

(134) 地震時断層変位を受けるPC橋梁の耐震安全性に関する考察

九州大学大学院助手 正会員 ○矢葺 亘
 九州大学大学院教授 正会員 大塚久哲
 九州大学大学院 夏 青

1. はじめに

1999年9月21日に台湾において発生した集集地震では、断層運動による鉛直方向変位が、橋梁および各種構造物に、多大の被害をもたらした^{1), 2), 3)}(写真-1)。台湾同様、数多くの断層が存在するわが国においても、この種の断層変位による被害形態は、当然想定しておくべきであるにもかかわらず、その指標となる解析・実験等のバックデータが非常に乏しいのが現状である。そのため、現行基準・旧基準で設計された橋梁の断層変位に対する安全性や、現在の耐震設計法では想定しない塑性ヒンジ箇所、また変位に対し有利な橋梁形式等を確認しておくことは、非常に重要であると考える。

本研究では、国内基準で設計されたアーチ橋、ラーメン橋、斜張橋の3つの不静定橋梁を対象に、橋脚および橋台に、強制変位が作用したときの橋梁全体系の応答を報告するものである。

2. 対象橋梁と解析モデル

ラーメン橋は、55年道示により設計された高さの異なる橋脚を有する3径間の連続ラーメン橋である。橋梁概要図を図-1に、橋梁諸元、使用材料をそれぞれ表-1、表-2に示す。上部構造は普通鉄筋を含んだPC箱桁、橋脚はRC部材で構成される。また、主桁、橋脚両方で中空断面を採用しており、橋軸方向の橋脚幅は上部から下部に向かって広がる変断面となっている。

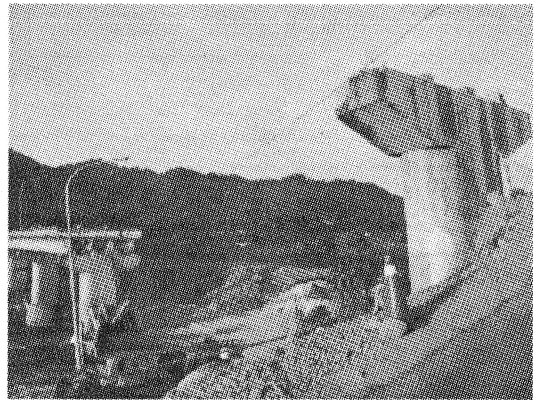


写真-1 P1橋脚の隆起による碑豊橋の落橋

表-1 ラーメン橋橋梁諸元

橋長	230.00m
支間割	67.40m + 94.00m + 67.40m
橋脚高	P1:68.0m P2:45.0m
橋脚断面	矩形RC中空断面6.0m×4.0m (橋脚基部)
設計震度 (55年道示進換)	橋軸方向 Kh=0.12
	橋軸直角方向 Kh=0.10 (長橋脚は施工時)
地域 / 地盤種別	B地域 / I種地盤

表-2 使用材料

コンクリート	上部構造: $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$
	下部構造: $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$
PC鋼材	SBPR 930 / 1180
鉄筋	SD295

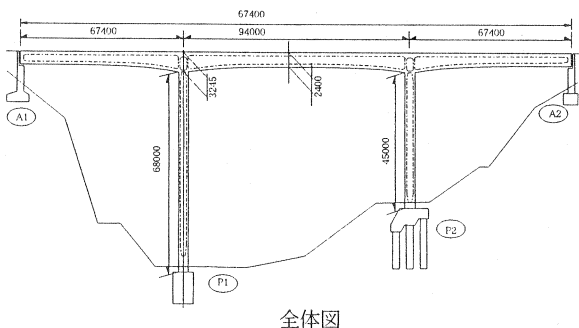
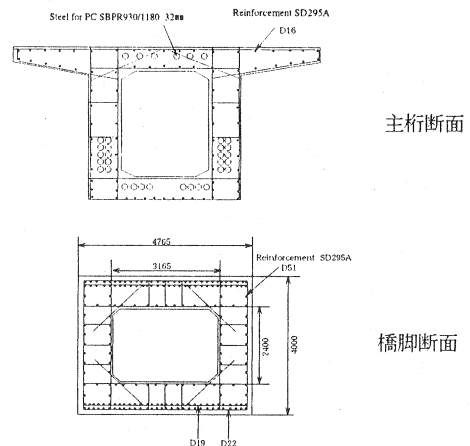


図-1 対象橋梁



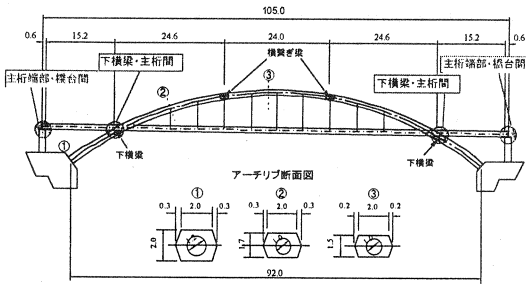


図-2 アーチ橋概要

表-3 アーチ橋橋梁諸元

構造形式	コンクリート中路式アーチ橋
橋長	105.0m
支間長	15.2m+73.2m+15.2m
アーチ支間長	92.0m
幅員構成	7.25m+2.50m
縦断勾配	2.50%
横断勾配	2.00%

表-4 アーチ橋使用材料

コンクリート	アーチリブ: $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 補剛材: $f'_{ck}=35\text{N/mm}^2$
PC部材	12T12.7mm, 7T12.7mm, F36 OPH, F27 OPH
鉄筋	SD295

アーチ橋はアーチ支間長92mを有する中路式アーチ橋である。図-2に示すように、2本の鉄筋コンクリートアーチリブが横繋ぎ梁および下横梁によって接合され、補鋼桁 (PRC床版) が吊鋼材 (PCケーブル) でアーチリブから吊られた構造で、アーチリブはスプリング部において岩定着された橋台に固定されている。また、主桁はアーチリブ間の下横梁上でアンカーを有するすべり支承によって支持されるとともに、主桁両端部に反力分散ゴム沓が設置されている。構造概要を表-3に、使用材料を表-4に示す。

斜張橋は中央径間170m、側径間60mの3径間連続PC斜張橋 (図-3) である。構造概要を表-5に示す。主桁の中央径間側はセパレート型2室箱桁断面で桁高1.7mであるが、側径間側は地形上の制約条件により通常より短かく、カウンターウェイトを得るために中央径間側の形状と異なっている。また、主桁と主塔間には支承を設けないフローティング構造であり、耐震性、クリープおよび乾燥収縮に対する考慮がなされている。

主塔高はP1主塔が64.5m、P2主塔が64.0mであり、基礎構造は、P1主塔が杭径 $\Phi 3.0\text{m}$ の深礎杭形式、P2主塔が直接基礎である。また、斜材ケーブルはPC鋼より線をポリエチレン被覆したSEEE工法F-PH型斜材ケーブルを使用している。

3. 解析モデルと解析手法

解析モデルを図-4に示す。ラーメン橋、斜張橋については、上部構造、橋脚ともに非線形はり要素とした。アーチ橋については上部構造は線形はり要素、アーチリブは非線形はり要素によりモデル化を行った。

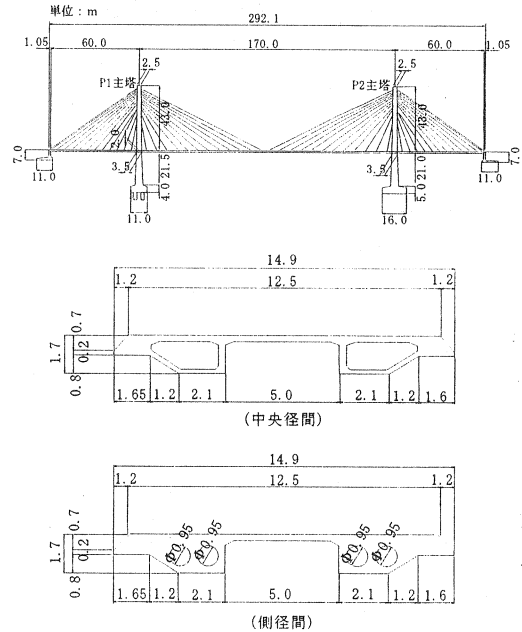


図-3 斜張橋概要

(上:一般図 下:桁断面図)

表-5 斜張橋橋梁諸元

橋長	292.1m	桁長	291.7m
道路規格	3種3級	橋格	1等級
設計速度	50km/h		
形式	3径間連続PC斜張橋		
支間	60.0m+170.0m+60.0m		
有効幅員	1.25m+2@3.5m+0.75m+2.5m(歩道)		
横断勾配	車道:1.5%, 歩道:2.0%		
縦断勾配	0.30%		
平面曲線	直橋 (R=∞)		

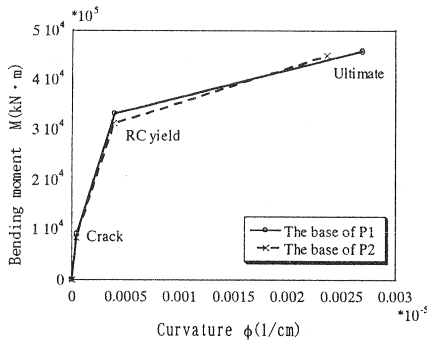


図-5 ラーメン橋橋脚下端における骨格曲線

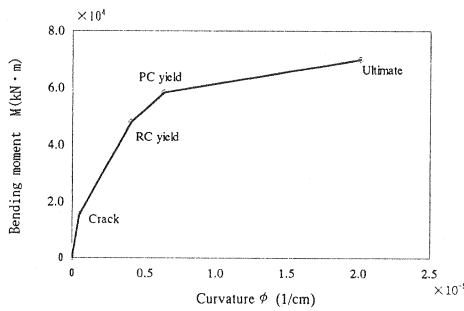


図-6 ラーメン橋主桁中央径間中央断面の骨格曲線

また、基礎は固定とした。

橋脚および主桁断面の骨格曲線における曲げモーメント-曲率関係（以下M-φ関係）は、各断面形状と初期軸力に対して決定した。図-5にラーメン橋の両橋脚下端の橋軸方向解析に対するM-φ関係を示す。橋脚

脚に関しては、道路橋示方書V耐震設計編¹⁾の応力-ひずみ曲線を使用し、「ひび割れ-鉄筋降伏-終局」を決定した。主桁断面のM-φ関係の導出には、道路橋示方書IIIコンクリート橋編⁵⁾により、コンクリート、鉄筋、PC鋼材の応力-ひずみ曲線を用い、プレストレスによる初期鋼材ひずみを考慮し算出した。各イベントの定義は

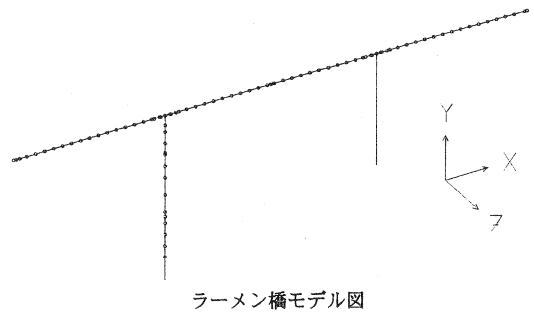
- ・ひび割れ発生時（引張縁コンクリートにひび割れが発生するとき）
- ・鉄筋降伏時（ウェブ最外縁の引張鉄筋が降伏するとき）
- ・PC鋼材降伏時（引張縁のPC鋼材が降伏点に達するとき）
- ・終局時（圧縮縁のコンクリートが終局ひずみ0.0035に達するとき）

とした。

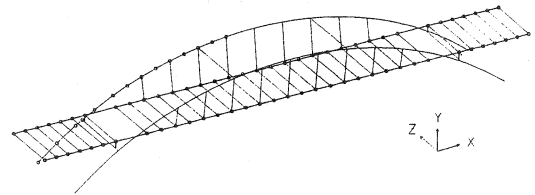
図-6にラーメン橋PC主桁中央径間中央断面の橋軸直角方向解析に対するM-φ関係を示す。

斜張橋の斜材に関しては、初期プレストレスを考慮し、圧縮軸力は受け持たない要素とした。ただし、引張時の弾性限界、降伏等はモデル化せず、弾性とした。

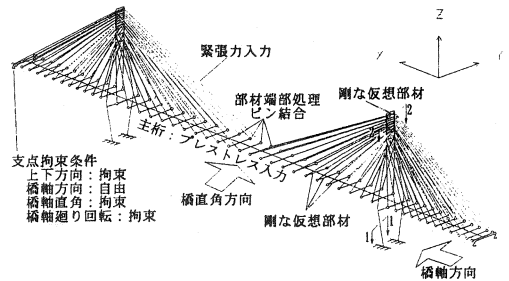
解析では、橋梁中央に断層による相対変位が生じたことを想定して、アーチ橋の一端、ラーメン橋の桁端と橋脚、斜張橋の桁端と橋脚を、鉛直（面内）または水平（面外）に強制変位させたそれぞれ6ケースを検討した。



ラーメン橋モデル図



アーチ橋モデル図



斜張橋モデル図

図-4 解析モデル

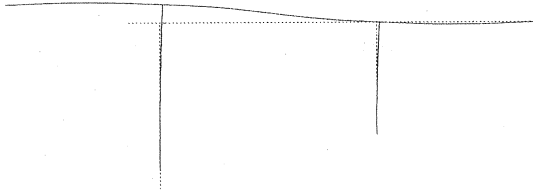


図-7 ラーメン橋変形図(面内方向)

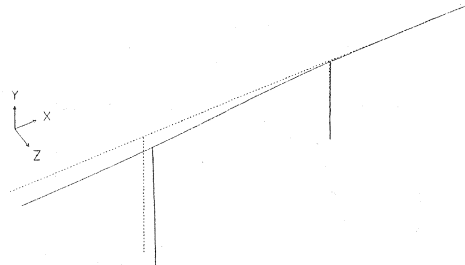


図-10 ラーメン橋変形図(面外方向)

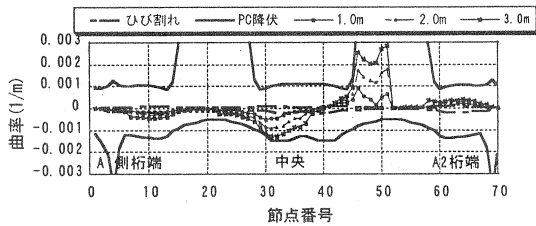


図-8 ラーメン橋面内方向解析における主桁の応答曲率の分布

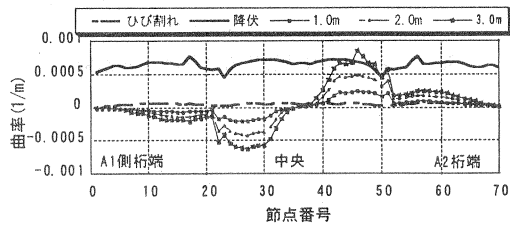


図-11 ラーメン橋面外方向解析における主桁の応答曲率の分布

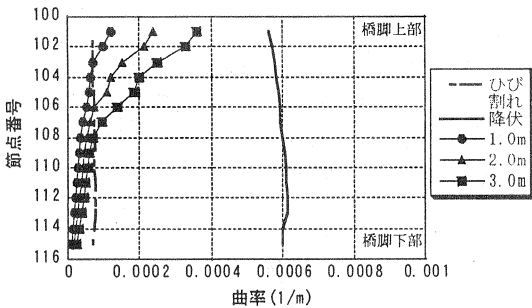


図-9 ラーメン橋面内方向解析における橋脚の応答曲率の分布

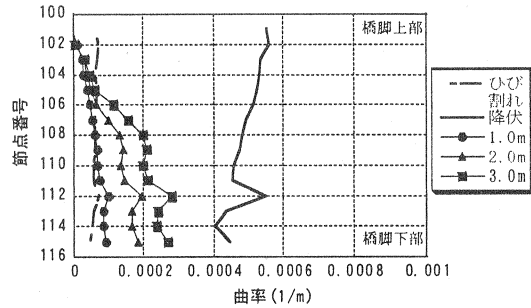


図-12 ラーメン橋面内方向解析における橋脚の応答曲率の分布

4. 解析結果

今回は、部材の損傷を、応答曲率の分布で表した。強制変位を徐々に増加させていった場合の応答曲率と、部材のひび割れ・降伏(鉄筋, PC鋼材)曲率の関係、および橋脚とPC主桁の損傷度の関係を検討すると、以下のとおりである。

(1) ラーメン橋：図-7～12

ラーメン橋の場合、強制変位に対し、面内方向および面外方向ともに橋脚の変形は小さく、PC主桁中央部横付近に損傷が集中する。0.3m程度の変位でもPC桁にひびわれを生じ、また、橋脚の鉄筋降伏よりも、PC主桁のPC鋼材降伏(3.0m変位時)が先に起こる。現在の耐震設計が、橋脚基部の損傷を想定して行われていること、またPC上部構造を耐震検討時に弾性部材として扱っている点等を考えると、地震時の断層変位に対しては、別途対策が必要であるといえる。

(2) 斜張橋：図-13～18

面内方向では主桁中央、面外方向では、橋脚付近の主桁に損傷が集中する。PC主桁に対し、橋脚の損傷は軽微であり、ラーメン橋同様、PC主桁に対する検討が必要である。

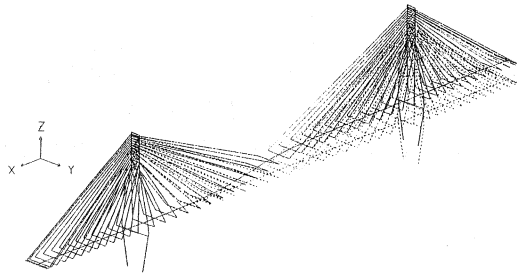


図-13 斜張橋変形図 (面内方向)

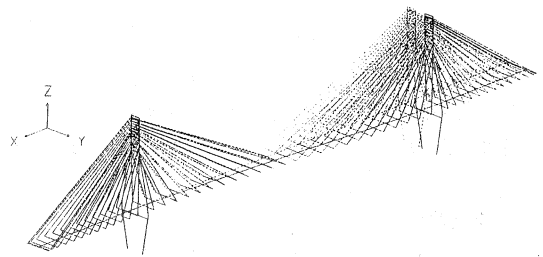


図-16 斜張橋変形図 (面外方向)

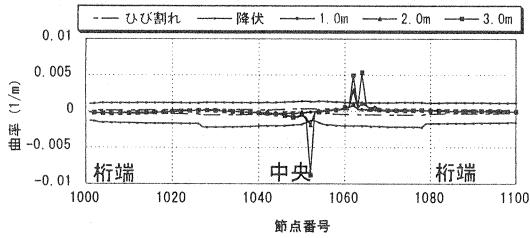


図-14 斜張橋面内方向解析における主桁の応答曲率の分布

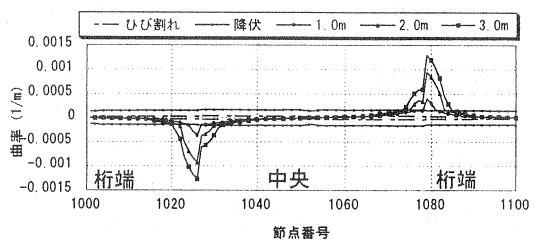


図-17 斜張橋面外方向解析における主桁の応答曲率の分布

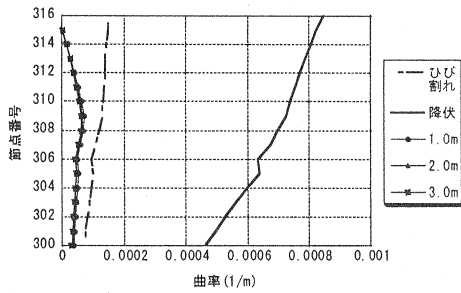


図-15 斜張橋面内方向解析における橋脚の応答曲率の分布

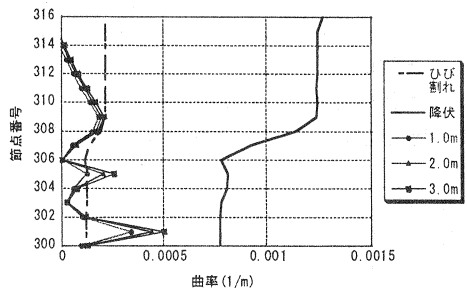


図-18 斜張橋面外方向解析における橋脚の応答曲率の分布

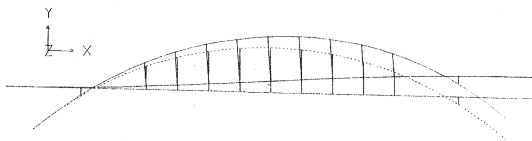


図-19 アーチ橋変形図 (面内方向)

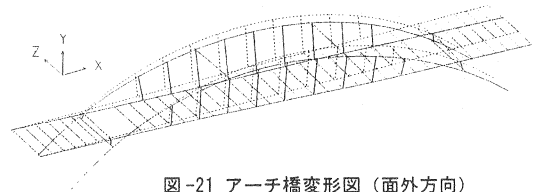


図-21 アーチ橋変形図 (面外方向)

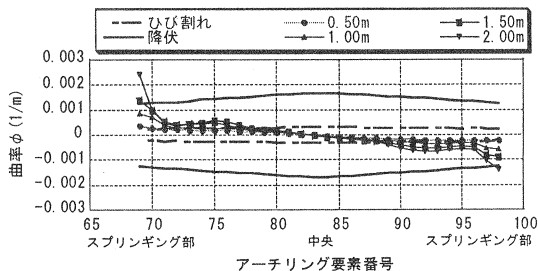


図-20 アーチ橋面内方向の応答曲率の分布 (アーチリング部)

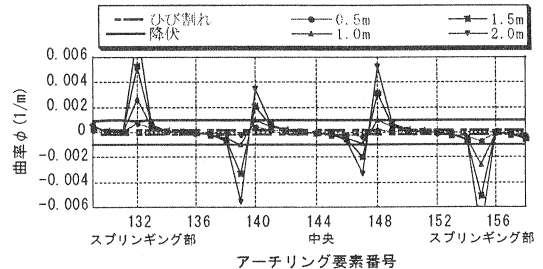


図-22 アーチ橋面外方向の応答曲率の分布 (アーチリング部)

(3)アーチ橋：図-19～22

面内方向は、アーチスプリング部における損傷が大きく、また変位の増大とともにアーチ中間部に比べ塑性化の進展の程度が大きいことが確認できる。面外方向は、アーチリブの横繋ぎ材付近の6箇所において、応答曲率が增大している。水平変位が0.5mで降伏に至り、1.0mから急激に損傷が増加することがわかる。

5. まとめ

今回の解析で、特徴的であった点をまとめると以下のとおりである。

1. ラーメン橋、斜張橋は面外変位、面内変位に対して、橋脚よりもPC主桁部での損傷が大きい。
2. アーチ橋は、アーチスプリング部、横繋ぎ材付近において損傷が大きく、当該箇所のみで損傷が集中する。

6. 今後の課題

今後の課題を以下のように考える。

1. 断層変位に対し有利な橋梁形式(単純桁、連続桁、各種不静定橋梁)の検討
(今回の解析ではラーメン橋が比較的有利であったが、さらに解析事例を増やす必要がある。)
2. 各橋種に対する想定塑性ヒンジ発生個所の検討
(各橋種において想定すべき塑性ヒンジ個所を明らかにする。)
3. 解析精度の向上
(幾何学的非線形性を考慮した解析等の解析手法を検討するとともに、今回非線形性を考慮しなかった地盤ばね、支承、ケーブル等を考慮する。また現在行っているPC上部構造部材の載荷試験結果等を解析に反映し、精度向上を図る)
4. 断層変位吸収デバイスの検討および損傷に対する補修方法

参考文献：

- 1) The 1999 JI-JI Earthquake, TAIWAN -Investigation into Damage to Civil Engineering Structures, JSCE, 1999. 10
- 2) 地域防災計画における地震対策の策定の現状と課題」講習会テキスト, KABSE九州構造橋梁研究会, 平成12年1月
- 3) 川島, 庄司, 岩田: 1999年集集大地震における道路橋の被害と被災メカニズム, 文部省突発自然災害調査団1999年台湾集集大地震調査報告会資料
- 4) 平成9～10年度中径間橋梁の耐震性向上に関する研究委員会報告書, 土木学会西部支部, 平成11年11月
- 5) 矢茸, 大塚, 夏: 地震時断層変位がラーメン橋・アーチ橋・斜張橋の耐震安全性へ及ぼす影響, 土木学会西部支部研究発表会, 平成12年3月