

地震動および断層変位に対する 連続ラーメン橋と連続桁橋との耐震性能の比較検討

吉川 卓¹・梅本 洋平²・浦川 洋介³・角本 周⁴

¹正会員 工修 オリエンタル白石㈱ 施工・技術本部 土木技術部 (〒102-0093 千代田区平河町 2-1-1)

²正会員 工修 オリエンタル白石㈱ 施工・技術本部 土木技術部 (〒102-0093 千代田区平河町 2-1-1)

³正会員 博(工) オリエンタル白石㈱ 福岡支店 施工・技術部 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 4-2-31)

⁴正会員 博(工) オリエンタル白石㈱ 福岡支店 施工・技術部 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 4-2-31)

1. はじめに

橋の構造形式の選定においては、現在のところ、地震動のみを地震による作用として耐震性能を比較するのが一般的である^{1), 2)}。一方、多数の内陸活断層が存在する我が国においては、数mに及ぶ断層変位が想定されている断層帯もあることから^{3), 4)}、これらを横切る橋の構造形式を選定する際には、断層変位に対する耐震性能にも配慮することや、断層変位を吸収する機能を考慮しておくことが重要であると考えられる^{5)~7)}。しかしながら、断層変位に対する耐震性能については、構造形式毎にそれぞれ検討されている事例はあるが^{8)~11)}、同一諸元に対して比較した事例は少ない。

橋の構造形式のうち、多径間連続コンクリート橋には

連続ラーメン橋と連続桁橋とがあるが、不静定次数が高い連続ラーメン橋の方が地震動に対する耐震性能は優れているといわれており、固定支間長に対する橋脚高の比率が15%程度以上あれば、連続ラーメン橋が選定される傾向にある¹²⁾。しかしながら、断層変位に対する耐震性能を向上させるには、その変位を吸収する機能を支承部に設けられる連続桁橋を選定することも考えられる⁸⁾。

そこで、本検討では、同一諸元の連続ラーメン橋および連続桁橋に対して、同一鋼材配置で耐震性能にどのような相違があるかを、地震動に対する耐震性能および断層変位に対する耐震性能の2点から比較した。ここで、検討は面内方向の地震動および断層変位を対象とし、地震動に対しては非線形動的解析を用い、断層変位に対しては強制変位漸増解析を用いて行った^{13), 14)}。

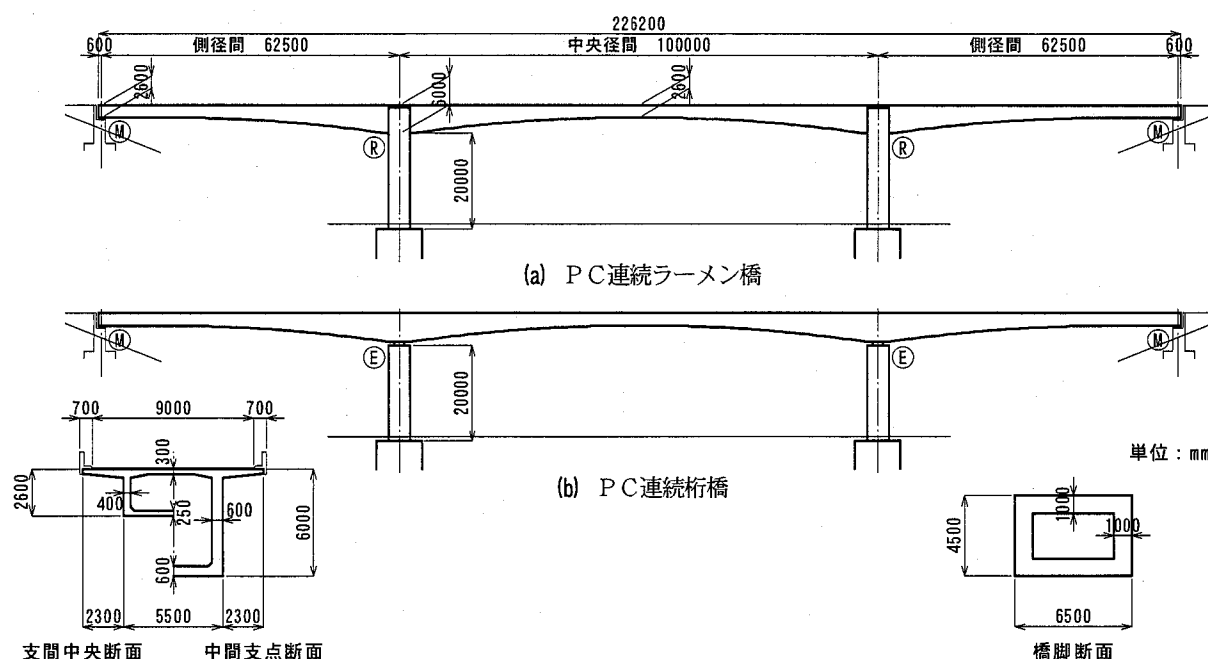


図-1 検討対象としたPC連続ラーメン橋およびPC連続桁橋

2. 検討対象橋および解析モデル

(1) 検討対象橋

検討には、中央径間 100m、橋脚高 20m の PC 3 径間連続ラーメン橋および PC 3 径間連続桁橋を用いた。ここで、桁高や径間長の比率等は、既往の同形式の橋の平均値を用いて設定している¹²⁾。また、橋脚高は、PC 連続ラーメン橋における固定支間長と限界橋脚高との比率を考慮して設定している¹²⁾。

検討対象とした橋の一般図を図-1に、検討に用いた橋脚の鉄筋配置を図-2に示す。ここで、本検討では、橋脚の曲げ耐力が地震動および断層変位に対する耐震性能に与える影響を把握するために、軸方向鉄筋の径を D32、D38 および D51 の 3 ケースで設定し、橋脚全高で一律の鉄筋配置とした。また、主桁には、常時に対する要求性能を連続ラーメン橋および連続桁橋のいずれにおいても満足する PC 鋼材および鉄筋を配置した¹⁵⁾。

なお、耐震設計上の地盤種別はⅠ種地盤とし、橋脚基礎は深礎杭基礎等で十分剛に支持されると仮定した。

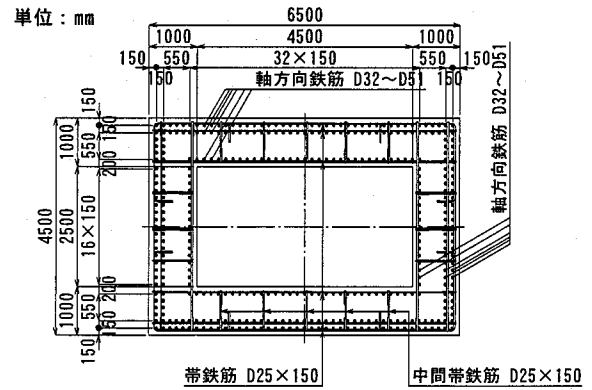


図-2 橋脚断面と鉄筋配置

(2) 解析モデル

本検討では、面内方向の地震動および断層変位を対象としたことから、解析モデルには図-3に示す 2 次元骨組モデルを用いた。ここで、断層変位そのものに伴う応答は一方方向ではあるが、地震動に対する解析モデルと断層変位に対する解析モデルは同一モデルを用いることとし、連続ラーメン橋では橋脚上下端に、連続桁橋では橋

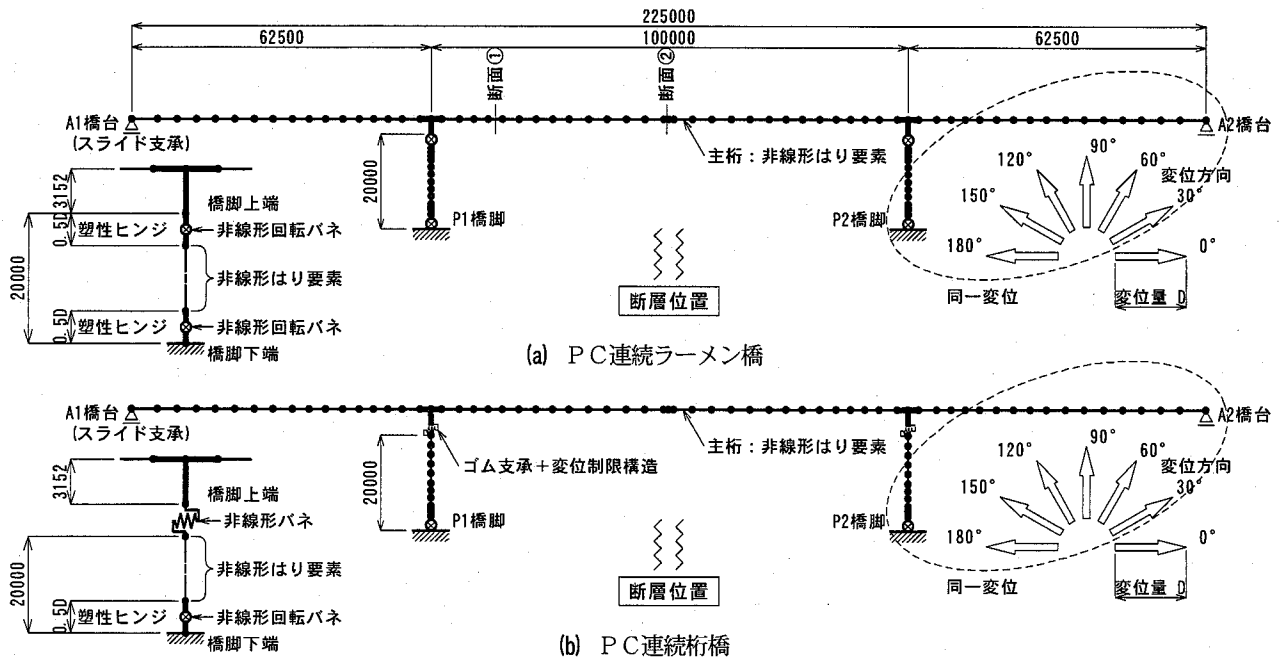


図-3 解析モデルおよび想定した断層変位

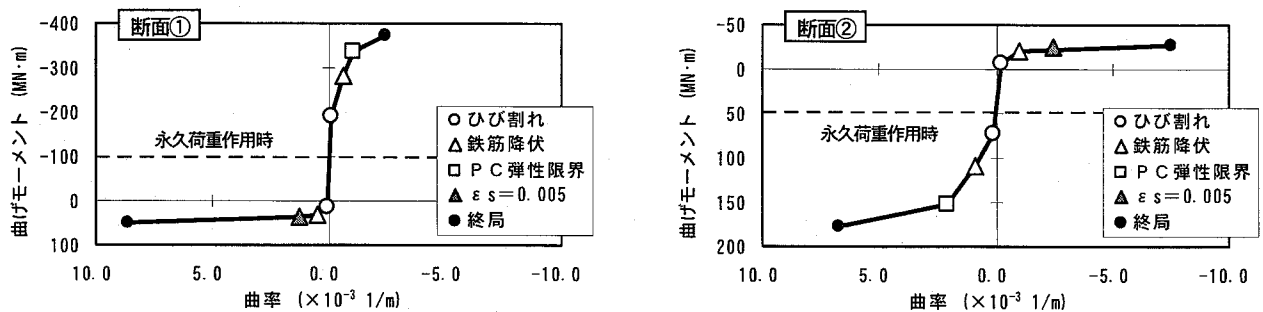


図-4 主桁の M-φ 骨格曲線

表-1 各構造形式のモデル条件および特性

構造形式	中間橋脚の結合条件		固有周期 T_1 (s)	保有耐力		
	剛性 (kN/m)	変位制限 (m)		D32 配置	D38 配置	D51 配置
ラーメン橋	剛結合	—	0.605	0.73	0.96	1.52
連続桁橋	A	ピン結合	0.608	0.38	0.49	0.77
	B	1.090×10^5	1.201			
	C	0.420×10^5	1.801			

脚下端に塑性ヒンジ (0.5D) を考慮した非線形回転バネを設けた。また、塑性ヒンジ領域以外の橋脚および主桁は、非線形はり要素でモデル化した。

橋脚の非線形回転バネおよび非線形はり要素には、剛性低下型の完全トリリニアモデル (Takeda モデル, $\alpha = 0.5$) を用いた。また、断層変位に対する橋脚断面の終局限界は、タイプII地震動に対して用いられる終局限界と同一とした¹⁾。なお、横拘束筋の体積比は0.015である。

主桁の非線形はり要素には、図-4に示す非線形弾性モデルを用いた。ここで、引張縁側にP C鋼材が配置されていない曲げ方向に対しては、最外縁の鉄筋ひずみが0.005に達するイベントも骨格曲線に組み込んでいる¹⁶⁾。また、主桁断面の終局限界は、最外縁のコンクリート圧縮ひずみが0.002に達する場合またはP C鋼材のひずみが0.035に達する場合としている¹⁾、¹⁷⁾。ただし、この終局限界は交番载荷の場合に対する指標であり、模型実験の結果では、一方向载荷の場合にはより大きな曲率まで最大耐力は維持されている¹⁷⁾。

なお、断層変位に対しては、その変位方向によっては部材の軸力が大きく変動するが⁸⁾、本検討では橋脚および主桁ともに軸力変動が骨格曲線へ与える影響は考慮していない。また、強制変位漸増途中に断面が終局限界を超える場合でも、終局限界前の剛性を維持するものとして解析した。

本検討で設定した各構造形式のモデル条件および特性を、表-1に示す。連続桁橋では、中間橋脚での橋脚と主桁との結合条件として、多点固定支持の場合と弾性支持の場合の計3ケースを設定した。ここで、弾性支持の場合の支承部の水平剛性は、多点固定支持の場合に対して橋軸方向1次振動モードの固有周期が2倍および3倍となる値を設定した。また、支承部の諸元を後述する地震動に対する最大変位量を元に設定し、支承のせん断ひずみが破断ひずみに達する前に変位制限構造により水平変位を拘束するものと仮定した。

端支点の支承部のモデルは、連続ラーメン橋および連続桁橋ともに可動支承を想定し、橋軸方向および回転方向を可動、鉛直方向を固定とした。なお、本検討では、構造形式の相違点として中間橋脚の結合条件に着目していることから、端支点の支承部の破壊等はモデル化していない。

表-2 想定した地震規模と断層変位量

マグニチュード M	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
想定断層変位 (m)	0.400	0.800	1.600	3.200	6.400

(3) 想定する地震動および断層変位

本検討で用いた地震動は、道路橋示方書に規定されているI種地盤に対するタイプIおよびタイプIIの標準加速度応答スペクトルに適合するように振幅調整した3波形 (標準波) である。また、断層変位については、図-3に示すように断層が中央径間内に位置するものとし、P2橋脚基礎およびA2橋台が同一方向・同一量で変位するものとした。ここで、変位量は、松田による提案式 (I) に基づき¹⁸⁾、¹⁹⁾、各マグニチュードに対して表-2の変位量が生じるものとした。

$$\log D = 0.6M - 4.0 \quad (I)$$

ここで、 D は断層変位量、 M はマグニチュードである。

3. 地震動に対する耐震性能

検討した各構造形式の固有振動特性として、全断面有効剛性を用いて算出した橋軸方向1次振動モードのモード形状を図-5に示す。連続ラーメン橋および多点固定支持した連続桁橋では、橋脚の橋軸方向への変形とともに主桁が鉛直方向にも変形するモード形状を示すが、弾性支持した連続桁橋では、支承の橋軸方向への変形が卓越したモード形状となる。非線形動的解析では、この固有振動モードから、各等価減衰定数を主桁5%、橋脚2%、支承3%としてひずみエネルギー比例減衰でモード減衰を算出し、塑性ヒンジ回転バネに過大な減衰力が作用しないように、Rayleigh 減衰のパラメータを設定した ($f_2 = f_1 \times 10$, $h_2 = h_1$)。

地震動に対する非線形動的解析結果の一例として、中間橋脚の支承の最大変位量を表-3に示す。また、上部構造の最大応答変位を図-6に、橋脚下端の塑性ヒンジの最大回転角を図-7に示す。ここで、3波平均値は、最大・最小値平均の値の最大絶対値である。

中間橋脚の支承の最大移動量は、橋脚の耐力が増加するほど増加している。これは、橋脚の耐力が増加したことで橋脚の変形量およびエネルギー吸収量が減少したためである。

耐震性能の評価指標となる橋脚下端の塑性ヒンジの回転角塑性率は、タイプⅠ地震動に対しては、連続ラーメン橋が連続桁橋に比べて小さく、今回の検討ケースでは塑性化していない。一方、タイプⅡ地震動に対しては、連続ラーメン橋は連続桁橋Bと同程度の塑性率が生じており、橋軸方向1次振動モードの固有周期がより長い連続桁橋Cに比べて大きい塑性率となっている。

一般的には、地震動に対する耐震性能は連続桁橋よりも連続ラーメン橋の方が優れているといわれているが、今回検討したような橋脚高が限界橋脚高に近く低い場合には、短周期が卓越するタイプⅡ地震動に対しては橋軸方向1次振動モードを長周期化させた連続桁橋の方が耐震性能が優れているとも考えられる。

表-3 中間橋脚支承の最大変位量 (3波平均)

	タイプⅠ地震動			タイプⅡ地震動		
	D32	D38	D51	D32	D38	D51
連続桁B	0.142 m	0.170 m	0.214 m	0.130 m	0.173 m	0.227 m
連続桁C	0.339 m	0.408 m	0.447 m	0.282 m	0.306 m	0.328 m

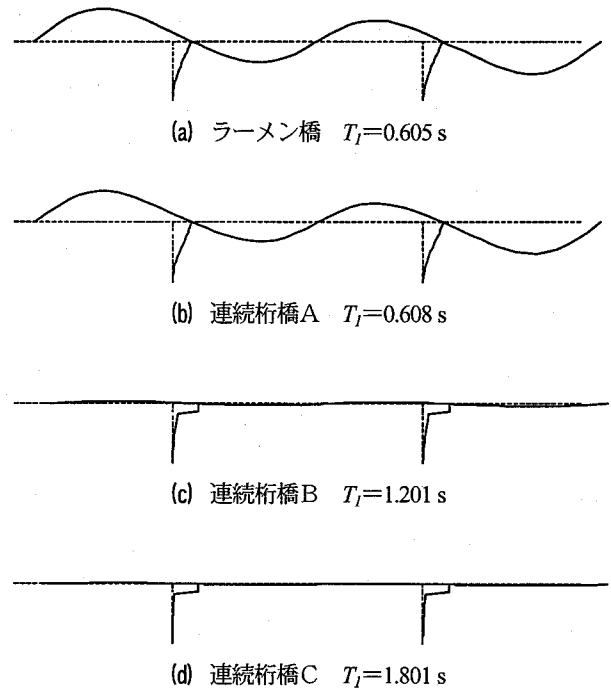
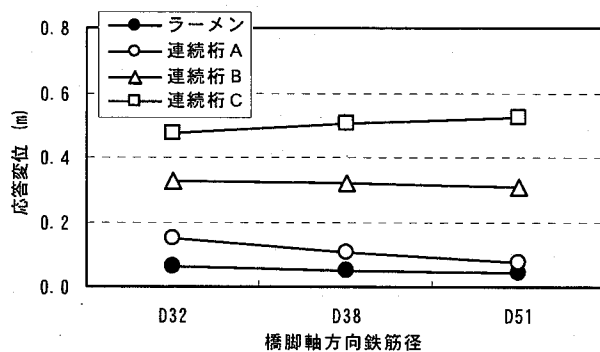
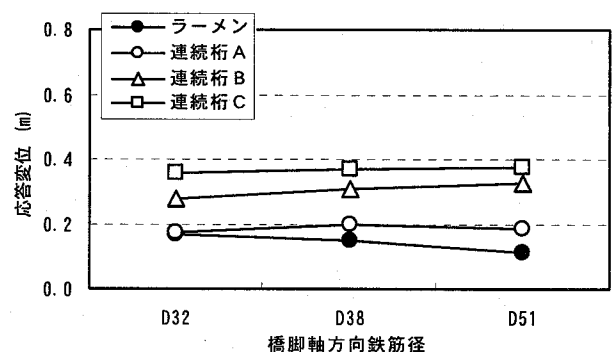


図-5 固有振動モード (全断面有効剛性)

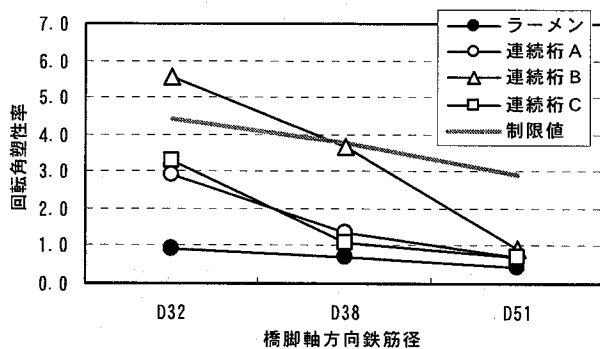


(a) タイプⅠ地震動

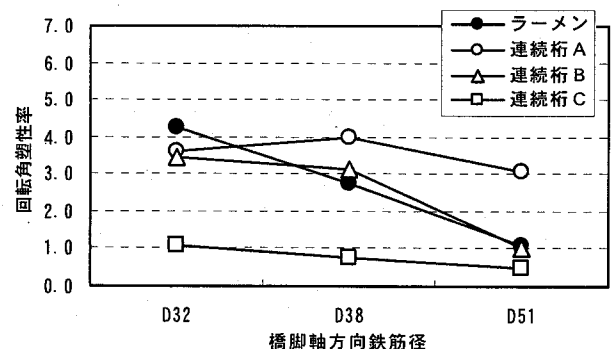


(b) タイプⅡ地震動

図-6 構造形式と地震動による上部構造の最大応答変位 (3波平均値)



(a) タイプⅠ地震動



(b) タイプⅡ地震動

図-7 構造形式と地震動による橋脚下端の塑性ヒンジ最大回転角 (3波平均値)

4. 断層変位に対する耐震性能

断層変位を想定した強制変位漸増解析の結果の一例として、変位方向30°に対する変形図を図-8に示す。橋

軸方向の変位が卓越する断層変位方向30°の場合においても、連続ラーメン橋では連続桁橋に比べて主桁に顕著な曲げ変形が生じている。また、弾性支持した連続桁橋の振動モードでは、支承の橋軸方向への変形が卓越し

ていたが、断層変位に対する変形では、橋脚の橋軸方向への変形の比率が高くなっている。

断層変位量と P1 橋脚下端の塑性ヒンジ回転角との関係を、図-9 および図-10 に示す。連続ラーメン橋や多点固定支持した連続桁橋では、断層変位の増加にほぼ比例して回転角が増加し、変位方向 0° の場合ではマグニチュード 7.0 相当の断層変位量で終局回転角に達する。一方、弾性支持した連続桁橋では、ある程度の断層変位量までは回転角がほとんど増加しないが、その後は、連続ラーメン橋や多点固定支持した連続桁橋と同じ比率で回転角が増加している。また、橋脚の耐力（鉄筋量）を増加させた場合は、弾性支持した連続桁橋において、回転角が増加し始めるまでの断層変位量が大きくなる結果となっている。

図-11 に、断層変位方向と橋脚下端の塑性ヒンジの回転角との関係を示す。なお、回転角としては、P1 橋脚および P2 橋脚それぞれの回転角の大きい方の値を示している。変位方向 0° および 180° の場合を除き、連続ラーメン橋の塑性ヒンジの回転角は、連続桁橋の塑性ヒンジの回転角より大きく、断層変位方向に鉛直成分が増加するほどその差が顕著になる。また、橋脚の耐力（鉄筋量）を増加させた場合、弾性支持した連続桁橋の方が連続ラーメン橋や多点固定支持した連続桁橋よりも回転角が低減される傾向にある。

図-12 に、断層変位方向と中間橋脚の支承変位量との関係を示す。連続桁橋 B では支承変位量 300 mm で、連続桁橋 C では支承変位量 600 mm で変位を拘束するようにモデル化しているが、連続桁で橋脚に D51 を配置した

※変形量を 10 倍に拡大

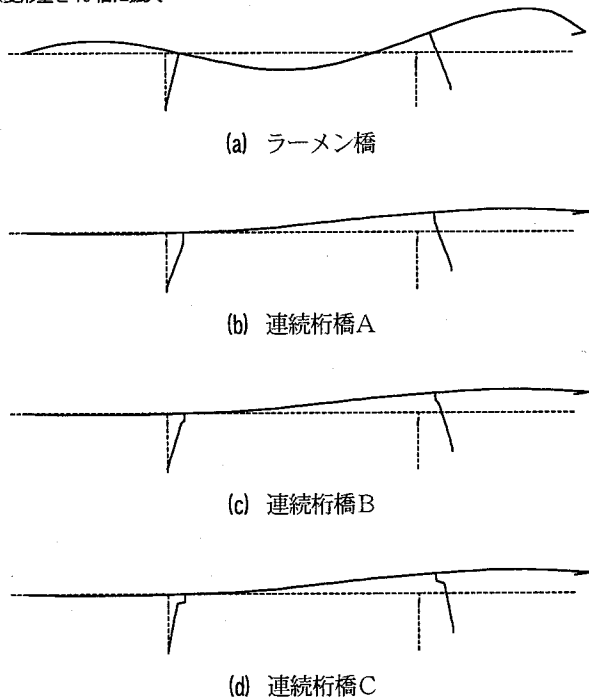
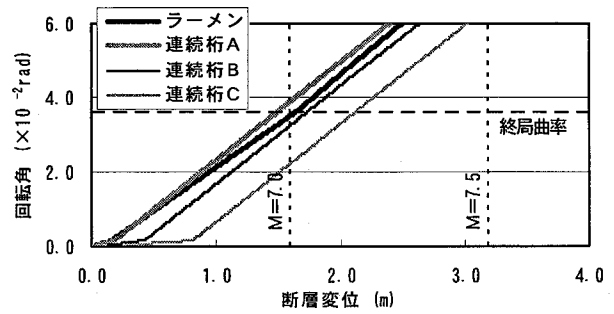
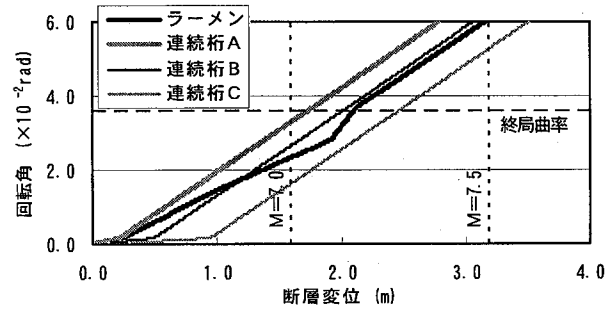


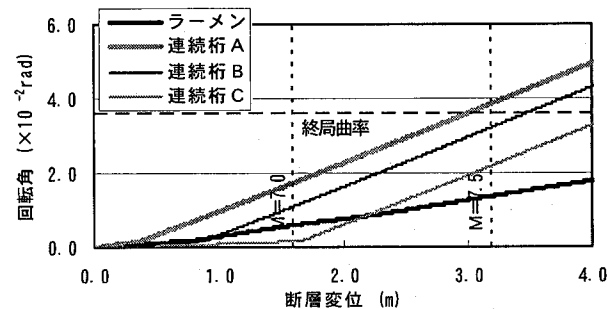
図-8 変形図 (D32 配置, 変位量 1.6m, 変位方向 30°)



(a) 変位方向 0° , D32 配置

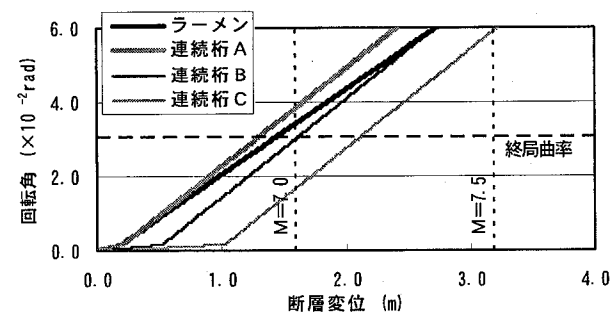


(b) 変位方向 30° , D32 配置

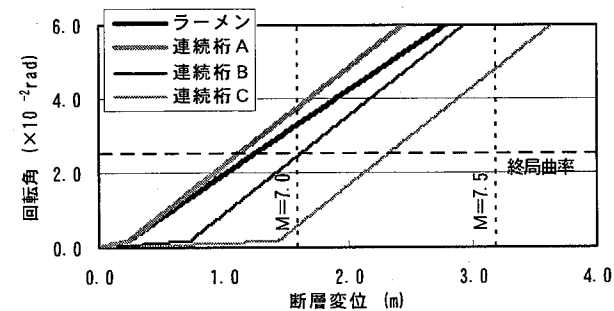


(c) 変位方向 60° , D32 配置

図-9 断層変位量と P1 橋脚下端塑性ヒンジ回転角 (1)

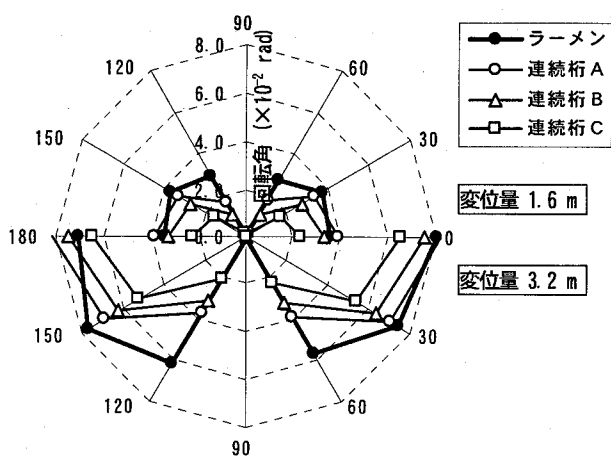


(a) 変位方向 0° , D38 配置

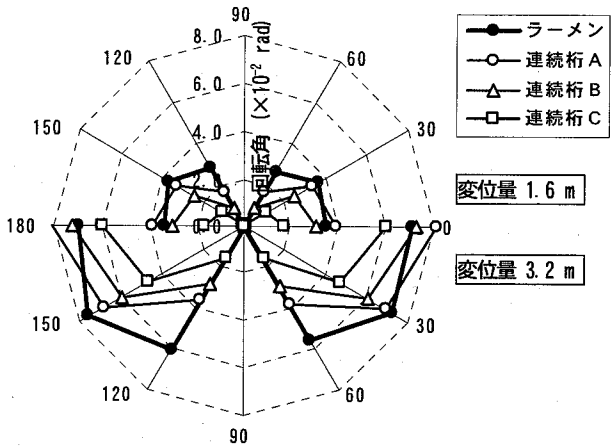


(b) 変位方向 0° , D51 配置

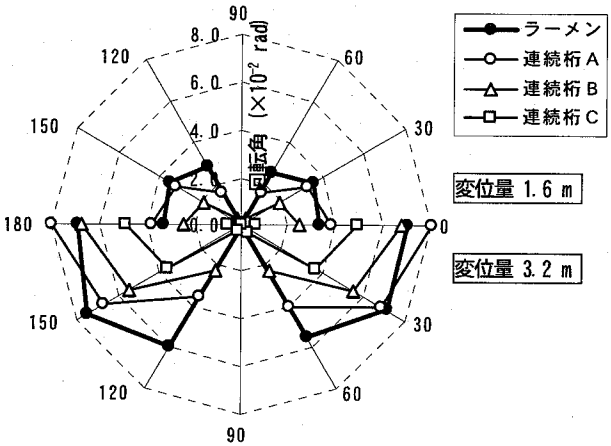
図-10 断層変位量と P1 橋脚下端塑性ヒンジ回転角 (2)



(a) D32 配置

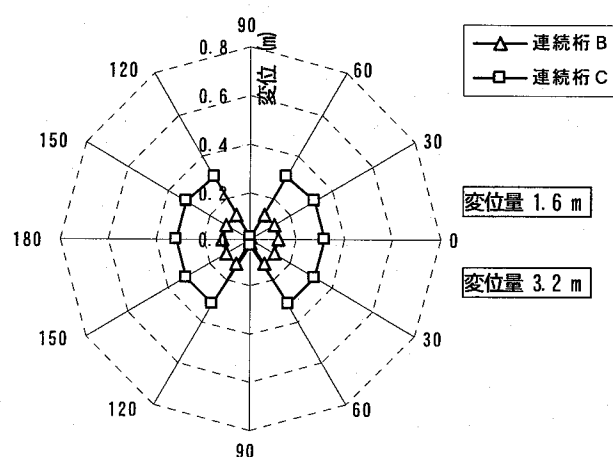


(b) D38 配置

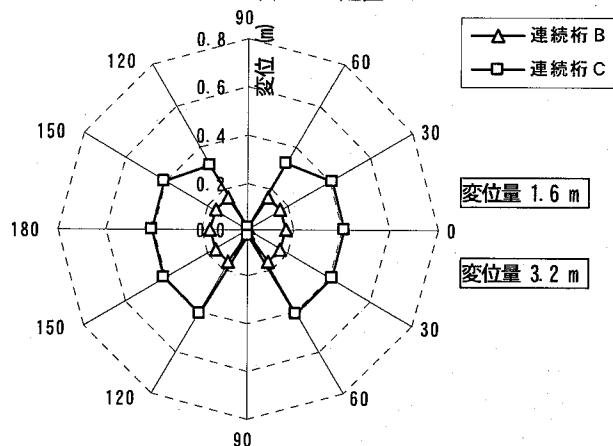


(c) D51 配置

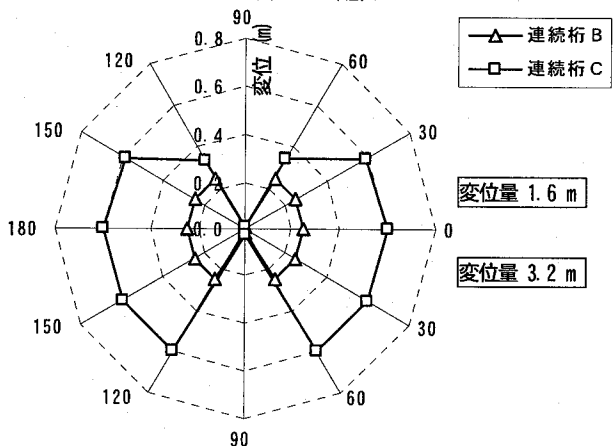
図-11 断層変位方向と橋脚下端塑性ヒンジの回転角



(a) D32 配置



(b) D38 配置



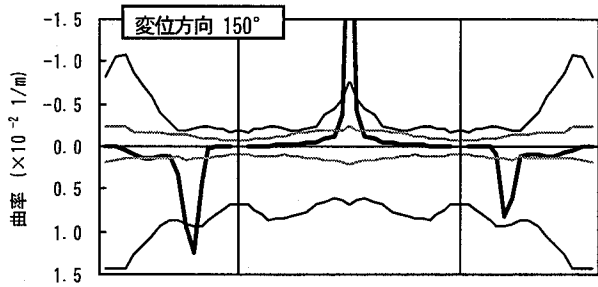
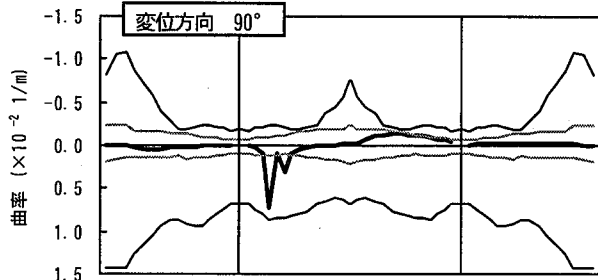
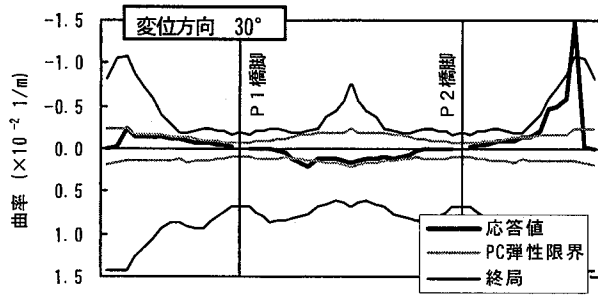
(c) D51 配置

図-12 断層変位方向と中間橋脚の支承変位量

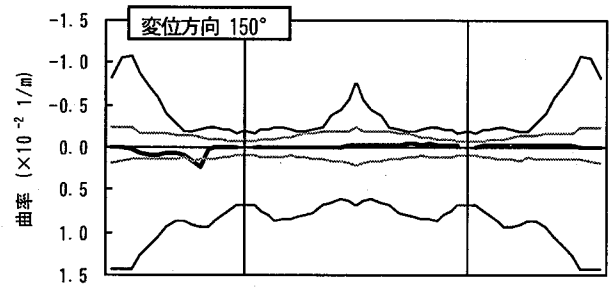
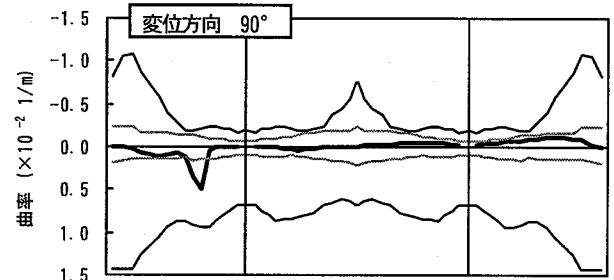
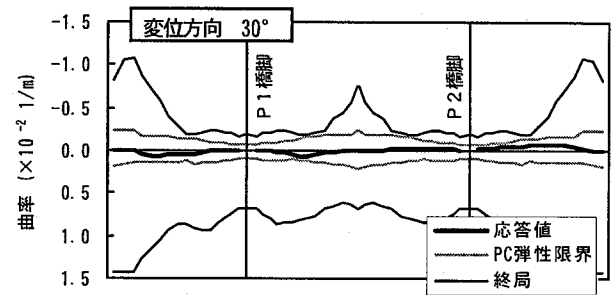
場合を除き、支承変位量は地震動に対する支承変位量を考慮して設定した変位制限値に達していない。これは、断層変位量 1.6 m の場合と 3.2 m の場合で支承変位量がほぼ一致しているように、断層変位が増加して橋脚下端が曲げ耐力に達すると、その後の断層変位は橋脚下端の塑性ヒンジの変形で吸収されるためである。したがって、断層変位を吸収する機能を支承部に設けるためには、橋脚下端が曲げ耐力に達しないように支承部の剛性(耐力)を設定しなければならない。

各断層変位方向に対する主桁の応答曲率の分布を、そ

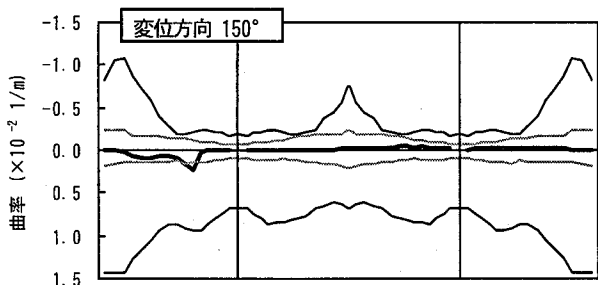
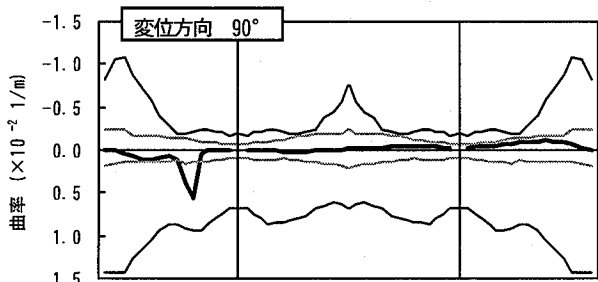
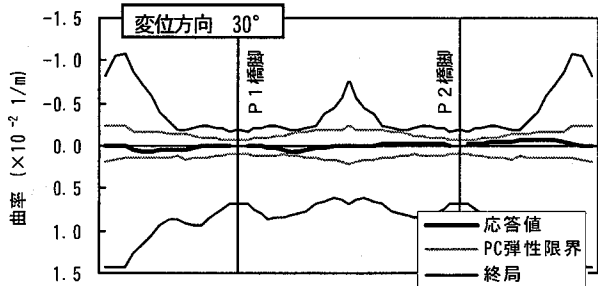
れぞれの構造形式に対して図-13 に示す。連続ラーメン橋では、図-8 に示したように、橋脚の変形がそのまま主桁に伝達されることから、橋軸方向の変形が卓越する断層変位方向の場合においても、連続桁橋に比べて主桁に著しい塑性化が生じる結果となっている。一方、連続桁橋では、中間橋脚の支承部の橋軸剛性が異なっても、主桁の応答曲率はほぼ一致した結果となっている。このことから、橋脚と主桁との結合条件のうち、水平変位の結合よりも回転変位の結合が、主桁の応答曲率に与える影響が大きいといえる。



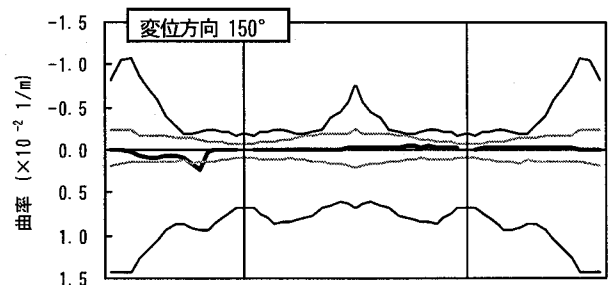
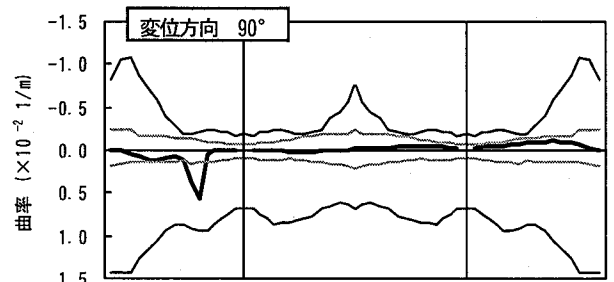
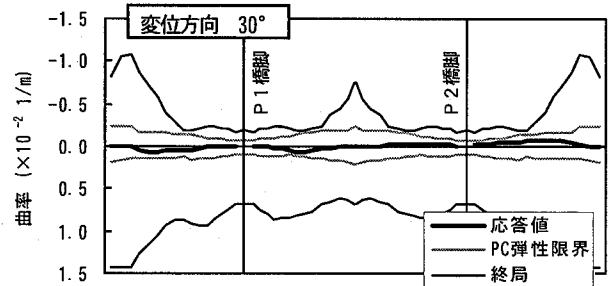
(a) ラーメン橋



(b) 連続桁橋A



(c) 連続桁橋B



(d) 連続桁橋C

図-13 各断層変位方向における主桁の応答曲率 (変位量 3.2 m, D32 配置)

5. まとめ

本検討では、地震動および断層変位に対する耐震性能について、同一諸元のPC連続ラーメン橋およびPC連続桁橋を用いて比較した。本研究で対象とした構造形式に関して得られた結果をまとめると、次のとおりである。

(1) タイプⅠ地震動に対しては、連続ラーメン橋の方が連続桁橋に比べて耐震性能は優れているといえる。一方、タイプⅡ地震動に対しては、橋軸方向1次振動モードを長周期化させることで、連続ラーメン橋に比べて連続桁橋の耐震性能を向上させることができる。

(2) 断層変位に対する橋脚の塑性化の程度は、弾性支持された連続桁橋の方が連続ラーメン橋や多点固定支持された連続桁橋に比べて小さく、耐震性能は優れているといえる。

(3) 断層変位に対する主桁の塑性化の程度は、中間橋との結合部の回転変形が拘束されない連続桁橋の方が連続ラーメン橋に比べて小さく、特に橋軸方向の変位が卓越する場合においてその差が顕著である。

(4) 断層変位に対する中間橋脚の支承変位は、地震動に対する支承変位と異なり、橋脚下端が曲げ耐力に達すると増加しなくなる。したがって、断層変位を吸収する機能を中間橋脚の支承部に設ける場合には、変位追従機能のみならず、その耐力に配慮する必要がある。

以上の結果によれば、内陸活断層近傍やその直上に架設される橋の構造形式としては、短周期が卓越する地震動や断層変位を吸収する機能を支承部に設けられる上部構造を弾性支持した連続桁橋の方が、連続ラーメン橋よりも望ましいといえる。今後は、この結果を踏まえて、地震動および断層変位に対する耐震性能を向上できる支承部構造の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，2002.3.
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，2009.11.
- 3) 地震調査研究推進本部：神縄・国府津－松田断層帯の調査結果と評価について，2007. 8.
- 4) 地震調査研究推進本部：富士川河口断層帯の調査結果と評

価について，2009. 10.

- 5) 水口知樹，阿部雅人，藤野陽三：1999年集集地震における地表地震断層による落橋現象の再現と対策の試み，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.257-271，2002.7.
- 6) 松平亮平，川島一彦：基礎免震による断層変位を受ける橋梁基礎の耐震対策，構造工学論文集，Vol.51A，pp.689-699，2005.3.
- 7) 常田賢一，渡邊武，平岩浩光：道路橋における活断層変位対策の検討，第28回土木学会地震工学研究発表会報告集，報告No.123，pp.1-10，2005.8.
- 8) (社) 日本コンクリート工学協会・九州支部：断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全性に関する研究専門委員会報告書，2002.11.
- 9) 室野剛隆，弥勒綾子，紺野克昭：断層交差角度に着目した橋梁の挙動特性に関する基礎的研究，土木学会地震工学論文集，Vol.27，論文No.80，pp.1-6，2003.12.
- 10) 山尾敏孝，庄達也，村上慎一，松田泰治：断層変位を受ける中路式鋼アーチ橋の耐震挙動と耐震性能評価の検討，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.440-449，2007.8.
- 11) 大塚久哲，古川愛子，中村壮：断層変位を受ける鋼斜張橋の動的解析，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.450-457，2007.8.
- 12) (財) 高速道路調査会：PC多径間連続ラーメン橋に関する研究報告書，1988.3.
- 13) 吉川卓，大木太，浦川洋介，角本周：PC連続ラーメン橋の境界条件が面内断層変位に対する耐震性能に与える影響，第28回土木学会地震工学研究発表会報告集，報告No.44，pp.1-11，2005.8.
- 14) 吉川卓，浦川洋介，大塚久哲，角本周：直接基礎の滑動が面内断層変位に対するラーメン橋の耐震性能に与える影響，第9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，pp.41-48，2006.2.
- 15) 前原康夫，日紫喜剛啓，角本周，町勉：限界状態設計法によるPC連続ラーメン橋の耐震設計，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.243-250，1999.12.
- 16) 広瀬剛，岡田稔規，御園生静栄，浦川洋介：PC上部構造物の修復限界状態に関する一考察，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第1部，pp.389-390，2004.9.
- 17) 大塚久哲，岡田稔規，角本周，堤忠彦：PC箱桁の復元力特性に関する交番載荷実験，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.2，pp.90-97，2000.3.
- 18) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震，第2輯，第28巻，pp.269-283，1975.
- 19) 片岡正次郎，日下部毅明：内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.21-32，2005.10.