

インドネシア・スラウエシ地震による橋梁被害

幸左賢二¹・Hendra Setiawan²・宮島昌克³・小野祐輔⁴・吉田雅穂⁵

¹正会員 Ph.D 九州工業大学名誉教授（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 工博 Tadulako University (Bumi Tadulako Tonda Campus, Palu, Central Sulawesi, 941182)

³正会員 工博 金沢大学(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

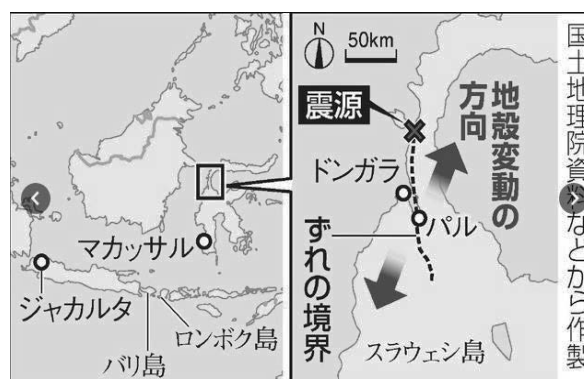
⁴正会員 工博 鳥取大学（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101）

⁵正会員 博士（工学） 福井工業高等専門学校（〒916-8507 福井県鯖江市下司）

1. はじめに

2018年9月28日インドネシア国セラウシ島中部のパル市を中心としてマグニチュード7.5の地震が発生した。デパートや病院などの構造物被害も多数発生しており、特に地震および地震に伴う津波により長さ126m+126mの単純2径間の鋼アーチ橋が落橋した。

筆者らは11月15日より1週間に亘り、地震被害調査を実施した。本報告はこのうち、地元の象徴的な存在である鋼アーチ橋の被害状況、原因を中心に考察を行う。



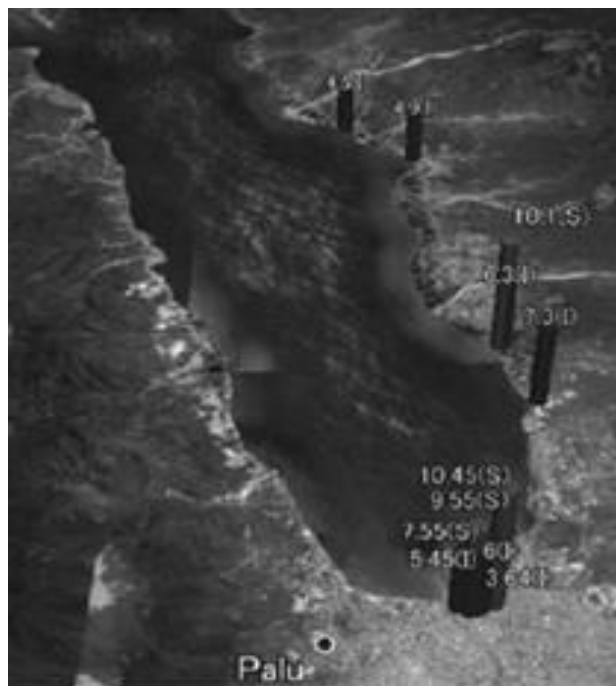
図－1 地震発生状況

2. 地震動および津波の状況

図－1に地震発生状況を示す¹⁾。今回の地震は断層面を境に水平方向にずれる左横ずれ断層だった。海底で断層が横ずれしても、上下方向のずれは少ないため、津波は起きにくいとされる。日本の国土地理院による人工衛星の観測データの解析によると、断層は湾に沿って延び、その西側が南に、東側が北にずれる地殻変動が起きていた。パル周辺の横ずれは約5mと特に大きかった。

これに対して今村らは湾内の湾内の海底の斜面や沿岸部でも地滑りが何カ所も発生、大量の土砂が海底に流れ落ちる勢いで付近の海面が上下に大きく変動し、津波が発生したと推測している。

図－2に今村らによって計測された津波高さ分布を示す。図においては赤色(S)はスプラッシュ高、青色(I)は潮位調整を実施していない浸水高を示す。全地域ではスプラッシュ高で7～10m、浸水高で3～7mとなっている。パル市中心の橋梁付近では浸水高として3～5mとなっている²⁾。また浸水範囲は海岸線から200～300m程度と被害に限られている。



図－2 パル湾における野外調査による浸水津波高とスプラッシュ高

撮影された映像を分析すると浸水高が 5m 程度の場合には一般には津波流速が 3～5m/s であるのに対して今回は 7m/s と極めて速いのが特徴である。

図－3 にパル市において観測された地震動の N-S 成分を示す。最大 200Gal 程度の地震動が 40 秒間継続している。E-W 成分も同様に最大 200Gal 程度が 40 秒間継続している³⁾。一方、2～5 秒の応答加速度スペクトルは鷹取波形を超える値となっている。

3. 橋梁の概要

パル橋は約 35 万人が住むパル市街の西側と東側をつなぐ長さ 252m(126+126m)の鋼アーチ橋である。高さ 20m, 幅員 9m で両側に歩道を有している。現地の専門家からのヒヤリングによるとパル市が発注し、Waagner-biro 社（本社オーストラリア）が製作したとのことである。

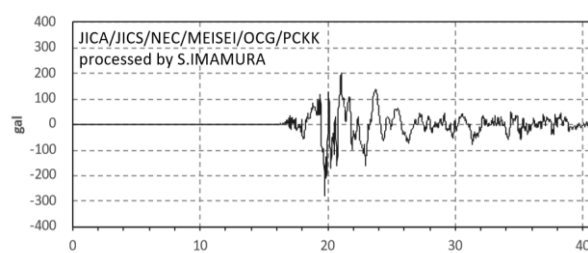
筆者らが現地調査した時点では橋梁は撤去中であり、詳細な被害状況を調査できなかった。そのため現地で入手した資料および専門家からのヒヤリングにより損傷状況を推定する。図－4 には損傷した桁の状況を示す⁴⁾。図－5 に座屈部を拡大したもの示す。写真は 10 月 1 日撮影されているが、アーチリブに 3 箇所座屈が確認できる。東側橋梁では東側アーチリブ基部と横梁中間部に座屈が確認できる。これに対して西側橋梁では東側アーチリブ基部および西側 2 つ目の横梁部に座屈が確認できる。以上の状況から橋軸直角方向の移動によっては、アーチリブ基部より 5m 付近に大きな座屈が発生したと考えられる。

図－6 には地震の前後の橋梁の位置を示す。以下の情報は地元大学の教員からのヒヤリングによった。地震後東側および西側アーチリブは山側に 2m 移動し、中央部の島の中の橋脚は 5m 山側に移動した。図－4 の写真でも中央の橋脚が確認できることから、中央部が大きく移動したと考えられる。

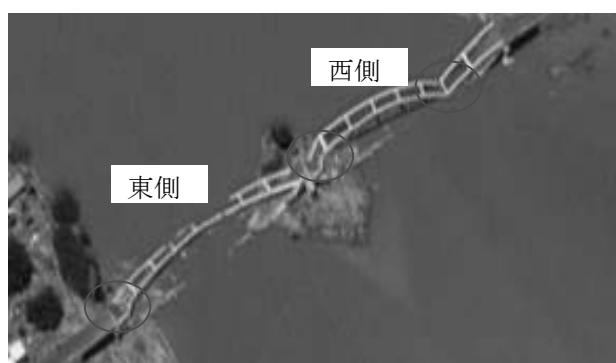
4. 損傷原因

損傷原因としては津波および地震力の 2 種類が考えられる。そこでまず橋梁の津波の痕跡高を調査した。

がれきや砂の存置状況から、津波の到達高は落橋を免れた隣接単純桁の路面付近であることから、アーチ橋の下床版にはスプラッシュが到達した可能性があるものの、アーチリブには達



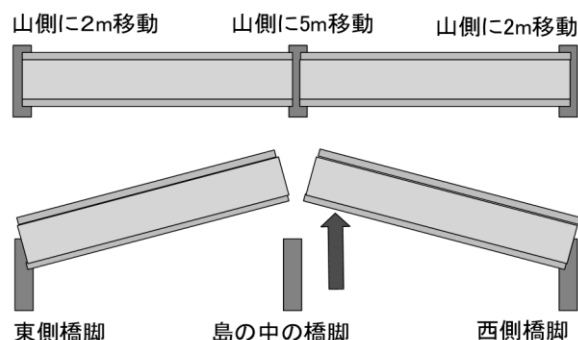
図－3 パル市における観測地震波波形（N-S 成分）



図－4 東側および西側パル橋損傷状況



図－5 東側パル橋東側アーチリブ部座屈状況



図－6 地震前後の橋梁の位置

していないことが明らかとなった。

また複数の目撃者から、地震から津波が到達までには5分程度の時間差があり、地震直後にすでに桁は落橋していたとの情報が得られた。以上のことから、地震動が主な損傷原因と考えられる。

図-7には得られた中間橋脚の支承の状況を示す。アーチ橋では極めて小さいBPAタイプが用いられており、上部工の移動とともに支承の損傷が見られた。図-8には西側橋梁の端部の橋脚部を示す。構造物に対して支承が極めて小さく、また橋脚の縁端距離も十分ではないことが分かる。

図-3に示すように最大300Galであるが、長周期成分の影響も考慮する必要がある。地震動により倒壊に至る原因としては以下の2つが考えられる。

図-9に示すように慣性力が上部工に作用する。
1)アーチリブに作用する橋軸直角方向慣性力により、アーチリブ部が座屈し、橋軸直角方向に大きく変位する。これに伴い、上部工全体が移動し、縁端距離が十分でないことから、落橋に至る。

2)橋軸直角慣性力が上部構造に作用し、支承が損傷し、橋軸直角方向に移動する。上記1)と同様に縁端距離が十分でないことから落橋に至る。

今後、詳細は図面を入手し、部材耐荷性能を評価する必要があるが設計上の課題としては以下の3点が考えられる。

- 1)アーチリブ、特に基部から5m付近の地震時耐荷力
- 2)支承の耐地震時の性能
- 3)橋脚縁端距離の考え方

5. 耐津波性能評価

ここでは、アーチリブに津波荷重が作用した場合のアーチリブに作用する荷重と風荷重と比較し、構造物の耐津波性状を評価した。

アーチリブに作用する風荷重、津波荷重は(1)、(2)式で表される。

$$P_1 = 0.5 C_{d1} \rho_1 V_1^2 A_1 \quad (1)$$

$$P_2 = 0.5 C_{d2} \rho_2 V_2^2 A_2 \quad (2)$$

ここで P:作用荷重(kN) Cd:抗力係数 ρ:密度(Kg/m³) V:作用流速(m/s) A:作用面積(m²)

簡便のため $C_{d1}=C_{d2}$, $V_1=50\text{m/s}$, $\rho_1=1.293(\text{kg/m}^3)$, $V_2=5\text{m/s}$, $\rho_2=1030(\text{kg/m}^3)$, $A_1=A_2$ と仮定すると



図-7 中間橋脚支承損傷状況

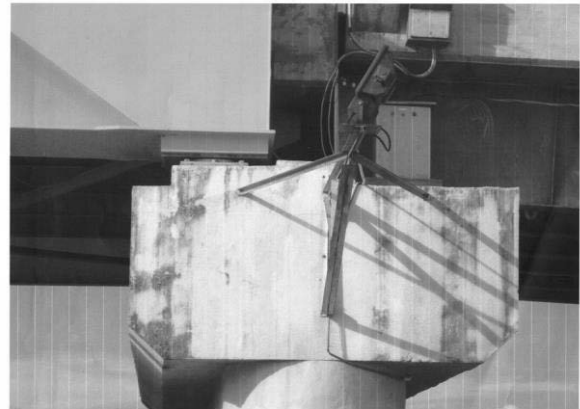


図-8 西側橋梁の西側橋脚部



図-9 地震荷重の作用状況

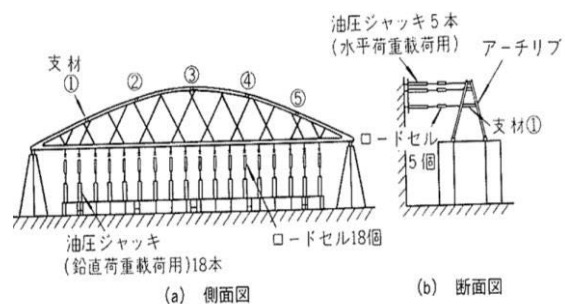


図-10 実験装置の概略

$P_2=8P_1$ となる。

すなわち 3 m 程度のアーチリブへの浸水高になれば、風荷重を上回ることになる。

以上のことから、海岸付近にあり、想定津波高に比べてアーチ高が十分な高さを持たないアーチ橋は津波による被害の可能性を十分検討する必要がある。

6. 耐地震性能評価例

耐地震性能を評価するために、新浜寺大橋を対象に実橋の 1/30 の全体模型に基づく耐荷力実験を実施している。本実験結果を基にアーチ橋の損傷メカニズムを考察する⁵⁾。

供試体は鉛直荷重載荷用 (No. 1) と水平荷重載荷用 (No. 2) としている。模型の製作に関しては、アーチリブの強度に及ぼす影響の大きい、アーチリブの細長比、アーチリブと下弦材との断面積比、およびアーチリブと上支材との断面二次モーメント比を二次元パラメータとして、できるだけ実橋と等しくなるように考えた。

供試体 (No. 1) に対しては図-10 (a) に示すように、下弦材に油圧ジャッキ (18 台) による等分布鉛直荷重を漸増させ破壊に至らしめた。供試体 (No. 2) に対しては、死荷重強度の 1.3 倍に相当する等分布鉛直荷重を一定に保ち、別途、風荷重に相当する水平荷重を図-10 (b) に示すように、油圧ジャッキ (5 台) によりアーチリブの支材位置に載荷させ、破壊に至らしめた。

実験値と弾塑性有限変位解析による解析値との比較を表-1 に示す。これより合力 R は解析値と良く一致していることが分かる。

図-11 に示すように破壊モードを比較すると、水平の地震荷重よっても、アーチリブ基部付近と横梁付近に座屈モードが生じており、今回の橋梁の損傷モードに非常と一致している。また、実験結果は数値計算結果とよく一致した結果が得られており、本手法を用いることにより、今後被害原因の推定が可能と考えられる。

7. まとめ

インドネシア・パル地震に対する調査の結果、明らかになった点を以下にまとめる。

- 1) マグニチュード 7.5 の地震により、パル橋梁付近では最大南北方向 200Gal の地震動、浸水高 7m の津波が発生した。
- 2) 現地調査の結果、津波は隣接桁の床版位置への到達高であったことから、アーチ橋のアーチリブに達せず、せいぜい桁高までの到達であった。

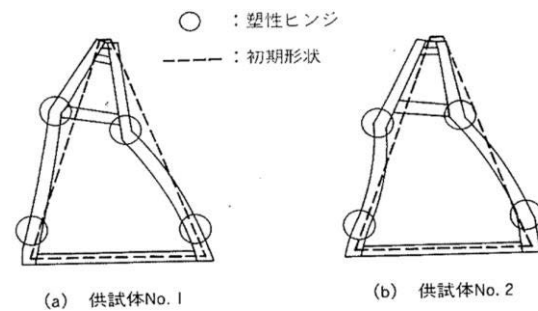


図-11 試験体の破壊モード

表-1 終局荷重の総括 (単位: kN)

		実験値	解析値
No. 1	鉛直荷重	368	361
	水平荷重	-	-
	合力	368	361
No. 2	鉛直荷重	180	180
	水平荷重	53.9	27.5
	合力	187.9	182.1

- 3) 専門家へのヒヤリングの結果、アーチ橋が地震動により損傷したとの複数の証言が得られた。以上の結果より、アーチ橋は地震動により損傷した可能性が高い。
- 4) 入手した写真からは、支承が極めて貧弱なこと、橋脚の縁端距離が十分でないことが明らかとなった。なお詳細については設計図面により損傷原因を明確にする必要がある。

参考文献

- 1) 朝日新聞記事、局所的な津波複数発生か、2018. 10. 12
- 2) Abdul Muhari, Fumihiko Imamura, Taro Arikawa and Bagus Afriyanto, Finding of the unexpected tsunami due to the strike-slip fault at central Sulawesi, Indonesia on 28 September, from the preliminary field survey at Palu
- 3) BMKG and JICA (2018): Palu Earthquake Strong Motion Waveform by Observation System Developed by Japan
- 4) Newyork times, インターネット news, 2018. 10
- 5) 松本雅治, 安田扶律, 明田啓史, 金子俊一: 我が国最大のニールセン橋新浜寺大橋の設計と架設, 橋梁と基礎, pp. 121-125, 1991. 8