体の崩壊も生じている。また、河川も激流であり、総じて自然条件の極めて厳しい地域である。

中国では5カ年計画に基づく全国強震観測ネットが構築されてきており、汶川地震直前の2008年5月からこの観測ネットが稼働開始し始めた。このため、汶川地震では最大加速度が10 gal以上の記録が500成分以上観測され、このうち、16成分は最大加速度が400 gal以上の記録である¹⁰⁾。四川省においては211の観測点が存在する。

このうち、代表的な汶川臥龍台（Wenchuan Wolong Station）及び什邡八角鎮台（Shenfang Bajiao Station）で観測された加速度記録を図-2に、また、これらの加速度応答スペクトル（減衰定数0.05）を図-3に示す。

これらの観測点位置は図-1に示すとおりである。臥龍台観測点は汶川県にあり、震央から19km、断層から19kmの地点に、また、八角鎮台観測点は什邡市にあり、震央から67km、断層から20kmの地点に位置する。

汶川臥龍台記録は継続時間が60s以上と長く、2つの波群がある。これは断層の破壊過程に基づくものと考えられる。最大加速度はNS方向に957.7 cm/s²、

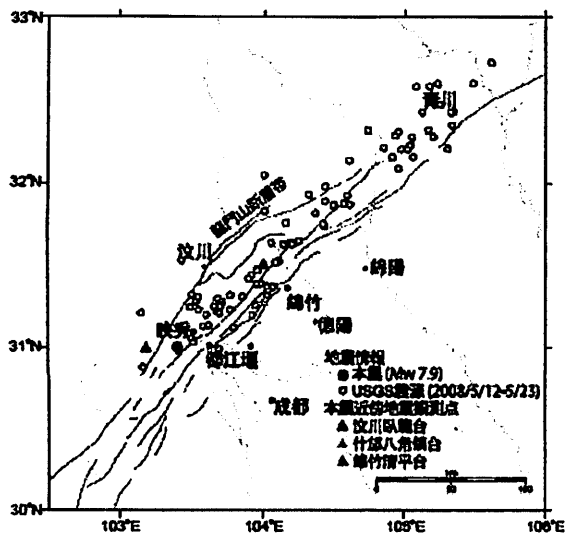


図-1 四川と余震分布（断層は文献 8）による）

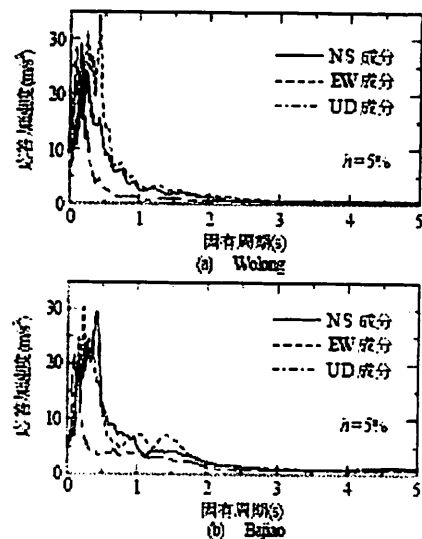


図-3 加速度応答スペクトル

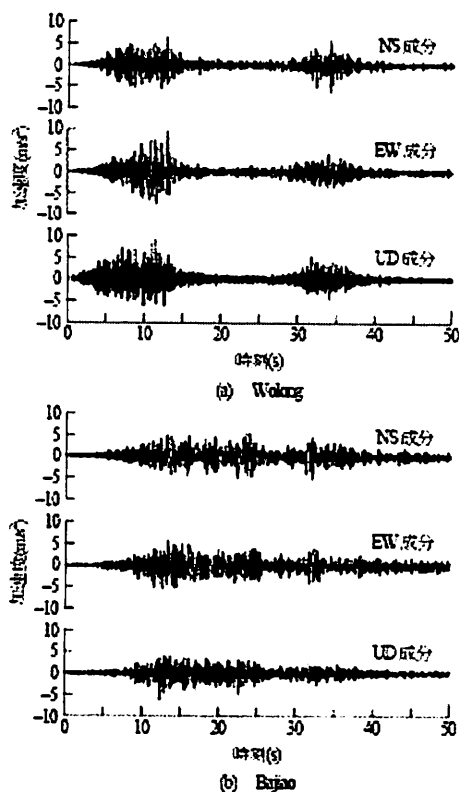


図-2 加速度記録

EW方向に 652.9 cm/s^2 , UD方向に 948.1 cm/s^2 であり、最大加速度としては、今回の地震で観測された中では最も大きい。加速度応答スペクトルのピーク値はNS, EW成分とも約 30 m/s^2 , UD成分には約 40 m/s^2 であり、ピーク周期はNS成分には 0.2 s , EW成分には 0.4 s , UD成分には 0.1 s である。ただし、短周期成分

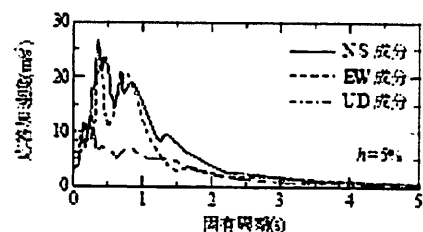


図-4 1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の加速度応答スペクトル

が卓越した記録であり、周期 1 s になると、加速度応答スペクトル値は 5 m/s^2 程度以下に低下する。地盤条件がわからないが、岩盤上もしくはこれに近い条件で観測された記録と推定される。最大速度はNS方向に 0.515 m/s , EW方向に 0.417 m/s , UD方向に 0.304 m/s である。

八角鎮台観測点の記録は汶川臥龍台観測点のように波群が2つに分かれていないが、継続時間はともに 60 s 以上と長く、汶川臥龍台観測点記録と同様に、短周期成分が卓越した記録である。

図-4には、上記の記録との比較のため、1995年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台で得られた記録の加速度応答スペクトルを示す。神戸海洋気象台で得られた記録の最大加速度は、上記の3地点での記録と同程度であるが、通常規模の構造物の応答に影響を与える $0.3 \sim 1 \text{ s}$ 範囲の加速度応答スペクトルレベルは神戸海洋気象台で得られた記録の方が上記の

3地点での記録よりも大きくなっている。ただし、地震動強度の比較は、地盤による増幅特性等を考慮してさらに慎重に検討する必要がある。

3. 中国の橋梁耐震設計

中国では交通部によって 1989 年に作成された基準 (JTJ004-89) が 1990 年以降、道路橋の耐震設計に適用されている¹¹⁾。この基準は支間長 150m 以下の RC 桁橋、PC 桁橋、石造・RC アーチ橋を適用範囲としたものである。桁橋を例にとると、橋脚の慣性力を考慮する場合とこれを考慮しない場合 (フレキシブル橋脚に支持された場合) に分けて慣性力が規定されており、橋脚の慣性力を考慮しない場合には、橋脚の質点 i に作用する水平地震力 E_{ihp} は次式によって求めることとされている。

$$E_{ihp} = C_i C_z K_h \beta_1 \gamma_1 X_{li} G_i \tag{1}$$

ここで、 C_i : 重要性修正係数、 C_z : 総合影響係数、 K_h : 水平地震係数、 β_1 : 動的応答係数、 γ_1 : 1 次モード寄与率、 X_{li} : 質点 i の相対水平変位、 G_i : 質点 i の重量である。ここで、1 次モード寄与率 γ_1 は次式で与えられる。

$$\gamma_1 = \frac{\sum X_{li} G_i}{\sum X_{li}^2 G_i} \tag{2}$$

水平地震係数 K_h は基本烈度に応じて表-1 のように与えられている。ここで基本烈度とは中国独自の震度階であり、基本烈度が 7, 8, 9 となるにつれて水平地震係数 K_h は倍々に増加する。

最大加速度の区分は図-5 に示すように GB 18306-2001 中国地震動参数区划図¹²⁾において定められていた。被災地では基本烈度は 7 とされていたが、今回の地震後に改定された新しい耐震設計細則 JTG/T B02-001-2008 (2008 年 10 月 1 日から発効) には 8 に変更された¹³⁾。

一方、式(1)の重要性修正係数 C_i は表-2 のように与えられている。重要度による差が大きく設定されているのが特徴である。

また、動的応答係数 β_1 は 4 種類の地盤種別 (I~IV 種地盤) ごとに、次式のように与えられている。

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.3 \leq 2.25 \times (0.2/T) \leq 2.25 & \text{Group I} \\ 0.3 \leq 2.25 \times (0.3/T)^{0.98} \leq 2.25 & \text{Group II} \\ 0.3 \leq 2.25 \times (0.45/T)^{0.95} \leq 2.25 & \text{Group III} \\ 0.3 \leq 2.25 \times (0.7/T)^{0.9} \leq 2.25 & \text{Group IV} \end{cases} \tag{3}$$

ここで、 T は固有周期である。

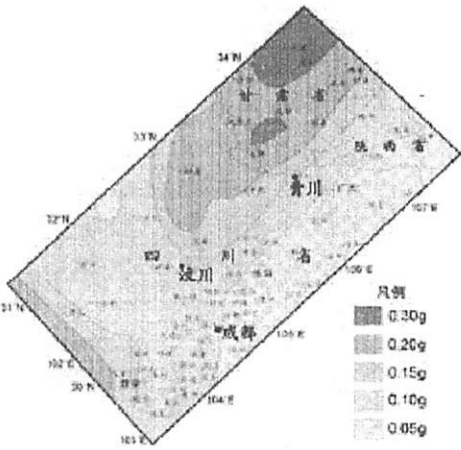


図-5 設計震度マップ (文献 12)に加筆)

表-1 水平地震係数 K_h

基本烈度	7	8	9
水平地震係数 K_h	0.1	0.2	0.3

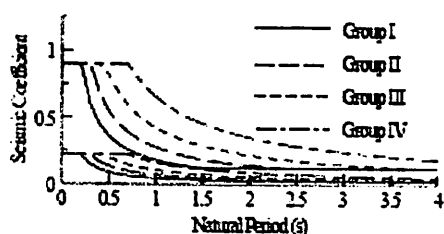
注) 基本烈度は 50 年内に発生する確率が 10~13% の震度階を表す。

表-2 重要性修正係数 C_i

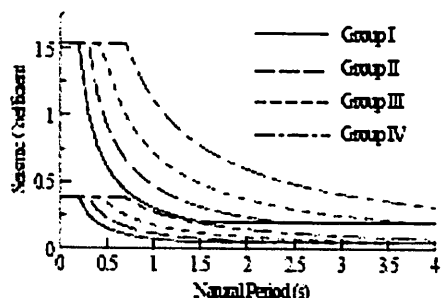
道路の種別	重要性修正係数 C_i
高速道路、耐震上重要な 1 級道路の橋	1.7
高速道路、耐震上標準的な 1 級道路の橋、耐震上重要な 2 級道路の橋、2 級及び 3 級道路の橋台	1.3
2 級道路、耐震上重要な 3 級道路の橋、4 級道路上の橋台	1.0
耐震上標準的な 3 級道路の橋、耐震上重要な 4 級道路の橋	0.6

表-3 総合影響係数 C_z

橋梁、橋脚及び橋台形式		橋脚高さ H(m)		
		$H < 10$	$10 \leq H < 20$	$20 \leq H < 30$
桁橋	変形しやすい橋脚	0.3	0.33	0.35
	剛性の高い橋脚	0.20	0.25	0.30
	杭基礎橋脚	0.25	0.30	0.35
	橋台	0.35		
アーチ橋		0.35		



(a) 重要性修正係数 $C_i=1.0$ の場合



(b) 重要性修正係数 $C_i=1.7$ の場合

図-6 設計震度 $C_i K_h \beta_1$ (小さい値は基本烈度 7 の場合, 大きい値は基本烈度 9 の場合)

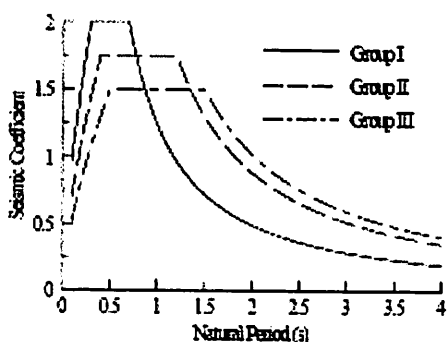


図-7 日本における橋梁の設計震度
(タイプ II 地震動)

総合影響係数は次式で定義されており, 表-3 のように与えられている.

$$C_z = \frac{1}{\sqrt{z\mu - 1}} \quad (4)$$

ここで, μ は応答じん性率, z は係数である.

以上より, 基本烈度が 7 及び 9 の場合に対して, 重要性修正係数 C_i を 1.0 とした場合と 1.7 とした場合の 2 ケースにつき式(1)及び式(3)から設計震度 $C_i K_h \beta_1$ を求めると, 図-6 のようになる. これによれば, 基本烈度が 7 の場合には, 設計震度の最大値は $C_i=1.0$ とすると 0.225, $C_i=1.7$ とすると 0.385 となる. これに総合影響係数 C_z として, たとえば $C_z=0.3$ を考慮すると, 橋梁の非線形性を考慮した設計震度は $C_i=1.0$ の場合には 0.0675, $C_i=1.7$ の場

合には 0.115 となる.

JTJ004-89 が使用され始める前の耐震設計においてどの程度の地震動が使用されていたか等, 不明な点がいろいろあるが, 仮に今回の地震で被災した橋梁の多くがこの程度の地震力で設計されていたとすると, 図-2, 図-3 に示した強力な汶川地震による地震動に対して耐震性を確保するためには, 0.225 ~ 0.385 の設計震度は小さ過ぎたと考えられる. なお, 基本烈度が 9 であれば, 設計震度の最大値は $C_i=1.0$ の場合には 0.9, $C_i=1.7$ の場合には 1.54 となる.

参考までに日本で使用されているタイプ I 及び II の設計震度を示すと図-7 のようになる. ただし, 重要度は B 種 (重要な橋) としている. 汶川地震によって生じた地震動に対して設計するためには, 少なくとも図-7 レベルの地震力が必要だと考えられる.

耐震照査に関しては, 極限状態設計法または許容応力法 (部品) を用いることが規定されている. 極限状態設計法では, 鉄筋コンクリート構造の場合, 次式で照査されるようになっている.

$$S_d = \gamma_b R_d \quad (5)$$

ここで, S_d は地震荷重などによる構造物の応答値, R_d は構造物の限界値である. 応答値については, 橋脚は応答スペクトル法, 橋台は静的方法より求まるが, 複雑な橋梁や 30m を超える橋脚は時刻歴応答解析を実施するようになっている. なお, 限界値については, 基準 JTJ023-85 によるとされている.

一方, 構造細目は基本烈度ごとに, 単純支持梁の桁掛かり長, 桁間や桁と橋台間の緩衝措置といった簡単な規定があるが, 落橋防止構造や制震部材の利用に関しては特に規定がない.

なお, 文献 14) によると, 鉄筋コンクリート構造の耐震設計に関する規定は日本や欧米に比べて極めて不十分である. 例えば, フレキシブル橋脚の場合の縦方向配筋率は 0.4% 以上, 帯筋は間隔 10cm 以上かつ直径 8mm 以上で溶接して連結, スータラップ筋は 3% 以上などと規定しているが, せん断破壊型柱の配筋に関する規定がない. また, 上部構造, 上部構造と柱との接合およびシャーリンクに関する規定も全くない. 基礎設計も液状化のことを触れていてだけで, 設計そのものの規定はない.

ただし, 今回の地震後に改訂された新しい基準¹³⁾では, 次の内容の修正や追加がされている.

- 1) 適用範囲を広げて、複雑な橋梁の耐震設計の内容を加えている。斜張橋、吊橋およびスパンが150m以上の桁橋とアーチ橋に対して、設計の基本原則を明示し、関連する規定が与えられている。また、免震・制震についても触れている。
- 2) 旧基準での保有耐力照査のみから、耐力と変形の両面から照査するように変更している。また、単一の震度法設計から2段階設計法を採用している。
- 3) 地盤、基礎の規定を細分化している。
- 4) 水平方向設計加速度応答スペクトルを修正し、5秒までを10秒までと拡大している。また、地盤別係数、減衰調整係数を導入し、鉛直方向設計加速度応答スペクトルを新たに加えている。ただし、総合影響係数が削除された。
- 5) じん性設計と保有性能の確保に関する規定と関連する構造細目を設けている。
- 6) 耐震解析のモデル化と解析方法についても新たに加えている。
- 7) 耐震デテールの規定を修正している。

4. あとがき

被災地は、中国基本烈度7を想定して耐震設計されていたが、本論文に示したように、重要性修正係数 $C_1=1.0$ とすると、総合影響係数 C_2 で低減前の設計震度は0.225程度であり、これに総合影響係数 C_2 を約0.3程度と見込むと、設計震度は0.1以下となる。断層近傍地震動の加速度応答スペクトルに基づくと、0.1程度の設計震度に相当する設計地震力では、事実上耐震性から断面決定された部材はきわめて限られていたと考えられる。このため、今回の地震のように、強烈な地震動の作用を受けると、橋脚等主要構造部材に大きな塑性変形が生じ、仮に以下に示す部材のじん性が確保されていたとしても、耐震性を確保することは困難であったと考えられる。

一方、現行の耐震設計基準では構造細目的にもじん性の確保や落橋防止構造等の配慮が十分ではなかったことも、比較的最近建設された橋や建設中の橋にも甚大な被害を生じた原因の1つであると考えられる。

新しい基準に関しては、今後詳細に検討し、別の

機会で紹介したい。

謝辞：本調査は文部科学省科学研究費補助金（特別研究推進費、代表：小長井和男東京大学教授）の一環として実施されたものである。調査にあたり、多数の方々のご支援、ご助力を得た。特に、中国地震局工程力学研究所の王自發所長、李山有教授、林均岐教授、西南交通大学の李喬主任教授、鄭史雄教授、東南大学の劉釗教授および現地地震局の方々をはじめとする中国研究者のご協力が無ければ調査が実施できなかったことを記し、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Ge, H. B., Kawashima, K., Takahashi, Y., Wu, Z.S. and Zhang J.D.: Inspection Activities on Damaged Bridges in Seismic Region of Wenchuan Earthquake, Keynote Lecture, Proc. of The 10th International Summer Symposium, JSCE, September 18, 2008, Tokyo, Japan, pp.5-8.
- 2) 川島 一彦, 高橋 良和, 葛 漢彬, 呉 智深, 張 建東: 2008年四川汶川地震による橋梁の被害, 土木学会論文集へ投稿中。
- 3) General Introduction to Engineering Damage during Wenchuan Earthquake, Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 28 Supplement, ISSN 1000-1301, 2008.
- 4) Li Qiao and Zhao Shichun (editors): Analysis of Seismic Damage of Engineering Structures in Wenchuan Earthquake, 2008.
- 5) 川島 一彦, 高橋 良和, 呉 智深, 葛 漢彬, 張 建東: 中国四川地震による廟子坪大橋及び小魚洞橋の被害, 第12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, 2009年1月。
- 6) 高橋 良和, 川島 一彦, 呉 智深, 葛 漢彬, 張 建東: 中国四川地震による百花大橋及び回瀾立交橋の被害, 第12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, 2009年1月。
- 7) 呉 智深, 葛 漢彬, 張 建東, 高橋 良和, 川島 一彦: 中国四川地震におけるアーチ橋の

- 被害, 第 12 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, 2009 年 1 月.
- 8) Densmore, A.L., Ellis, M.A., Li, Y., Zhou, R., Hancock, G.S. and Richardson, N.: Active Tectonics of the Beichuan and Pengguan Faults at the Eastern Margin of Tibetan Plateau, *Tectonics*, Vol.26, TC4005, 2007.
- 9) Lekkas, E.L.: Wenchuan Earthquake, Sichuan, China-Geotechnical Regime and Damage Macro-Distribution, Proc. 14th WCEE, Paper No. S31-015, Beijing, China.
- 10) Li, X. et al.: Introduction and Preliminary Analysis of Strong Motion Recordings from the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of China, Proc. 14th WCEE, Paper No. S31-052., Beijing, China.
- 11) 中華人民共和國交通部：公路工程抗震設計規範 JTJ004-89, 人民交通出版社, 1998.
- 12) 國家質量技術監督局：中國地震動參數區劃圖 GB 18306-2001, 中國標準出版社, 2001.
- 13) 中華人民共和國交通部：公路橋梁抗震設計細則 JTJ/T B02-01-2008, 人民交通出版社, 2008.
- 14) Fan, Li-chu and Wang, Jun-jie: Design Code for Earthquake-Resistance of Bridges: Current Situation and Trend, *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol.21, No.2, pp.70-77, 2001 (in Chinese).