

土 木 研 究 所 資 料

ボルトの破断特性に関する実験的研究

平成6年11月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1994) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ボルトの破断特性に関する実験的研究

Experimental Study on Failure Characteristics of Steel Bolts

企画部 地下開発研究官 川島 一彦*
地震防災部 耐震研究室

室長 大塚 久哲
主任研究員 運上 茂樹
向 秀毅

*) 前耐震研究室長

要 旨

平成5年1月15日の釧路沖地震(M=7.8)は、釧路市周辺を中心とする北海道南東部地域に大きな影響を及ぼした。道路橋に関しては、軽微な被害を含めると合計63橋に何らかの被害を及ぼした。この中の一般道道本流音別停車場線の初音橋では、落橋を防止するために設けられていた隣接する主桁ウェブ間を凍結する桁間連結装置の固定ボルトが破断するという損傷を受けた。

本資料は、初音橋の桁間連結装置の損傷原因を検討するために、損傷を受けた桁間連結装置の損傷特性を調査するとともに、ボルトの載荷実験を行い、その破断特性及び損傷特性を検討した結果をまとめたものである。

キーワード： 釧路沖地震、道路橋、地震被害、初音橋、落橋防止装置、桁間連結装置、ボルト

ま え が き

平成5年1月15日の釧路沖地震（ $M=7.8$ ）は、釧路市周辺を中心とする北海道南東部地域に大きな影響を及ぼした。道路橋に関しては、軽微な被害も含めると合計63橋に何らかの被害を及ぼした。この中の一般道道本流音別停車場線の初音橋では、落橋を防止するために設けられていた隣接する主桁ウェブ間を連結する桁間連結装置の固定ボルトが破断するという損傷を受けた。

従来地震では、鋼製支承に一体的に設けられたストッパー（鋼製爪、移動制限装置）が破断するという損傷は多く見られたが、近年大規模な地震が起きていないこともあり、落橋防止装置が地震により被害を受けた例はあまりない。しかしながら、落橋防止装置は橋の主要部材に思わぬ破壊が生じた場合にも落橋などの致命的な崩壊を防止するというフェイルセーフ機能を与えるものであり、最大規模の地震が発生した場合でもその機能を発揮することが必要とされる。このため、損傷原因を検討し、今後の桁間連結装置の設計法に反映させることが重要である。

本資料は、初音橋において損傷を受けた桁間連結装置の損傷特性を調査するとともに、ボルトの載荷実験を行い、その破断特性及び損傷特性を検討した結果をまとめたものである。

目 次

1. 初音橋の被害の概要	1
1. 1 初音橋の概要	1
1. 2 平成5年1月釧路沖地震による被害の概要	2
1. 3 桁間連結装置の設計照査	4
2. 初音橋の桁間連結装置の全数調査	27
2. 1 ボルトの破断状況の目視調査	27
2. 1. 1 P 1 橋脚上の桁間連結装置	27
2. 1. 2 P 2 橋脚上の桁間連結装置	29
2. 1. 3 P 3 橋脚上の桁間連結装置	30
2. 1. 4 P 4 橋脚上の桁間連結装置	31
2. 1. 5 P 5 橋脚上の桁間連結装置	31
2. 2 破面の顕微鏡調査	32
2. 3 亀裂面強制破断調査	32
2. 4 まとめ	34
3. ボルトの載荷実験	87
3. 1 実験目的	87
3. 2 実験方法	87
3. 3 実験ケース	87
3. 4 実験結果	88
3. 4. 1 静的せん断試験結果	88
3. 4. 2 せん断疲労試験結果	88
4. 結論	102
謝 辞	104
参考文献	105

1. 初音橋の被害の概要

1. 1 初音橋の概要

初音橋は、図-1. 1に示すように、釧路市の西方約40kmに位置する音別町から音別川に沿って北上する一般道道本流音別停車場線が、音別町二俣において音別川を渡河する位置に架設されている橋梁である。

図-1. 2及び表-1. 1は、それぞれ、初音橋の一般図及び構造条件を示したものである。写真-1. 1、写真-1. 2は、それぞれ、初音橋の全景と橋脚を示したものである。

本橋は、橋長171.74mの6径間単純活荷重合成桁橋であり、昭和42年度に完成した2等橋である。橋梁部分は昭和42年度に架設され、左岸側の取り付け道路は昭和43年度に、右岸側の取り付け道路は昭和44年度に施工されている。支間割は、中央の2径間が31.82m、その他が26.1mである。本橋は斜橋であり、斜角は $72^{\circ}17'30''$ である。上部構造は、3主桁からなる合成桁であり、各桁間は横桁（対傾構）と横構によって結合されている。

橋台はRC逆T式、橋脚は直径1.8mの円形断面を有するRC張り出し式である。基礎は、いずれも鋼管杭を有する杭基礎である。橋脚は、図-1. 3に示すように、P1、P2、P4、P5橋脚は同一の諸元を有し、躯体部の高さは4.6mである。P3橋脚は、基部に高さ1mのスカートをもっており、その分他の橋脚よりも躯体部の高さが1m高くなっている。主鉄筋としては、橋脚基部ではD29が40本配筋されている。材質は、SDC40（冷間加工異形棒鋼Ⅰ種）であり、許容引張応力度は $2,400\text{kgf/cm}^2$ 、降伏応力度は $4,000\text{kgf/cm}^2$ である。主鉄筋は、橋脚基部（P3橋脚についてはスカート上面位置）から2.3mの位置で基部の半分に段落しされている。帯鉄筋としては、主鉄筋を段落しする高さまではD13（SDC40）が20cmピッチで、主鉄筋の段落し後は30cmピッチで配筋されている。コンクリートの強度は、設計図では $\sigma_{28} \geq 210\text{kgf/cm}^2$ となっている。

地盤条件としては、図-1. 2に示したように、杭の先端を支持するのはN値30程度の頁岩であり、頁岩の上面位置は右岸から左岸に向けて深くなる。中間部にはN値10～26の砂礫混じりの粘土、または、N値6程度のシルト混じり粘土となっている。杭は、直径が609.6mm、厚さが9.5～12.7mmの鋼管杭であり、その長さは右岸側の橋台では14.5m、左岸の橋台では22mである。

初音橋で用いられていた桁間連結装置は、図-1. 4及び写真-1. 3に示すように、高さ68cm、幅31cm、厚さ9mmの鋼板（SS400）を片側7本、両側で14本のボルト（M22、SS400）で隣接するウェブに固定したものであり、3主桁にそれぞれ1枚ずつ設置されていた。鋼板の一方は、桁のウェブに固定（固定孔： $\phi 23.5$ ）し、片方はボルトの取り付け孔を長円形（ $23.5 \times 60\text{mm}$ ）にして橋軸方向に $\pm 2\text{cm}$ 程度の移動が可能な構造であった。ボルトと、ウェブ及び連結板の間には厚さ4.5mmのワッシャーを挿入するとともに、設計上はボルト及びナットは緊結せず、ウェブ及び連結板との間に、それぞれ、1mmの間隔をあけることとされていた。

なお、本橋は昭和42年度の架設であり、この当時は落橋防止構造に関する規定はなかったこ

とから、橋梁架設当時から取り付けられていたものではなく、橋梁架設後に別途設置されたものと推定される。また、連結板の取り付けは、設計図では図-1.4に示した通りであるが、実際には、連結板に設けられていた可動のための長孔は、図-1.4に示したように設計とは逆の固定支承側に設けられていた。また、連結板のボルト穴とウェブのボルト穴が合致しなかったために、連結板の孔を現場でガス加工して新たに設けたり、広げたりして連結板を取り付けた形跡が見られた。

さらに、本橋では、活荷重による疲労が主原因と考えられる床版のひびわれ、コンクリートの剝離等の損傷が生じており、平成3年度～平成4年度に床版の打ち換え工事が行われている。図-1.5は、床版打ち換え前後の断面を示したものである。床版打ち換え工事は、現交通を確保しながら、片側車線ごとに行われた。なお、平成3年度にはP4～P5橋脚間、及びP5橋脚～A2橋台間の床版打ち換えが行われ、平成4年度にはその他の部分について行われた。地震は、平成4年度末の1月に起きたため、床版打ち換え工事の全てが完了した直後に地震を受けたことになる。

1.2 平成5年1月釧路沖地震による被害の概要

(1) 通行規制

平成5年1月の釧路沖地震により、初音橋では橋脚と桁間連結装置に被害を受けた。地震後の交通規制は、1月17日から重量規制(4tf)が行われ、1月22日からは片側通行規制に変更になった。通行規制は、復旧工事が完了した7月12日に解除された。

なお、本流音別停車場線の交通量(平成2年センサス)は、表-1.2に示す通りであり、現地におけるヒアリング結果によれば、本線に沿って酪農産業が盛んであり、牛乳を積載する大型車両の通行が多い路線とのことであった。

(2) 橋脚の損傷

5基の橋脚には、いずれも主鉄筋の段落し位置で躯体を1周する水平クラックが生じた。最も損傷の大きかったP4橋脚では、写真-1.4及び写真-1.5に示すように斜めクラックも生じており、曲げ破壊からせん断破壊に移行している。

道路震災対策便覧によれば耐荷力の低下が生じる「中被害」と判定される。なお、P4橋脚のひびわれ状況によれば、橋軸方向に沿って橋脚を見た場合には正面に斜めのひびわれが確認されるため、橋軸直角方向の振動が卓越したために生じた損傷と見ることができる。

このような損傷は、軸方向鉄筋を橋脚の中間高さで途中定着(段落し)する際の鉄筋の定着長が不足したために生じたものである。この被害が最も顕著に明らかになったのは、昭和57年の浦河沖地震により静内橋の橋脚で落橋寸前の損傷が生じた時である。釧路沖地震では、初音橋以外の5橋にも同種の被害が生じている。過去の被害経験に基づき、昭和55年の道路橋示方書IV下部構造編では、途中定着する主鉄筋の定着長が延長されるとともに、定着部の許容せん断応力度を低減するように改訂されており、この基準に従って設計されていれば主鉄筋の途中

定着（段落し）部でせん断破壊を生じることはないことが明らかになっている。

（３）桁間連結装置の損傷の概要

地震により、図－１．６に示すように合計15枚の連結板のうち10枚で5本から最大11本のボルトがせん断で破断した。損傷が生じた10枚のうち8枚で、片側のボルト7本が全て破断して連結機能が完全に失われている。写真－１．６は、14本のうち11本のボルトが破断した状況

（写真では10本であるが、このうち1本は破断したボルトの頭部がついているだけのもの）を示したものであり、片側の固定ボルト7本は全て破断している。なお、詳細な損傷状況の調査結果については次節に示す。

なお、前述の平成３年度～平成４年度に行われた床版打ち換え工事の工事写真の中に桁間連結装置が写っていたものがあった。これに基づき地震前にボルトの破断状況がどうであったかを示したのが図－１．７である。図中の斜線部の３箇所については、地震前（床版打ち換え工事時）にはボルトがついていたが、地震後にはボルトが破断していたことが明らかなものである。なお、P３橋脚上のG３桁の最上部のボルト１本は地震前の写真でもついておらず、もともと設置されていなかったものと考えられる。その他のボルトの地震前の状況は確認できなかった。したがって、床版打ち換え工事は、平成３年度～４年度に実施されてものであり、平成４年度の終わりの１月に地震が起こったことを考慮すると、地震が直接の原因でボルトが破断したと考えられる。

床版打ち換え工事の担当者のヒアリング調査によれば、床版打ち換え時には、どこかで１枚だけボルトがついていなかったが、その他は全てついていたと記憶しているとのことであった。

（４）上部桁の相対移動

桁間連結装置のボルトが破断しているため、隣接する主桁間には橋軸方向に相当の相対変形が生じたであろうことが推定される。このため、支承の状況及び主桁の移動状況について調査した。

写真－１．７及び写真－１．８は、それぞれ、可動支承を有する橋台（A２橋台）及び固定支承を有する橋台（A１橋台）の支承の損傷を示したものである。可動側では、支承部に桁が橋台側に移動した形跡が見られる。一方、固定側では、沓座モルタルの破損、ストッパー部の塗装の剥げた跡が見られ、相当の荷重が作用したことが推定される。

最も大きく損傷したP４橋脚上の支承を示したのが、写真－１．９である。これによれば、固定支承には変状は見られないが、可動支承には側面に振動によりこすれた跡が見られる。写真－１．１０は、P４橋脚上の高欄の継手部を示したものである。地震前にどの点が原点であったかが不明のため必ずしも正確ではないが、塗装の剥げた状況から約１cmの相対変位が生じたと考えられる。

地震による主桁の移動の程度を調査するために、連結板に残されていたボルトの痕跡（塗装の剥離した跡）と震後の桁間の遊間量から地震による相対変位量を推定した。桁間連結板には、図－１．８(a)に示すように塗装によるボルトの痕跡が残されていたためこれを地震前の状況（図－１．８(b)）と仮定して、次式により地震前の主桁遊間距離を算定した。

$$X_u = W_u - 2d \quad (1.1)$$

$$X_b = W_b - 2d \quad (1.2)$$

ここで、

X : 地震前の主桁遊間の推定量 (m)

W : 桁間連結板に残されていたボルト痕跡による幅 (測定値: m)

d : 主桁ウェブに設けられたボルト穴中心位置の桁端からの距離 (= 0.05 m)

u, b : u は上端位置、b は下端位置を示す。

以上のようにして、主桁間の遊間量及び地震による移動量を推定した結果を示したのが表-1.3である。ここで、主桁間の遊間量に関しては、上端と下端で異なるものもあるため、両者について示している。なお、表中の斜線部が連結装置のボルトが破断した位置である。表-1.4は、相対移動量の大きさとボルトの破断が生じた位置の関係を示したものである。これによれば、以下の点が指摘される。

1) 表-1.3によれば、主桁間の遊間量は、いずれの位置でも上端部が大きくなっている。

その差は0.3cm~2.4cm (平均値: 1.33cm) である。したがって、主桁は橋脚上では図-1.

9に示すように変形していることがわかる。しかしながら、架設当初、または、地震前の状況がわからないため、これが何の原因で生じたのかは特定できない。

2) 表-1.4によれば、相対移動量の大きいところにおいてボルトの破断が生じているという傾向は見られない。

(4) 橋脚の復旧

地震後には、写真-1.11に示すように、P3橋脚及びP4橋脚については、橋脚の張り出し部に支保工を設置するとともに、橋脚の左右両側にRC製のフーチングを新たに打設し、これから仮橋脚が設置された。

損傷を受けた橋脚のうち、損傷程度が比較的大きかったP3橋脚とP4橋脚についてはRC巻立てにより、その他の橋脚についてはひびわれ補修工事が行われた。図-1.10は、P3橋脚とP4橋脚の補修図を示したものである。ここで、河積阻害率を大きくしないために、断面を小判型に巻立てている。補修設計では、道路震災対策便覧(震災復旧編)に従い、既設部分の耐力を無視し、新設部分のみで地震力を受け持つように設計された。

完成状況を写真-1.12に示す。ここで、最も手前に見えるのが小判型に補修されたP3橋脚、奥2つの橋脚がひびわれ補修が行われたP1及びP2橋脚である。

(5) 桁間連結装置の復旧

桁間連結装置に関しては、図-1.11に示すように復旧された。基本的に当初設計と同様であり、既設の連結板を全て撤去し、新規の連結板を現場で主桁の遊間量に合わせて設置された。

1.3 桁間連結装置の設計照査

道路橋に対する落橋防止構造の規定は、昭和46年の道路橋耐震設計指針で初めて基準に取り入れられ現在に至っている。表－1. 5は、落橋防止構造の規定に関する変遷を示したものである。本連結装置はいつ設置されたかは不明であるが、過去の震災点検により付けられたとすれば、昭和54年震災点検と考えられ、したがって設計基準としては昭和55年の道路橋示方書により設計されたものと考えられる。

このため、昭和55年の道路橋示方書により本連結装置を照査してみると表－1. 6の通りとなり、設計上は満足されていることになる。なお、表－1. 6に示した設計照査では、本橋中で支間長が最も長い部分で照査した。

表-1.1 初音橋の設計条件等

地名	音別町二俣
橋格	2等橋 (TL-14)
上部構造型式	単純活荷重合成桁 3主桁
橋長	171.74m
幅員	車道: 7m
支間割	26.1m × 2 + 31.82m × 2 + 26.1m × 2
斜角	72° 17' 30"
下部構造型式	橋台: 円形断面RC張り出し式 橋脚: RC逆T式
基礎型式	杭基礎 (鋼管杭)
適用示方書	昭和39年鋼道路橋示方書 昭和41年道路橋下部構造設計指針
設計震度	0.2 (推定)

表-1.2 本流音別停車場線の交通量 (平日12時間)

平日12時間交通量		1,200台
大型車		149台
内訳	バス	17台
	大型普通貨物	111台
	特殊車	21台

表-1. 3 主桁遊間量の測定値及び地震による移動量の推定値 (単位: cm)

主 桁	橋脚番号	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
G-1	地震前遊間量 ①	9.0	10.0	5.5	10.0	7.8
	地震後遊間量	上 端②	10.4	9.3	5.5	11.6
		下 端③	9.1	7.8	3.1	9.5
		②-③	1.3	1.5	2.4	2.1
	相 対	上 端	1.4	-0.7	±0.0	1.6
	移動量	②-①				
G-2	地震前遊間量 ①	11.0	11.0	5.5	10.5	8.7
	地震後遊間量	上 端②	11.2	9.5	6.3	10.5
		下 端③	10.9	8.4	3.9	9.2
		②-③	0.3	1.1	2.4	1.3
	相 対	上 端	0.2	-1.5	0.8	0.0
	移動量	②-①				
G-3	地震前遊間量 ①	11.0	9.0	5.5	10.0	11.0
	地震後遊間量	上 端②	11.3	7.7	7.0	8.7
		下 端③	10.1	6.7	4.7	7.7
		②-③	1.2	1.0	2.3	1.0
	相 対	上 端	0.3	-1.3	1.5	-1.3
	移動量	②-①				
		下 端	-0.9	-2.3	-0.8	-2.3
		③-①				

注1) 相対移動量については、正值は遊間量が拡大する方向、負値は遊間量が狭くなる方向とする。

2) は、ボルトの破断が見られた連結板位置を示す。

3) 主桁位置及び橋脚番号は、下図の通り。

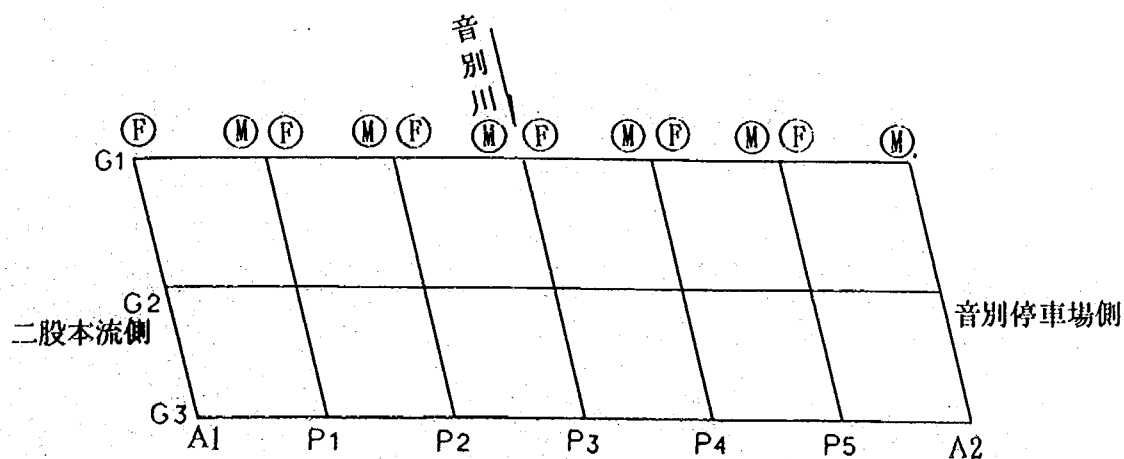


表-1. 4 相対移動量の大きさとボルトの破断位置の関係

橋脚番号 主桁番号	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
G-1	△	○	○	△	△
G-2	×	○	△	△	×
G-3	×	○	△	○	×

注1) 〇は、ボルトの破断が見られた位置

2) 相対移動量の大きさ

○：2 cm以上

△：1 cm以上 2 cm未満

×：1 cm未満

表-1.5 道路橋の設計における落橋防止構造の規定の変遷

制定年	基準名	落橋防止構造に関する規定の概要
昭和46年	道路橋耐震設計指針（建設省）	5章 設計一般（5.2 落橋防止構造） 1）可動支承部には移動制限装置を設ける。 2）桁端部には1）の他に以下を併用するのがよい。 ① 桁が落下しないように下部構造頂部に距離を十分にとる。 ② 隣接桁間を連結する。 3）移動制限装置の移動量の規定 4）移動制限装置の設計水平震度は50%増以上とし、設計水平力Hは次式による。 $H \geq R_d \cdot k_h \times 1.5$ R_d：死荷重反力、k_h：設計水平震度 5）橋軸方向の支承縁端と下部構造頂部縁端との距離S ① 支間長 $l = 100\text{m}$以下 : $S = 20 + 0.5 l$ ② 支間長 $l = 100\text{m}$以上 : $S = 30 + 0.4 l$ 特に重要な橋で4種地盤のところでは $S \geq 35\text{cm}$ 6）掛け違い長さは落橋までの距離が60cm以上、4種地盤における橋においては70cm以上。 7）隣接するけたの支承の一方または両方が可動の場合は、連結装置には3）の可動距離を設ける。両方の支承が固定の場合は連結装置は活荷重による桁の回転が自由になるようにする。
昭和55年	道路橋示方書Ⅴ耐震設計編（建設省）	5章 耐震設計における構造細目（5.2 落橋防止構造） 1）可動支承部には移動制限装置を設ける。 2）桁端部には1）の他に次のいずれかを満足する。 ① 下部構造頂部縁端までの桁の長さ ② 落橋防止装置 3）可動支承の移動制限量は可動支承の移動可能量 4）移動制限装置の設計水平震度は50%増とする。 5）桁端から下部構造頂部縁端までの桁の長さ S_E ① 支間長 $l \leq 100\text{m}$: $S_E = 70 + 0.5 l$ ② 支間長 $l > 100\text{m}$: $S_E = 80 + 0.4 l$ 特に重要な橋で4種地盤のところでは $S \geq 35\text{cm}$ 6）落橋防止装置は次の構造とする。 ① 桁と下部構造を連結する構造 ② 桁または下部構造に突起を設ける構造 ③ 2連の桁を相互に連結する構造 7）落橋防止装置は、移動や回転などの支承の機能を損なってはならない。 8）落橋防止装置の設計に用いる設計水平震度は2倍以上とする。
平成2年	道路橋示方書Ⅴ耐震設計編（建設省）	同上

表-1. 6 桁間連結装置の設計照査

支 間 割		$26.1\text{m} \times 2 + 31.82\text{m} \times 2 + 26.1\text{m} \times 2$
計算対象支間長		31.82m
死 荷 重 反 力		$2.68\text{tf/m} \times 31.82\text{m} / 2 = 42.64\text{tf}$
設計水平震度 k_h		0.2
設計水平力 H		$2 \times 0.2 \times 42.64\text{tf} = 17.1\text{tf}$
連 結 板	寸 法	$680 \times 9 \quad \phi 23.5 \times 7 \quad (\text{SS400})$
	断 面 積	$(68.0 - 2.35 \times 7) \times 0.9 = 46.4\text{cm}^2$
	応力度照査	$\sigma = 17,100\text{kgf} / 46.4 = 377\text{kgf/cm}^2$ $< \sigma_s = 1,400 \times 1.5 = 2,100 \quad (\text{OK})$
ボ ル ト	寸 法	M 2 2 7 本 (SS400)
	有 効 径	20.376cm^2
	断 面 積	$\pi \cdot 20.376^2 / 4 = 3.26\text{cm}^2$
	応力度照査	$\tau = 17,100\text{kgf} / 3.26 / 7 = 750\text{kgf/cm}^2$ $< \tau_s = 800 \times 1.5 = 1,200 \quad (\text{OK})$

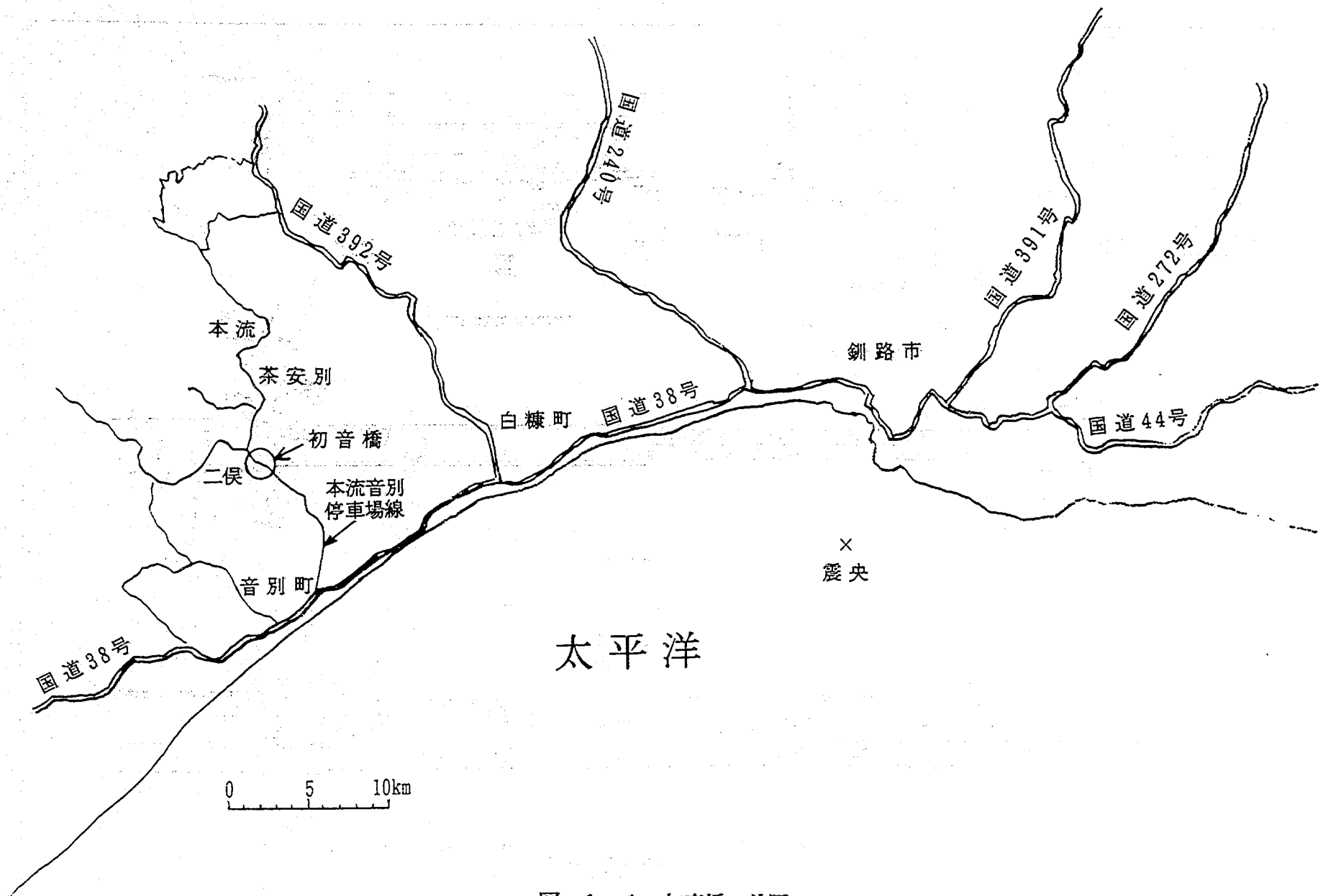


図-1.1 初音橋の位置

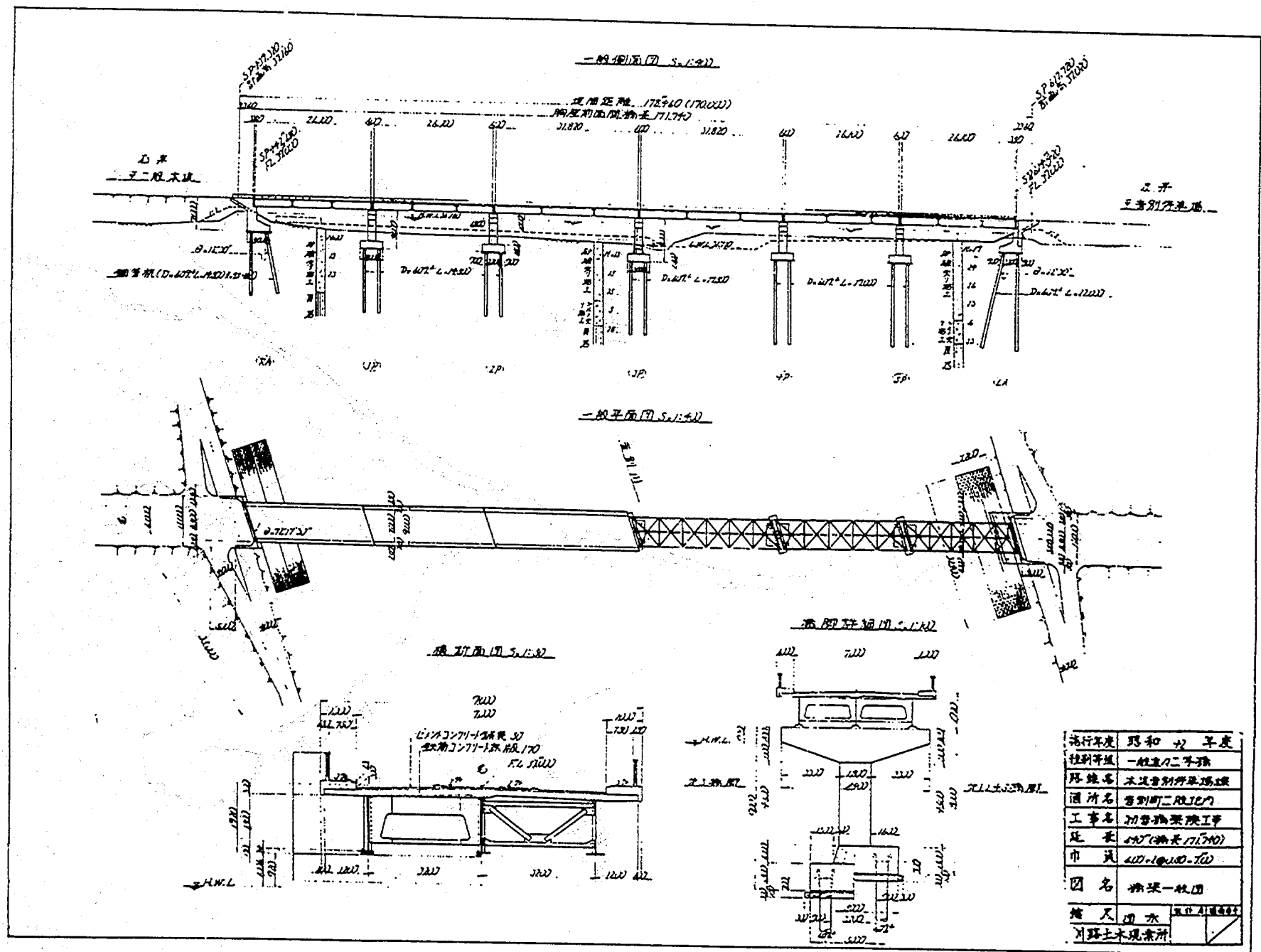


図-1.2 初音橋一般図

施行年度	昭和 42 年度
設計年度	一般道 1 等橋
路線名	木道宮別所至瑞穂線
箇所名	香別町二股 JCT
工事名	初音橋架設工事
延長	64.0 (橋長 17.540)
巾	10.0 (橋幅 10.0)
図名	橋梁一般図
縮尺	1/1000
資料	国土交通省

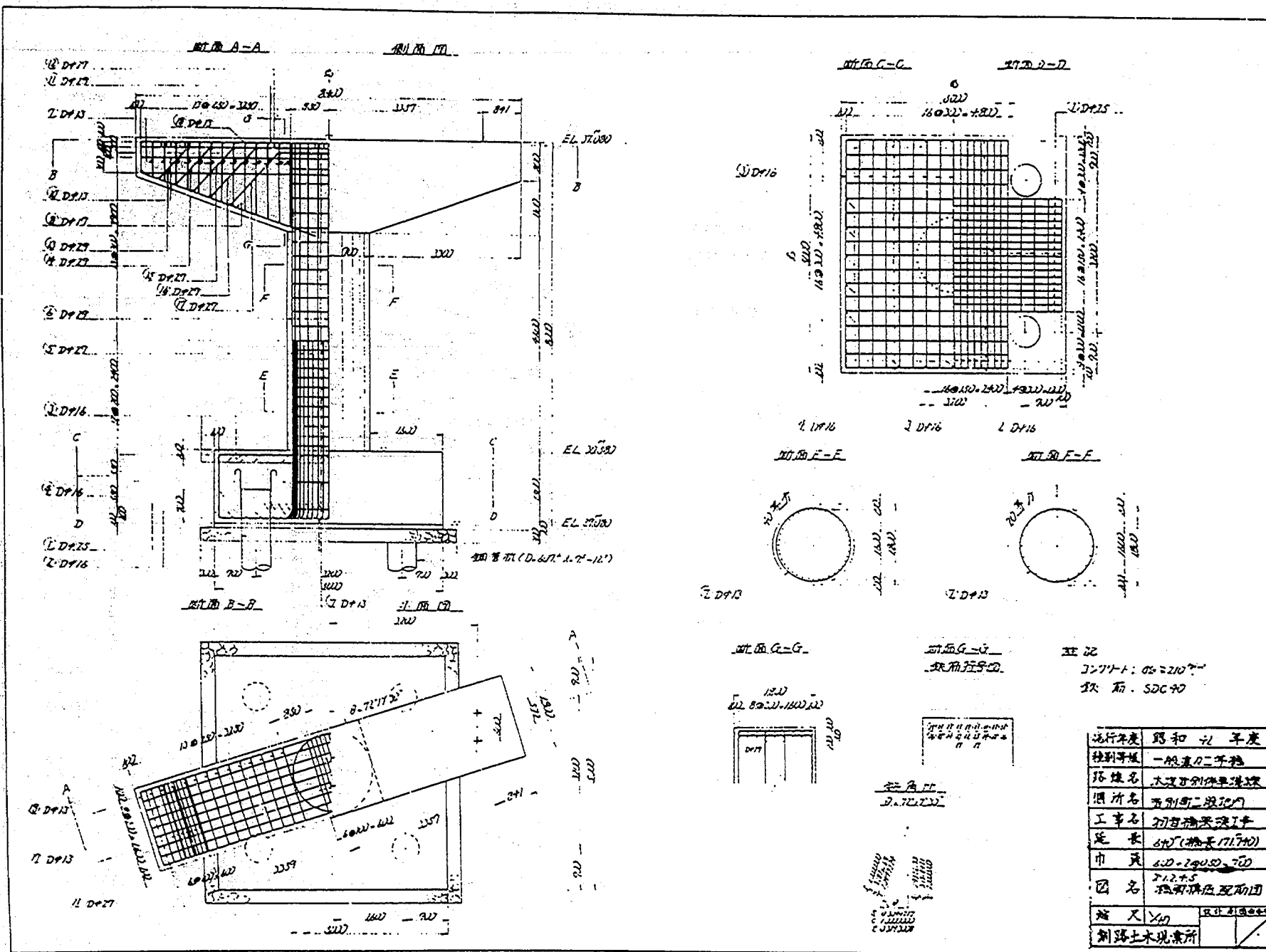
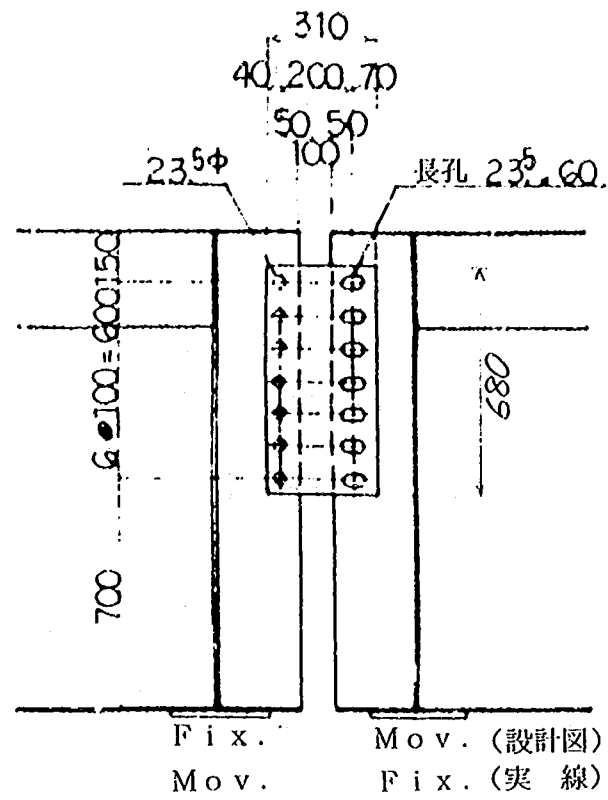


図-1.3 下部構造一般図 (a) P1、P2、P4、P5橋脚

图-1.3 下部构造一般图 (b) P3 桥脚



1-P1 310.9.680
14-B.N 22φ.50 (2-washer)

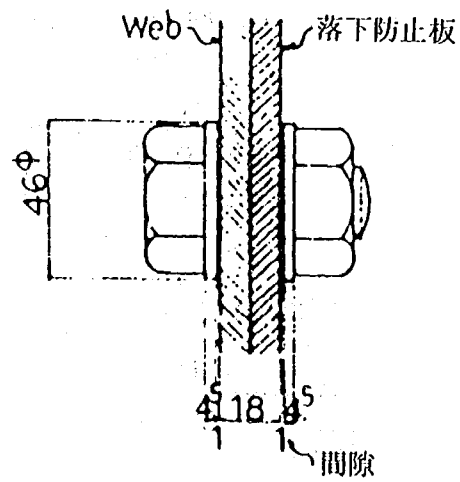
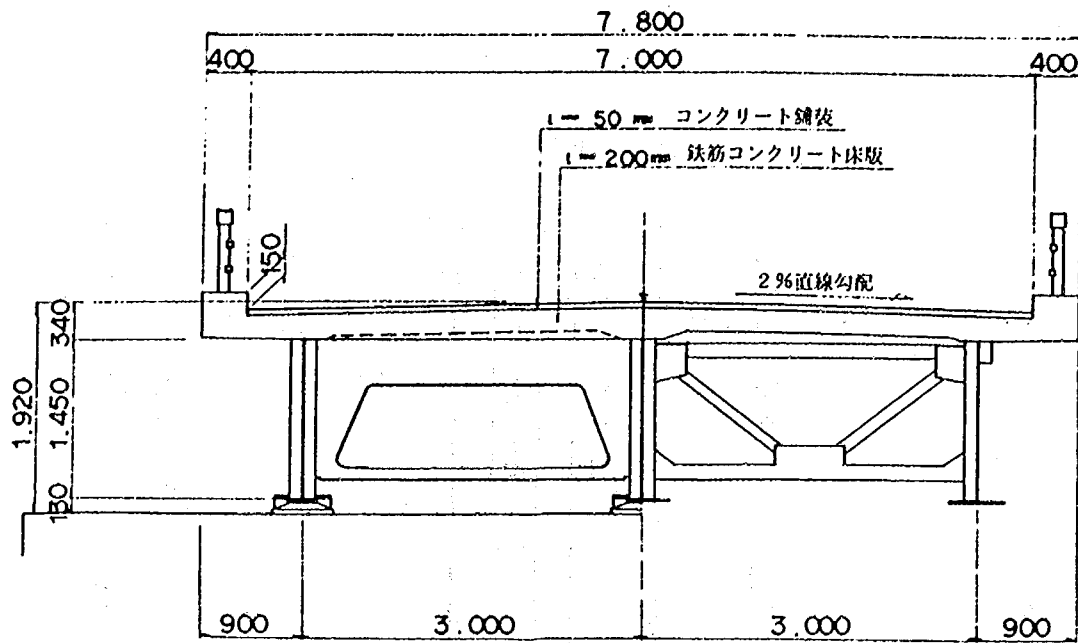
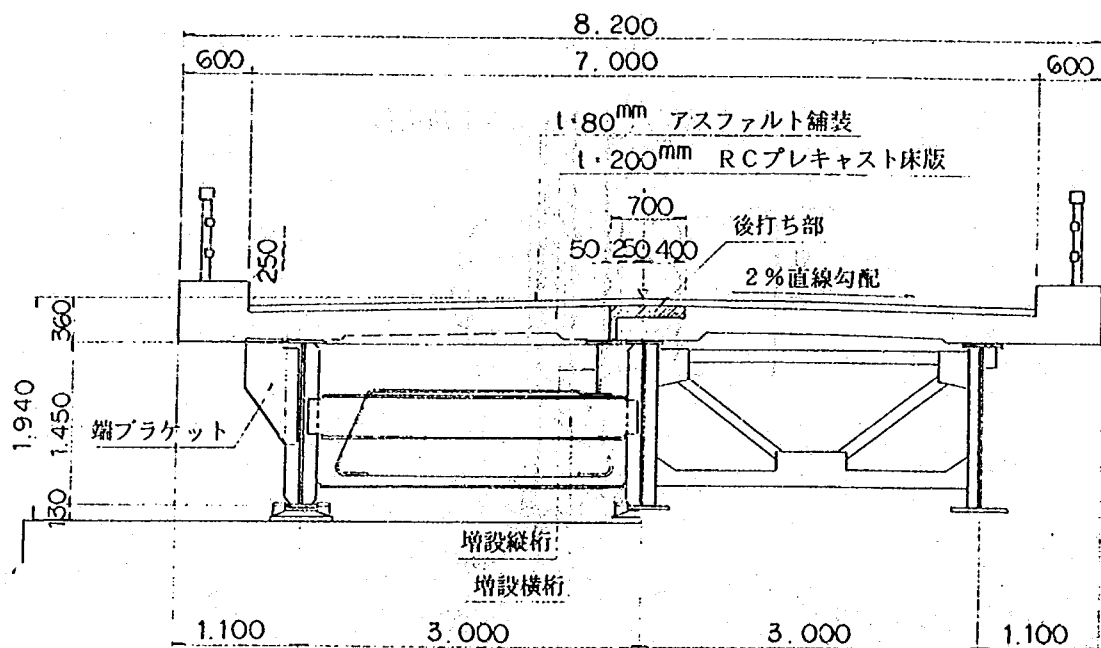


図-1.4 桁間連結装置の構造図



(a) 既設断面



(b) 床版打ち換え後の断面

図-1.5 床版の打ち換え

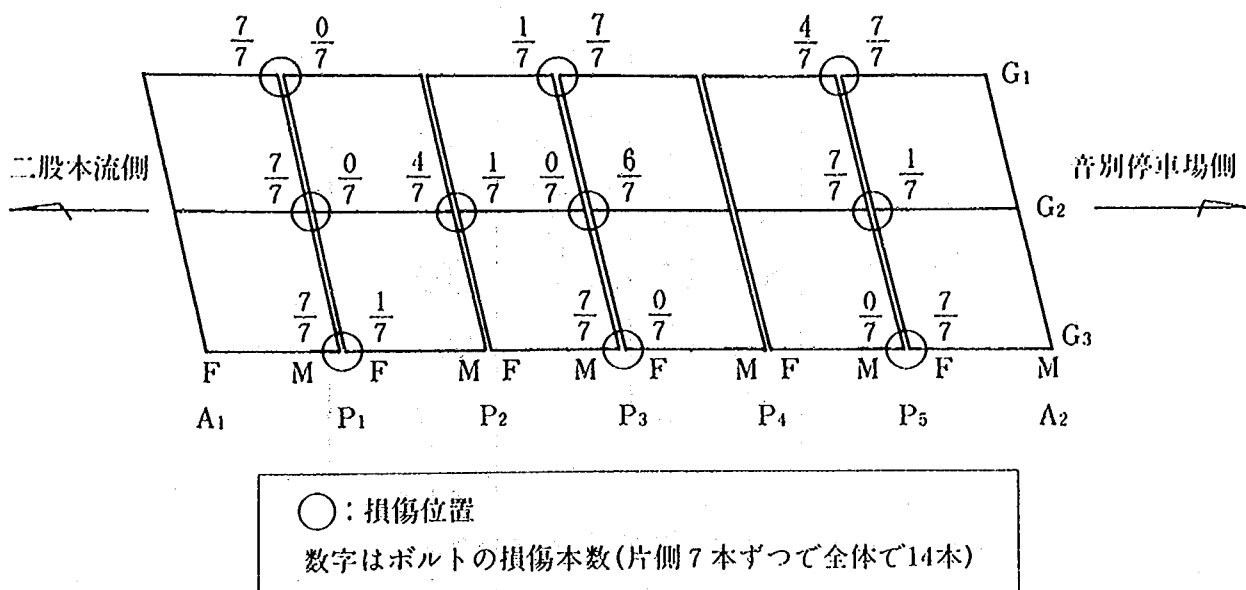


図-1.6 初音橋の桁間連結装置の損傷が生じた位置

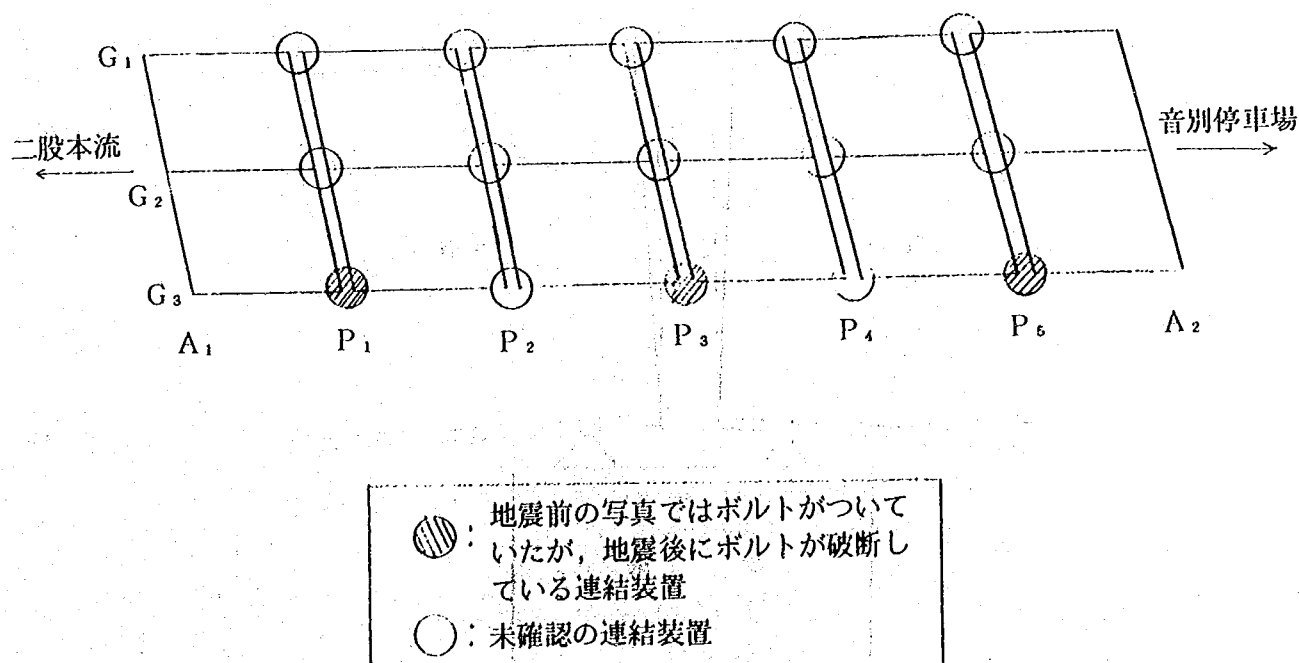


図-1.7 地震前にはついていたが地震後にボルトの脱落が確認された連結装置

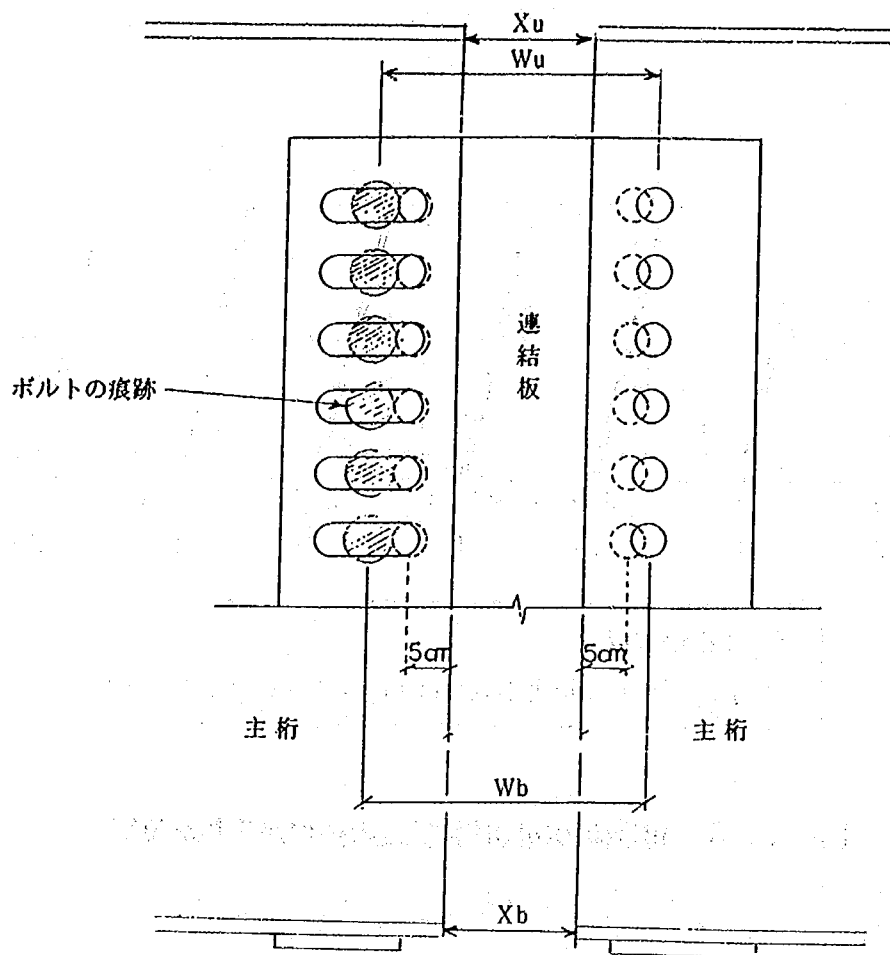


図-1.8 桁間連結板に残されていたボルトの痕跡と推定遊間距離

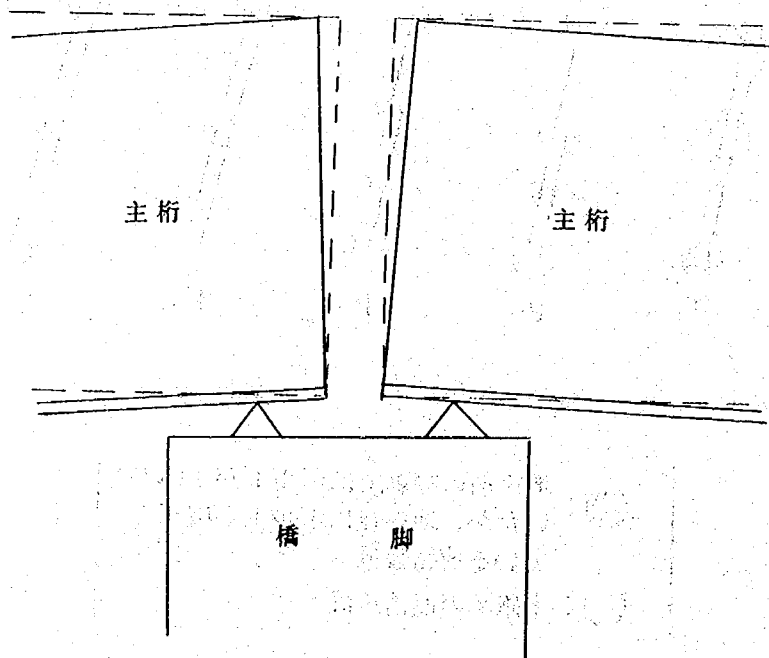
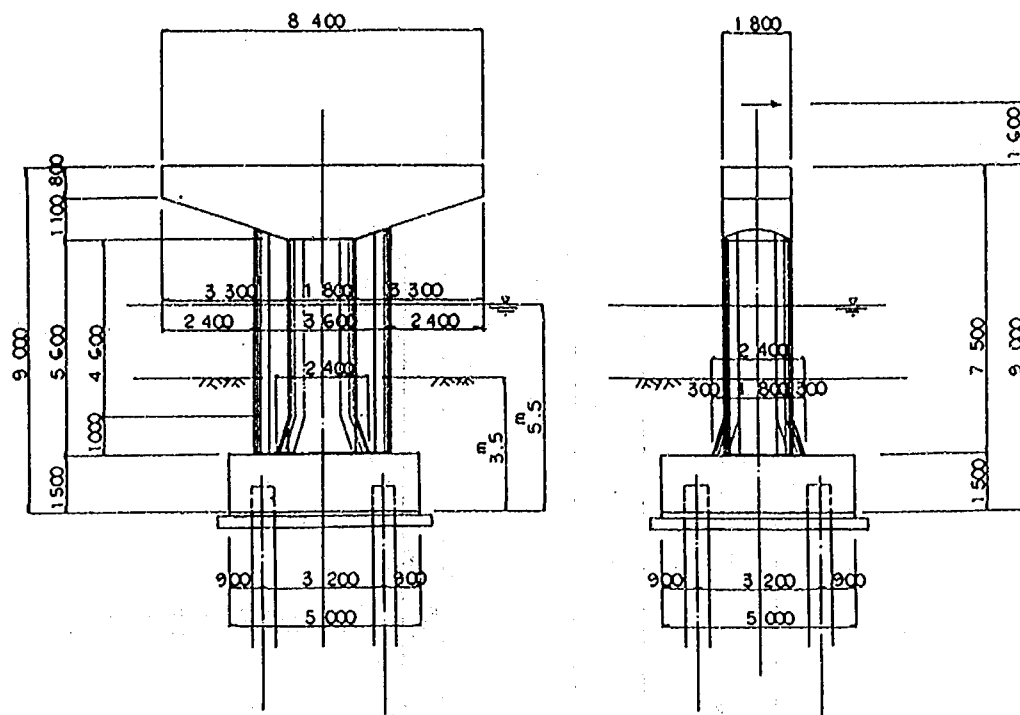
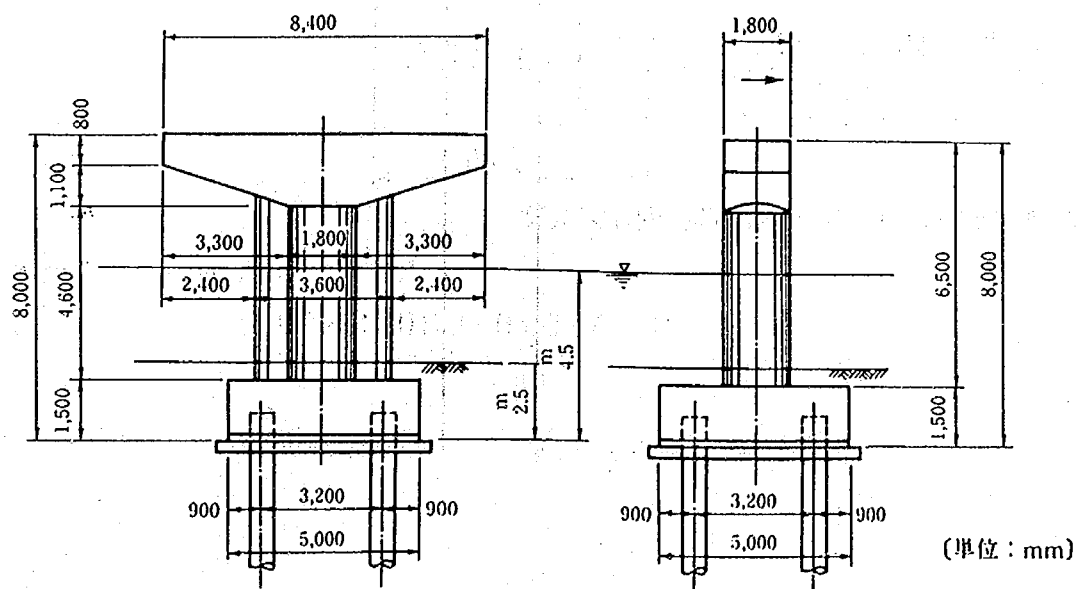


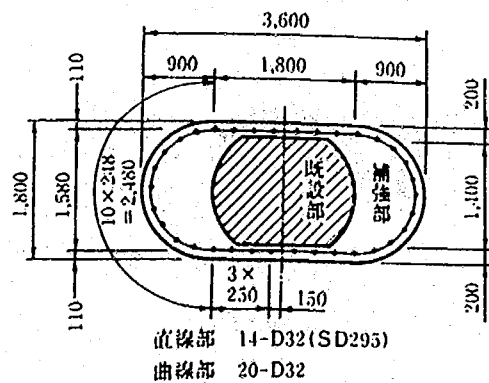
図-1.9 主桁の遊間量から推定した主桁の変形



(a) P 3 橋脚



(b) P 4 橋脚



(c) 橋脚躯体断面

図-1.10 初音橋橋脚の補修図

連結部 15箇所

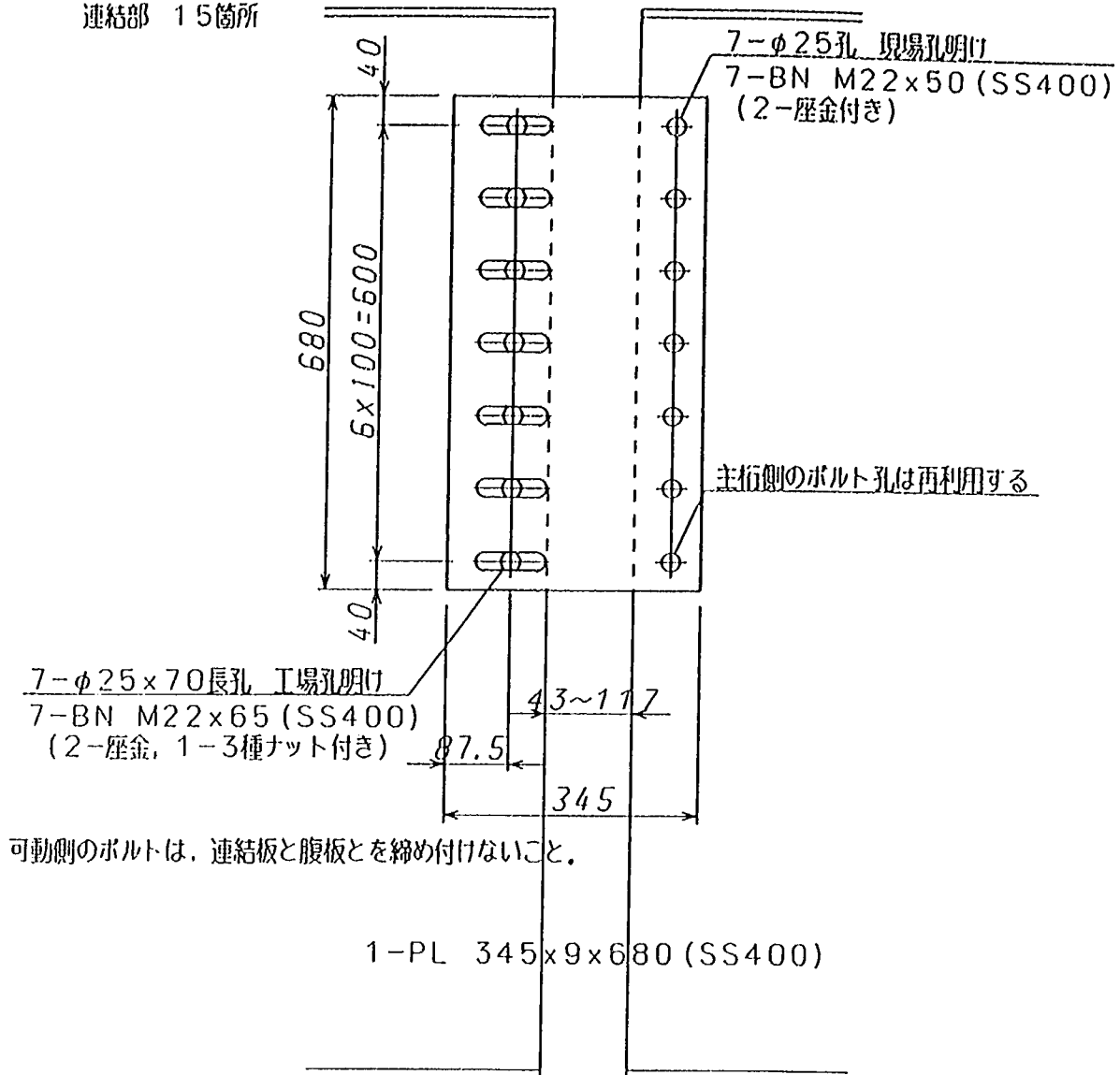


図-1.11 桁間連結装置の復旧

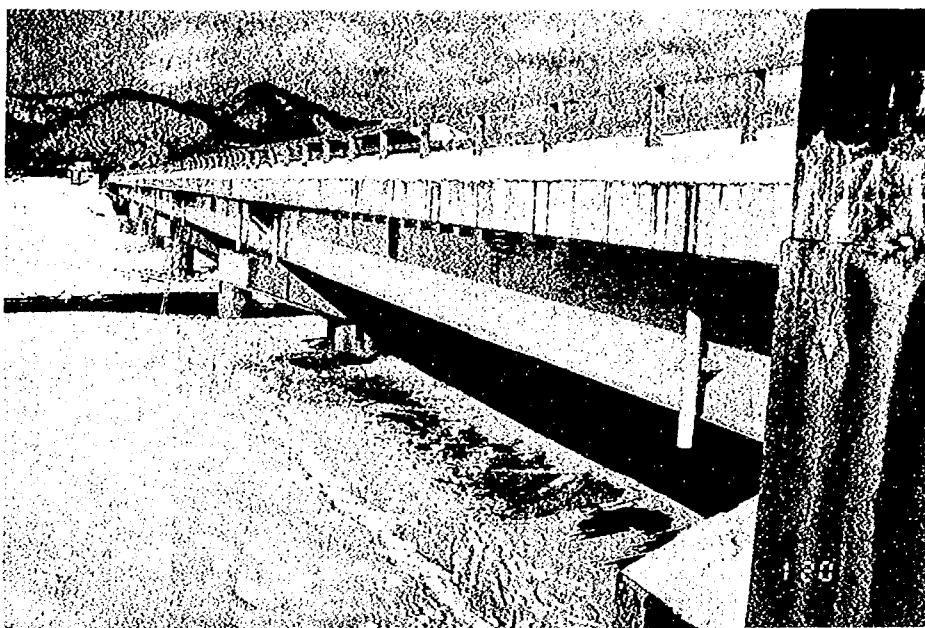


写真-1. 1 初音橋



写真-1. 2 橋脚

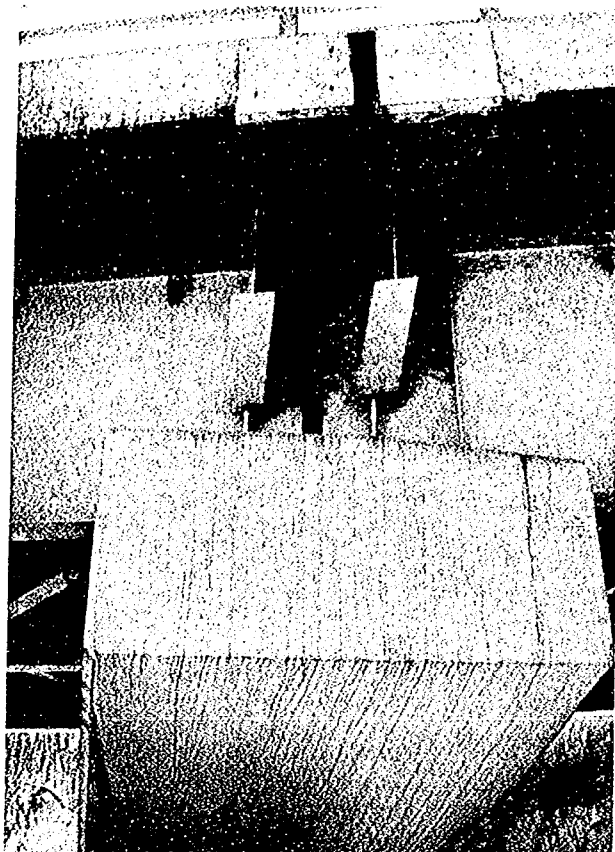
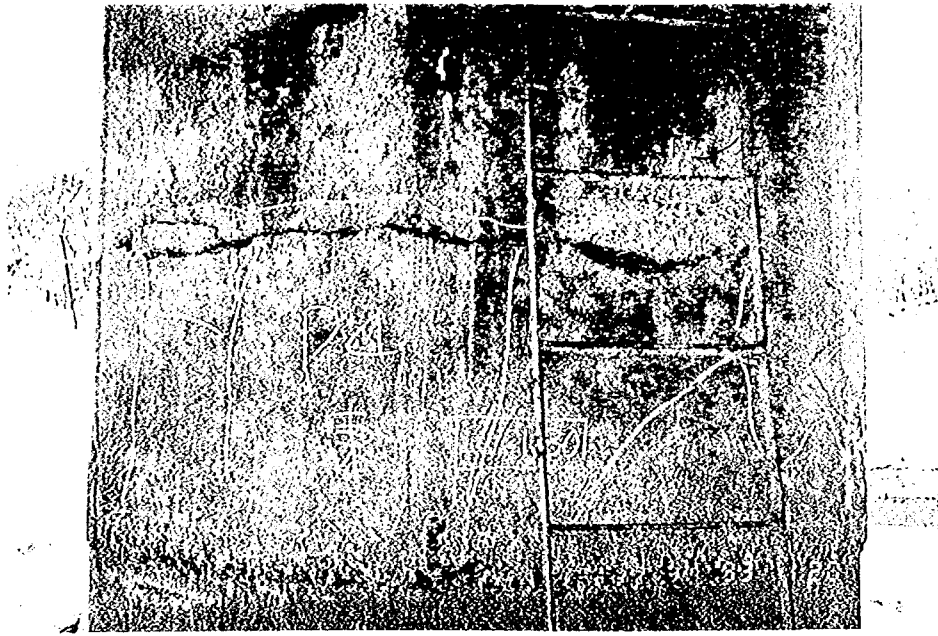


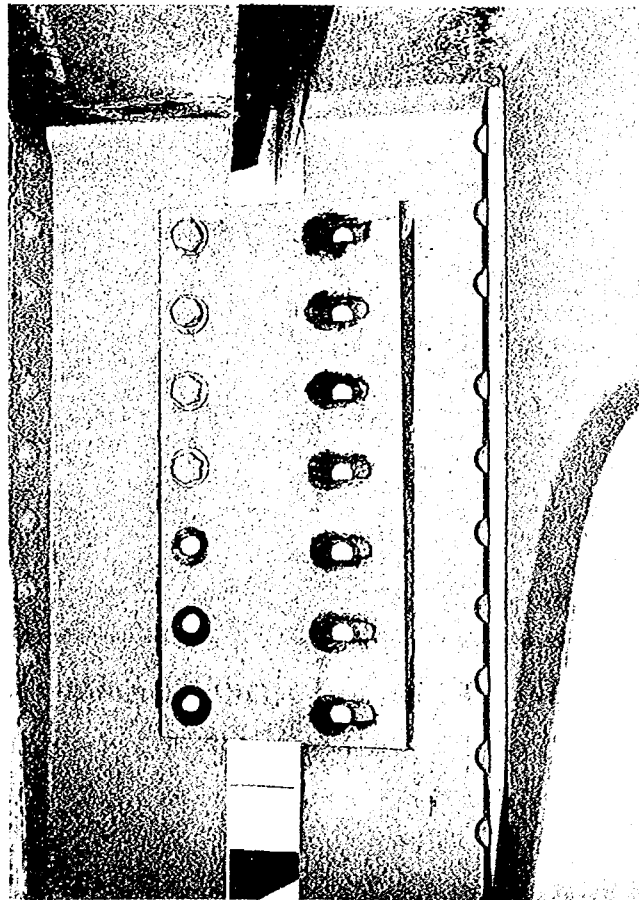
写真-1. 3 桁間連結装置



写真-1. 4 P 4 橋脚の斜めひびわれ



写真－1．5 P 4 橋脚の斜めひびわれ



写真－1．6 14本のうち11本のボルトが破断した桁間連結装置

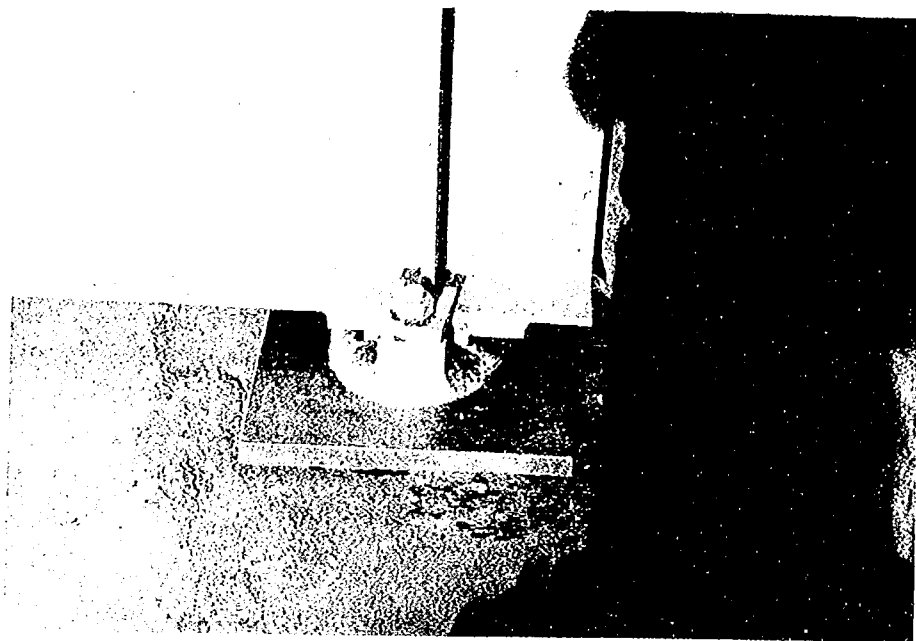


写真-1.7 A2橋台の可動支承部

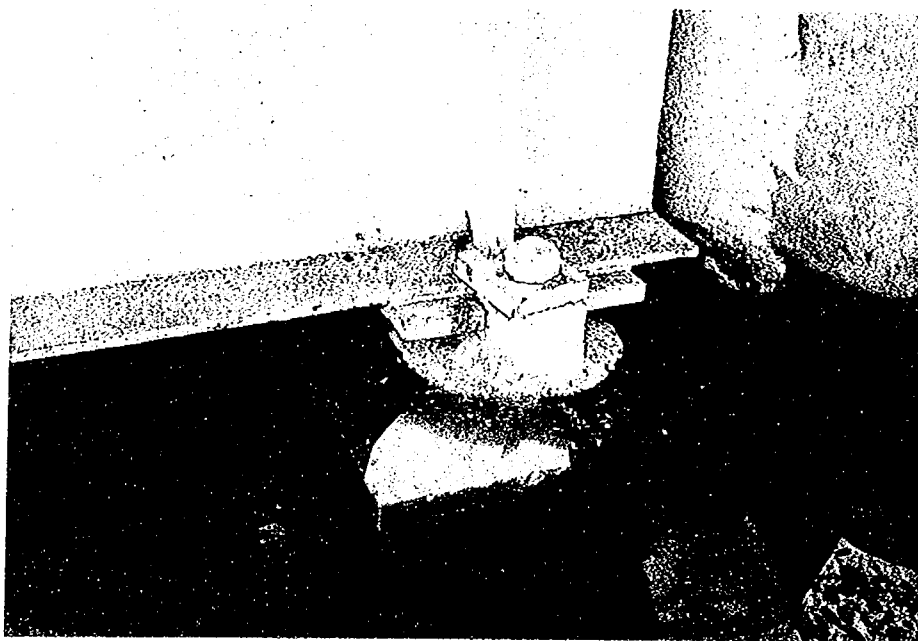
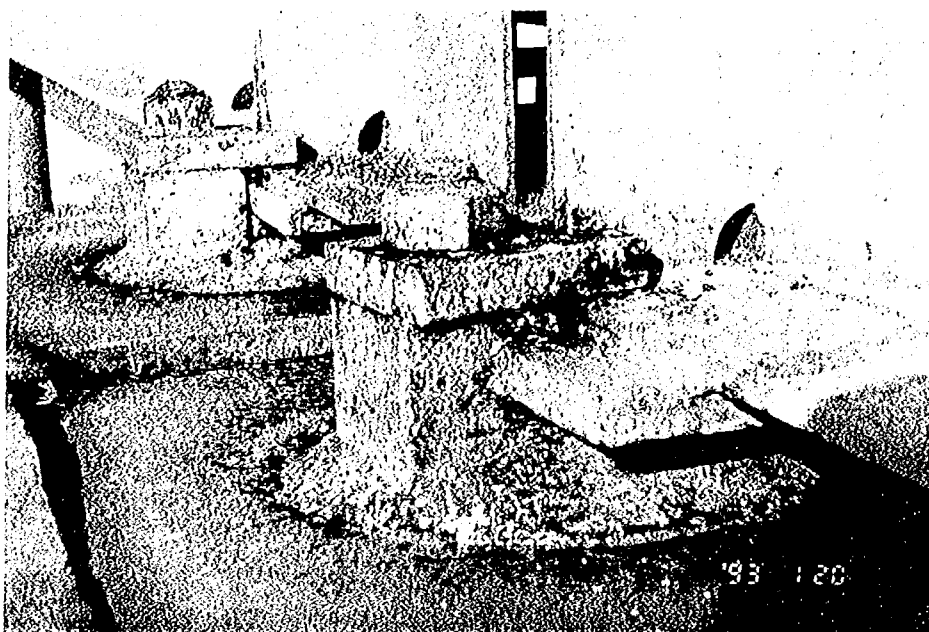
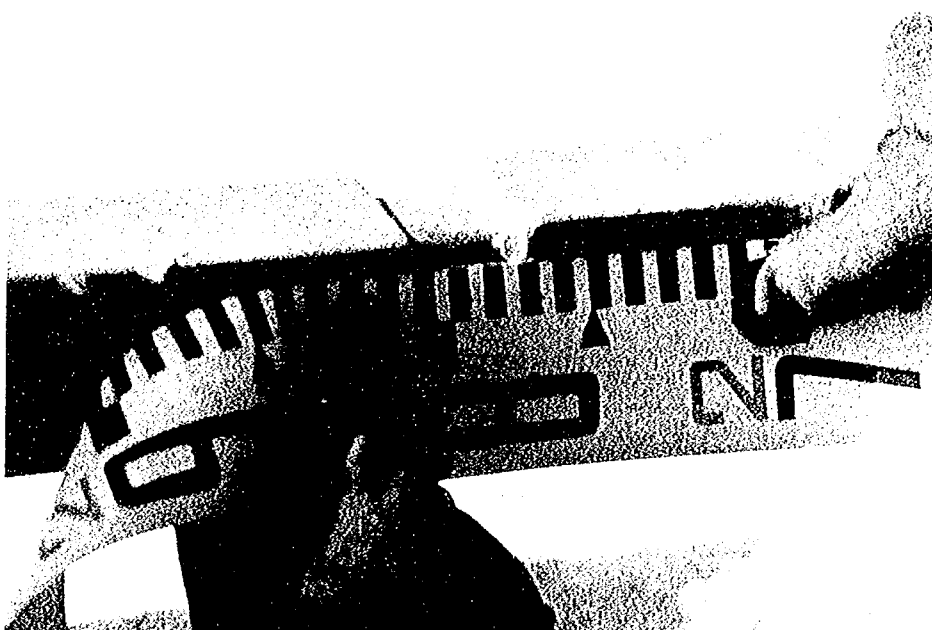


写真-1.8 A1橋台の固定支承部



写真－１．９ P４橋脚上の支承の状況



写真－１．１０ P４橋脚上の高欄の継手の抜け出し

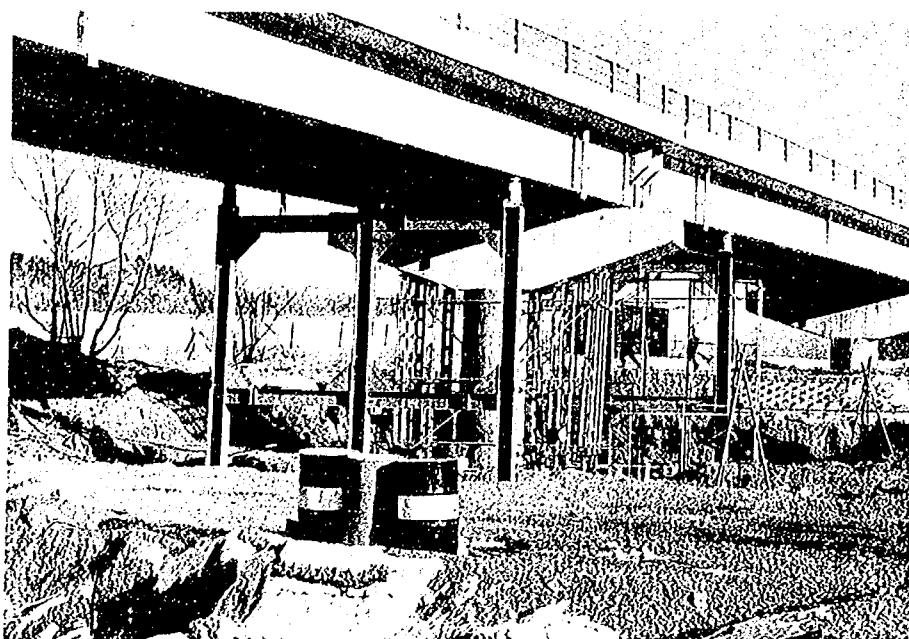


写真-1.11 P4橋脚の仮支持



写真-1.12 補修完成

2. 初音橋の桁間連結装置の全数調査

2. 1 ボルト破断状況の目視調査

地震後の調査により、図－2. 1に示すように、合計15個の桁間連結装置のうちの10枚において全部または一部のボルトが破断、または、紛失していたことが明らかになった。前述のように地震前の床版打ち換え工事の際にはボルトがついていたことも確認されており、地震により桁間連結装置が損傷を受けたと考えられる。ここでは、ボルトの破断状況、力の作用状況を推定するために、これら10個の桁間連結装置の連結板とこれを主桁ウェブに固定していたボルトの損傷状況を詳しく調査した。

以下に各橋脚ごとに連結板の損傷状況を調査した結果を示す。ここでは、 i 橋脚上の j 主桁の連結板を $P i G j$ と表記することとする。

なお、ボルトの破断状況としては、地震発生1月後の2月15日に調査された結果、地震後の復旧工事に伴って撤去される直前（4月24日、地震発生約3カ月後）の状況と撤去解体後の状況を写真で示した。地震発生1月後と3カ月後の写真は、さびの違いを見るために示した。解体後の状況については、ボルトは対応する孔の横に並べた。ただし、地震後にもボルトが固定されていたものについては完全に孔に対応するものであるが、ボルトが破断したものについては連結板の付近に落ちていたものを集めたものであり、対応する穴の特定はできない。

なお、連結板撤去の担当した者からヒアリングした結果によれば、ボルトは比較的簡単にはずれ、特に張力を入れて緊結してはいなかったとのことであり、設計通りに設置されていたと考えられる。また、本橋の塗装塗り替え工事は、架設後昭和61年に1度だけ行われている。また、平成3年度～4年度に実施された床版打ち換え工事に伴って一部の塗装の塗り替えが行われたとのことである。

2. 1. 1 P 1 橋脚上の桁間連結装置

(1) 桁間連結装置 P 1 G 1

写真－2. 1に示すように、丸孔（固定）側のボルト7本は全て紛失し、長孔（可動）側のボルト7本は全て残っている。しかしながら、写真（b）からわかるように、連結板にはボルトがついていた痕跡が明確に認められるが、写真（a）によれば塗装のはがれた跡がないことから、地震時にはボルトはついていなかったと推定される。ただし、ウェブの塗装下にはワッシャーのついていた形跡が明確に認められ、ここが塗装される以前は固定されていたと推定される。また、連結板の周辺には破断したボルトが散在していたことを考慮すると、昭和61年の塗装の前、あるいは、地震前の床版打ち換え工事の前に破断したのではないかと考えられる。

写真－2. 2は、連結板とウェブが接していた部分を示したものである。長孔付近で、水平方向に擦れた痕が明確に見られる。写真－2. 3に示すように、左側は円形になっているが、右側は上塗りが剥離したようにギザギザで新鮮な下塗りが見える。また、写真－2. 1に示したように地震直後はボルトは右側に位置していたことから、地震により連結板が振動し、ボル

トの位置が移動したことを示している。

図-2. 2は、連結板の表の面にトレーシングペーパーを重ねて、ボルト孔の形状、塗装の境目の形状を写し取ったものである。また、孔の板厚部分に残された痕跡からボルトの力が作用したと推定される方向を矢印で示した。連結板に残された痕跡によれば、ボルトを介してほぼ水平方向に力が作用したものと推定される。また、一部のボルト（11及び12）では両方向に力が作用したと考えられる痕跡が認められる。写真-2. 4は、ボルトが破断した丸孔11の板厚部に残された打痕を示したものである。写真-2. 5は、同様にボルトが破断しなかった長孔7の打痕で、孔の下にボルトの山によって削れたあとがあり、右端に打痕がある。衝突の方向は、ほとんど平行で、水平方向に対してやや角度をもっている。その他の丸孔のほとんどに連結板の引張方向に力が作用した痕跡があり、2つの孔には圧縮方向の痕跡も認められるが、引張方向のくい込みの方が深い。長孔は引張方向の痕跡が3つの孔にある。両方向の痕跡があるのは、力が左右両方向に繰り返されていることを示している。ただし、引張方向の痕跡が多く、くい込みが深いのは、その方向に作用した力が大きかったことを示している。

写真-2. 6は、破断したボルトを示したものである。これらはいずれも軸直角方向にせん断で破断している。破断面の腐食は著しい。前述のように本ボルトについては地震前に破断したものであり、その原因はよくわからない。

写真-2. 7は、未破断のボルトを示したものである。ボルト1～4は、地震により生じたと考えられるへこみや磨耗は明確に認められない。このうち、ボルト1と2は腐食がやや著しい。また、ねじ山のつぶれが認められ、これは特にボルトの頭（ナットの反対側）付近で、連結板と接触する部分が激しい。ボルト5～7はねじ山のつぶれが認められる。特にボルト7ではねじ山のつぶれが著しく、またせん断変形も認められる。

以上の状況を見てみると、連結板の塗装状況から釧路沖地震の時には片側7本のボルトは設置されていなかったと推定され、塗装工事が行われたのが昭和61年、あるいは、地震前の床版打ち換え工事であることを考慮すると、ボルトの破断は今回の地震により破断したものではなく、過去の地震（浦河沖地震）、または、活荷重等の疲労破断が考えられるが明らかではない。

（2）桁間連結装置 P 1 G 2

写真-2. 8に示すように、丸孔側のボルトは全て紛失し、長孔側のボルトは全て残っている。写真-2. 9は、連結板の表の面の長孔4の塗装の剥離状況を示したものである。これによれば、ボルトは長孔の中央より右側において振動した形跡が認められる。

図-2. 3に示すように、丸孔のほとんどに連結板の引張方向の痕跡が認められるが、丸孔14には圧縮方向の痕跡も認められる。引張方向の痕跡の方向はほとんど同じ方向であり、水平からわずかに上向きとなっている。長孔側には明確な痕跡はない。

長孔側に残っていたボルトを写真-2. 10に示す。いずれのボルトについてもねじ山がつぶれている。ボルト1は腐食がやや顕著である。ボルト2、4～7は、ねじ山のつぶれと地震等により一方向に力が作用した痕跡が認められる。ボルト7は、やや曲がっている。

（3）桁間連結装置 P 1 G 3

写真－2. 11に示すように、丸孔側のボルトはすべて紛失し、長孔側のボルトは最下端のボルト7だけが紛失している。ただし、写真（a）に示すように喪失したボルトのうち、丸孔側の上2つについては以前ついていたボルトのワッシャー部分の塗装がきれいになっており、地震の際にはボルトは設置されていなかったと推定される。また、連結板には回転移動した形跡が認められる。写真－2. 12は、該当する桁間連結装置の地震前の床版打ち換え工事の際に撮影されたものであるが、ボルトは全てついており、塗装のきれいな上記の2箇所については矛盾が生じる。これは、よくわからないが、床版打ち換え工事時にはついていたが、床版の打ち換えが完了した際には2本が脱落していたと考えられ、地震によるものではないと考えられる。

図－2. 4に示すように、連結板には引張方向の痕跡が認められる。痕跡は長孔3～7、丸孔の全てに明確に認められる。写真－2. 13、写真－2. 14はボルトを介して力が作用したために生じた痕跡を示したものである。しかし、連結板には長孔と丸孔とも圧縮方向の痕跡は認められない。

破断ボルトは、写真－2. 15に示すように、いずれもP 1 G 1の破断ボルト同様にせん断で破断している。破断面の腐食はかなり著しい。破断しなかったボルトを写真－2. 16に示す。ボルト3～6は、全周にわたってねじ山がかなりつぶれている。

2. 1. 2 P 2 橋脚上の桁間連結装置

（1）桁間連結装置 P 2 G 1

写真－2. 17に示すように、桁間連結装置 P 2 G 1 には一切損傷は認められなかった。ただし、長孔側には塗装のはがれが見られ、地震により振動した形跡が認められる。振動の変位量としては、写真から読みとると1 cm程度である。

（2）桁間連結装置 P 2 G 2

写真－2. 18に示すように、丸孔のボルト1～4だけが破断していた。長孔側のボルト7は地震1月後の写真では設置されていたが、連結板を撤去する際にははずれていた。しかしながら、孔には打痕が認められないことから、未破断ボルトを何らかの理由で撤去したものと判断される。

図－2. 5に示すように、長孔1～3および丸孔8、11、12に連結鈑の引張方向の痕跡は明確に認められる。しかし、長孔と丸孔とも連結板の圧縮方向に力が作用した痕跡は認められない。

破断ボルトは、写真－2. 19に示すように、いずれもP 1 G 1の破断ボルト同様にフラットな断面を呈しているが、腐食はかなり激しい。また、写真－2. 20のように破断面以外に亀裂のあるものもある。未破断のボルトを写真－2. 21に示す。全てのボルトの周辺に磨耗とねじ山のつぶれが見られる。長孔4のボルトにはせん断変形が認められる。

（2）桁間連結装置 P 2 G 3

写真－2. 22に示すように、P 2 G 3の桁間連結装置には一切損傷は認められなかった。ただし、長孔側には、塗装のはがれが見られ、地震により振動した形跡が認められる。振動の変

位置としては、写真から読みとると 2 cm 程度である。

2. 1. 3 P 3 橋脚上の桁間連結装置

(1) 桁間連結装置 P 3 G 1

写真-2. 23は、P 2 G 3の桁間連結装置を示したものである。これによれば、長孔とウェブの孔が一致しなかったために、長孔のとなりに丸孔をあけてボルトを設置している。したがって、この連結板は、すべて丸孔で固定されており、桁の移動には追従できない状態であった。

写真(a)より一方のボルトは全て紛失しているが塗装面がきれいであること、また、写真(d)より連結板の丸孔の周辺にはペンキが新たに塗られた形跡があることから、地震時にはボルトはついていなかったと推定される。しかしながら、写真-2. 24からわかるように塗装の下にはワッシャーの形跡が明確に認められ、以前はボルトが設置されていた。

また、写真(b)によれば、右側の一番上のボルト1はついていているように見えるが、写真(c)からわかるようにボルトは破断している。これは、ボルトのナット側が落下し、頭部側のみがついていたものである。写真(a)では、塗装面がきれいであることから、このボルトは地震ではなく、それ以前から破断していたと考えられる。

丸孔14については、連結板の塗装下にはワッシャーの跡が全く見られないことから、ここにはボルトは設置当初からついていなかったものと推定される。

図-2. 6は、連結板の状況を示したものであるが、ボルトによる力が作用した明確な跡は確認できなかった。破断ボルトは、写真-2. 25に示すように、P 1 G 1の破断ボルト同様にフラットな破断面を呈している。未破断のボルトを写真-2. 26に示す。全てのボルトにおいてねじ山のつぶれと一方向に力を加えた形跡が見られる。

(2) 桁間連結装置 P 3 G 2

写真-2. 27に示すように P 3 G 1と同様に長孔とウェブの孔が一致しなかったために、隣にガス加工で丸孔をあけてボルトを設置している。したがって、本連結板についても桁の移動に追従できずに固定状態となっていた。

ボルトの破断は、長孔側(実際には丸孔)に生じており、上2つのボルト(ボルト1、2)は、頭の部分のみがついているが、ナット側は落下しており、ボルトは破断している。また、ボルト4は頭及びナットもついているが、ボルト自体は破断していた。したがって、長孔側は1本のボルトのみが生き残っていた。

図-2. 7に示すように、丸孔側のボルト9、10及び11で連絡鈑の引張方向に力が作用した痕跡が認められた。破断ボルトは、写真-2. 28に示すように、頭部のみ残っていたボルト1、2は腐食が著しく、P 1 G 1の破断ボルト同様にフラットな破断面を呈している。一方、ボルト4の破断面は比較的新しく地震により破断したものと推定される。また、破断面は途中までフラットであるが、それから段違いになっている。

破断しなかった丸孔のボルトを写真-2. 29に示す。全てのボルトにねじ山がつぶれる打痕が認められる。長孔側で唯一破断しなかったボルト3には、ねじの谷部に亀裂が認められた。このため、このボルトについては後述する亀裂面の強制破断試験を行った(写真-2. 30)。

(3) 桁間連結装置 P 3 G 3

写真-2. 31に示すようにP 3 G 1と同様に長孔とウェブの孔が一致しなかったために、隣にガスで丸孔をあけてボルトを設置している。したがって、本連結板についても桁の移動に追従できずにほぼ固定状態となっていたと考えられる。写真-2. 32は、地震前の床版打ち換え工事の際の写真を示したものであるが、一番上のボルト8はもともとついていなかったが、その他のボルトは全てついており、地震により破断したものと考えられる。

長孔側については、ボルト8の他の9～14のボルトは全て喪失している。図-2. 8に示すように、丸孔側では力が作用した痕跡は、ほとんどの孔で連結板の引張方向に認められる。

破断しなかった長孔側のボルトを写真-2. 33に示す。全てのボルトにねじ山のつぶれが認められ、多くのボルトで谷より深い磨耗となっている。

2. 1. 4 P 4 橋脚上の桁間連結装置

写真-2. 34～写真-2. 36は、P 4 橋脚上の桁間連結装置を示したものである。P 4 橋脚上では桁間連結装置には全く損傷は生じなかった。また、P 4 G 3の長孔には1 cm程度移動したと思われる形跡が認められる。

2. 1. 5 P 5 橋脚上の桁間連結装置

(1) 桁間連結装置 P 5 G 1

写真-2. 37に示すように、長孔側のボルトはすべて破断し、丸孔側のボルトは上の3本を除いて破断している。上から4番目はボルトの頭はついているが、ナット側は落下している。

図-2. 9に示すように、多くのボルトが破断しているにもかかわらず、孔の痕跡は少数しか確認できなかった。なお、孔との接触面が磨耗して丸くなったボルト(写真-2. 38)や孔がガス加工によりギザギザになっている場合には、明確な打痕が残らないので、その有無を判断できない。写真-2. 39に示すように、長孔付近の塗装の剥げ具合から、桁の移動に伴って連結板が移動した形跡が認められる。

破断ボルトは、写真-2. 40に示すように、すべてP 1 G 1の破断ボルト同様にフラットな破断面を呈している。ただし、いずれの破断断面も腐食はかなり著しい。未破断のボルトを写真-2. 41に示す。全てのボルトのねじ山のつぶれ、磨耗が見られる。ボルト9とボルト10にはせん断変形も認められる。

(2) P 5 G 2 落橋防止装置

写真-2. 42に示すように、丸孔側のボルトはすべて紛失し、長孔側は最上部のボルトだけが紛失している。

図-2. 10に示すように、P 5 G 2と同様に、多くのボルトが破断しているにもかかわらず、孔の痕跡はボルト1の位置にしか確認できなかった。破断ボルトは、すべてP 1 G 1の破断ボルト同様にフラットな破断面を呈している。

破断しなかったボルトを写真-2. 43に示す。ボルトは、写真の水平方向が実際に連結板に

固定されていた水平方向と一致するように並べている。ほとんどのボルトの上面には顕著な凹みが見える。ボルト3と5、7では、その凹みのそばのねじの谷に亀裂が確認された。この凹みは、地震による水平方向ではなく、上下面で生じていることから、常時荷重による磨耗により生じたものと考えられる。亀裂はそれによる疲労亀裂と考えられる。ボルト6と7については水平方向に曲がっており、地震荷重による可能性もある。

(3) P5G3落橋防止装置

写真-2.44に示すように、長孔側のボルトは全て破断し、丸孔側のボルトは全て残っている。写真-2.45は、地震前の床版打ち換え工事の際のボルトの状況を示したものである。これによれば、地震後に脱落していたボルトはいずれも所定の位置についているため、破断したボルトは地震によるものと考えられる。

図-2.11に示すように、P5G2と同様に、多くのボルトが破断しているのにもかかわらず、孔の痕跡はボルト9及び11の2つにしか確認できなかった。破断ボルトは、すべてP1G1の破断ボルト同様にフラットな破断を呈している。一部、腐食の著しいものもある。

破断しなかったほとんどのボルトは、写真-2.46に示すようにボルトの全周にわたって磨耗によりねじ山がつぶれており、表面の腐食も著しい。

2.2 破面の顕微鏡調査

地震により破断したボルトのうち、破面があまり腐食していないもの1本について走査形電子顕微鏡により破面を撮影した。本ボルトは、地震直後に採取したものであり破断面が比較的新しいことから、地震により破断したものと考えられる。なお、破断して落下したものを選定したものであるため、どの位置のボルトかは確認しなかった。

写真-2.47は、ボルトの破断面を示したものであり、これを2000倍に拡大した顕微鏡写真を示すと写真-2.48のようになる。これによれば、観測位置B、C、及びDでは、左上から右下方向（ほぼ45度方向）に伸長したディンプルが見られる。これは、せん断による延性破壊の特徴を示している。観測位置Aのディンプルの伸長方向と伸長の程度が他の観測位置と異なるが、これはこの位置が最後に破断して、引張成分が作用したためと推定される。このため、ボルトの破断は、図-2.11に示すように一方向にせん断力を受けたために生じた破断と考えられる。したがって、地震時に隣接する桁間に相対変位が生じ、桁間連結装置が作動した結果、一度にせん断破壊したものと考えられる。

2.3 亀裂面強制破断調査

ボルトの全数調査を行った結果、一部のボルトには亀裂が発見された。亀裂の見つかったボルトは、P3G2の3、P5G2の3、P5G2の5、及びP5G2の7の4本である。これ

ら4本のボルトの亀裂の進展程度を観測するために、亀裂面に沿って強制的に破断させた。

P 3 G 2の3及びP 5 G 2の3については、ボルトを軸方向に2分割し、液体窒素で冷却し、それぞれの分割された片について亀裂先端が引張となるように曲げ変形させて脆性破壊させた。P 5 G 2の5及びP 5 G 2の7は、後述する載荷試験により亀裂面をせん断破壊させた。ただし、P 5 G 2の7は、亀裂面で破断しなかった。以下、破断面の状況をボルトごとに示す。

なお、同時に発光分光分析（カントバック分析、JIS G 1253）により成分分析を行った結果によれば、材質は一般構造用圧延鋼材（S S 4 0 0 相当材）と推定された。

（1）P 3 G 2のボルト3

写真－2. 49は、P 3 G 2のボルト3の状況を示したものである。写真（b）に示されるように、ボルト側の破面を見てみると、下からの亀裂は深くボルト半径の半分くらいまで進展していることがわかる。上からも亀裂が進展している。ナット側の破面には右横からも亀裂が進展している。（a）に示すように、ボルトには磨耗による激しい凹凸が認められる。

写真－2. 50は、これを拡大したものであり、中央の新しい破面は強制載荷によるものであり、上下の亀裂が生じていたことになる。この破面によれば、上下の2点が起点となって亀裂が生じていることから、上下方向の繰り返し載荷により生じた亀裂と推定される。破断面における初期クラック領域の占める割合が大きいことから比較的大きな力が作用したと考えられる。このうち、図－2. 12に示す位置について顕微鏡写真を撮影した結果が写真－2. 51である。破断面の発錆の激しく、破断特性はわからない。

（2）P 5 G 2のボルト3

写真－2. 52は、P 5 G 2のボルト3を示したものである。亀裂は、左右から進展しているのが認められる。なお、亀裂面はあまり腐食していない。写真－2. 53は、これを拡大したものであり、破断特性は上記P 3 G 2のボルト3と同様である。図－2. 13に示す位置について顕微鏡写真を撮影したものが写真－2. 54である。これによれば、せん断破壊の特徴を示すディンプルパターンが認められた。亀裂は、相対する2箇所から進展しており、亀裂の発生は疲労によるものであり、その荷重は前述と同様に比較的大きかったものと推定される。

（3）P 5 G 3のボルト5

写真－2. 55は、P 5 G 3のボルト5を示したものである。亀裂は、上下から進展している。写真（a）に示すように、亀裂のすぐ上のねじ山に凹みがある。

（4）P 5 G 2のボルト7

写真－2. 56は、P 5 G 2のボルト7の状況を示したものである。上面に、亀裂と磨耗と思われる大きな凹みがある。

P 5 G 2のボルト3を除いて、亀裂が主にボルトの上下にあること、その上下の位置に磨耗と思われる凹凸があることを考慮すると、この亀裂は常時の活荷重による上下方向の繰り返し荷

重による疲労亀裂と思われる。P 5 G 2 のボルト 3 は、亀裂が左右であること、あまり腐食していないことから、地震時に生じた亀裂の可能性も考えられるが、このような亀裂は、一般に繰返し載荷による疲労により生じるものであり、地震による低サイクルの繰返しで生じるかどうかはわからない。

通常の曲げを受ける軸の疲労形態を示したのが表-2. 1 である。一方向での曲げ繰返し載荷では、一方向から亀裂が進展するが、両方向での曲げ繰返し載荷の場合には相対する両端から亀裂が進展することが明らかになっている。せん断破壊の場合には、一方向へのせん断と疲労せん断による破断面については明らかにされていないが、上記の破壊形態としては、地震というよりは、活荷重等の繰返し載荷によるものと推定される。

2. 4 まとめ

以上のようにボルトの破断が生じていた全ての連結板についてその損傷状況を詳細に調査した。ボルトの破断状況をまとめると、図-2. 14の通りとなる。なお、図-2. 14には、後述する試験対象としたボルトの位置も示している。

損傷状況等に関して特徴的な点をまとめると以下ようになる。

1) 塗装の状況から見ると、P 1 G 1 の 8~14、P 1 G 3 のボルト 8、9、P 3 G 1 のボルト 1~7 は地震の時にはボルトは設置されていなかった。ただし、連結板には以前ボルトがついていた形跡が明確にあること、また、連結板の周辺に破断したボルトが散在していたことを考慮すると、地震以前に何らかの理由により破断した。

また、P 3 G 1 のボルト 14及びP 3 G 3 のボルト 8の 2 本については、連結板設置当初から一切付けられた形跡がなかった。この原因は明らかではないが、固定ボルトの孔がどうしても合わない等の理由により設置されなかったものと推定される。

2) 平成3年度~平成4年度に行われた床版打ち換え工事の際の工事写真によれば、P 1 G 3、P 3 G 3 (ボルト 8を除く)、P 5 G 3 は、ボルトが全て固定されており、破断していない。ただし、P 1 G 3 のボルト 8、9は、上記 1) のように地震後の調査では塗装面が新しく、地震時にはボルトはついていなかったが、床版打ち換え工事の時にはついていたという矛盾が生じる。かつ、散在していたボルトは破断している。この原因はよくわからない。

3) P 3 橋脚上の桁間連結装置に関しては、いずれもボルトの位置がウェブの孔位置と一致しなかったため、長孔の横に丸孔をガス加工であけたため、両者ともにほぼ固定状態であった。

4) ボルトが破断しているのが、丸孔側か長孔側かを比較してみると、P 5 橋脚の G 1 及び G 3 を除いて丸孔側すなわち固定側となっている。地震により桁間連結装置に引張方向あるいは圧縮方向の力が作用して破断したのであれば、どちらもほぼ同じ条件であると考えられる。ここで、丸孔の方が破断が多いのは移動が拘束されるため、活荷重等による振動による原因が考えられる。

5) 破断したボルトの破断面はほぼフラットな破断面を呈している。いずれも腐食が著しい。また、いずれのボルトもほぼ全周にわたりねじ山がつぶれており、地震による繰返しというよりも長期にわたる繰返し荷重による磨耗を受けていた可能性が高い。ただし、いくつかの

ボルトでは一方向の力により生じるボルト側面のへこみ、連結板の厚板部の痕跡が明確に認められ、一方向の作用力に作用したものもある。

6) 連結板に残されていた痕跡は、連結板の引張方向に力が作用したことを示すものが多く、圧縮方向は少ない。また、痕跡は圧縮方向よりも引張方向の方が深く、引張方向の荷重が大きかったと考えられる。

7) 地震直後に採取したボルトは、その破断面がまだ新鮮で腐食しておらず、別の理由により破断寸前であった可能性はあるが、これは地震により破断したと考えるのが妥当と考えられる。このボルトの破断面の顕微鏡写真によれば、破面の性状が一方向のせん断状況を示しており、地震により一方向に破断したものと推定される。

8) 亀裂が生じていたボルトを見ると、P5G2のボルト3を除いて亀裂が水平方向ではなく、主にボルトの上下面にあること、その上下の位置に磨耗と思われる凹凸があることが明らかになった。このため、この亀裂は水平方向の力ではなく、常時の活荷重等による上下方向の繰返し荷重による疲労亀裂と思われる。なお、P5G2のボルト3では、亀裂が左右であること、あまり腐食していないことから、地震時に生じた亀裂の可能性も考えられる。

以上の状況証拠から、桁間連結装置のボルトの破断原因を推定すると、大型車の交通量が比較的多いこと、地震時についていなかったボルトも破断した形跡があること、ボルトの腐食が著しいこと、亀裂の発生が水平ではなく上下方向に生じているものがあること、引張方向のみが多いという連結板への痕跡等の理由から、常時の活荷重等により疲労損傷を受けており、ほとんどはこれにより疲労破断したものと推定される。さらに、地震直後には破断面が新鮮なものも数本発見されており、一部は地震により破断したものと考えられる。

表-2. 1 曲げまたはねじり荷荷の場合の疲労破断面の特性¹²⁾

	切吹きなし		鈍い切吹き		鋭い切吹き	
	応力小	応力大	応力小	応力大	応力小	応力大
片振り曲げ						
両振り曲げ						
回転曲げ						

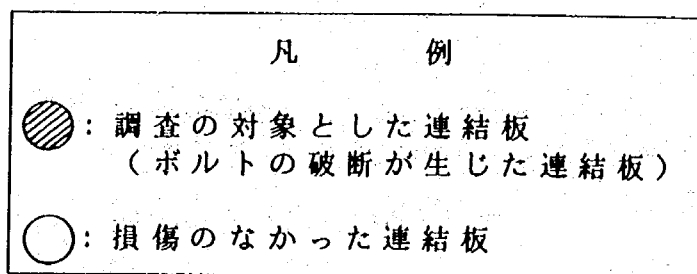
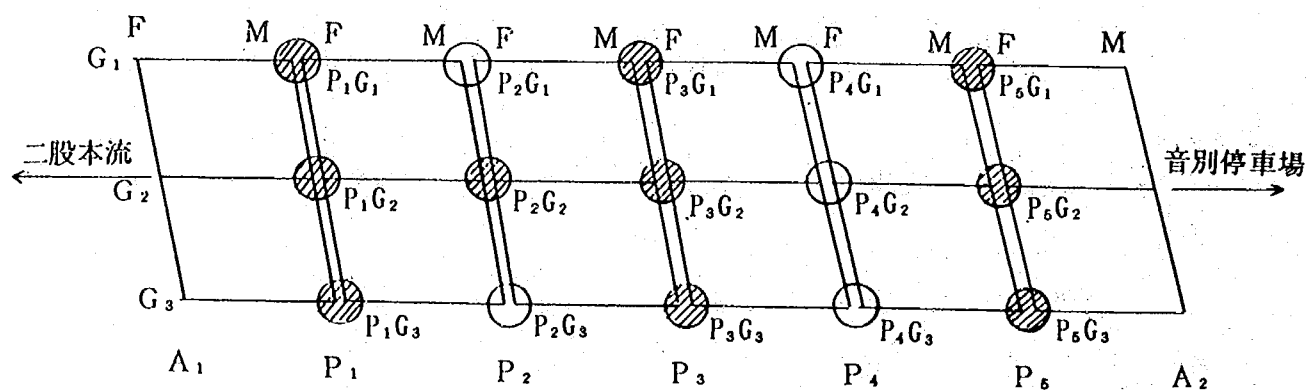


図-2. 1 詳細調査を行った連結板の位置

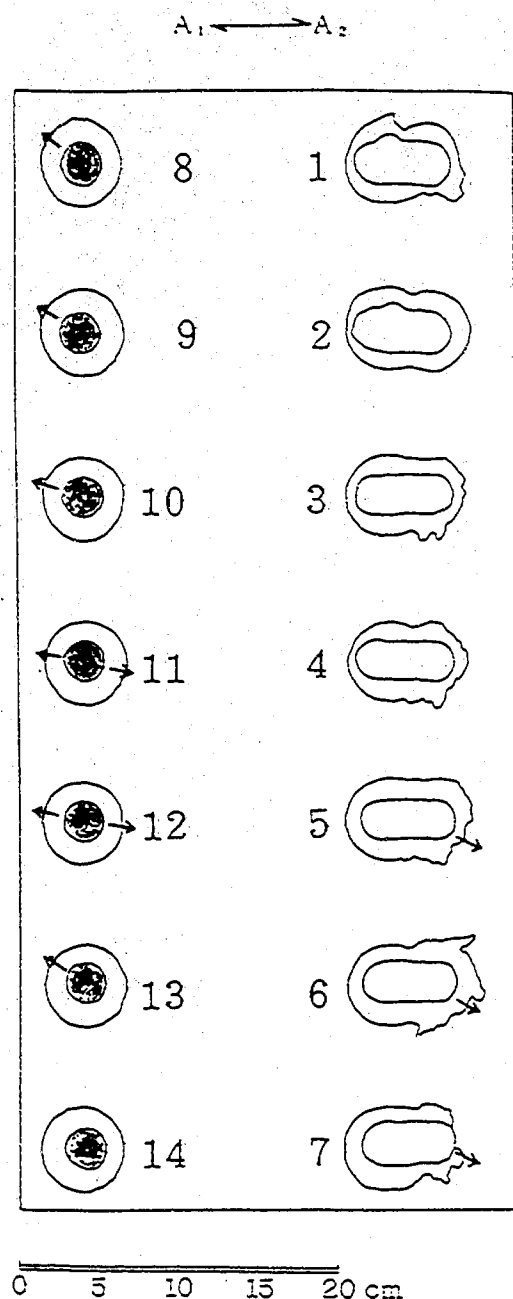


図-2. 2 連結板の状況 (PIG 1)

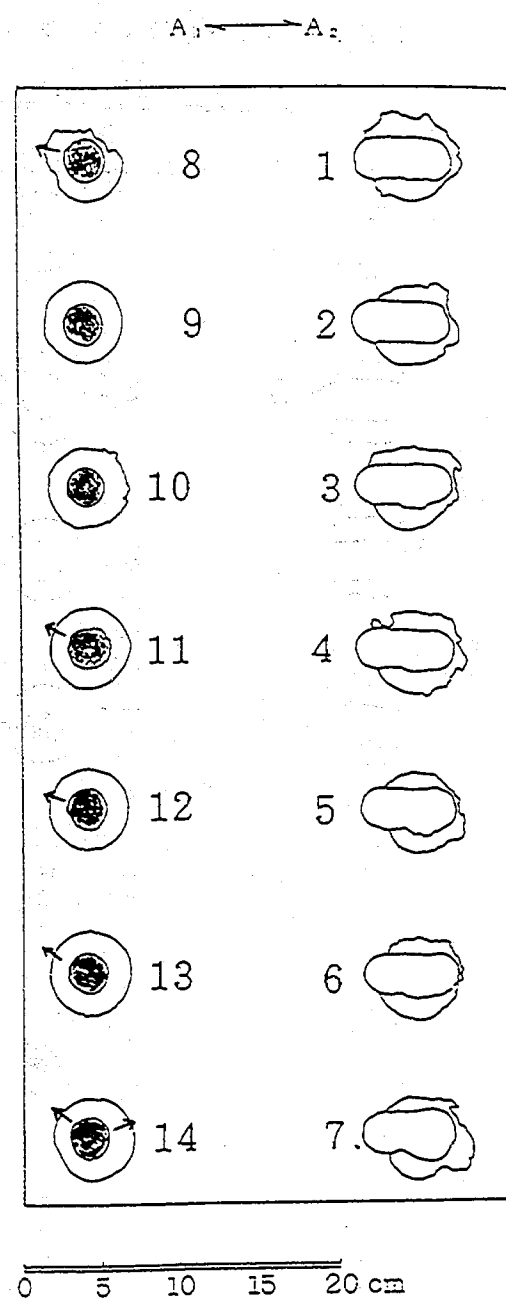


図-2. 3 連結板の状況 (PIG 2)

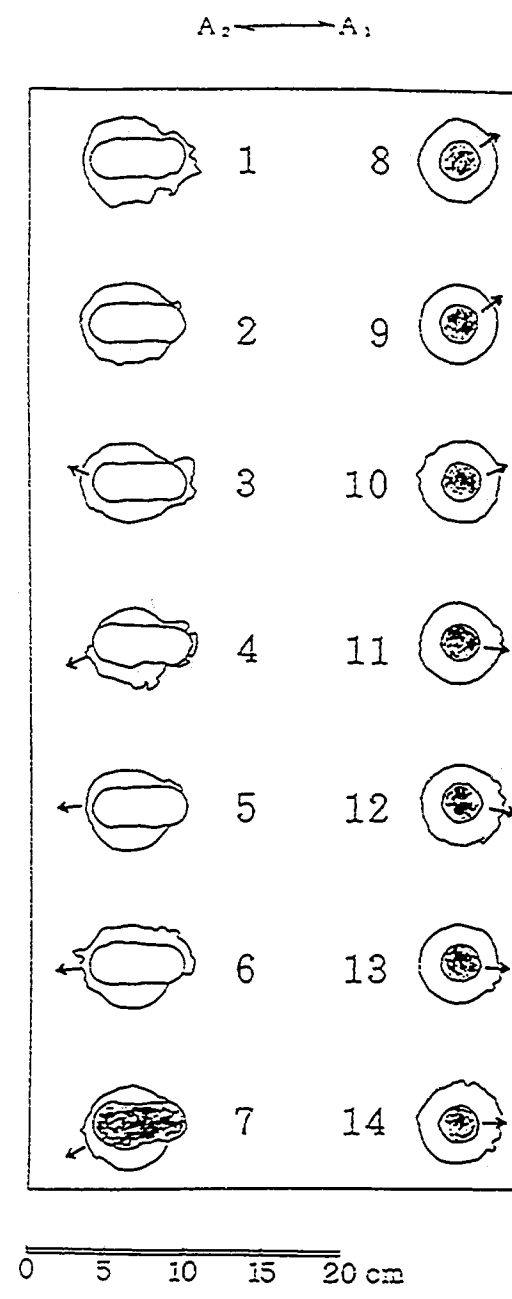
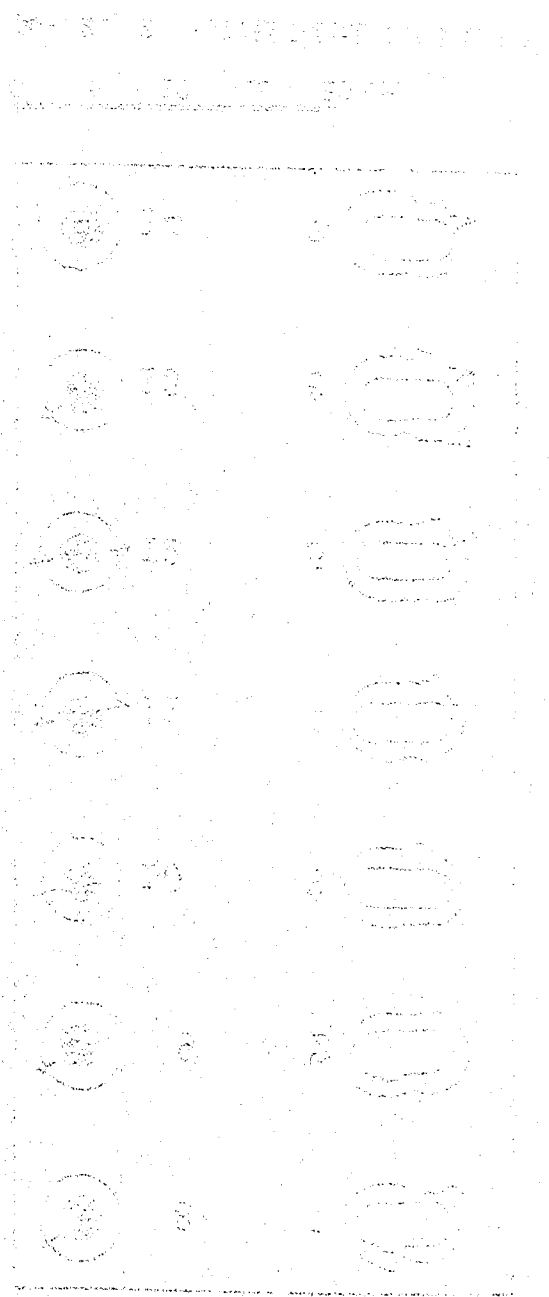
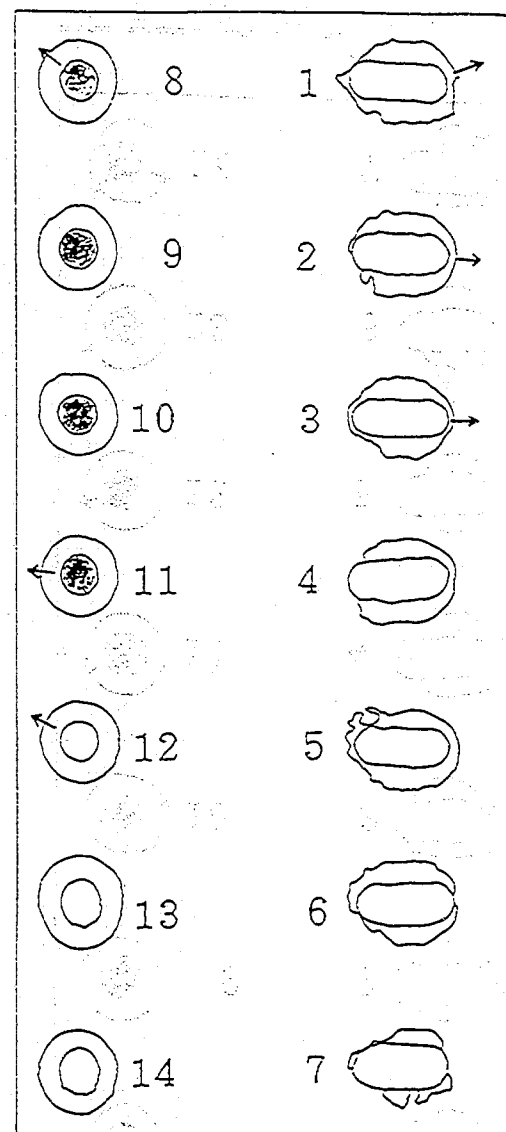


図-2. 4 連結板の状況 (PIG 3)



$A_1 \longleftrightarrow A_2$



0 — 5 — 10 — 15 — 20 cm

図-2. 5 連結板の状況 (P 2 G 2)

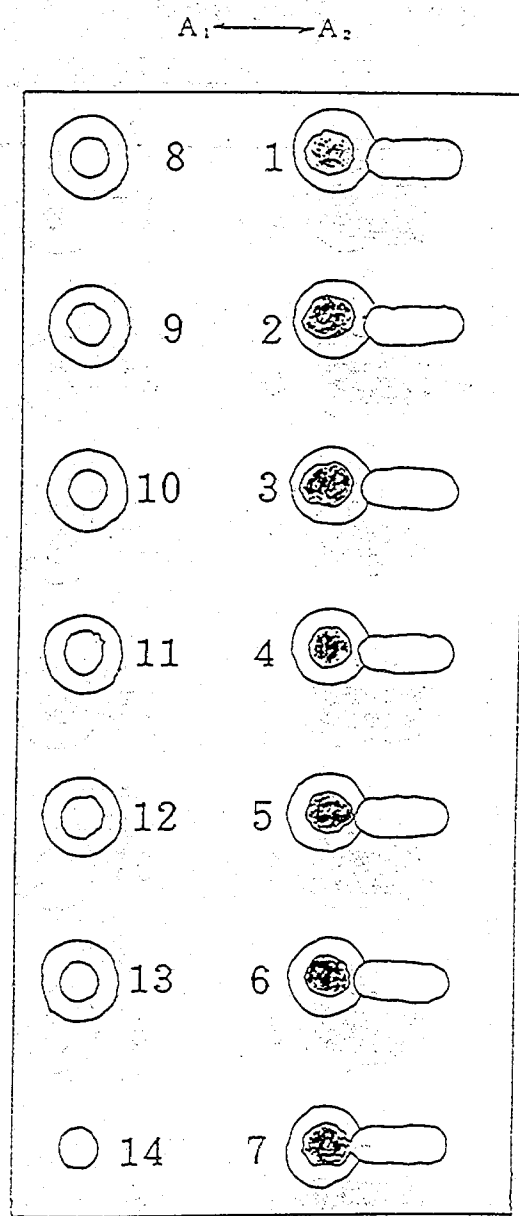


図-2. 6 連結板の状況 (P 3 G 1)

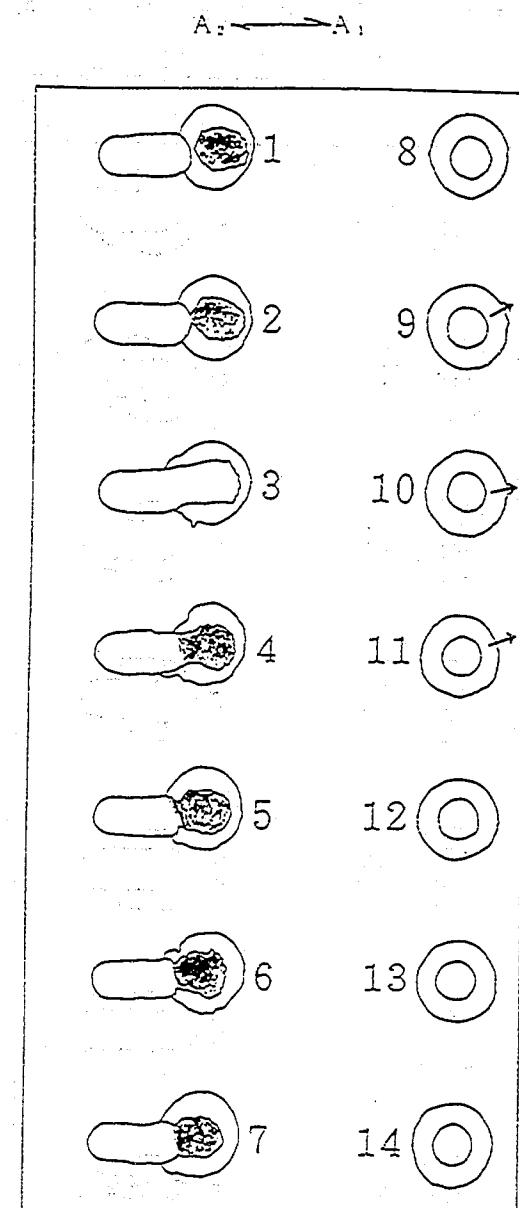


図-2. 7 連結板の状況 (P 3 G 2)

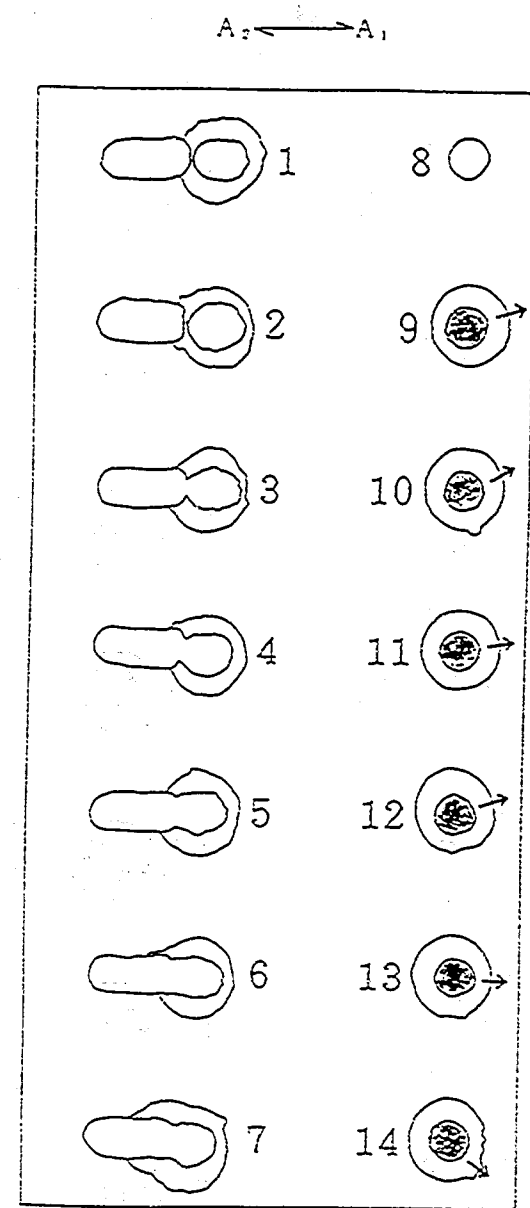


図-2. 8 連結板の状況 (P 3 G 3)

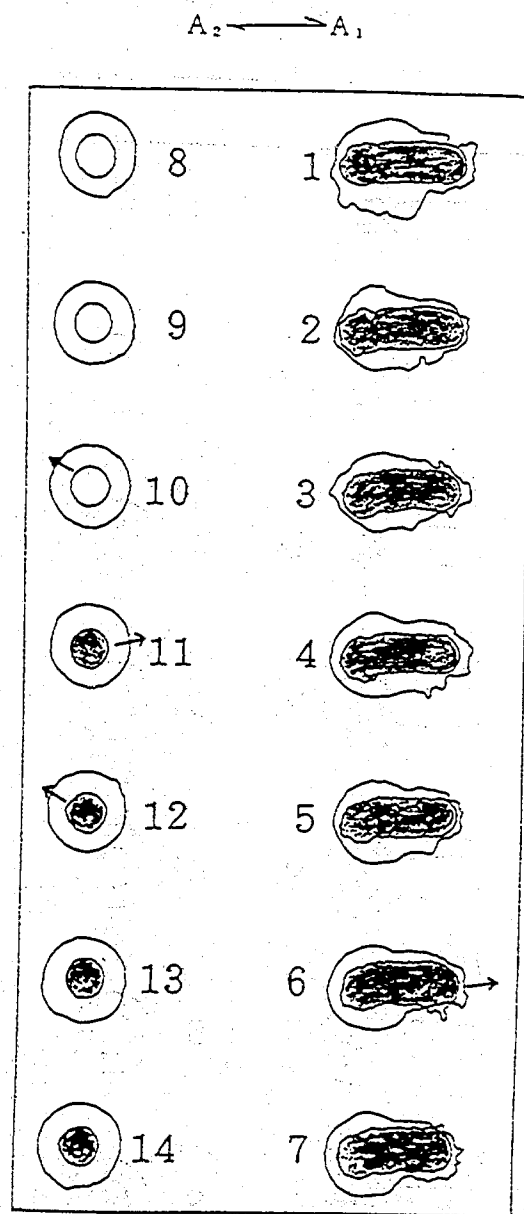


図-2.9 連結板の状況 (P5G1)

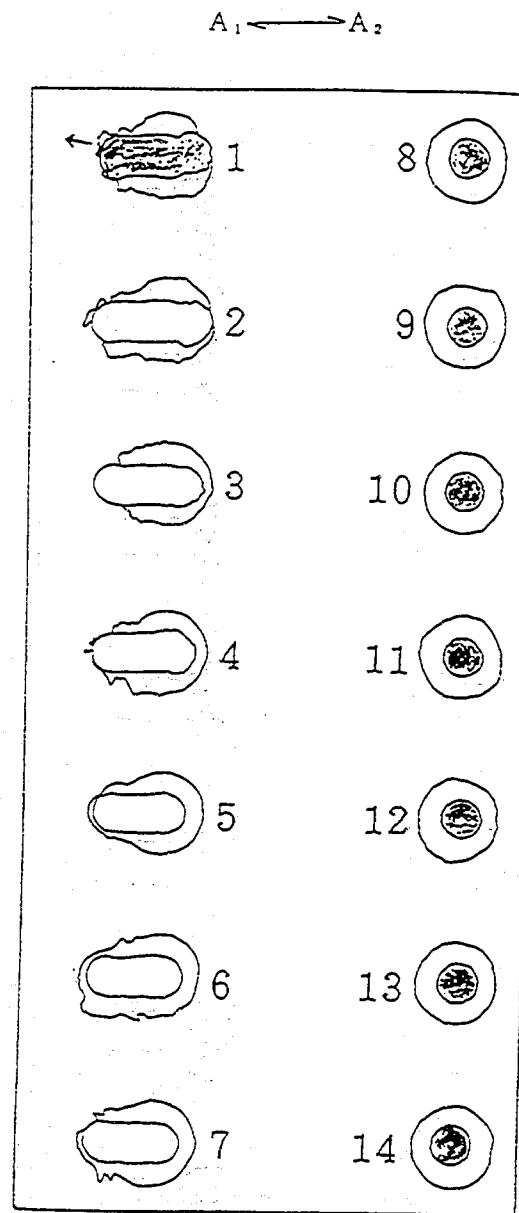


図-2.10 連結板の状況 (P5G2)

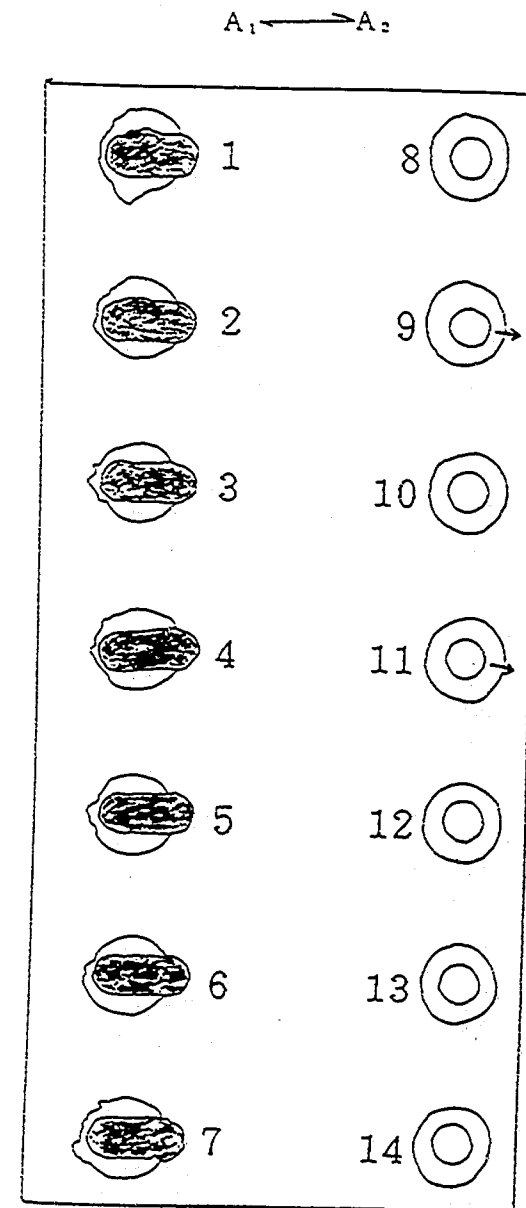


図-2.11 連結板の状況 (P5G3)

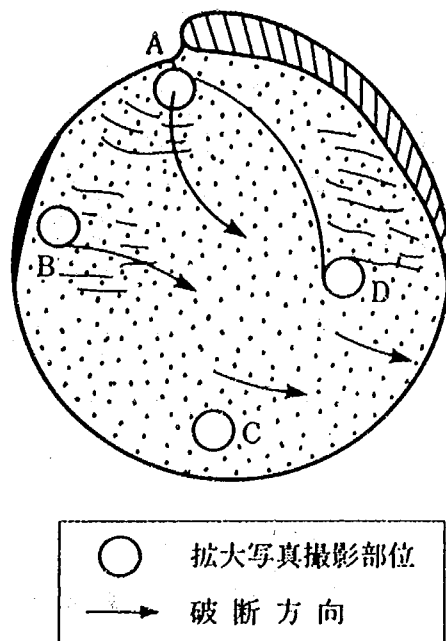


図-2.12 顕微鏡写真から見たボルトの破断方向

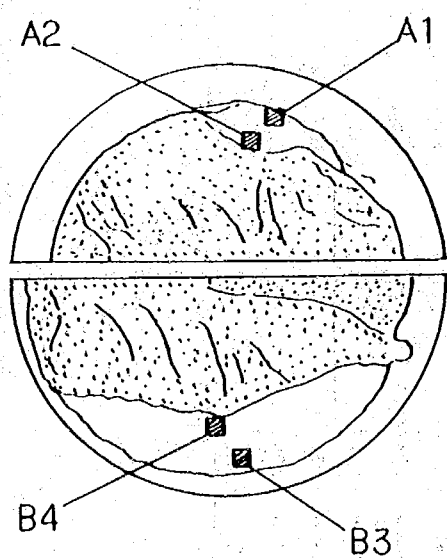


図-2.13 顕微鏡写真の撮影位置
(P3G2のボルト3)

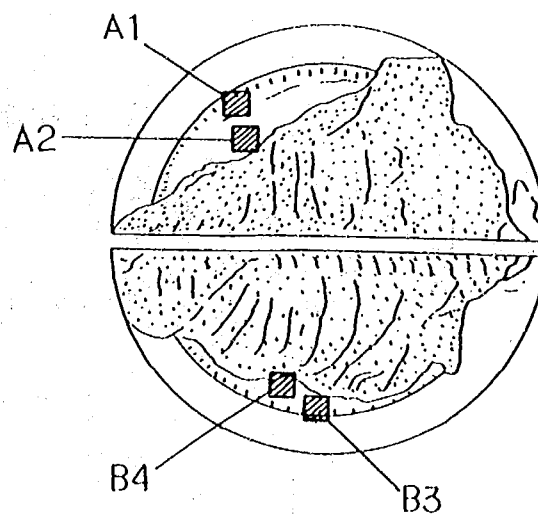


図-2.14 顕微鏡写真の撮影位置
(P5G2のボルト3)

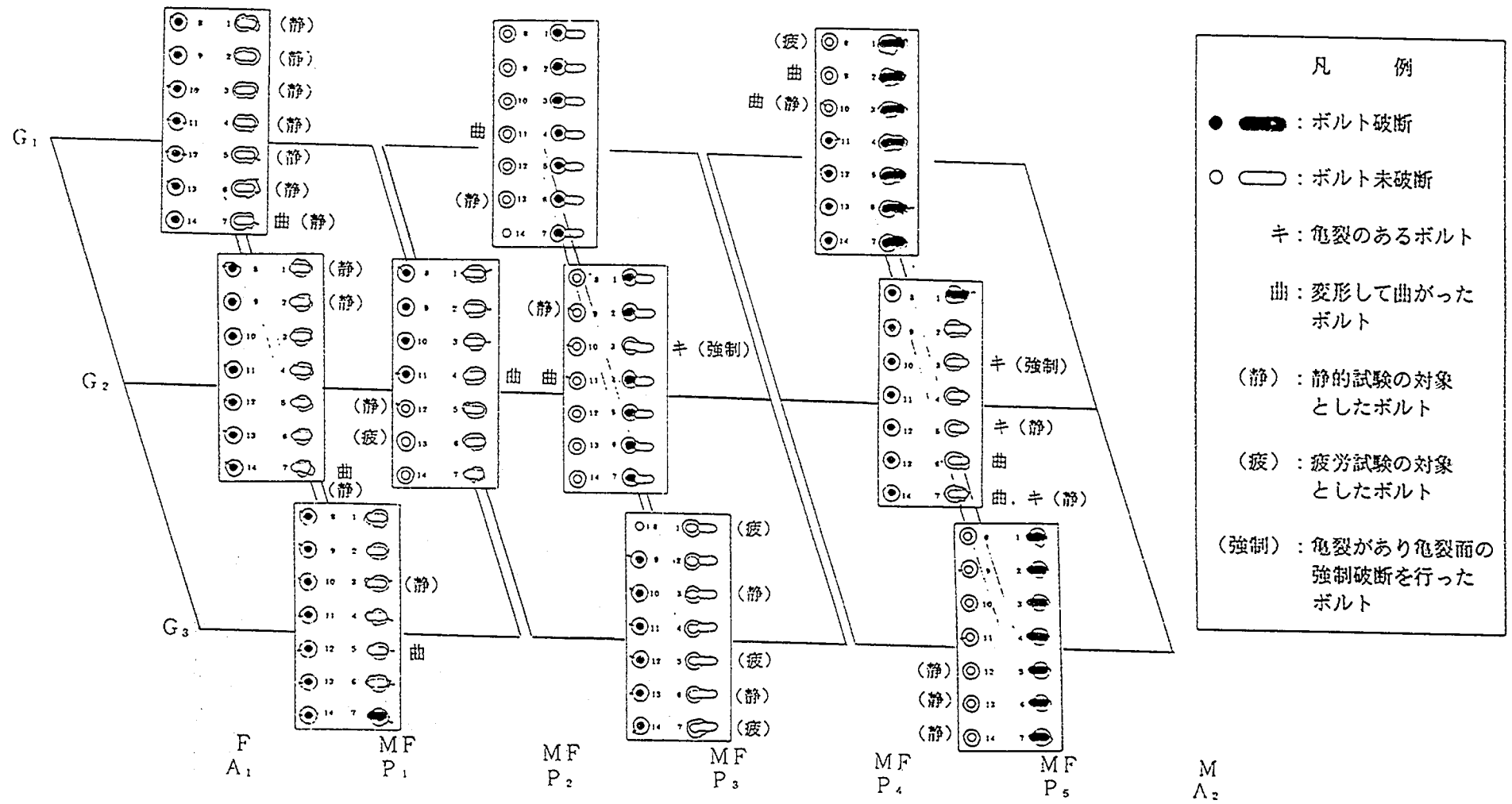
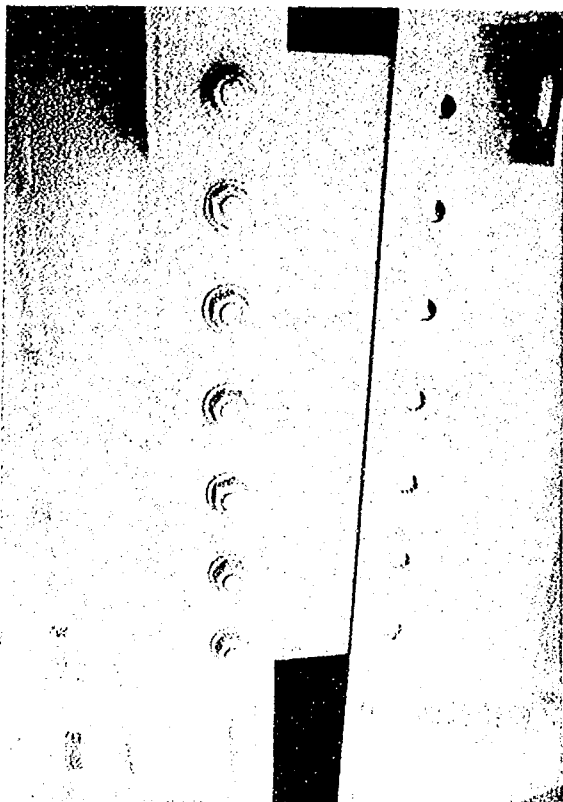
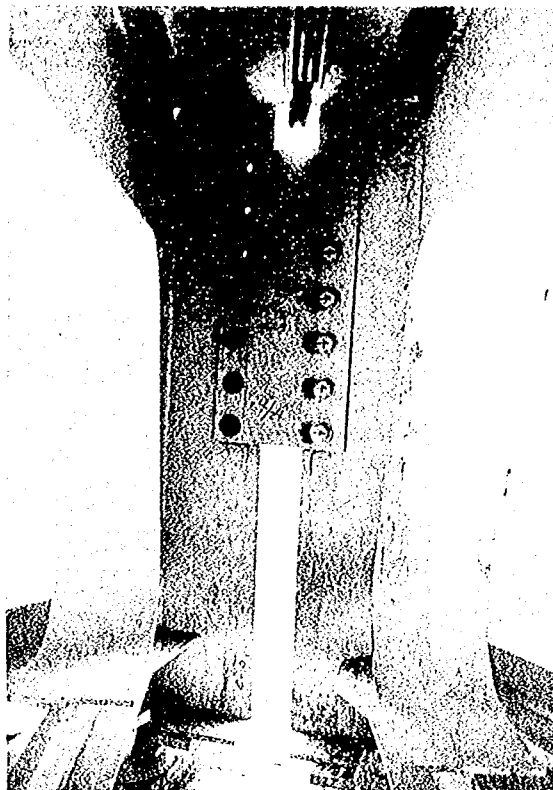


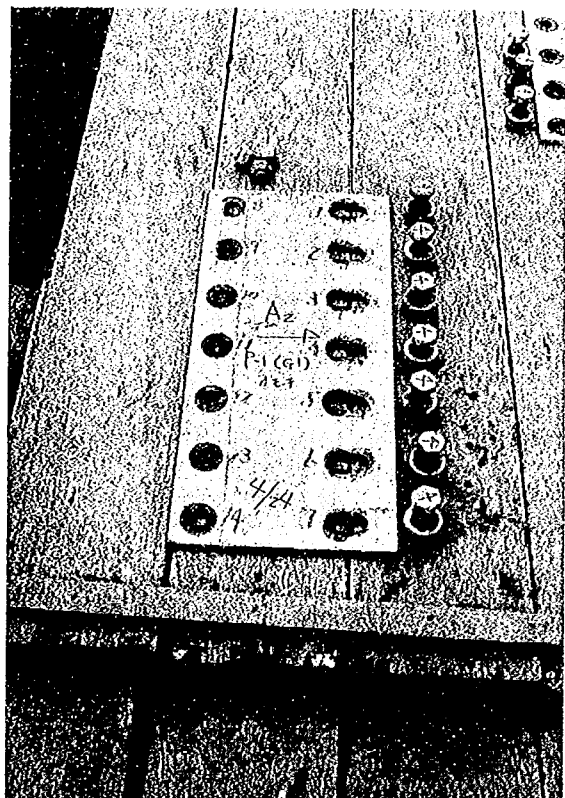
図-2.15 ボルトの破断状況に関する調査結果のまとめ



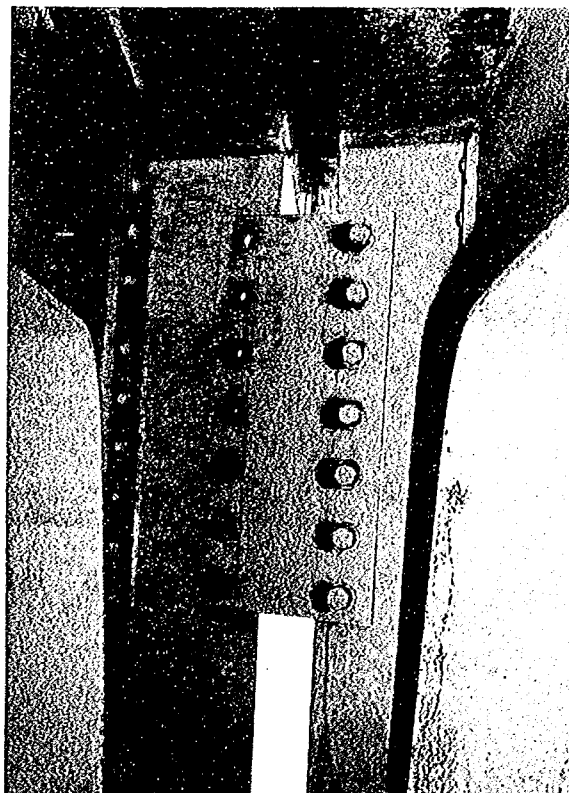
(a) ウェブ側



(b) 連結板側



(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.1 連結板とボルトの損傷状況 (P1G1)

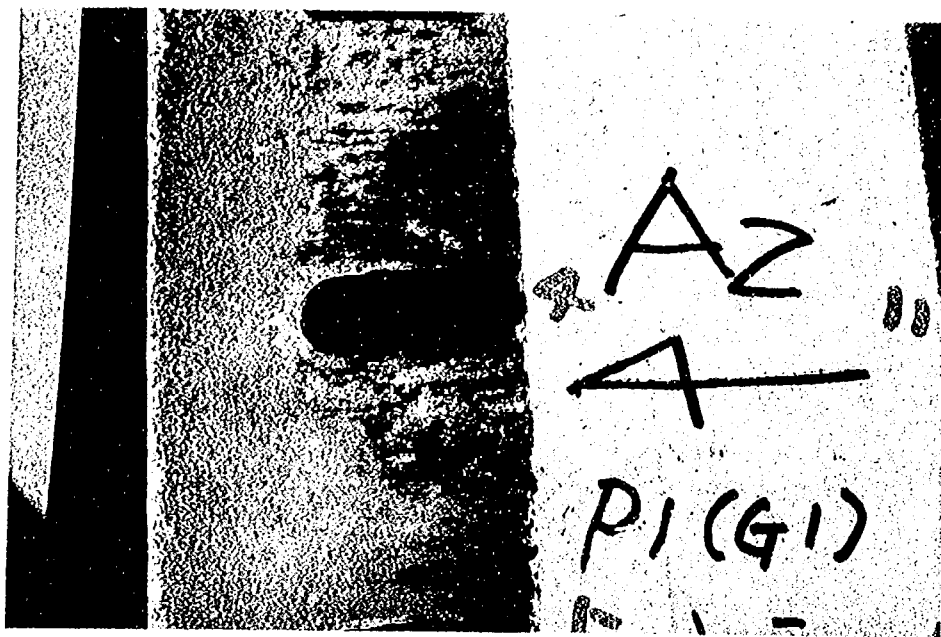


写真-2. 2 連結板とウェブの接触面 (P1G1)

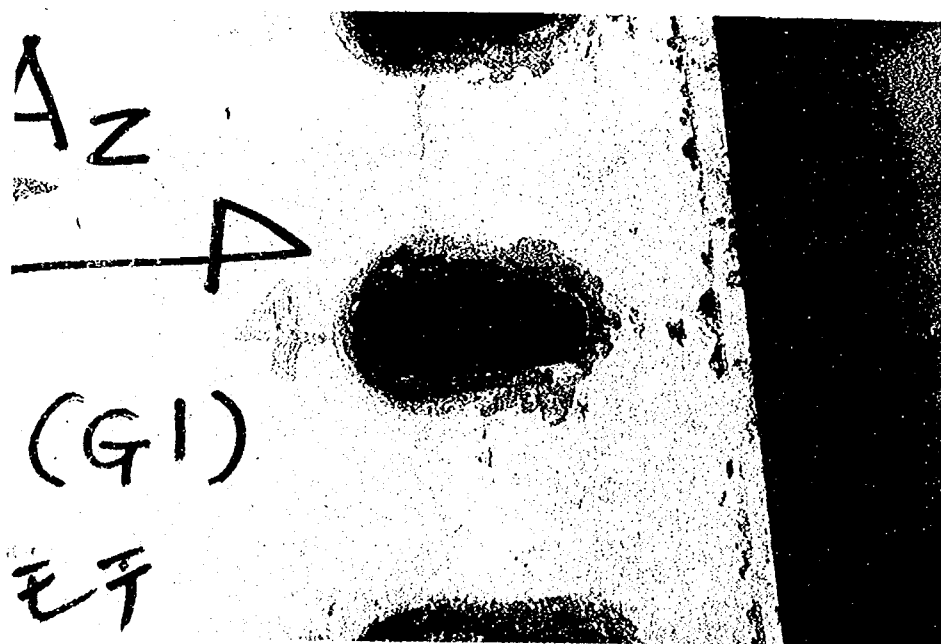
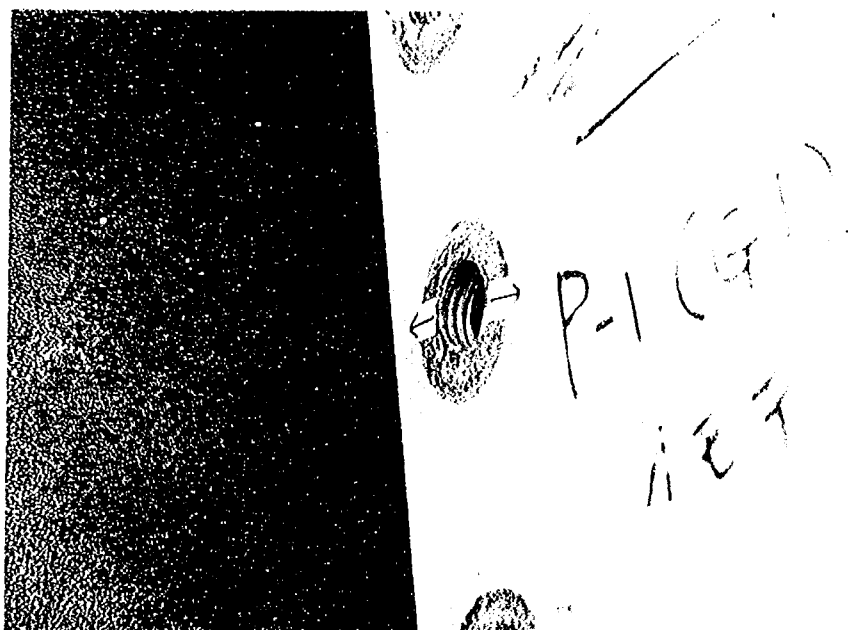
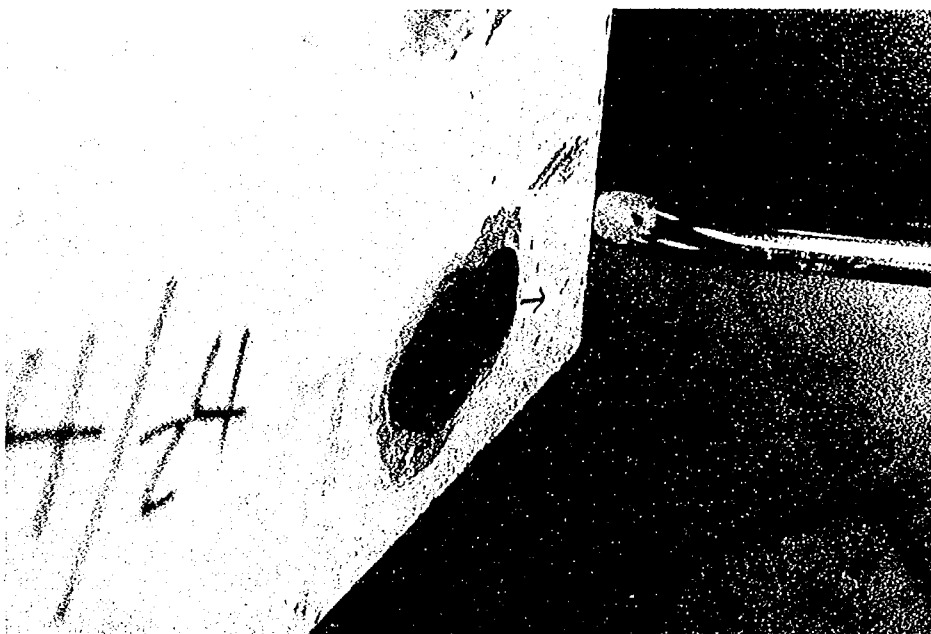


写真-2. 3 連結板の表面 (P1G1)



写真－ 2. 4 丸孔目の痕跡（P 1 G 1）



写真－ 2. 5 長孔 7 の痕跡（P 1 G 1）

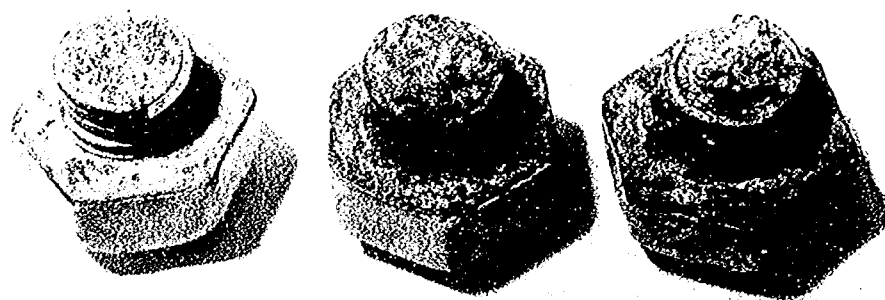


写真-2. 6 破断ボルト (P1G1)

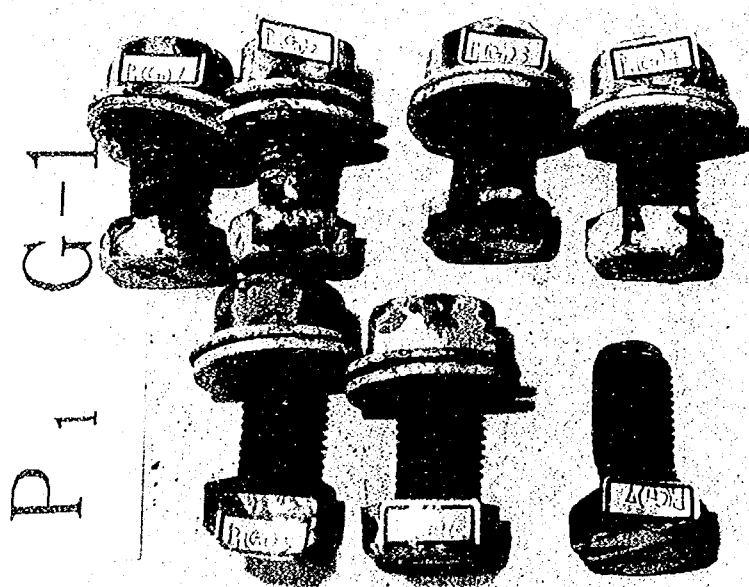
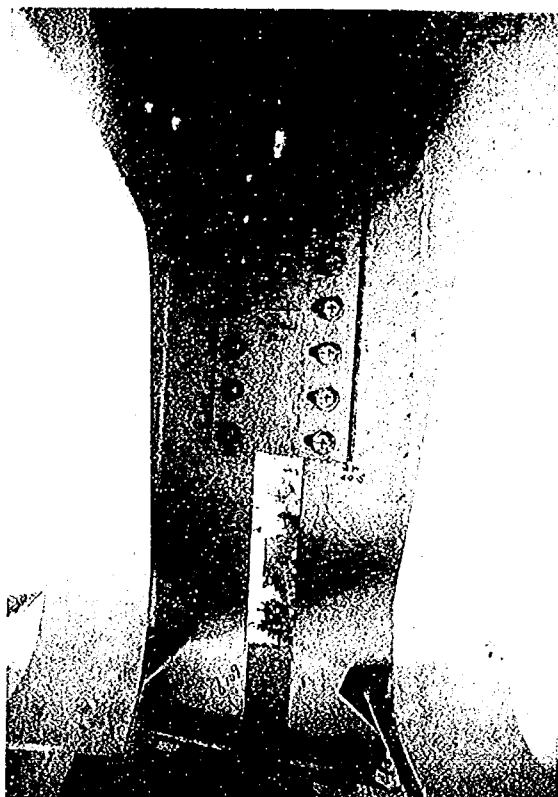
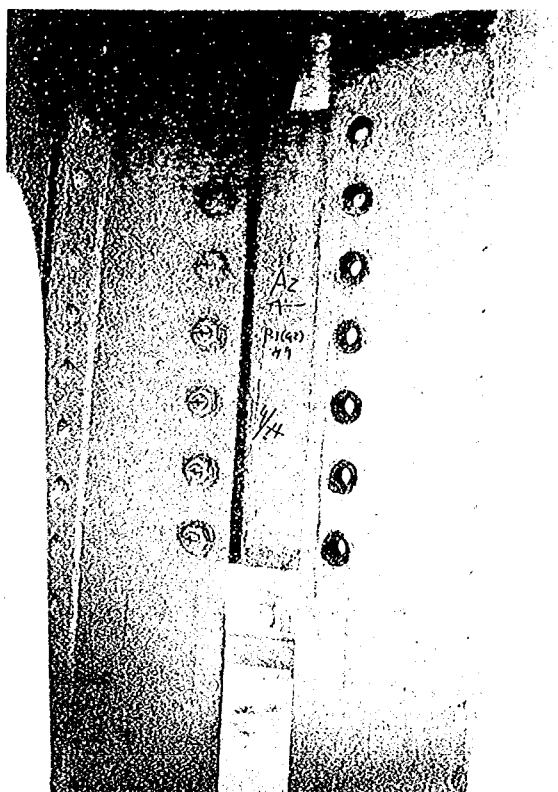


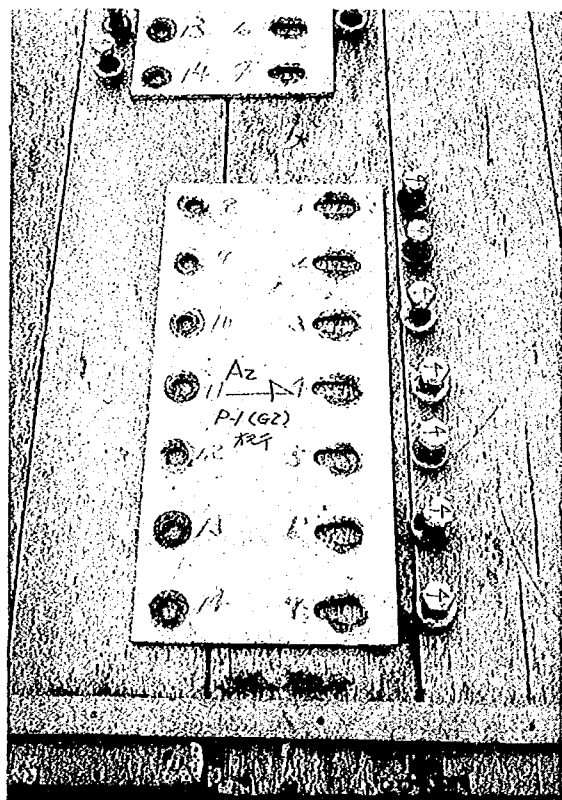
写真-2. 7 未破断ボルト (P1G1)



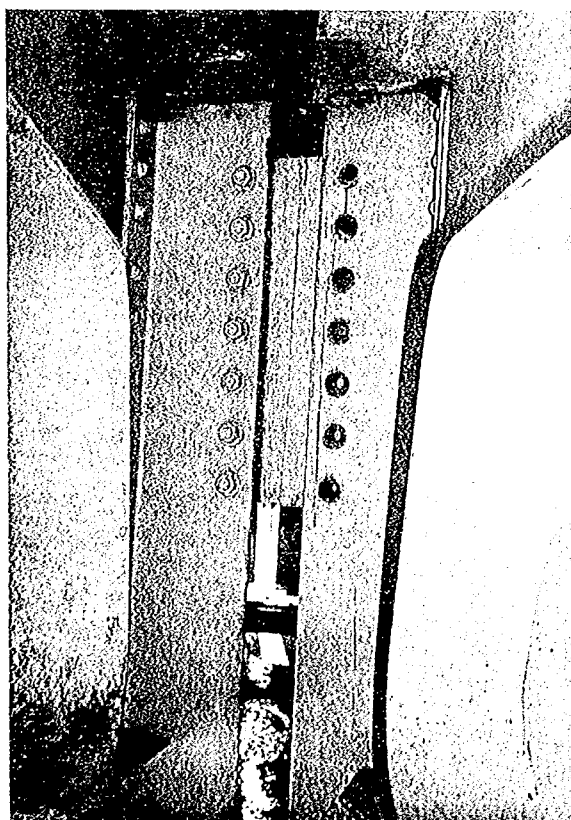
(a) ウェブ側



(b) 連結板側



(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.8 連結板とボルトの損傷状況 (P1G2)

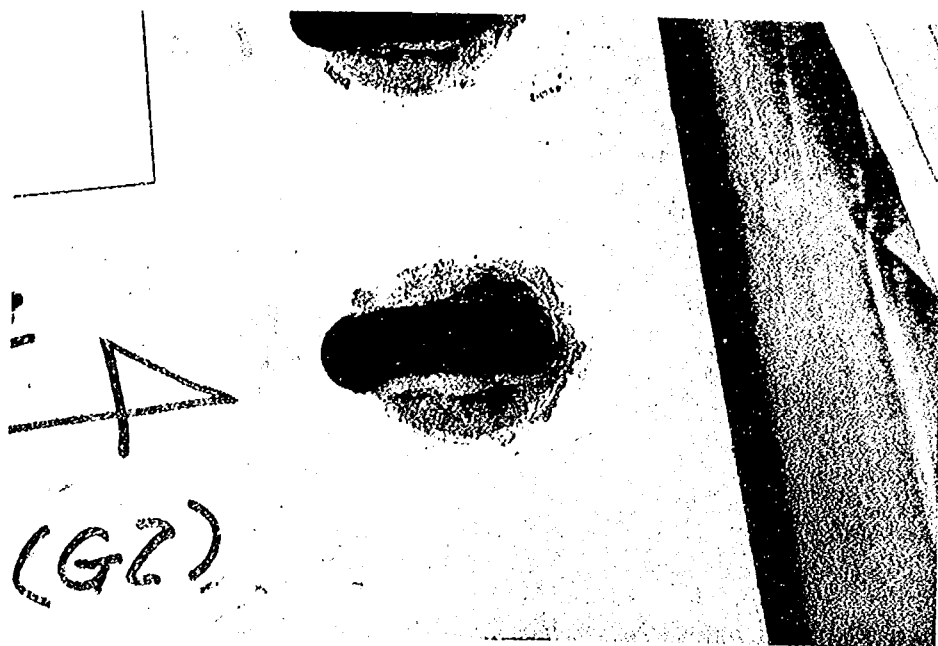


写真-2. 9 長孔4の打痕 (P 1 G 2)

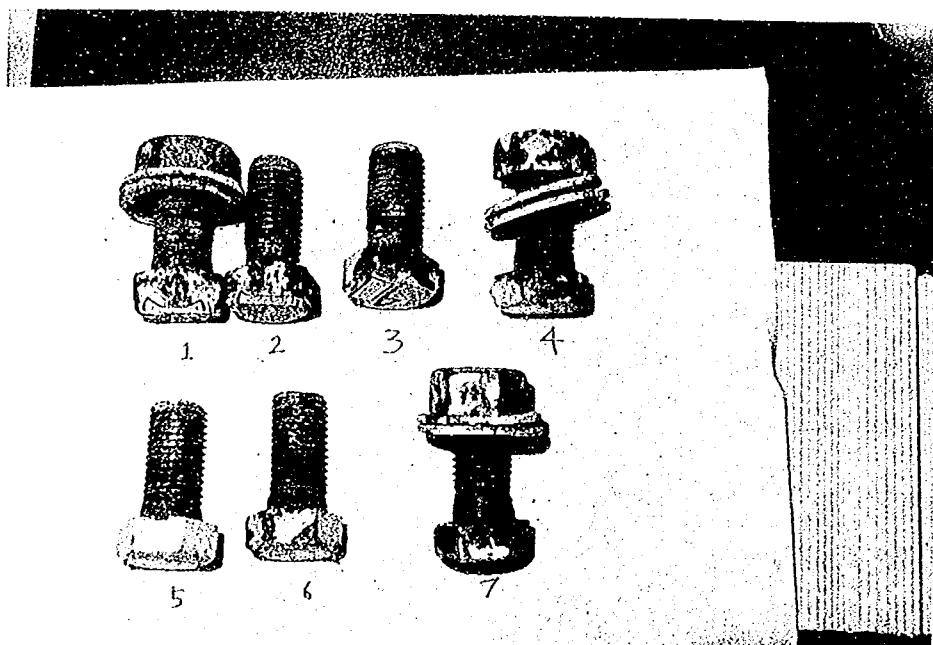
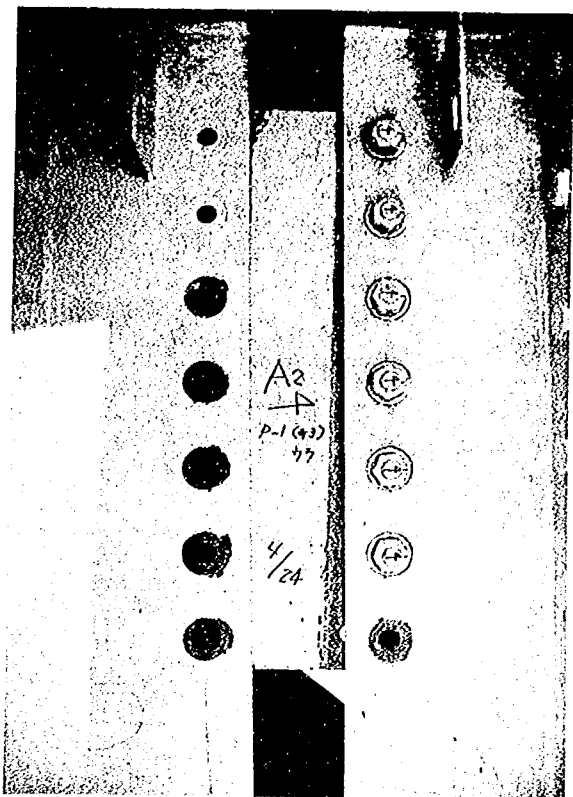
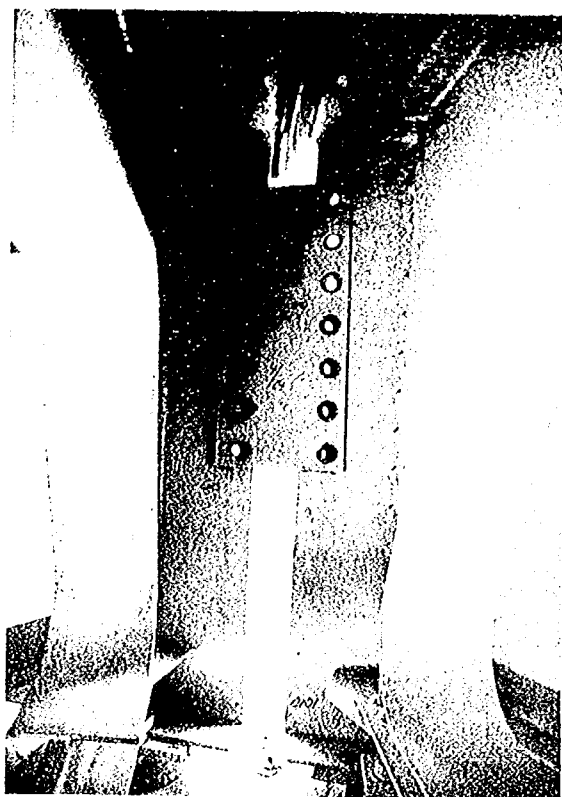


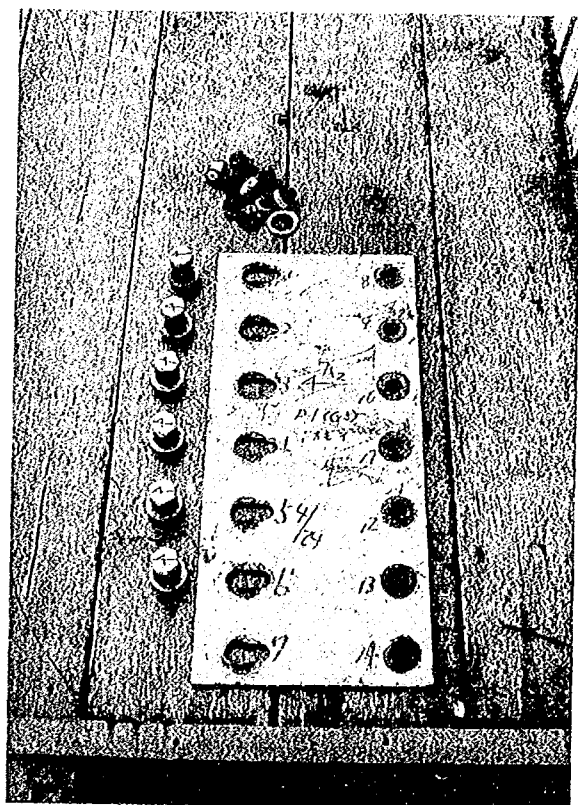
写真-2. 10 未破断ボルト (P 1 G 2)



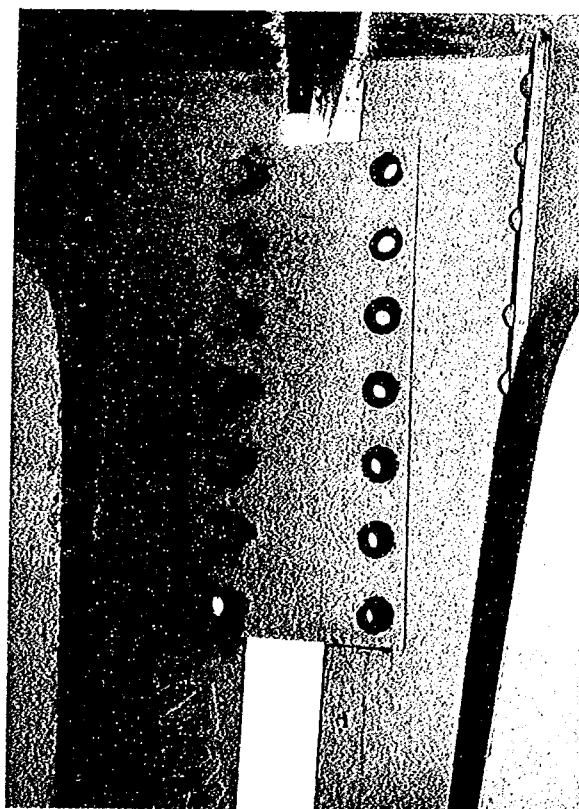
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

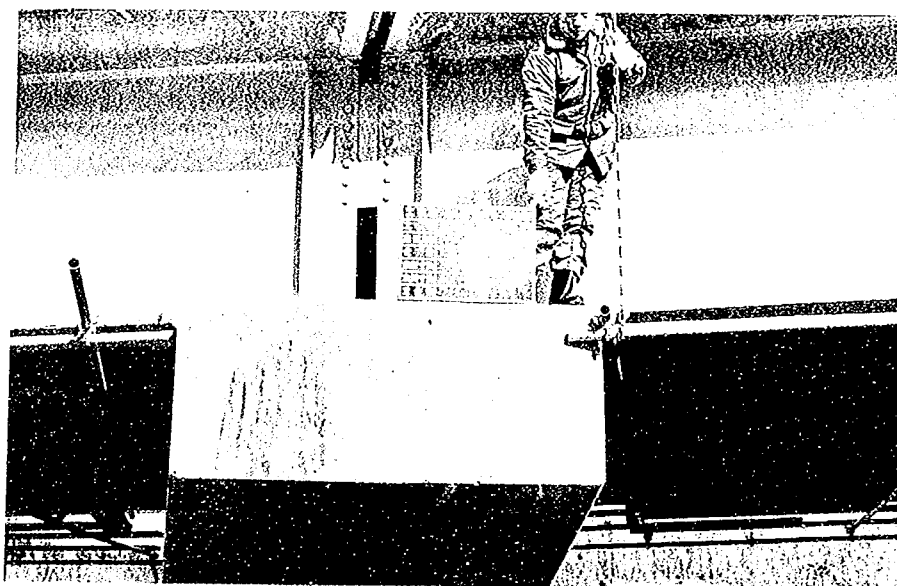
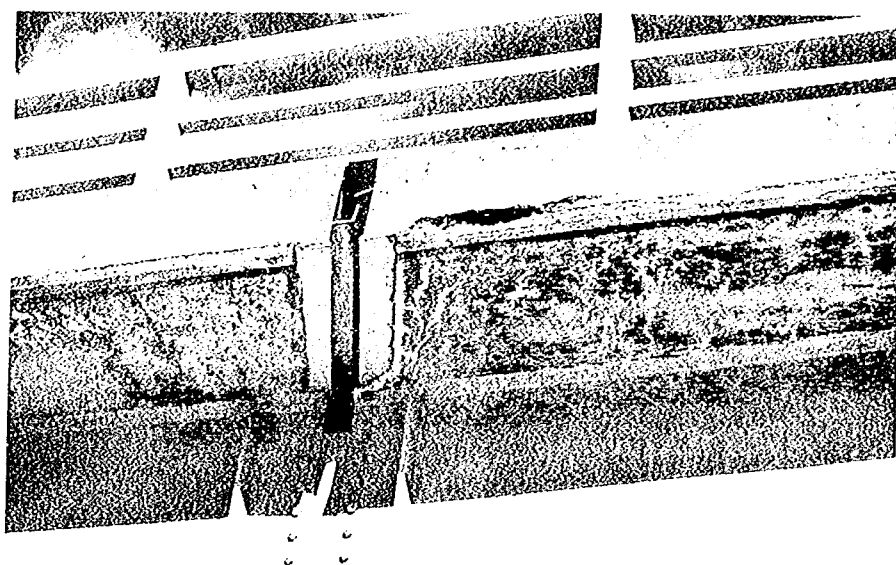


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)

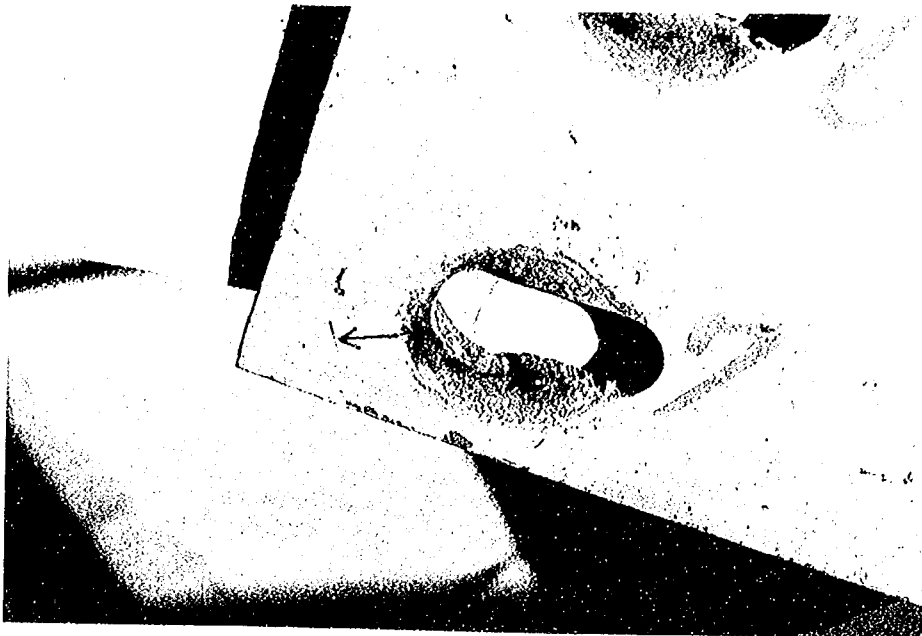


(d) 地震1月後の撮影

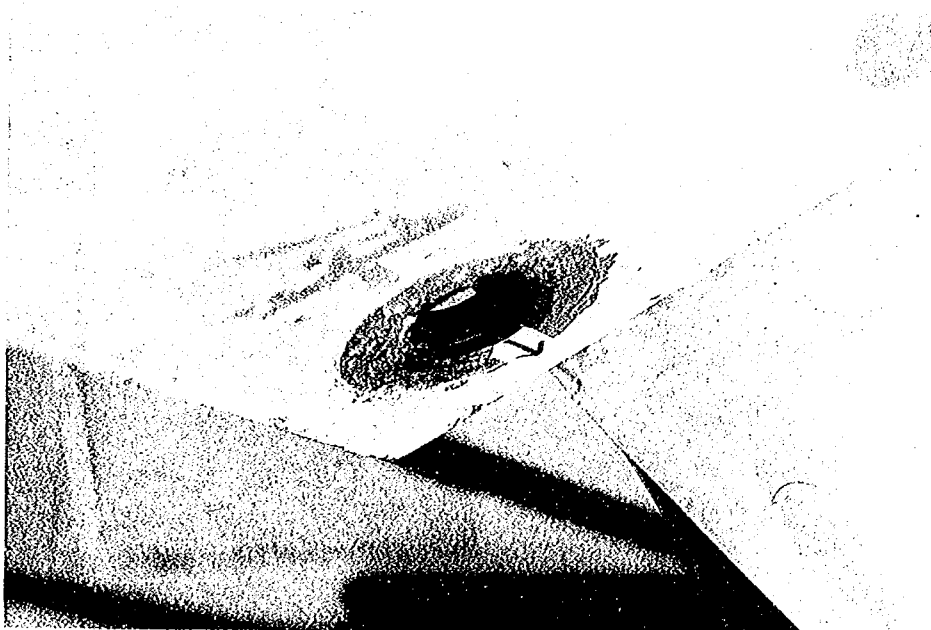
写真-2.11 連結板とボルトの損傷状況 (P1G3)



写真－ 2. 12 地震前の連結板の状況 (P 1 G 3)



写真－ 2. 13 長孔7の打痕（P 1 G 3）



写真－ 2. 14 丸孔14の打痕（P 1 G 3）

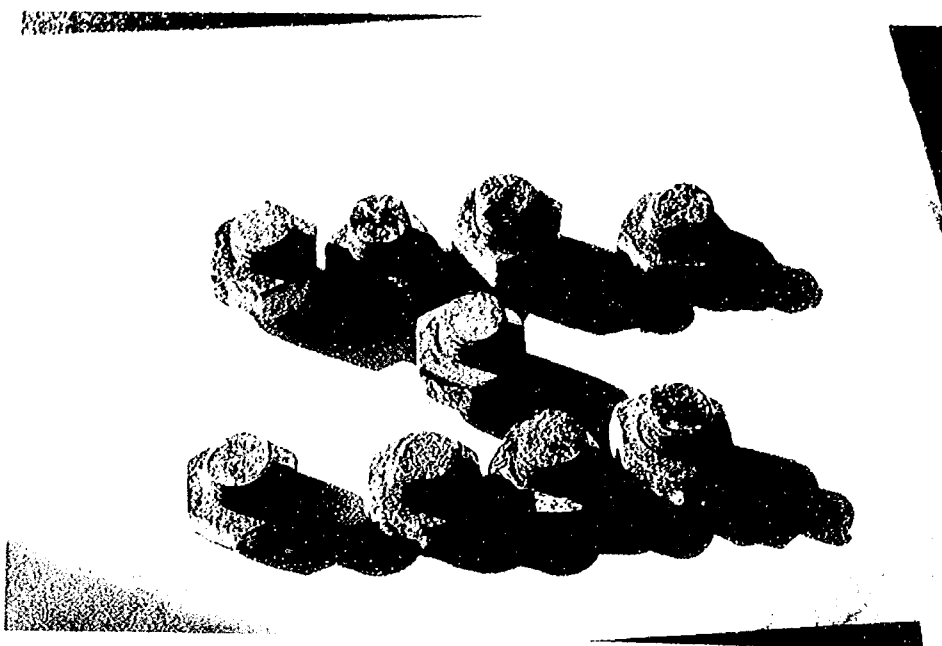


写真-2. 15 破断ボルト (P 1 G 3)

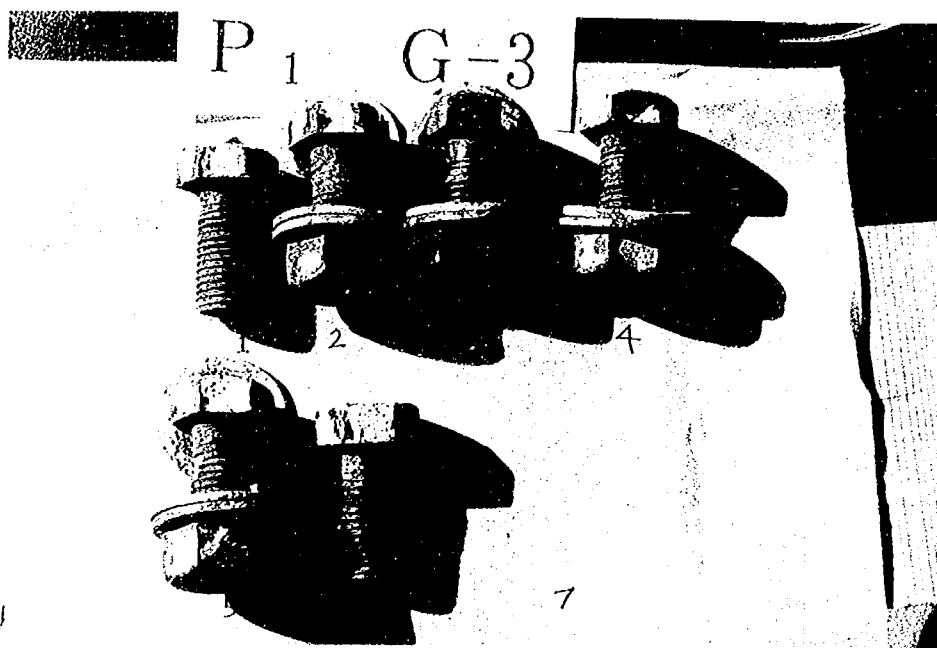


写真-2. 16 未破断ボルト (P 1 G 3)

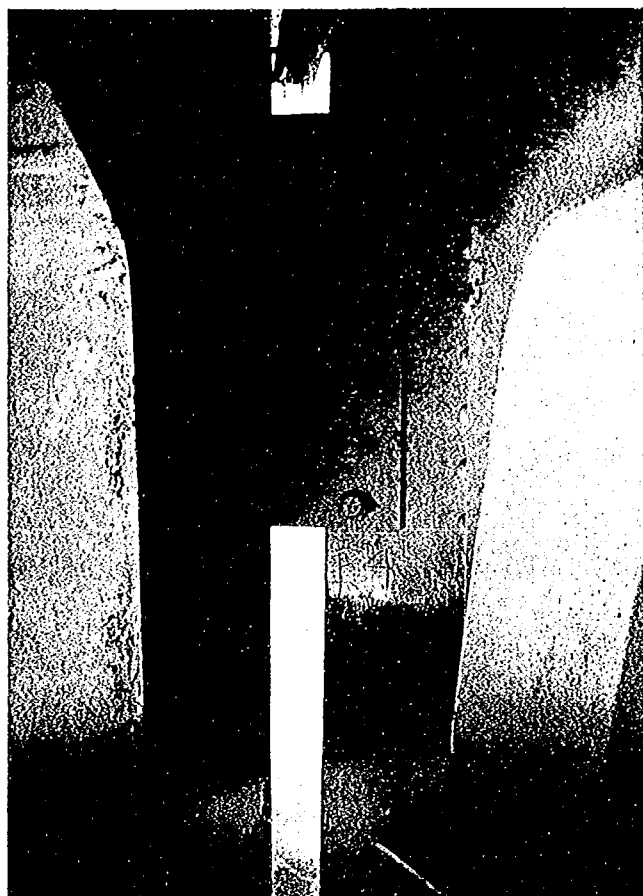
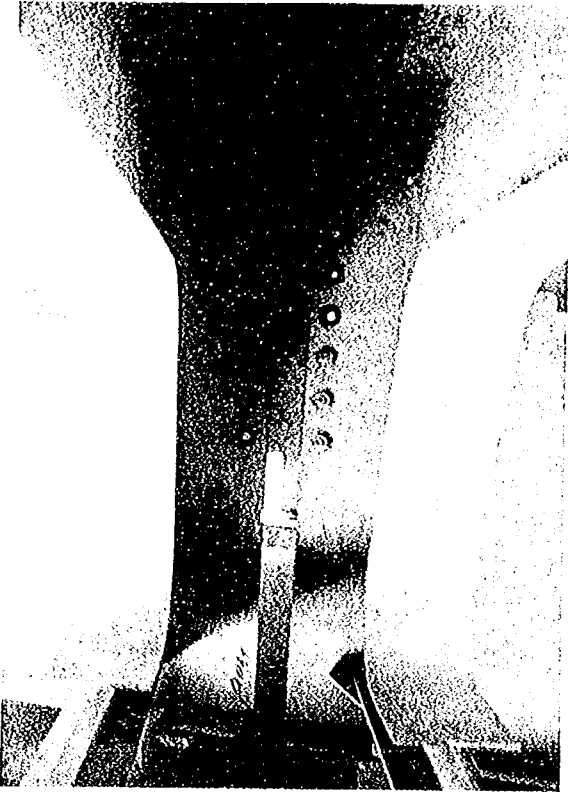
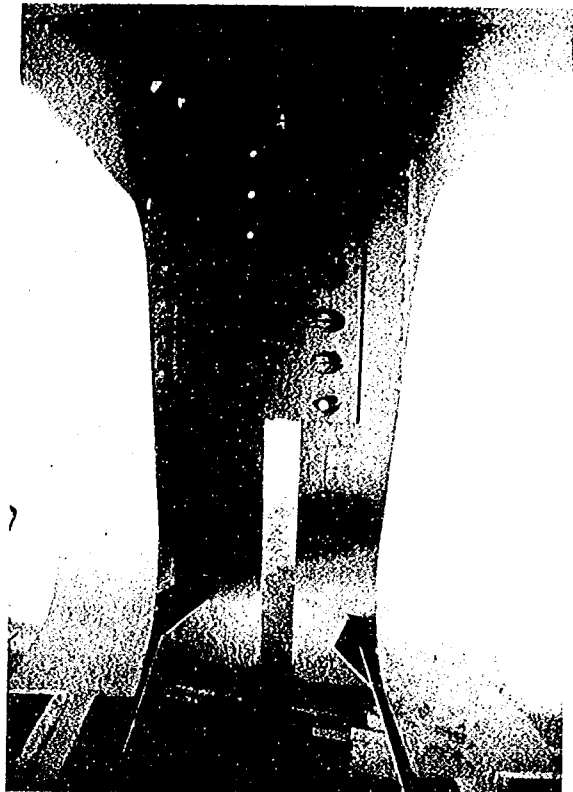


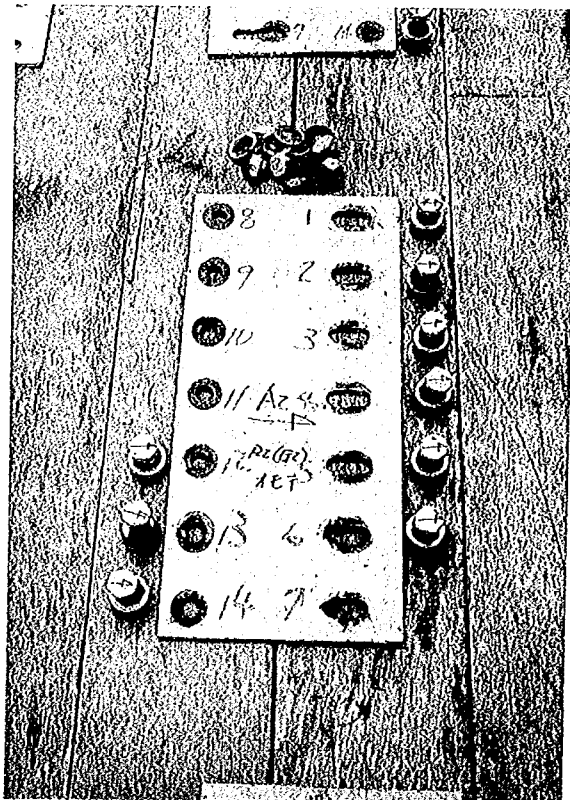
写真-2.17 連結板とボルトの状況 (P2G1)



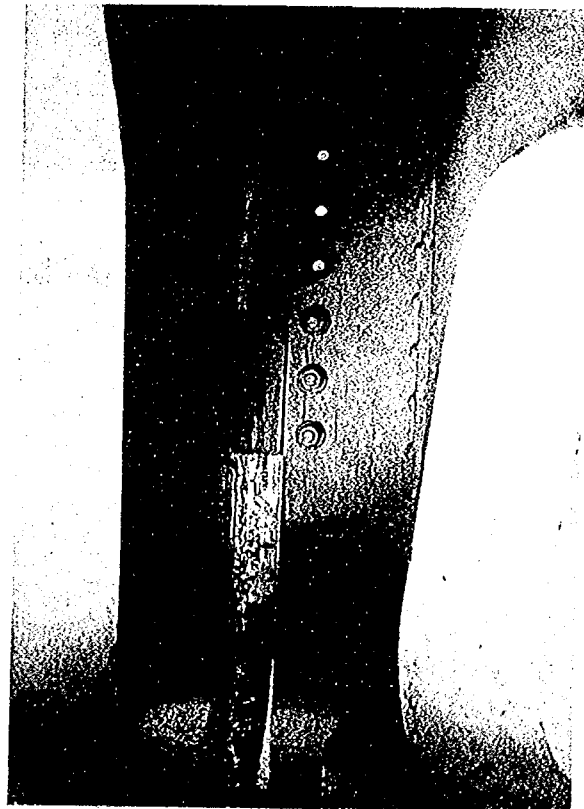
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

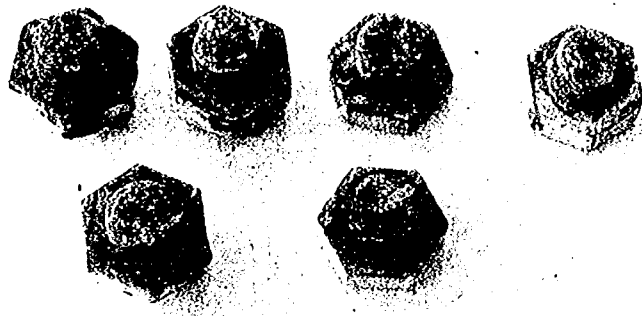


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.18 連結板とボルトの損傷状況 (P2G2)



P₂ G-2

写真-2. 19 破断ボルト (P 2 G 2)

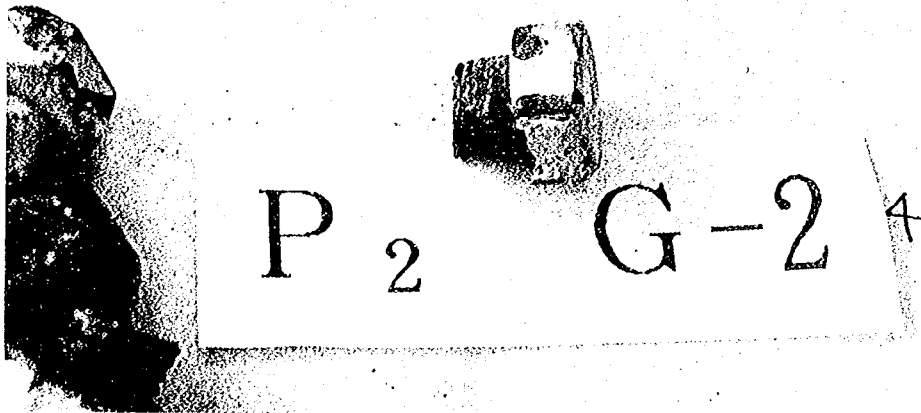


写真-2. 20 破断面以外に亀裂が認められる破断ボルト (P 2 G 2)

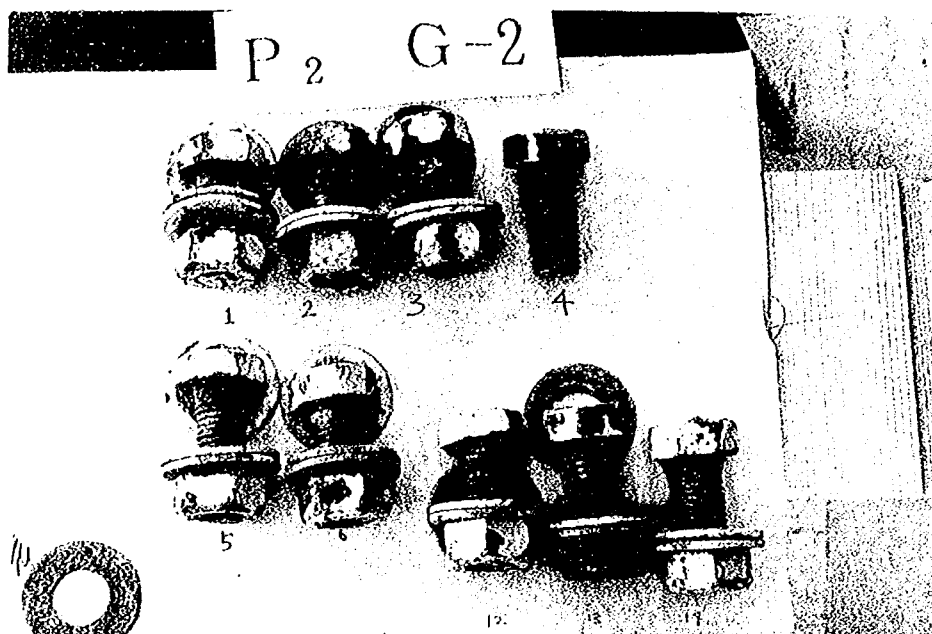
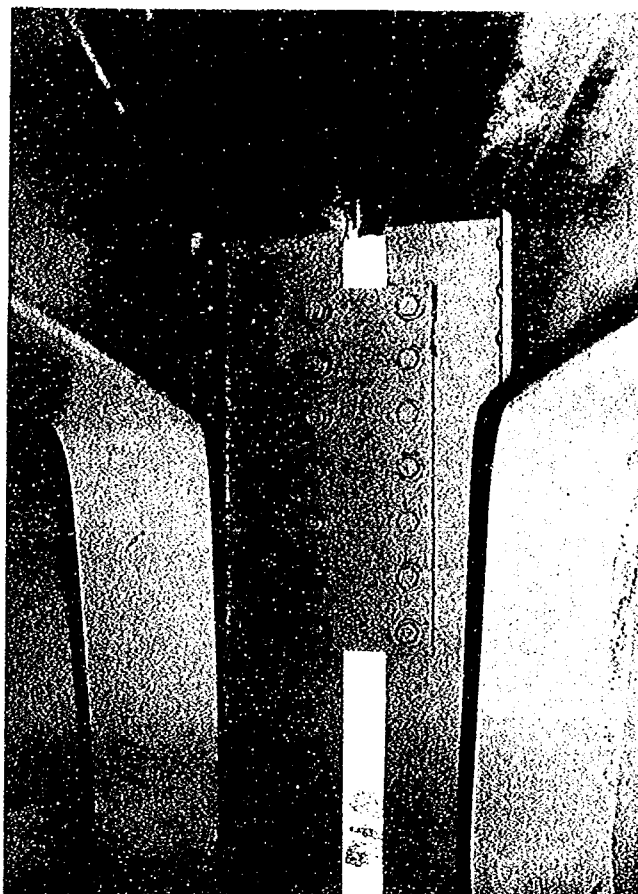
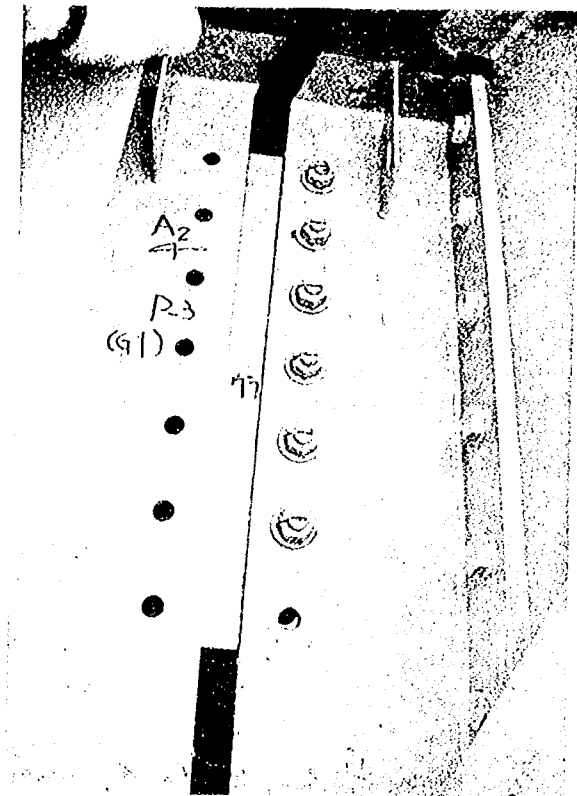


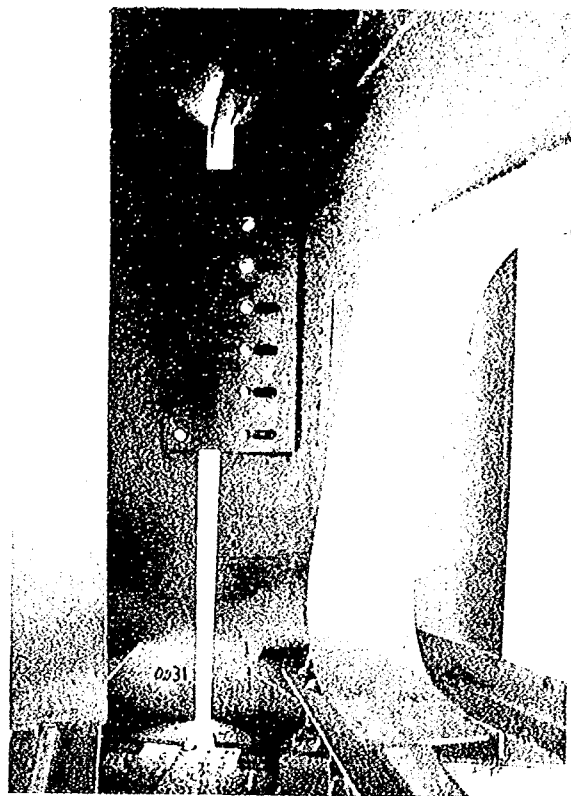
写真- 2. 21 未破断ボルト



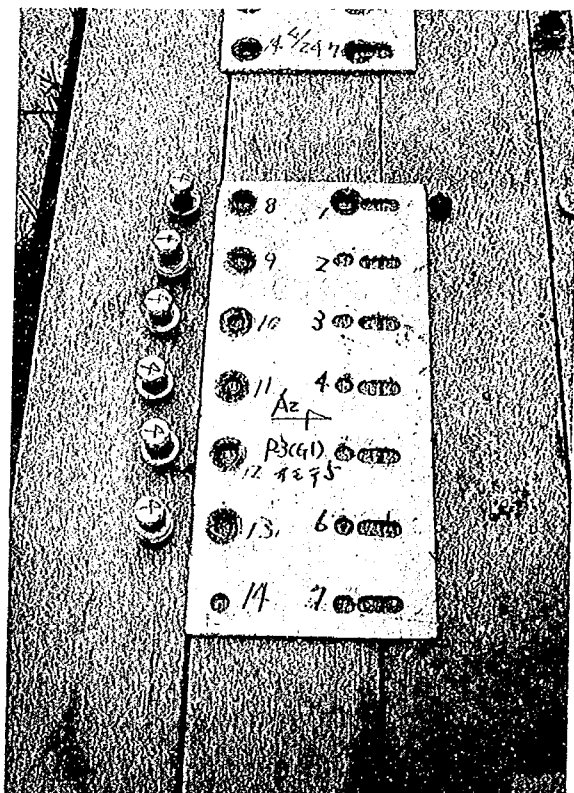
写真－２．２２ 連結板とボルトの状況（P 2 G 3）



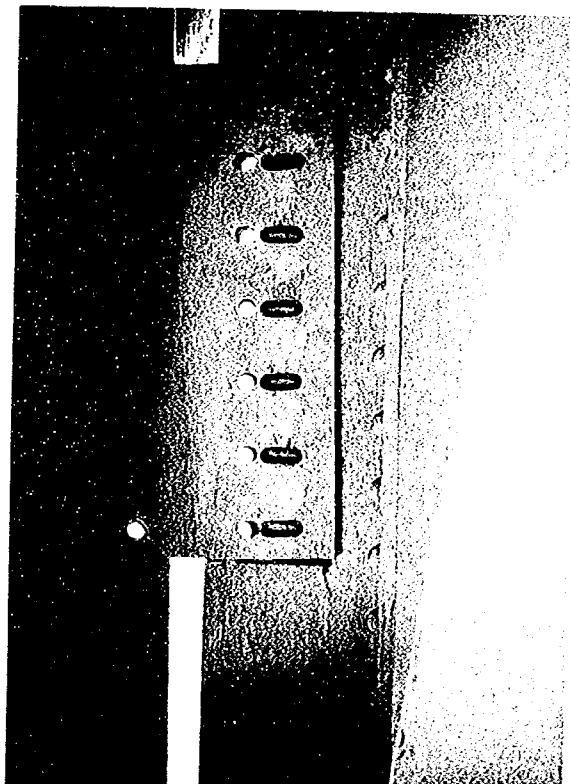
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

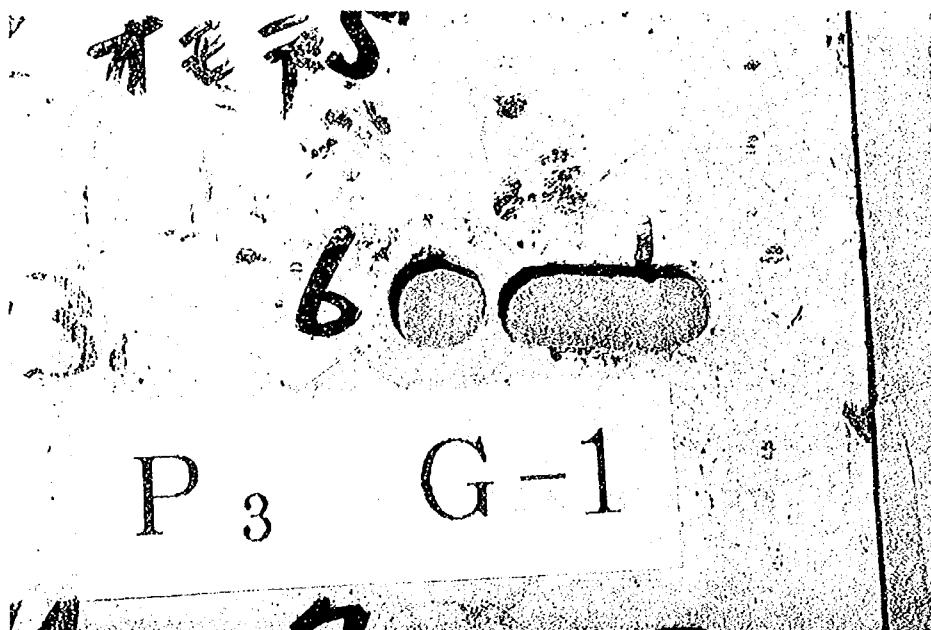


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.23 連結板とボルトの損傷状況 (P3G1)



写真－2. 24 連結板の塗装下に見られる座金跡（P 3 G 1）



写真-2. 25 破断ボルト (P 3 G 1)

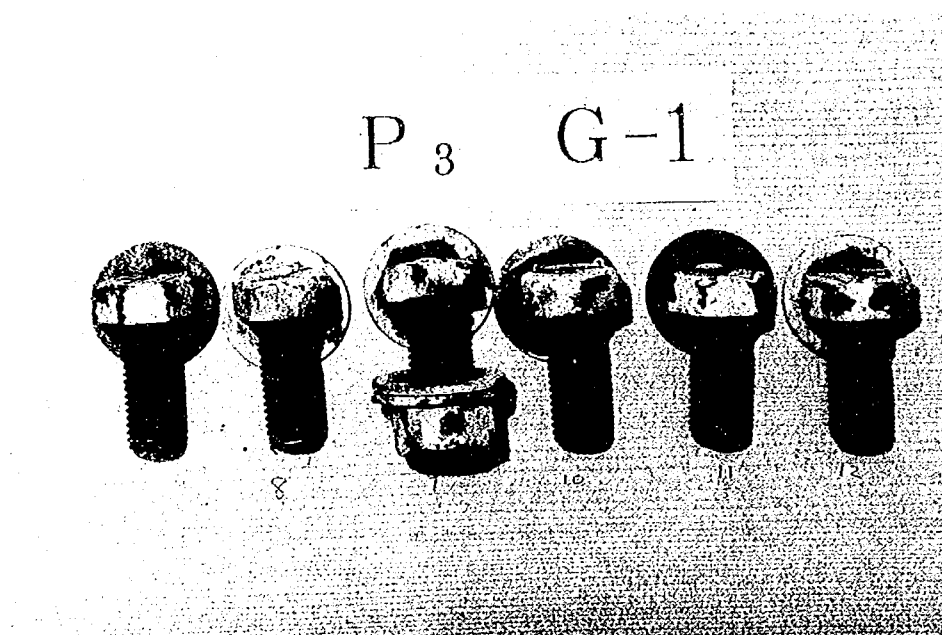
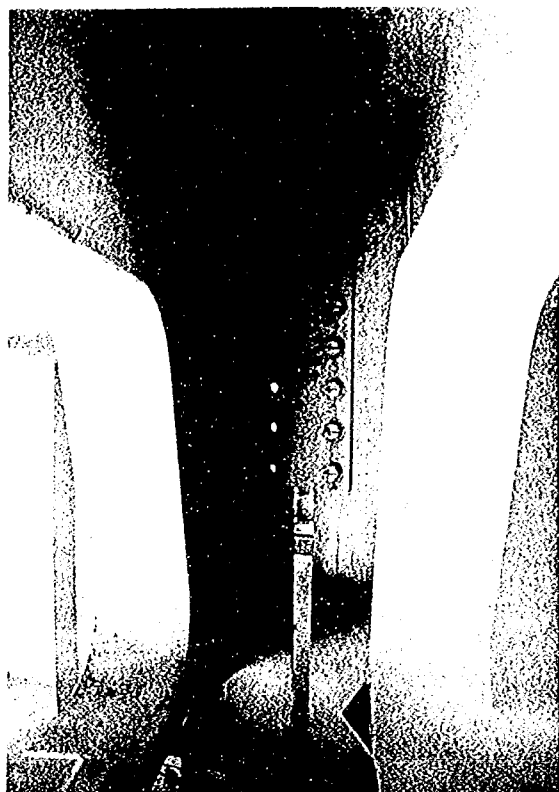
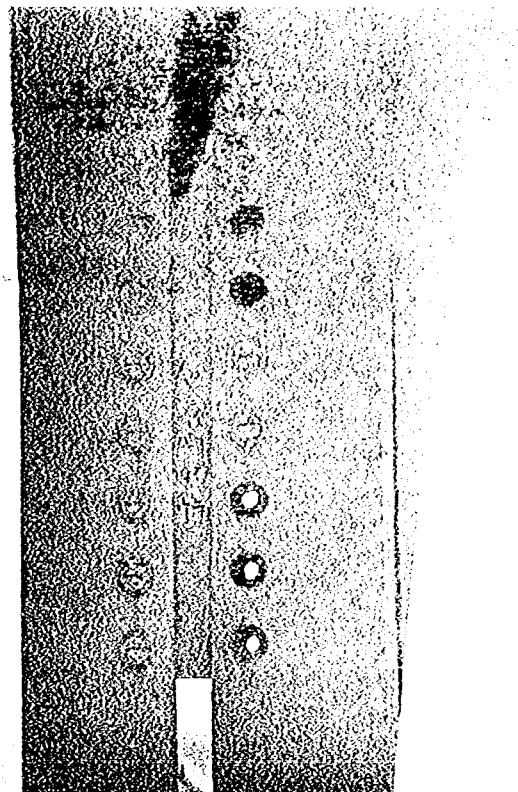


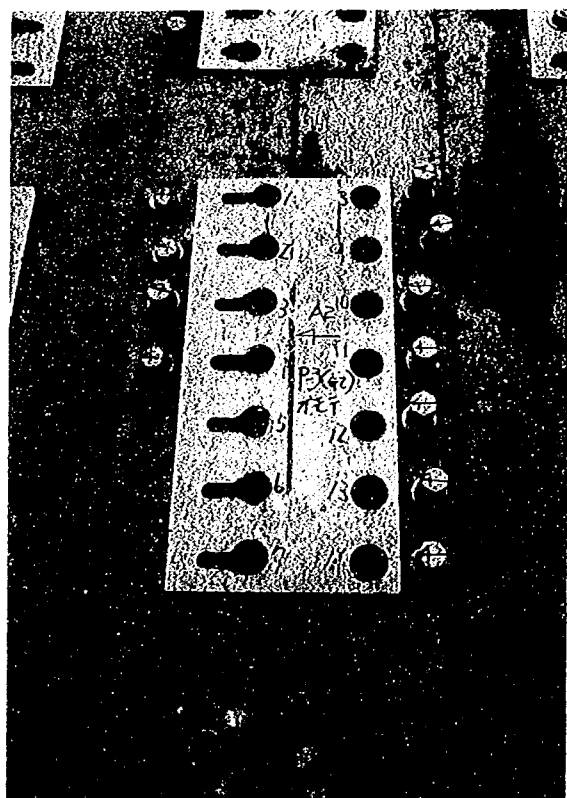
写真-2. 26 未破断ボルト (P 3 G 1)



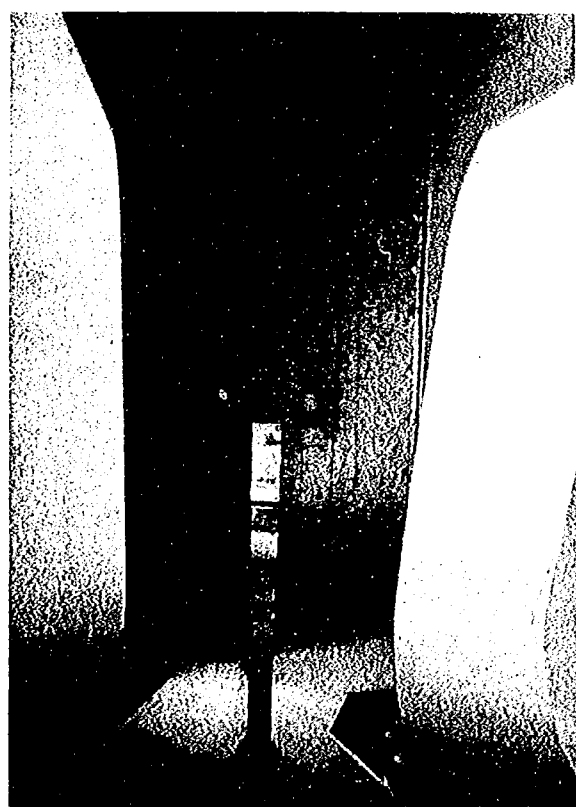
(a) ウェブ側



(b) 連結板側



(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震 1 月後の撮影

写真-2.27 連結板とボルトの損傷状況 (P3G2)

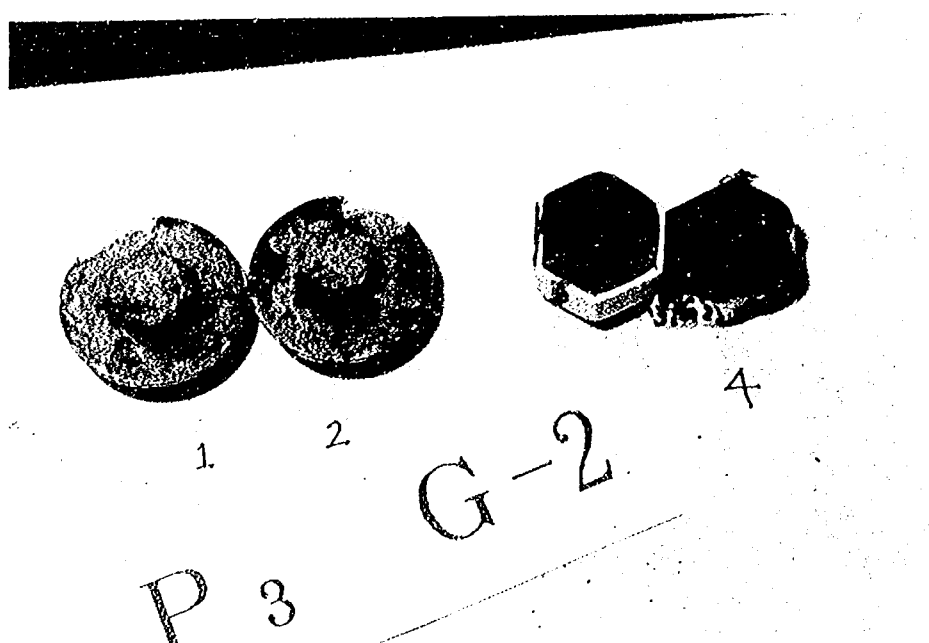
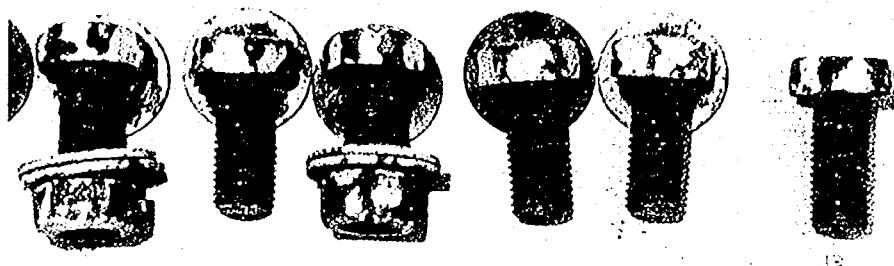


写真-2. 28 破断ボルト (P 3 G 2)



P₃ G-2

写真-2. 29 丸孔側の未破断ボルト (P 3 G 2)



P₃ G-2

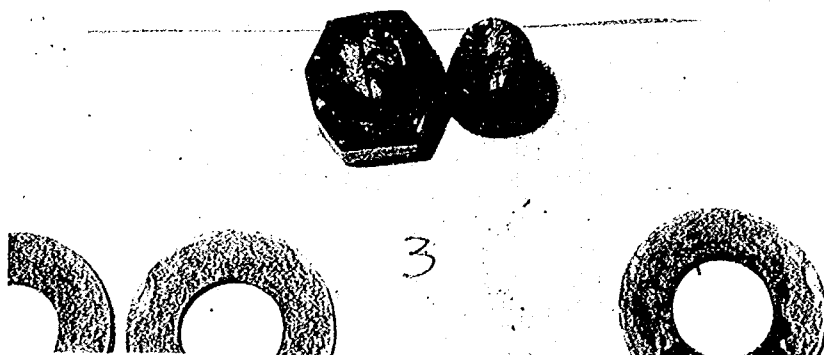
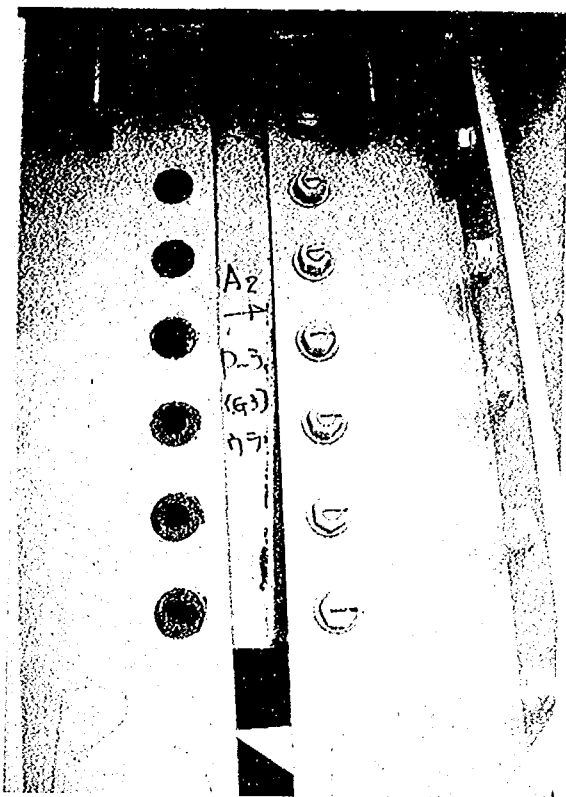
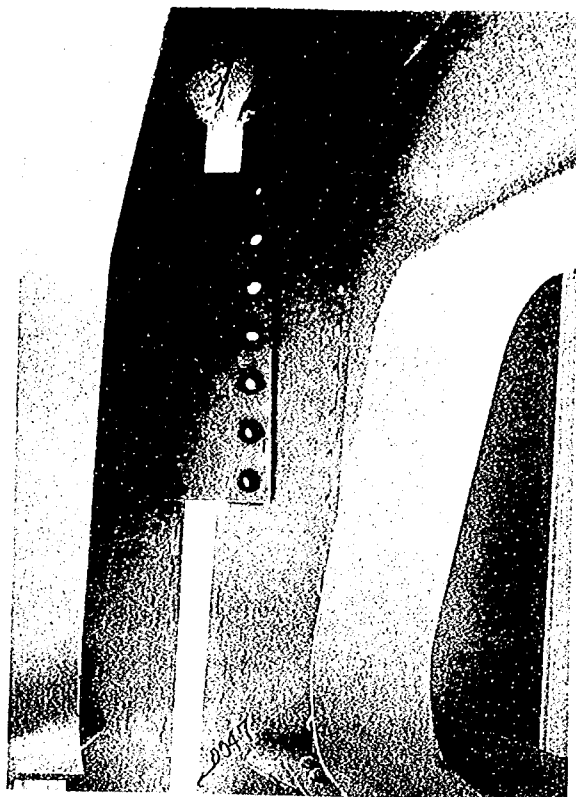


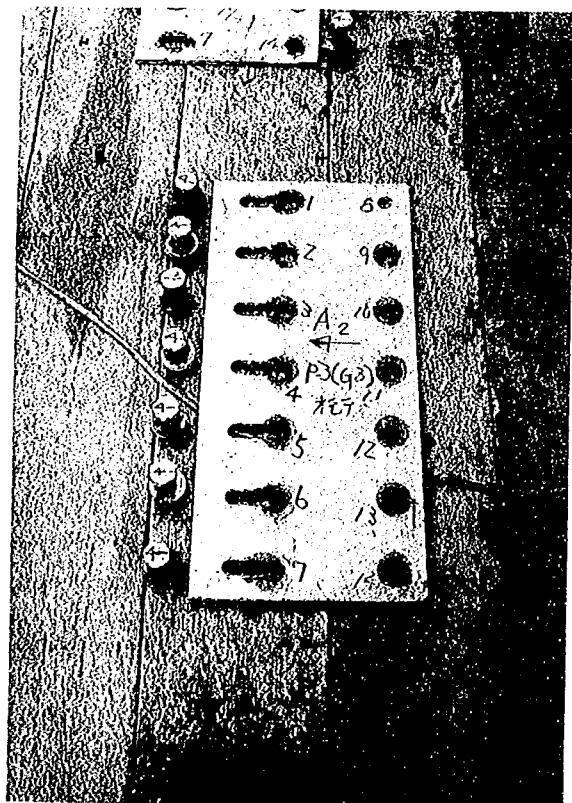
写真-2. 30 長孔側のボルト3 (P 3 G 2、亀裂が認められたため、亀裂面の調査を行った)



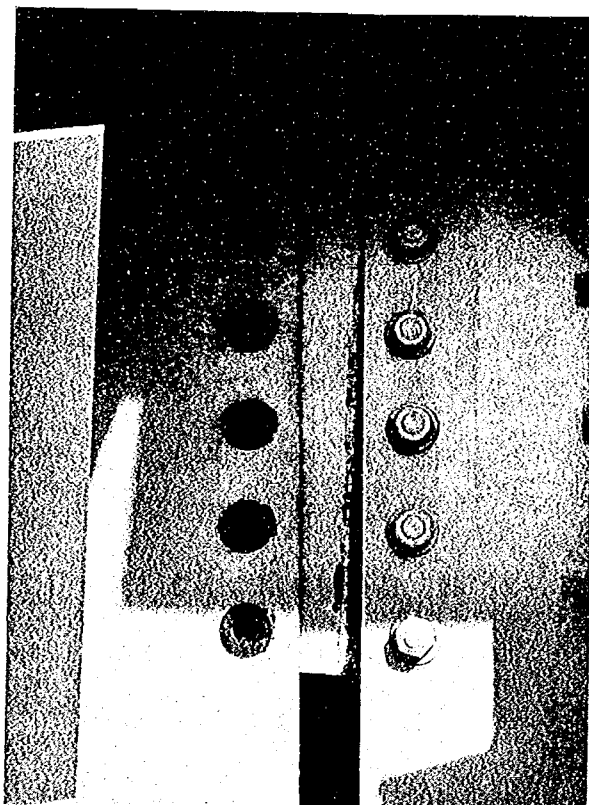
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

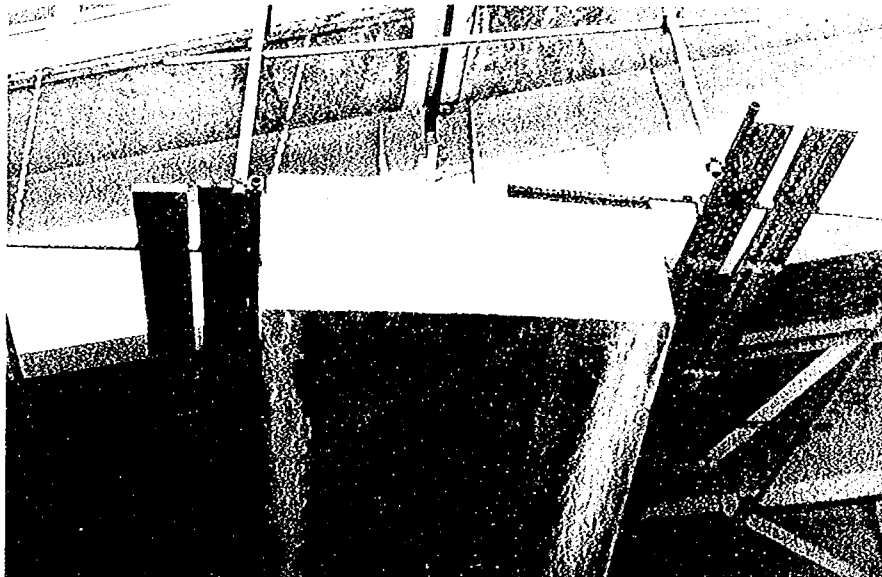
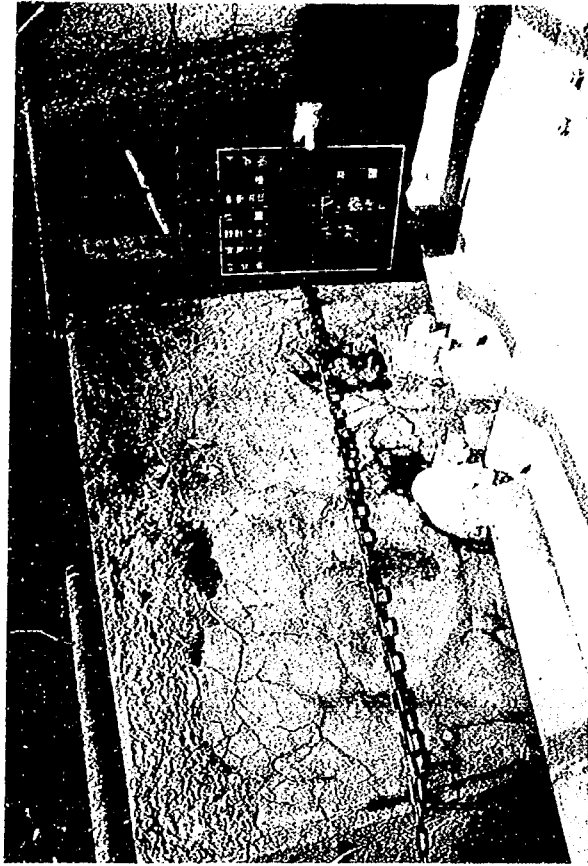


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.31 連結板とボルトの損傷状況 (P3G3)



写真－2. 32 地震前の連結板の状況（P 3 G 3）

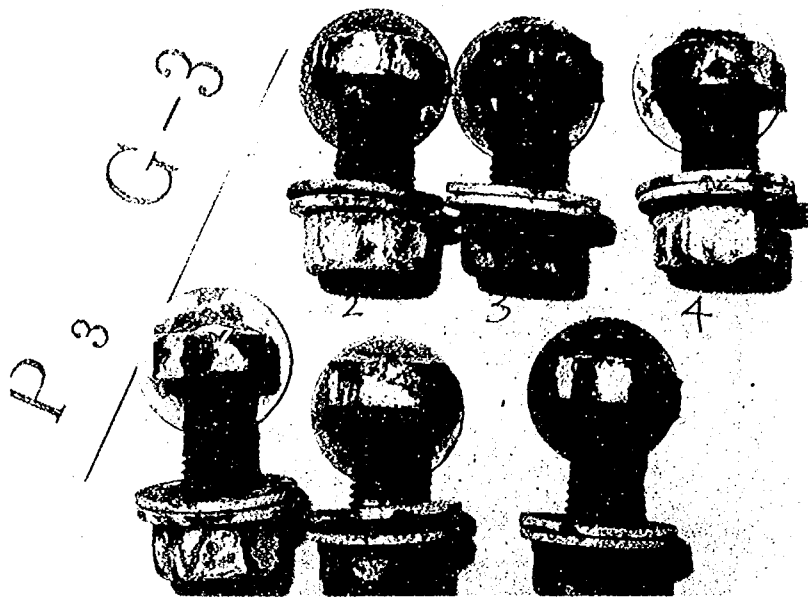
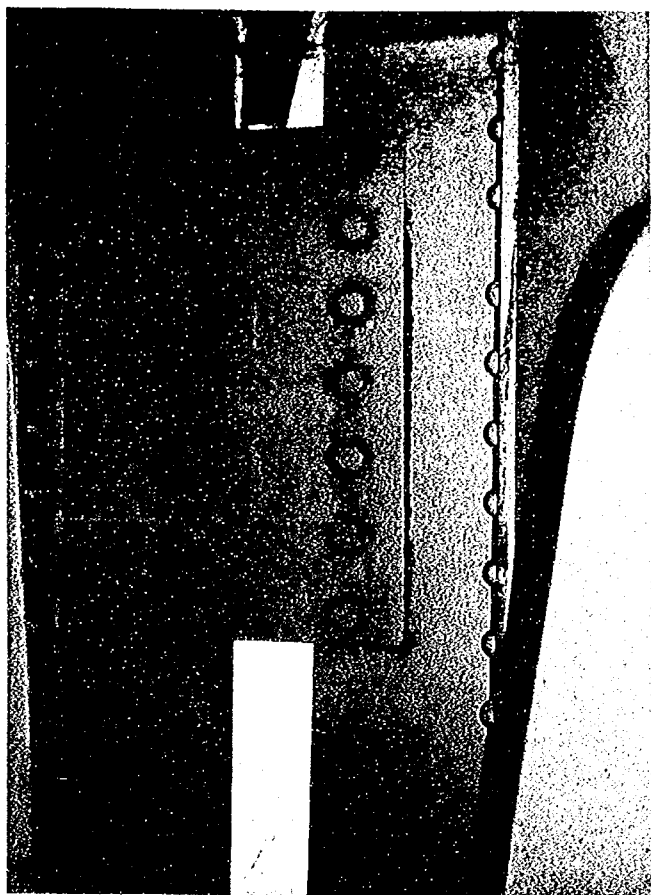


写真-2. 33 丸孔側の未破断ボルト (P 3 G 3)



写真－2.34 連結板とボルトの状況（P4G1）

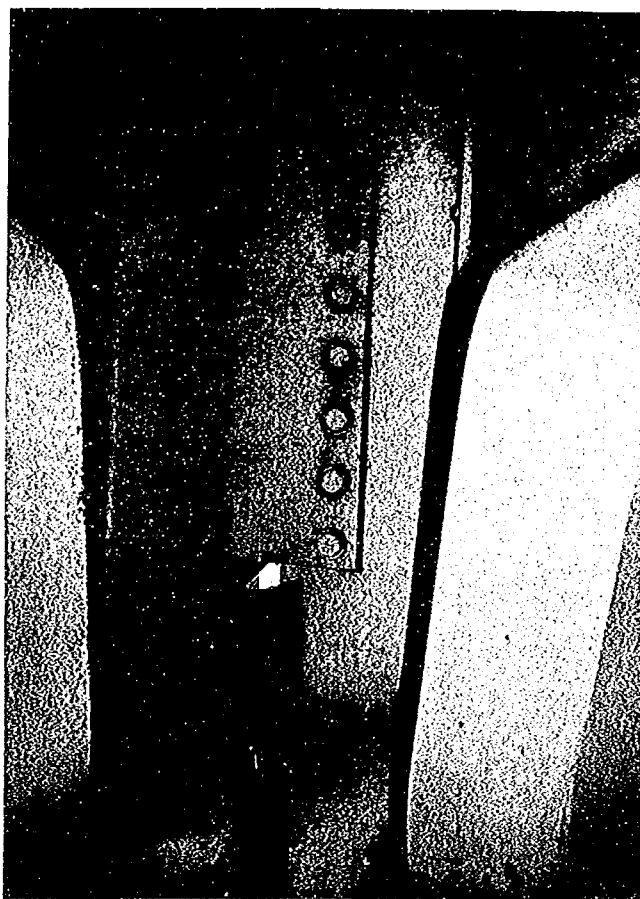
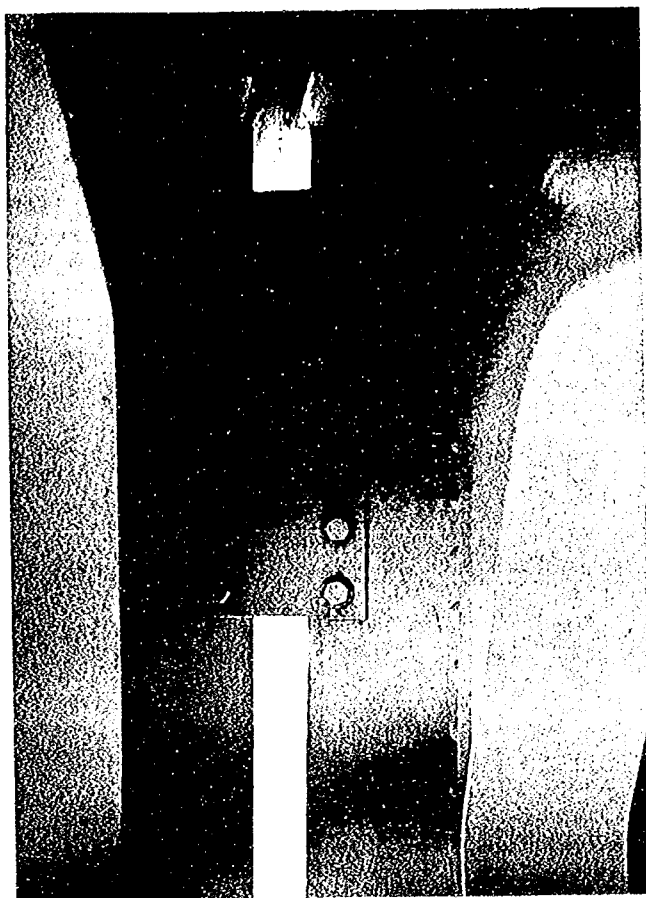
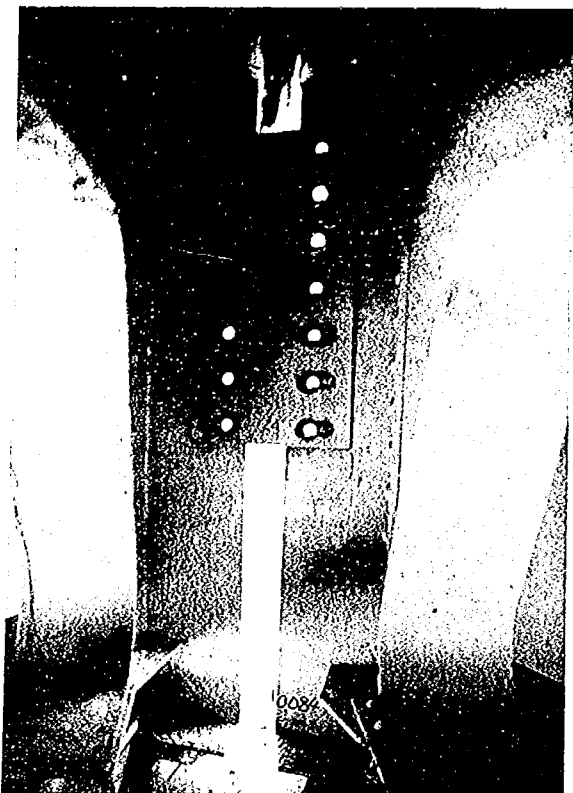


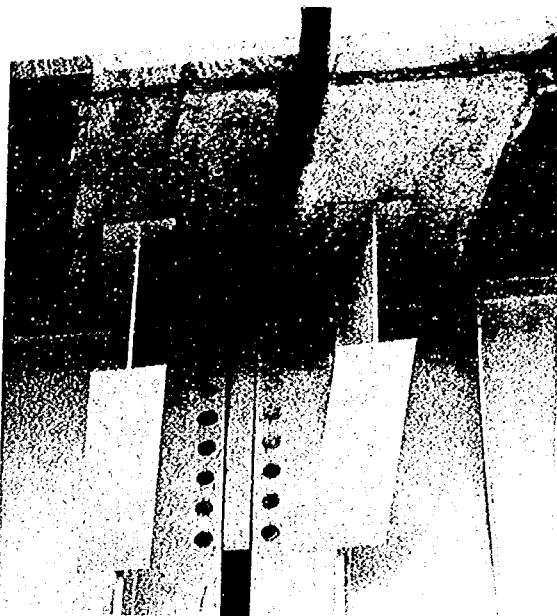
写真-2.35 連結板とボルトの状況 (P4G2)



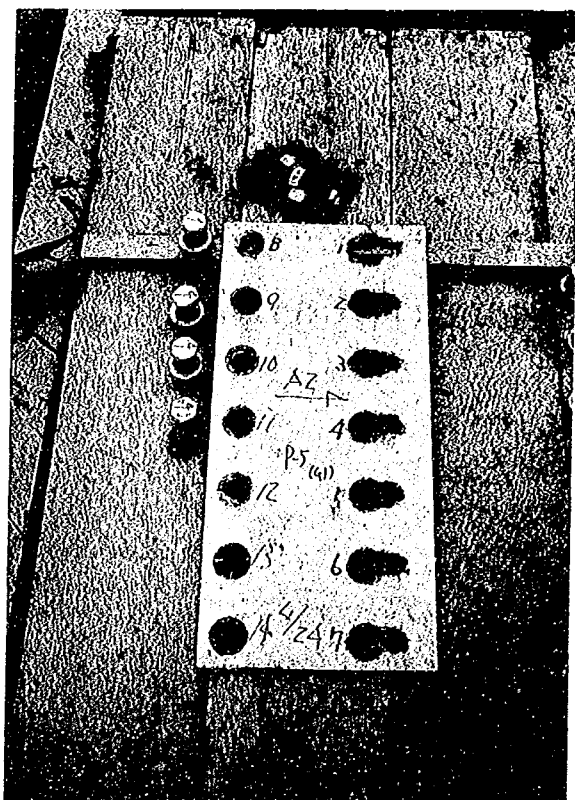
写真－2．36 連結板とボルトの状況（P4G3）



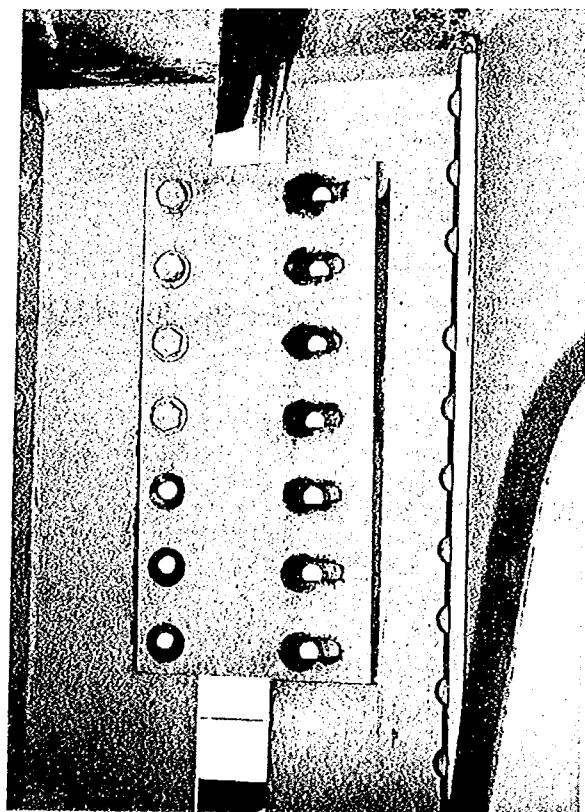
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

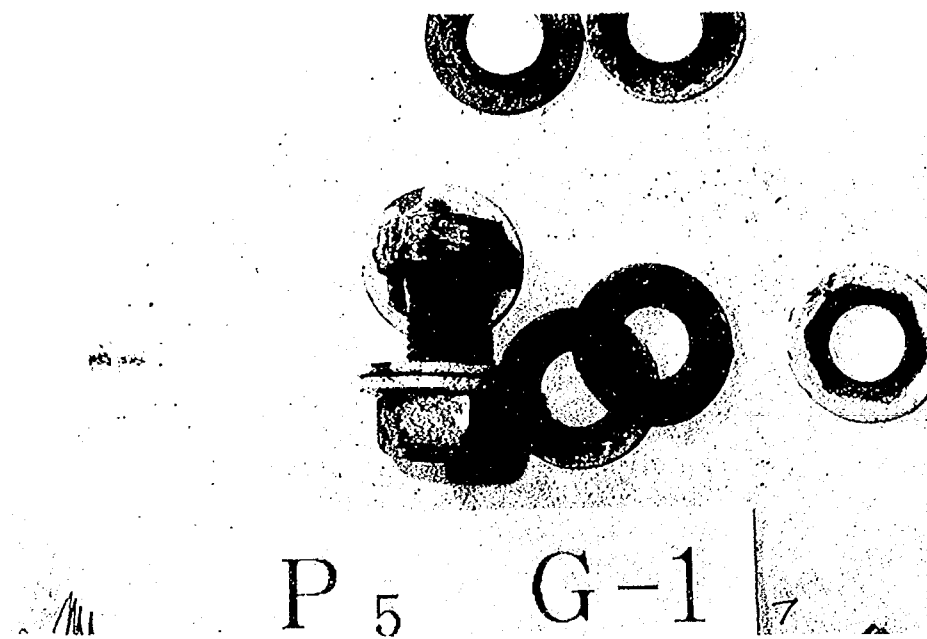


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)

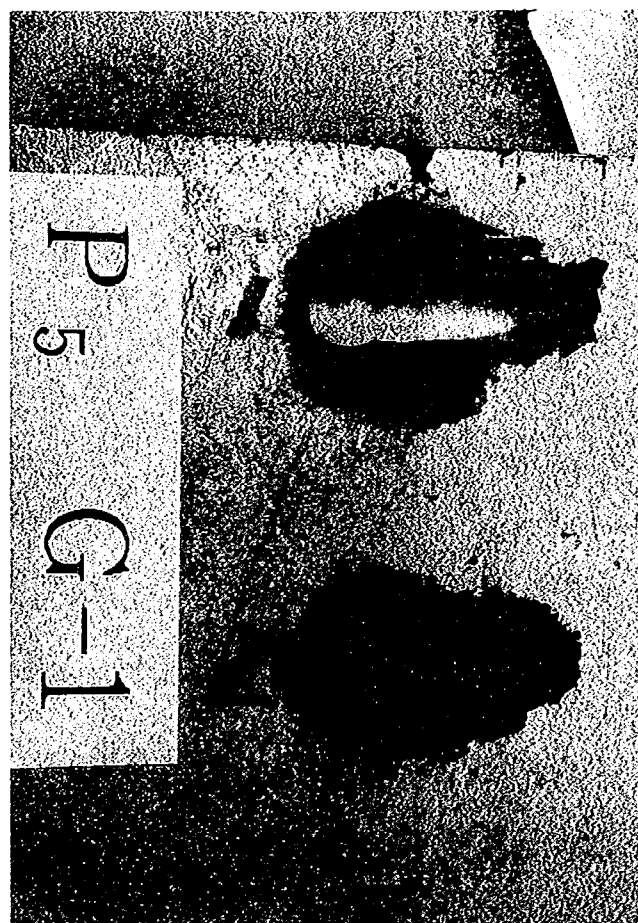


(d) 地震1月後の撮影

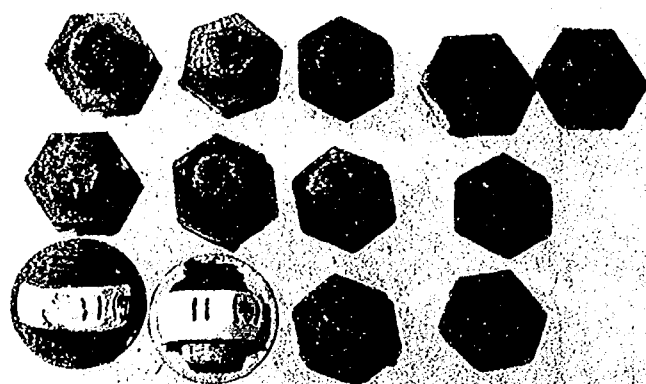
写真-2.37 連結板とボルトの損傷状況 (P5G1)



写真－2. 38 ボルトの首部のねじ山がつぶれたもの（P 5 G 1）

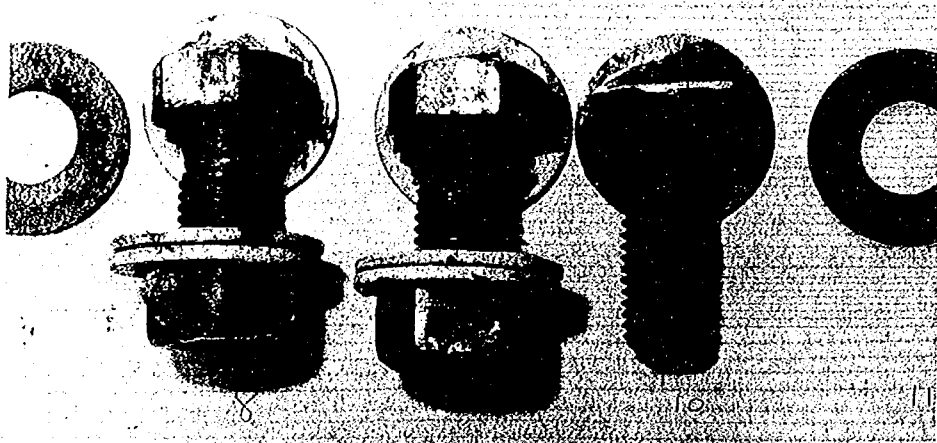


写真－2. 39 長孔の塗装の剥げた状況（P 5 G 1）



P₅ G-1

写真-2. 40 破断ボルト (P 5 G 1)



P₅ G-1

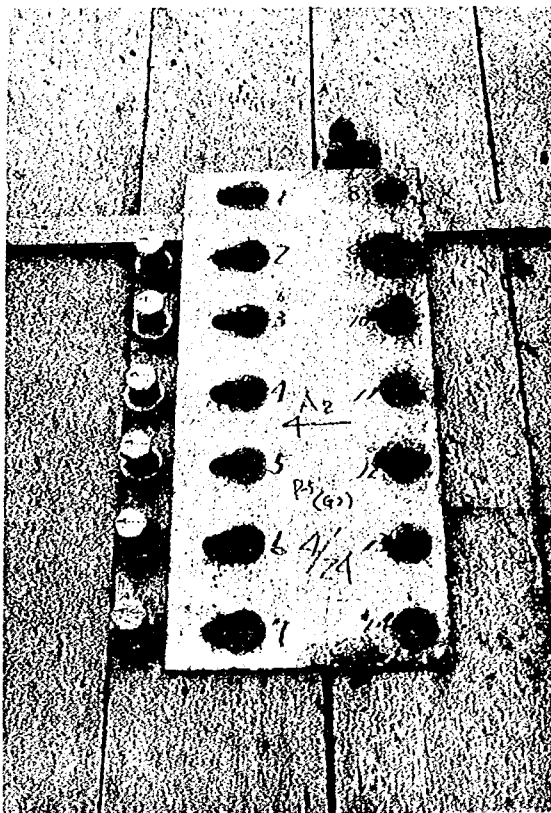
写真-2. 41 未破断ボルト (P 5 G 1)



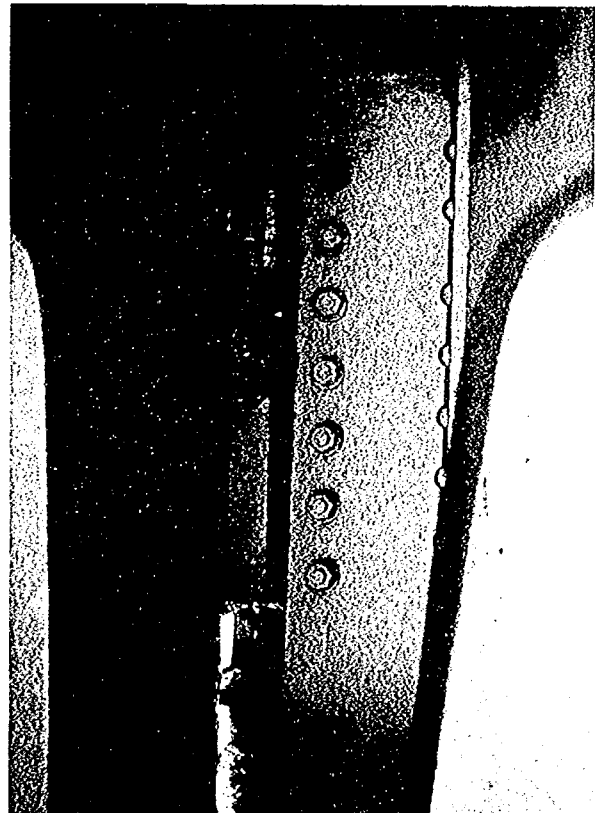
(a) ウェブ側



(b) 連結板側



(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震 1 月後の撮影

写真-2. 42 連結板とボルトの損傷状況 (P 5 G 2)

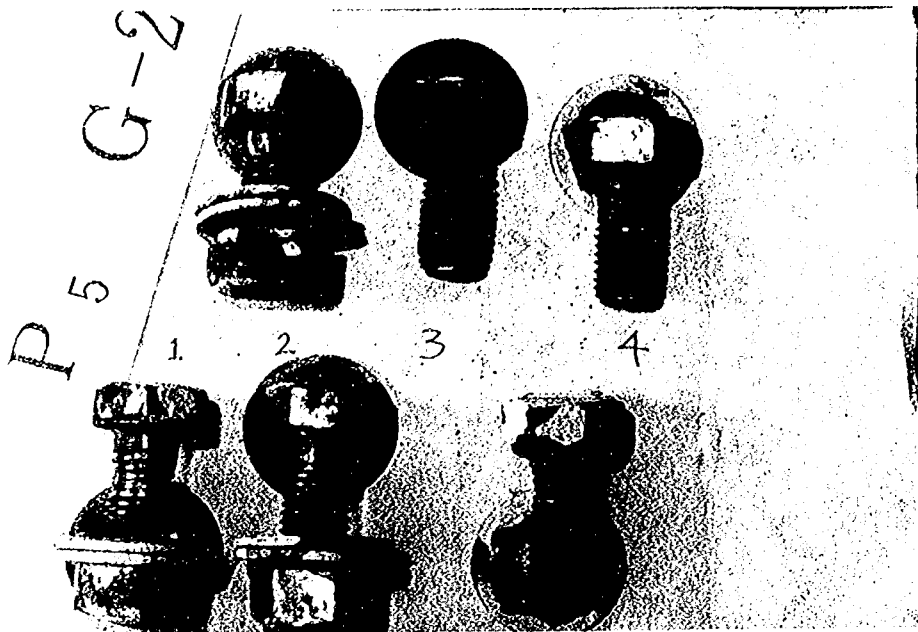
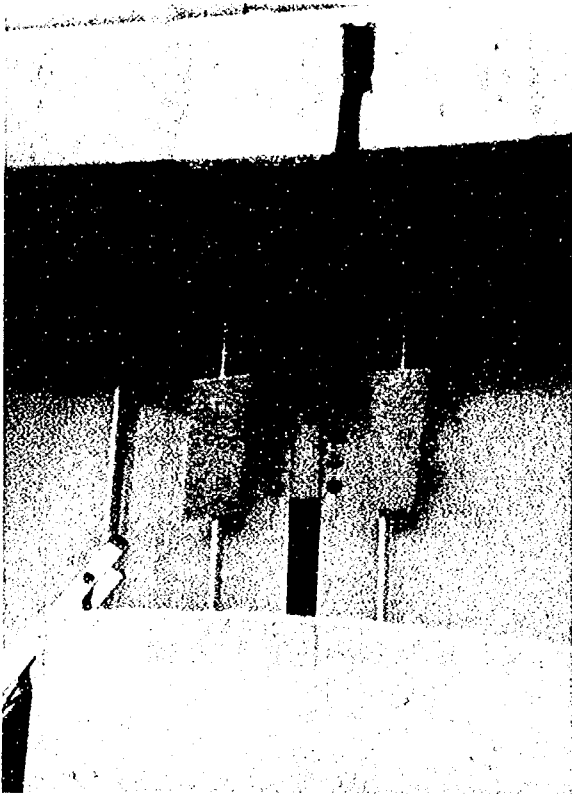
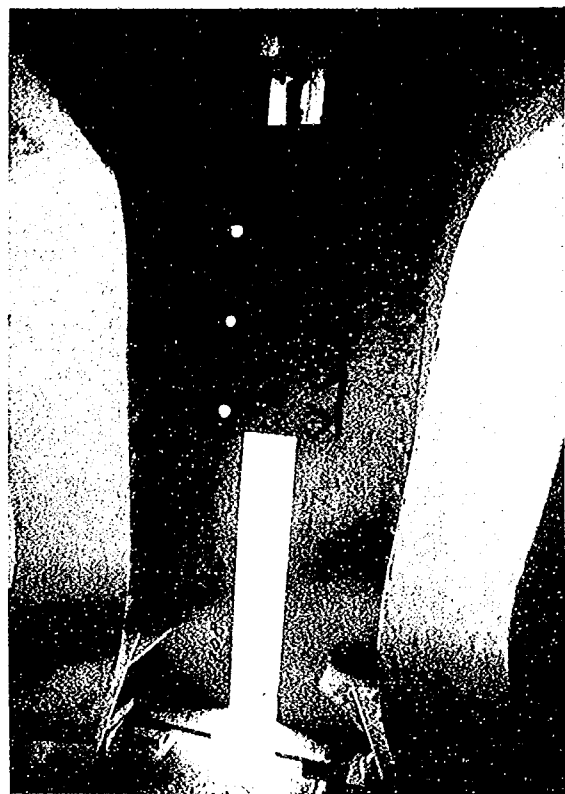


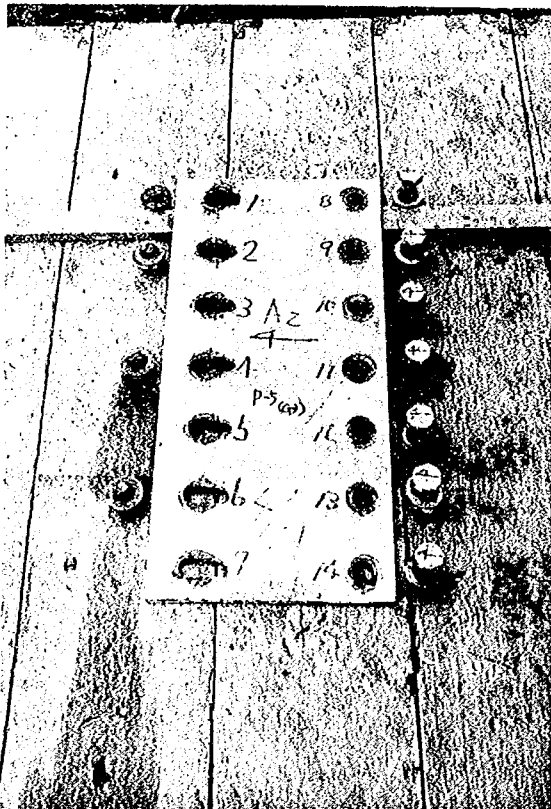
写真-2. 43 未破断ボルト (P 5 G 2)



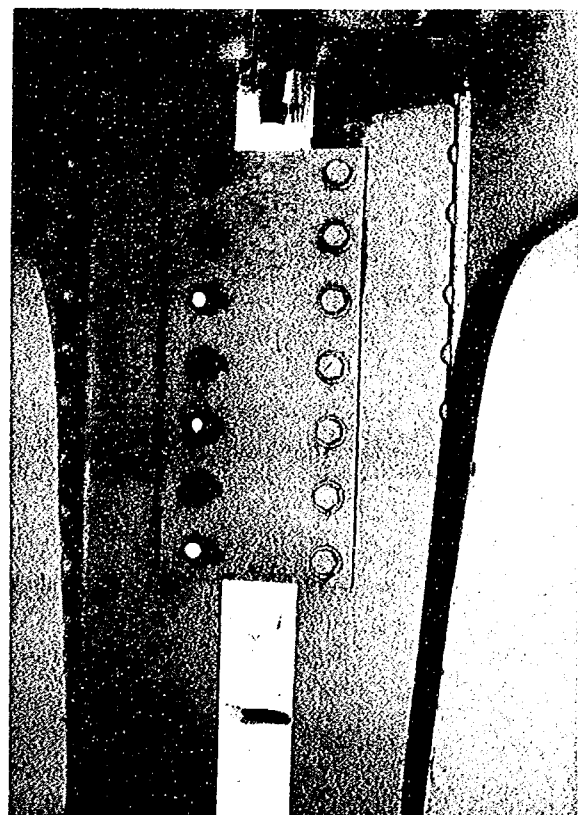
(a) ウェブ側



(b) 連結板側

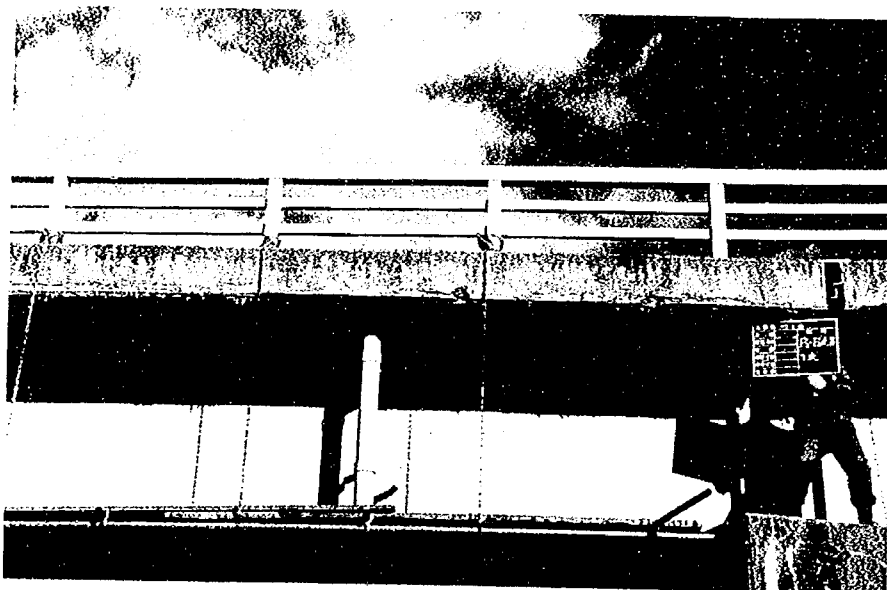
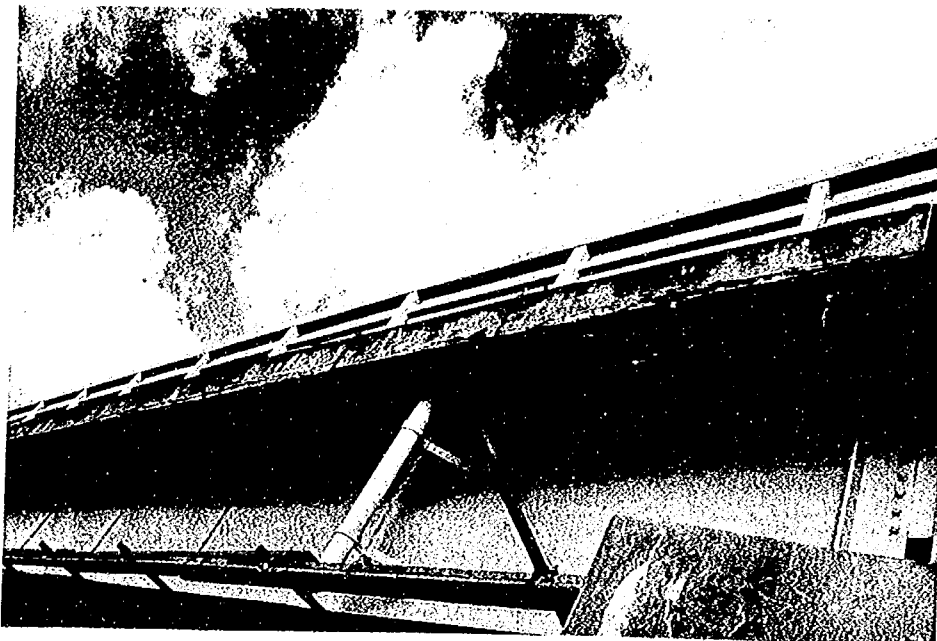


(c) 解体後
(ボルトは対応する位置についていたもの)



(d) 地震1月後の撮影

写真-2.44 連結板とボルトの損傷状況 (P 5 G 3)



写真— 2. 45 地震前の連結板の状況 (P 5 G 3)

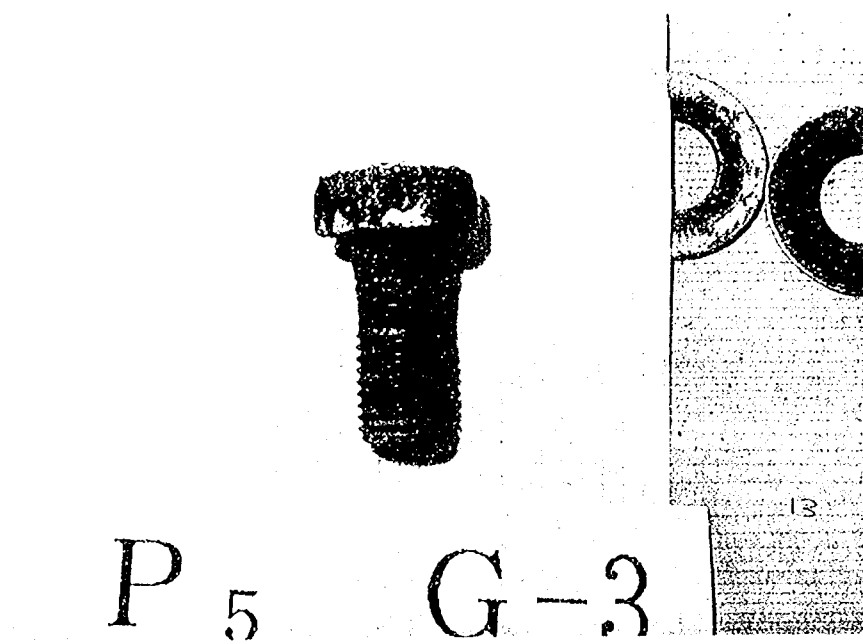
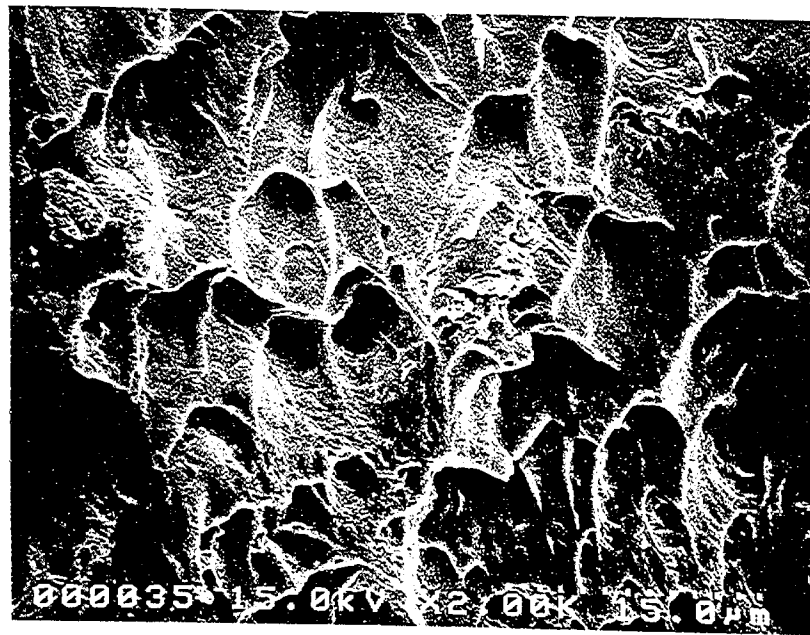


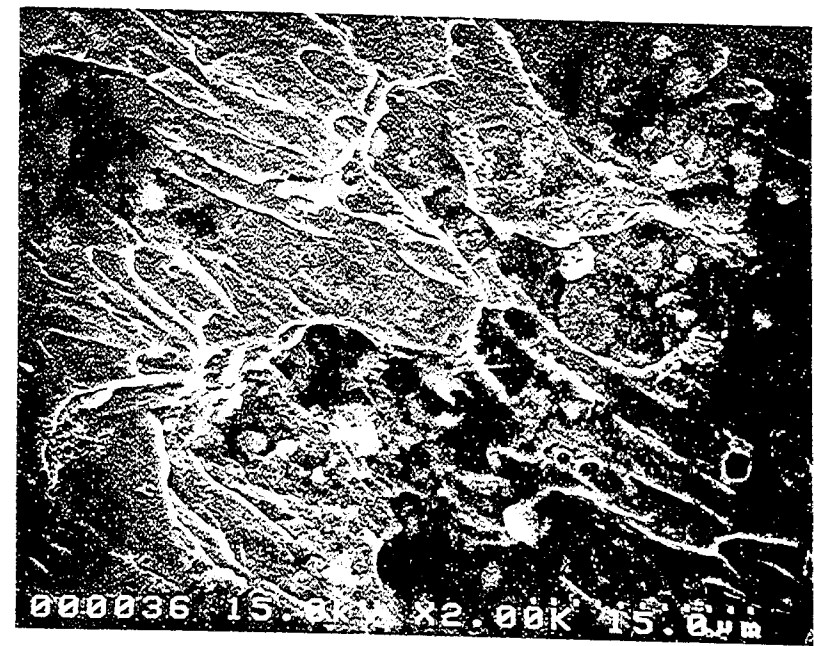
写真 2. 46 ねじ山が磨耗したボルト (P 5 G 3)



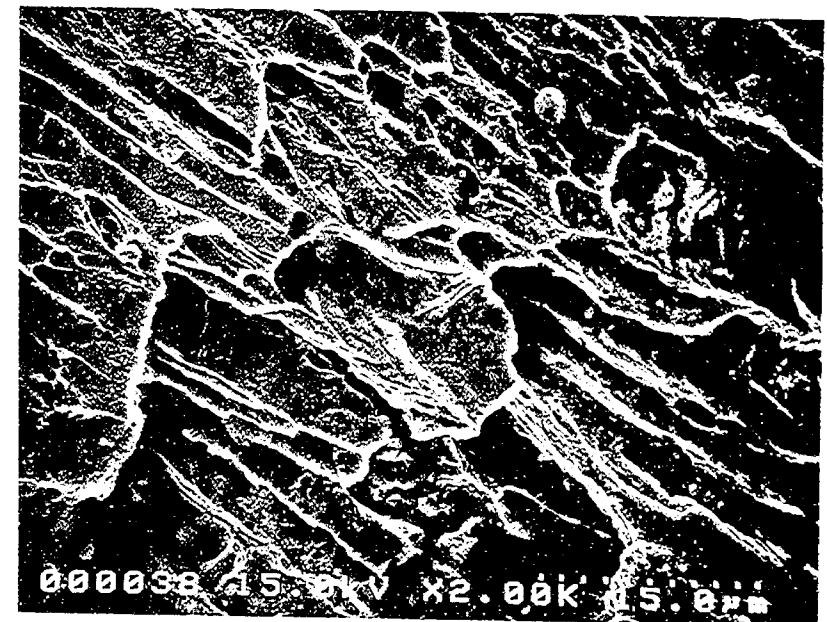
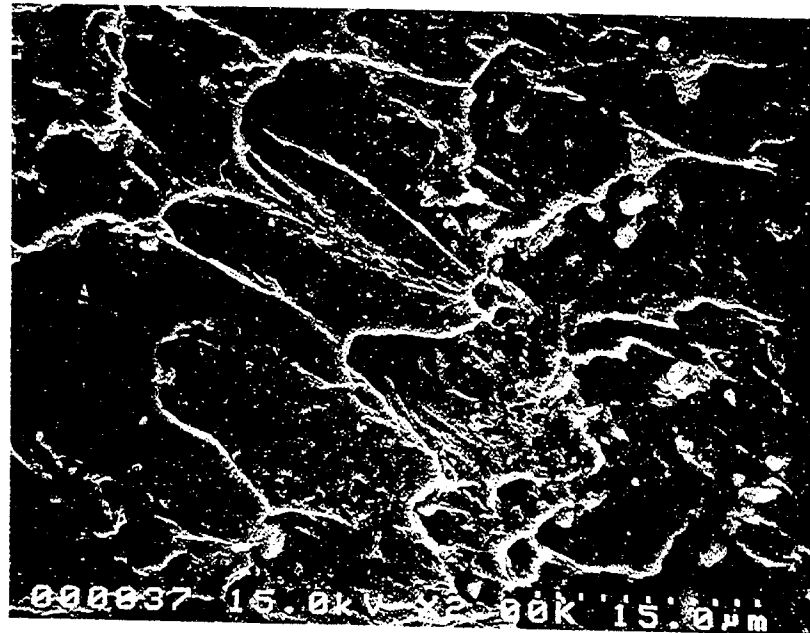
写真 2. 47 ボルトの破断面



(1) A位置

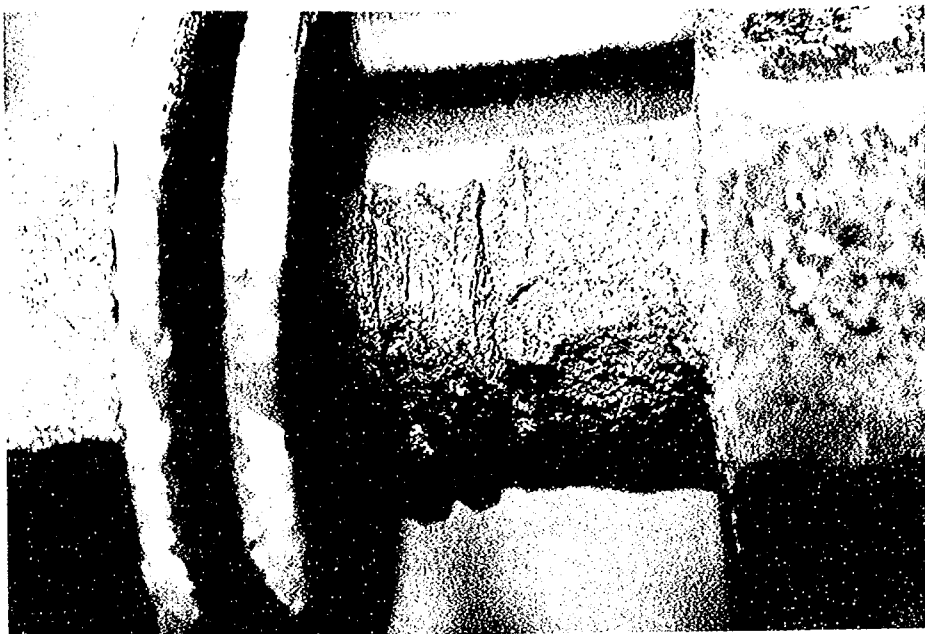


(2) B位置

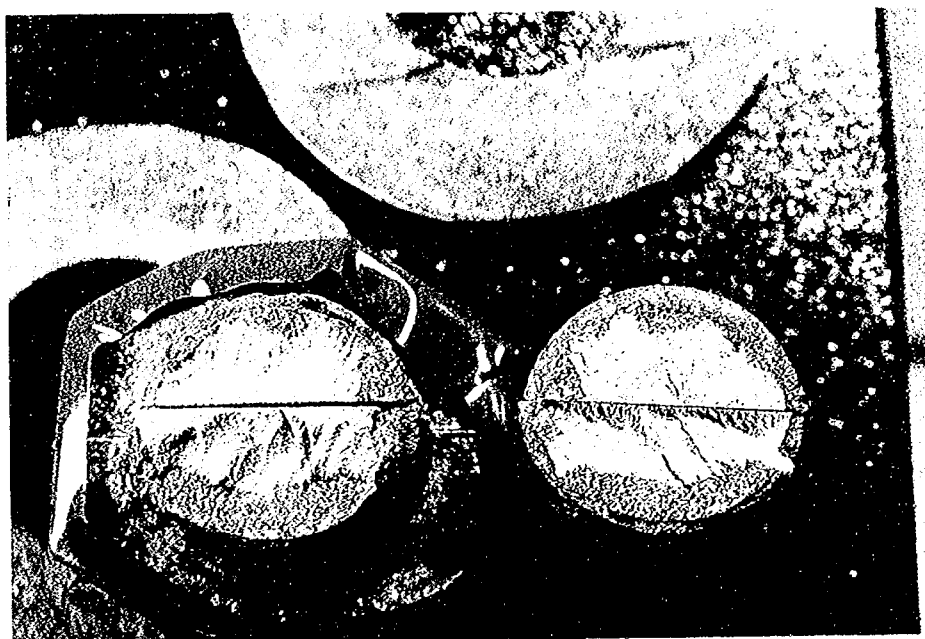


(4) D位置

写真-2. 48 ボルトの破断面の拡大写真（撮影位置は図-2. 11に対応）



(a) 破断前



(b) 強制破断面

写真-2.49 亀裂のあるP3G2のボルト3

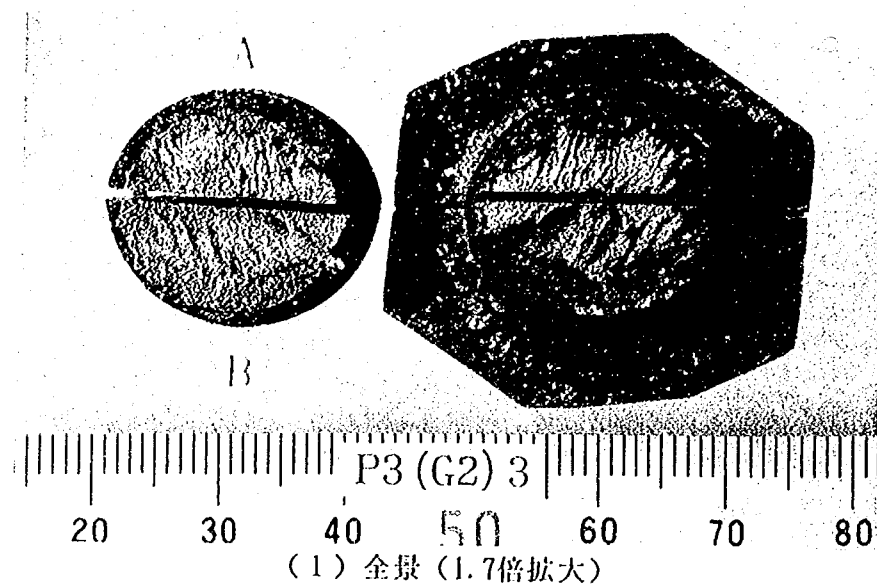
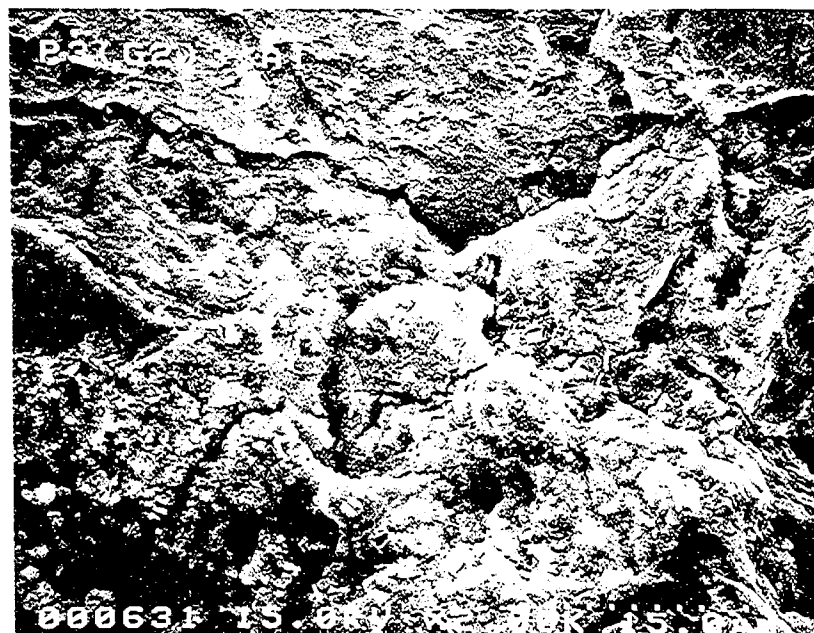


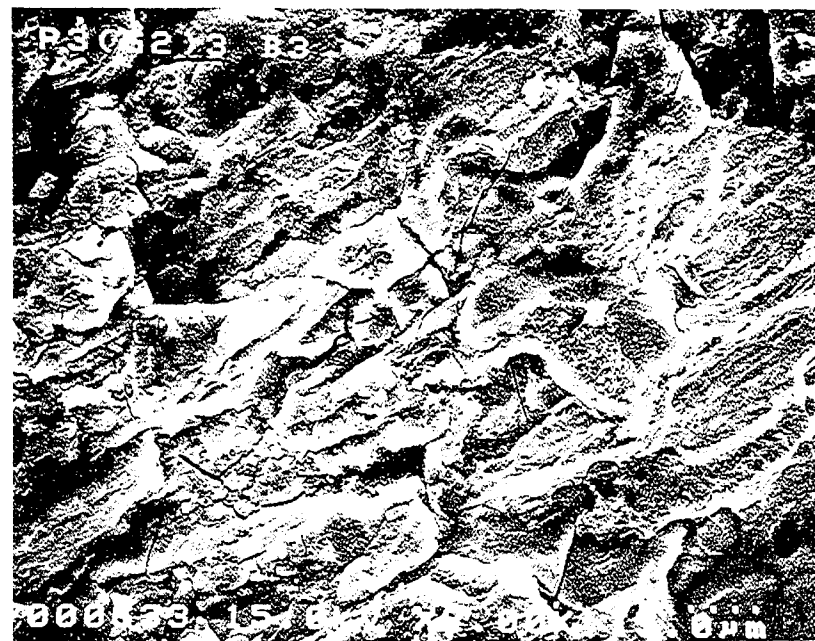
写真-2. 50 ボルトの破断面の拡大図



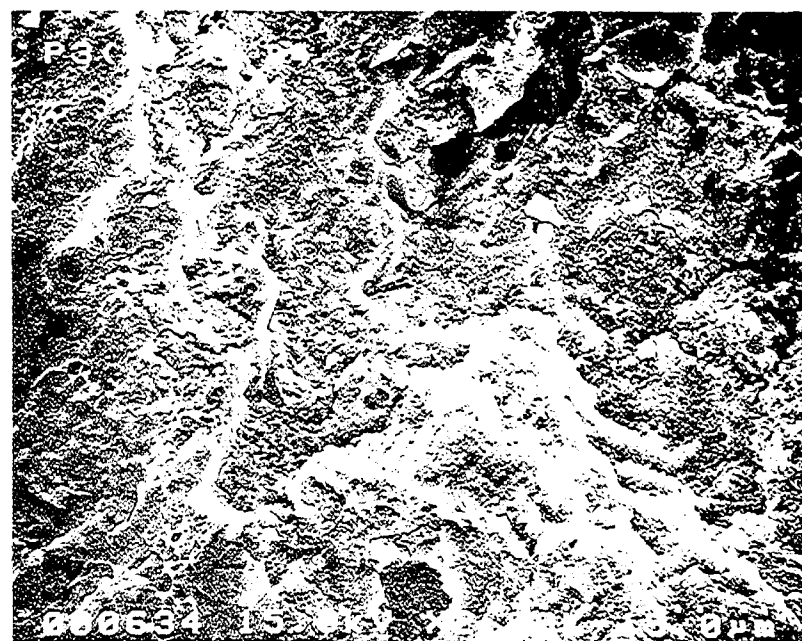
(1) A 1 位置



(2) A 2 位置

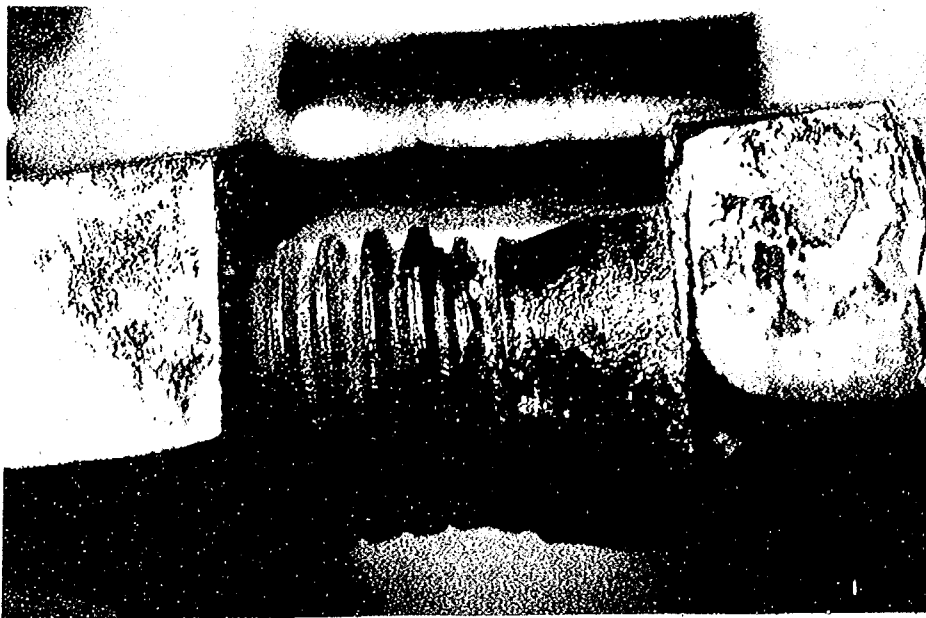


(3) B 3 位置

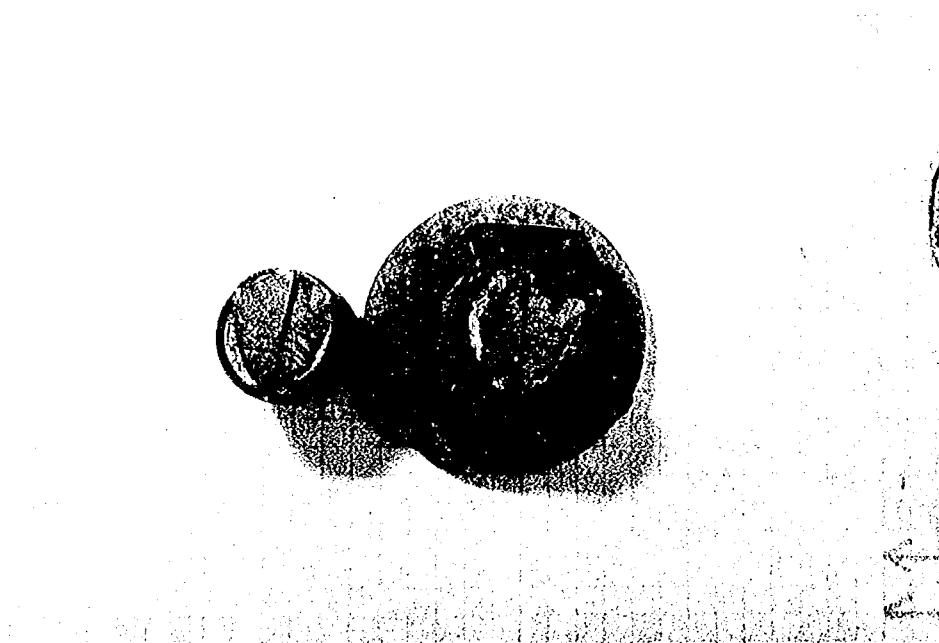


(4) B 4 位置

写真－2. 51 ボルトの破断面の拡大写真（撮影位置は図－2. 12に対応）



(a) 破断前



(b) 強制破断面

写真-2. 52 亀裂のあるP 5 G 2のボルト3

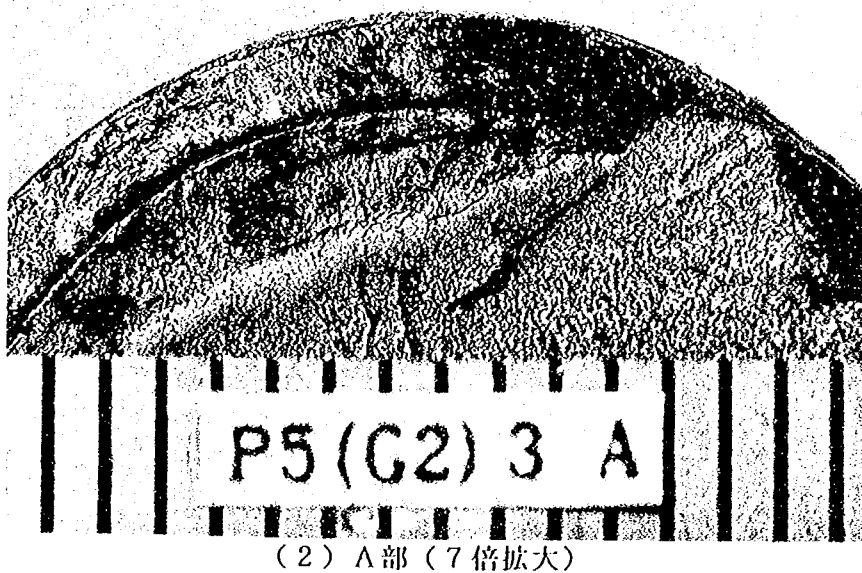
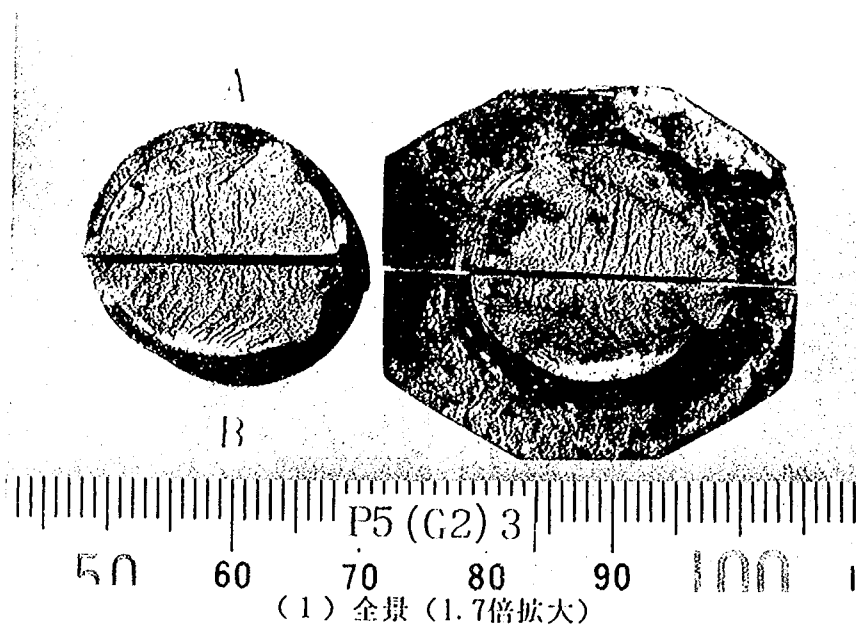
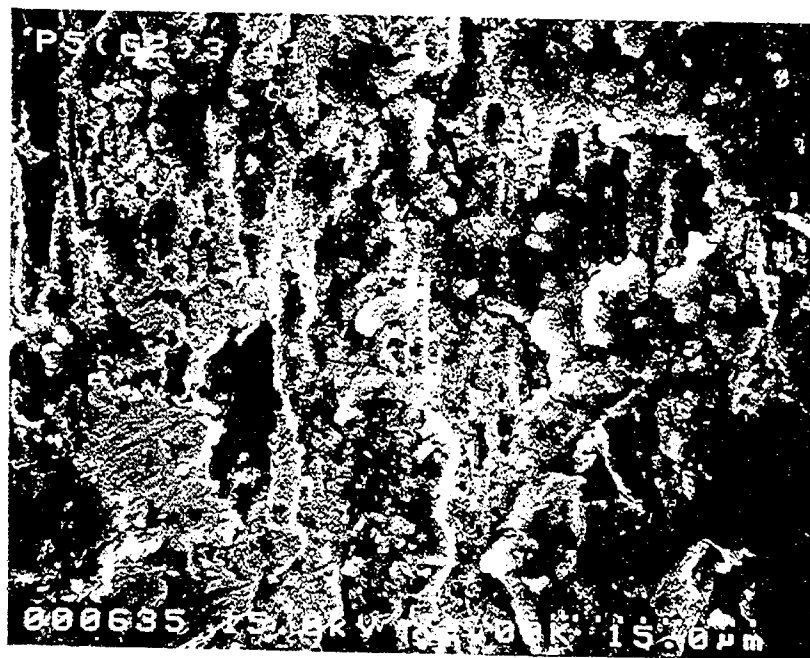
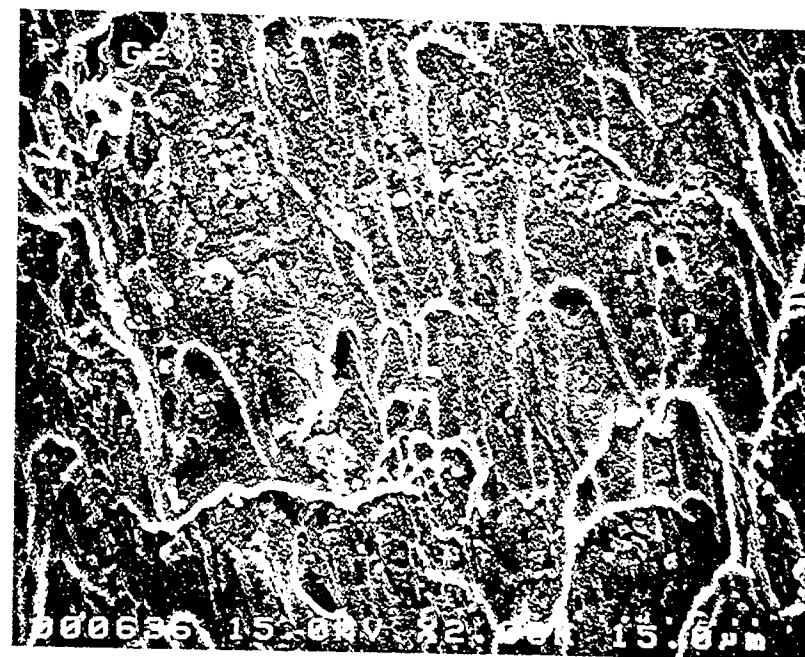


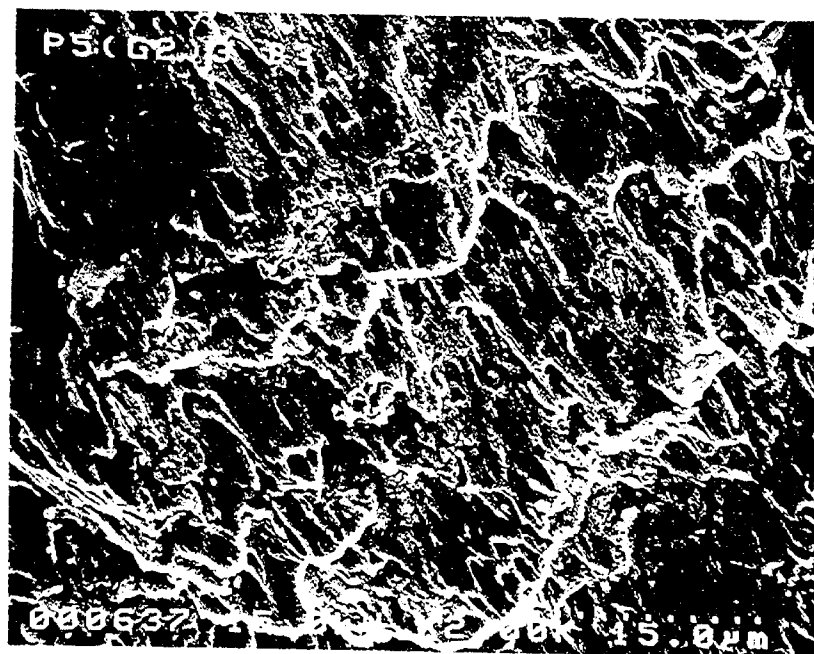
写真- 2. 53 ボルトの破断面の拡大図



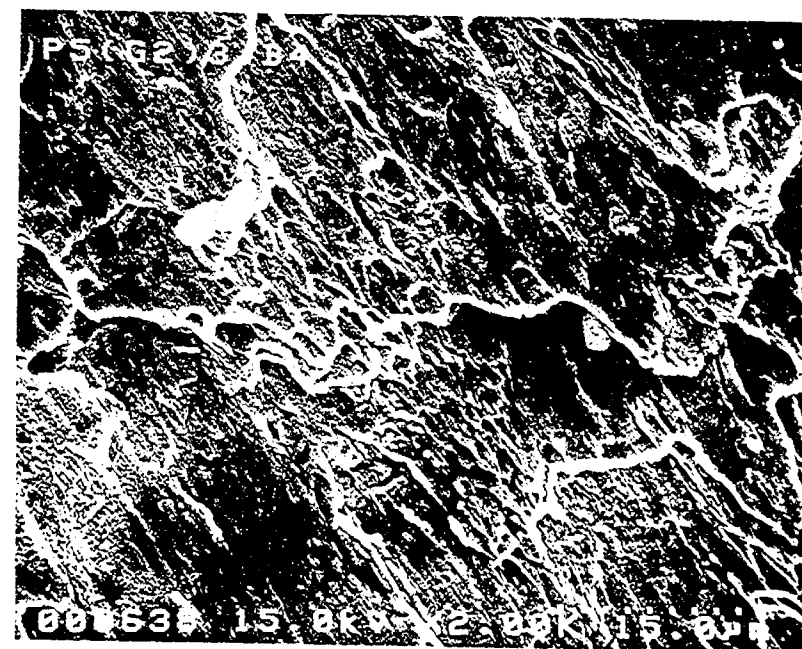
(1) A 1 位置



(2) A 2 位置

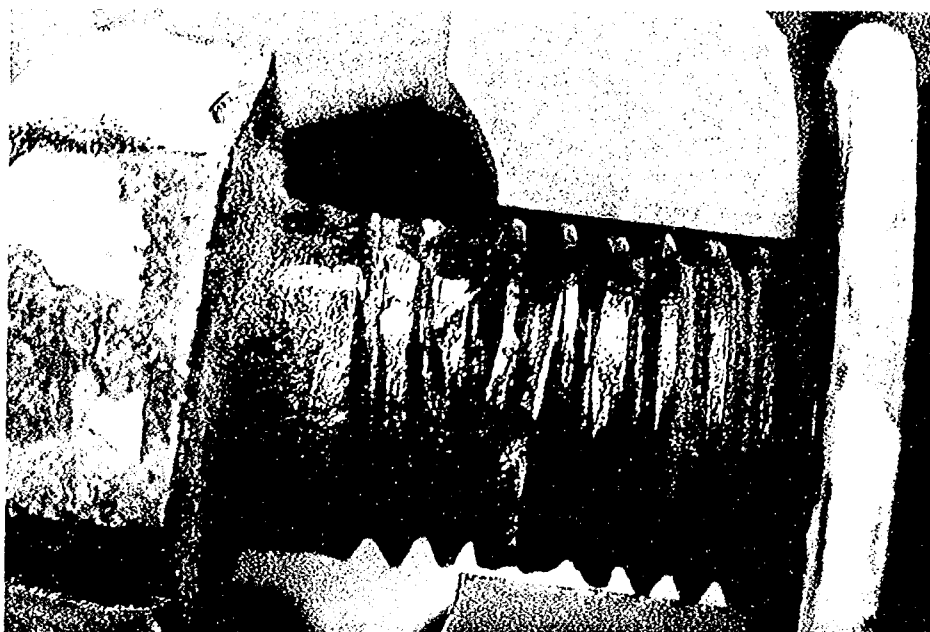


(3) B 3 位置

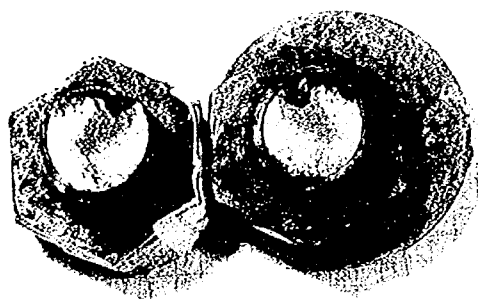


(4) B 4 位置

写真-2. 54 ボルトの破断面の拡大写真 (撮影位置は図-2. 13に対応)



(a) 破断前



(b) 強制破断面

写真-2. 55 亀裂のあるP 5 G 2のボルト5

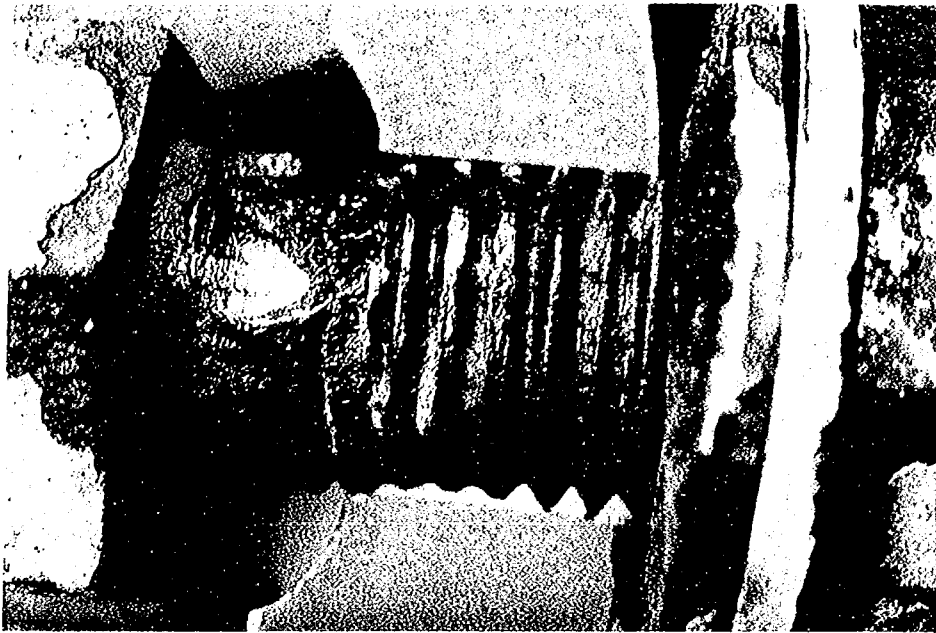


写真- 2. 56 亀裂のある P 5 G 2 のボルト 7

3. ボルトの載荷実験

3. 1 実験目的

2章に示したようにボルトの損傷状況の調査によれば、桁間連結装置のボルトは、活荷重による疲労、地震によるせん断、またはこれらの組合せにより破壊したものと推定される。通常の鋼材については、表-2. 1に示したように疲労破壊と単純破壊ではその破面に特徴があることが明らかとなっている。すなわち、疲労破壊では、繰返し載荷により順次亀裂が進展して最終的に破壊するため、破面には年輪のような性状が認められる。一方、単純に引張、せん断等で破壊した場合にはその破面には年輪はなく、金属が引張られたような性状を示す。

ボルトの破断が活荷重等による疲労破壊であれば繰返し荷重が作用しており、一方、地震時には何回かの繰返しは作用しているものの、その回数が少ないことから、これらの両者には破壊面の違いが認められることが予想される。

このため、桁間連結装置の状況を再現してボルトの載荷実験を行い、その破壊特性を検討した。

3. 2 実験方法

桁間連結装置が実際に橋に取り付けられていた状況を再現したボルトのせん断試験を行った。図-3. 1は試験体を示したものである。初音橋の桁間連結装置では、ボルト7本を有する鋼製プレートであったが、ボルトの破断性状を見ることが目的であるため、ここではボルト1本のみを対象とした。鋼製プレートは、初音橋に設けられていたものと同様に厚さ9mm、SS400材とした。試験ボルトは、中間部に設置し、プレートに空けた孔の径は同じ23.5mmとした。

試験状況を写真-3. 1及び写真-3. 2に示す。試験としては、静的試験と疲労試験を行った。静的せん断試験には静的能力200tfのアムスラー試験機を、せん断疲労試験には動的能力120tfの油圧サーボ制御方式の試験機を用いた。ボルトの破面の相違を調べるために、一方向に静的破断させたボルトと繰返し疲労破断させたボルト1体ずつを走査形電子顕微鏡による破面観測を行った。

3. 3 実験ケース

実験には、初音橋で実際に用いられていたボルトのうち、未破断のボルトを用いた。試験に用いたボルトの位置は図-2. 14に示した通りである。実験は、静的試験を22ケース、疲労試験を5ケース行った。また、破断時のねじ山のつぶれ方等を調べるために新しいボルトの破断試験を2ケース行った。

3. 4 実験結果

3. 4. 1 静的せん断試験結果

静的せん断試験の結果を表-3. 1に示す。最大せん断応力としては、ボルトの有効断面積 3.26cm^2 (有効径 20.376mm) で最大荷重を割った値である。最大せん断応力の平均値と標準偏差は次式のように表される。

$$\tau = 3,177 \pm 365 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.1)$$

これによれば、実際に使われていたボルトの強度のばらつきはかなり大きい。既に数年使用され、磨耗等を受けているが、設計上の許容せん断応力度は $1,200\text{kgf/cm}^2$ (地震時) であり、いずれも所要の強度は有している。ただ、破断応力度のばらつきは、腐食や磨耗の程度の違いによるものと考えられる。

試験後のボルトの破断状況の写真を写真-3. 3~写真-3. 12に示す。写真上の上下方向が荷重の作用方向である。ボルトの破断破断面はフラットであり、初音橋で破断したボルトとほとんど同じ破断面を有している。

写真-3. 13は、新しいボルトの破断試験を行った結果を示したものである。これによれば、一方向に力が作用して破断する場合には、当然ではあるがプレートと接触する部分のねじ山が互い違いにつぶれて、その面においてせん断破壊している点が特徴として挙げられる。

3. 4. 2 疲労試験結果

試験後のボルトの破断状態を写真-3. 14に示す。図では、上下方向が荷重方向である。ボルトの破断状態としては、破断面がフラットであり、外観上は静的試験の結果との区別は困難である。

表-3. 2は、荷重制御方式で行った疲労試験の結果を示したものである。図-3. 2は、試験結果をSN線で表したものである。最小二乗法により求めた平均寿命曲線は次式の通りとなる。

$$\tau_r = 2,917 N^{-0.0257} \quad (3.2)$$

静的試験結果を $N=1/4$ として、この式に代入すると次の値が得られる。この値は、静的試験結果とよく一致する。

$$\tau_r = 3,023 \text{ kgf/cm}^2 \quad (3.3)$$

図-3. 2によれば、寿命曲線の勾配が非常にゆるい。これは、このような降伏領域では同じ材料でも少し荷重の違いで歪みが大きく異なることを示している。すなわち、違う材料では同じ荷重でも材料強度のばらつきによって歪みが大きく違うことを表している。

3. 4. 3 顕微鏡による破面調査結果

写真－3. 15及び写真－3. 16に、静的破壊させたP 1 G 2のボルト2の顕微鏡による破面写真を示す。写真－3. 17及び写真－3. 18に、227サイクルで疲労破壊したP 2 G 2のボルト13の顕微鏡による破面写真を示す。

両方とも、延性破壊を特徴づけているディンプルパターンを呈している。しかし、静的破壊と疲労破壊で破面様相に差はない。静的破壊させたものは、純せん断に近く、破面に対してほとんど平行な伸長形ディンプルである。一方、疲労で破壊させたものは、破面に対してやや角度をもった伸長形ディンプルである。この違いは、ボルトに加わった荷重状態が、純せん断に近いのか、垂直応力が付加されているかの違いで、静的破壊と疲労破壊の違いではないものと推定される。したがって、本顕微鏡写真からは静的破壊と疲労破壊の破面の違いは特定できなかった。

表-3. 1 一方向静的載荷実験結果

桁間連結装置 の 番 号	ボルト 番 号	最大荷重 P (tf)	最大せん断力 τ (kgf/cm ²)
P1G1	1	9.35	2,868
	2	9.40	2,883
	3	12.73	3,903
	4	8.90	2,730
	5	9.85	3,021
	6	9.98	3,060
	7	9.80	3,006
P1G2	1	10.70	3,282
	2	9.90	3,037
	7	12.70	3,896
P1G3	3	10.40	3,190
P2G2	12	8.30	2,546
P3G1	13	10.65	3,267
P3G2	9	12.70	3,896
P3G3	3	9.80	3,006
	6	10.80	3,313
P5G1	10	11.30	3,446
P5G2	5	8.90	2,730
	7	10.45	3,206
P5G3	12	10.10	3,098
	13	10.50	3,221
	14	10.65	3,267
最大せん断力の平均値±標準偏差			3,117±365

表-3. 2 疲労試験結果

桁間連結装置 の 番 号	ボルト 番 号	荷 重 P (tf)	せん断応力 τ (kgf/cm ²)	せん断応力度範囲 $\tau \gamma$ (kgf/cm ²)	破断回数
P2G2	13	0.25 ~ 8.76	76.7 ~ 2,687	2,610	227
P3G3	1	0.21 ~ 8.04	64.4 ~ 2,466	2,402	15,309
	5	0.30 ~ 8.32	92.0 ~ 2,552	2,460	462
	7	0.24 ~ 7.25	73.6 ~ 2,224	2,150	2,260
P5G1	8	0.02 ~ 7.24	6.13 ~ 2,221	2,215	54,963

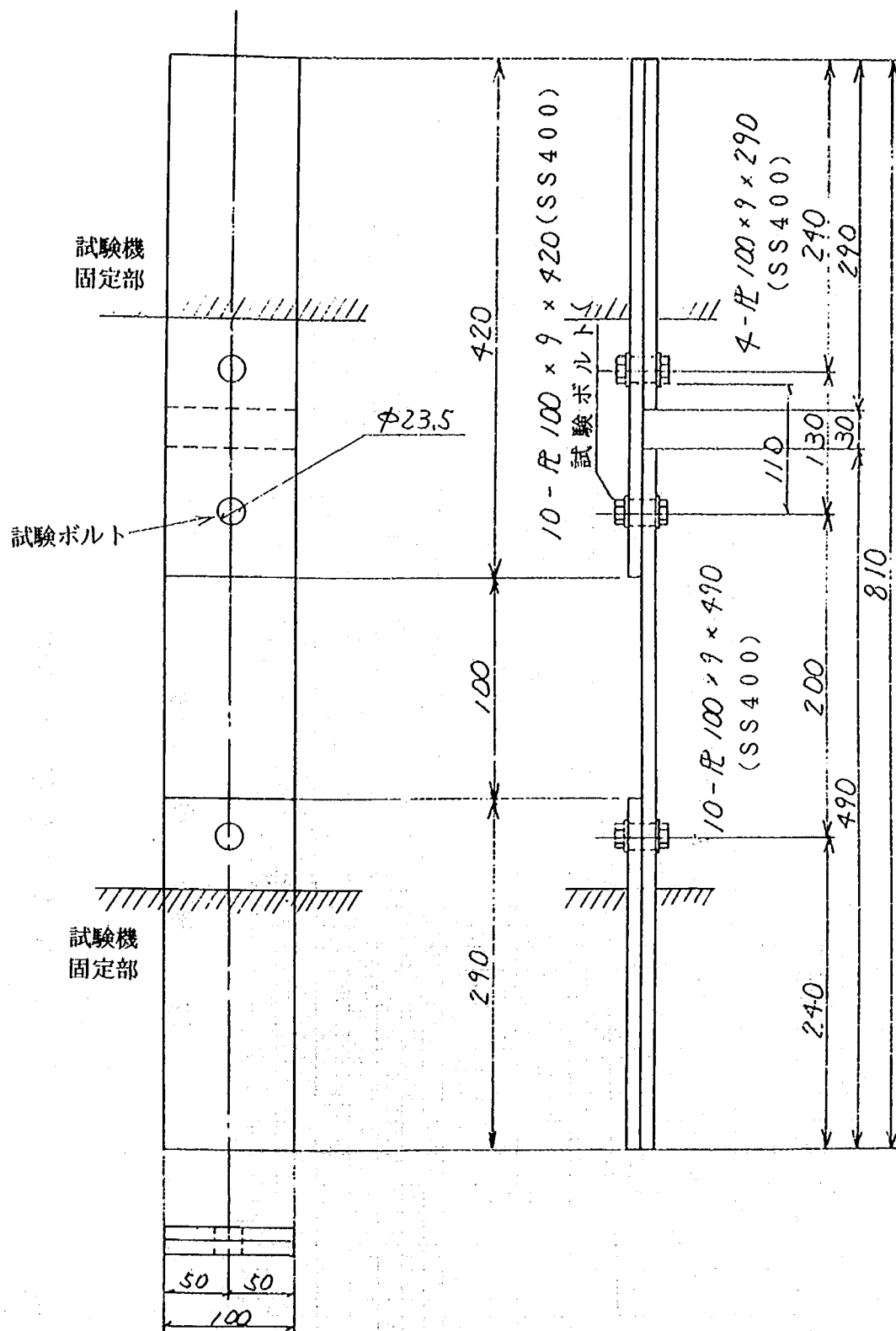


図-3.1 試験方法及び試験用プレート

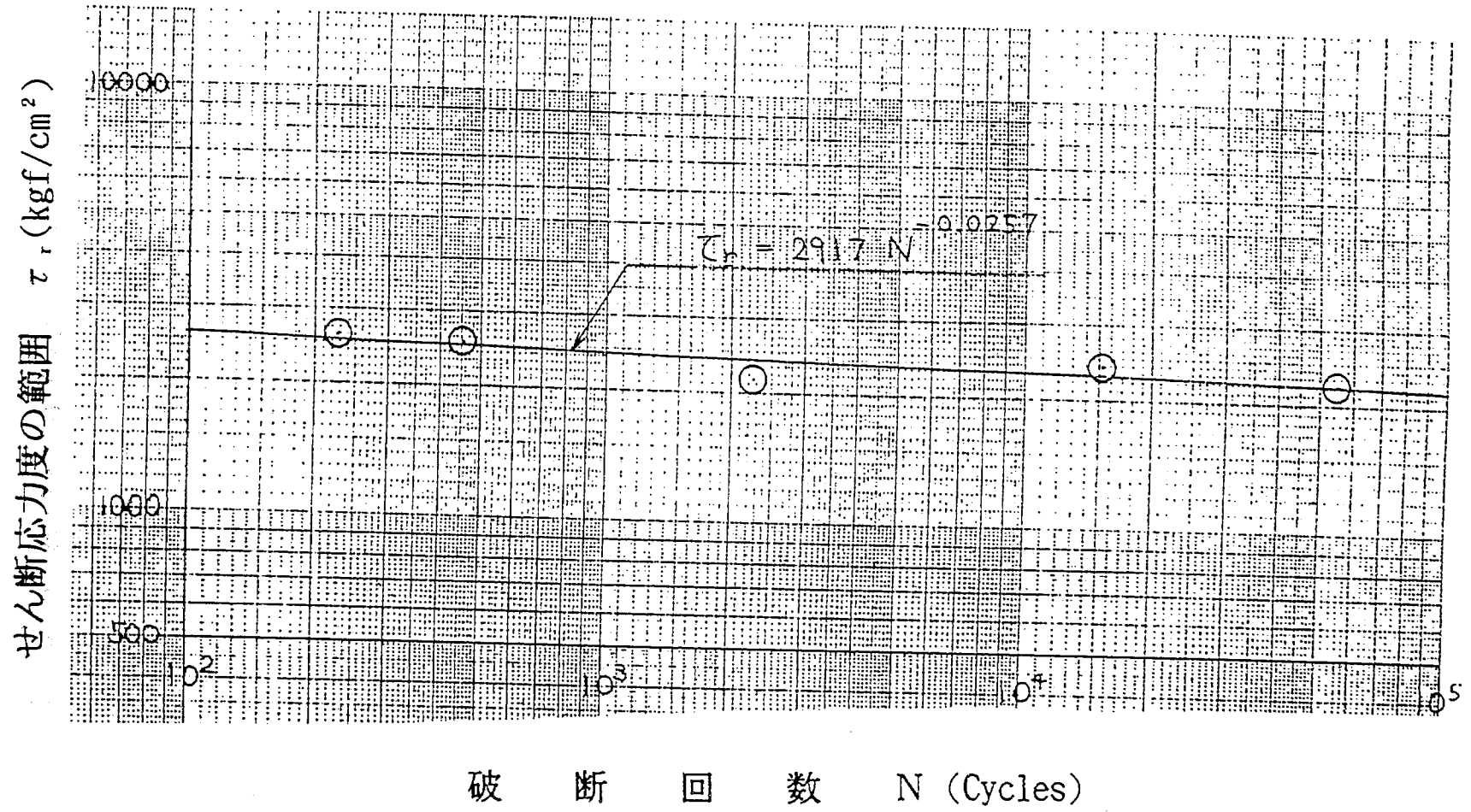
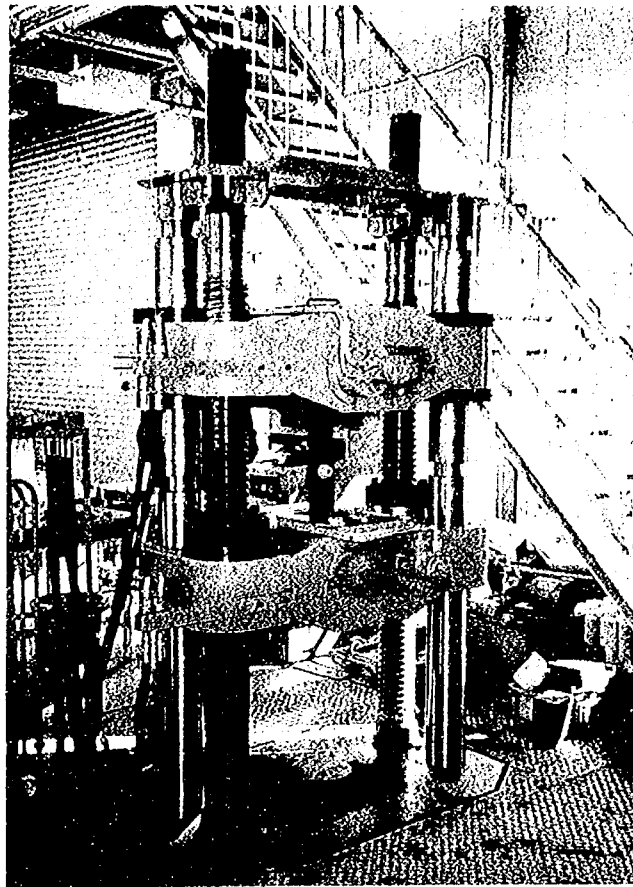


図-3.2 疲労試験によるSN線



写真－ 3. 1 試験装置（200tfアムスラー試験機）



写真－ 3. 2 試験ボルトの設置状況

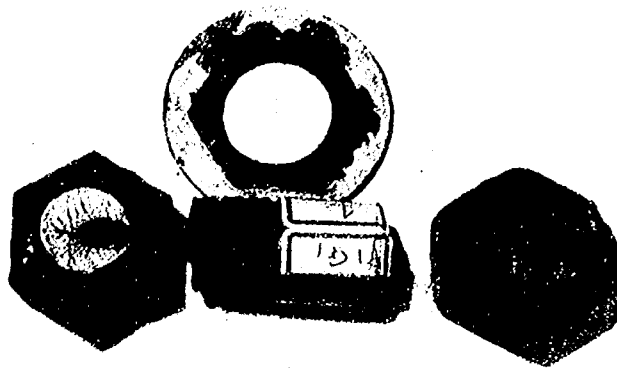


写真-3. 3 P1G1ボルト(1)の破断状況



P₁ G-2

写真-3. 4 P1G2ボルト(1)の破断状況



2 2 4
P₁ G-3

写真-3. 5 P1G3ボルト(3)の破断状況

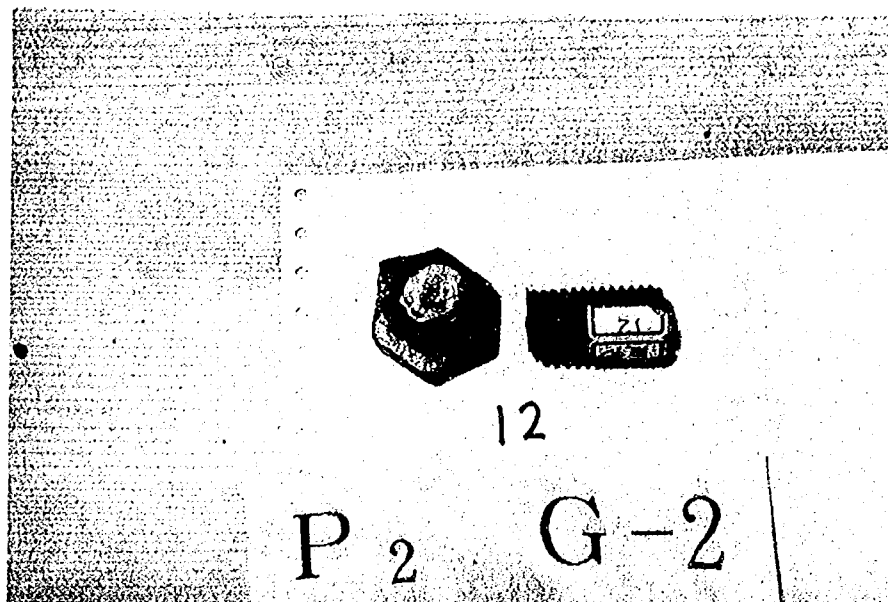


写真-3. 6 P2G2ボルト(12)の破断状況

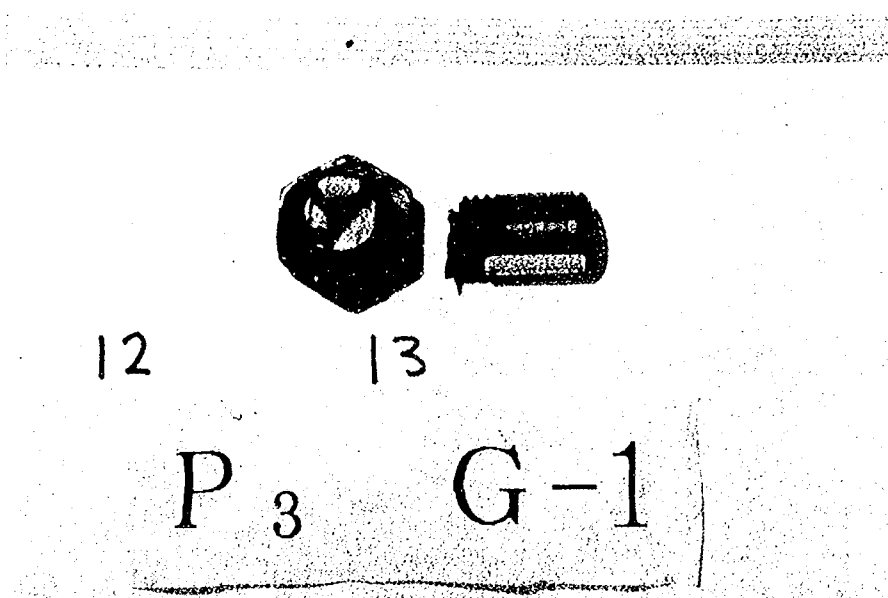


写真-3. 7 P3G1ボルト(13)の破断状況

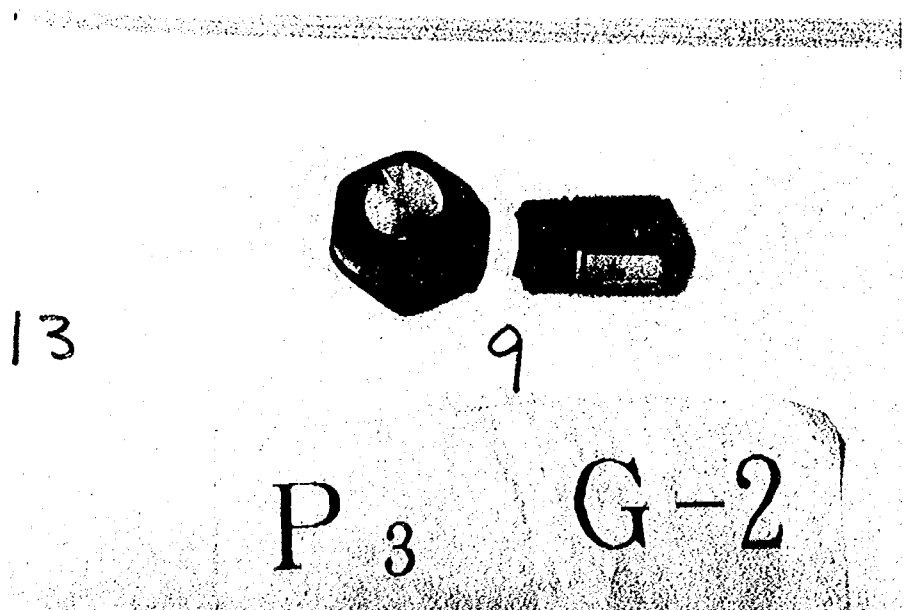
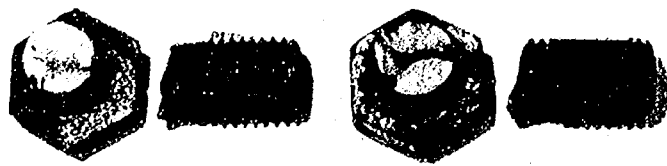


写真-3. 8 P3G2ボルト(9)の破断状況



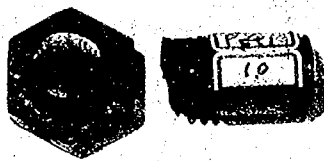
3

6

P₃

G-3

写真-3. 9 P 3 G 3 ボルト (3, 6) の破断状況

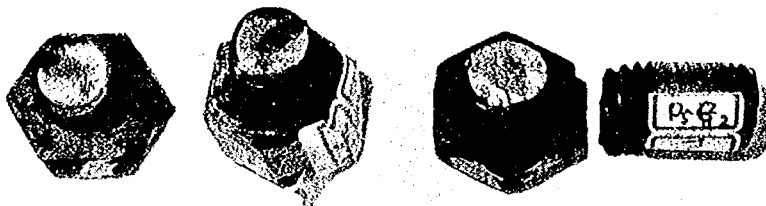


10

P₅

G-1

写真-3. 10 P 5 G 1 ボルト (10) の破断状況



5

7

P₅

G-2

写真-3. 11 P 5 G 2 ボルト (5, 7) の破断状況



12

13

P₅ G-3

写真-3. 12 P5 G3 ボルト (12, 13) の破断状況

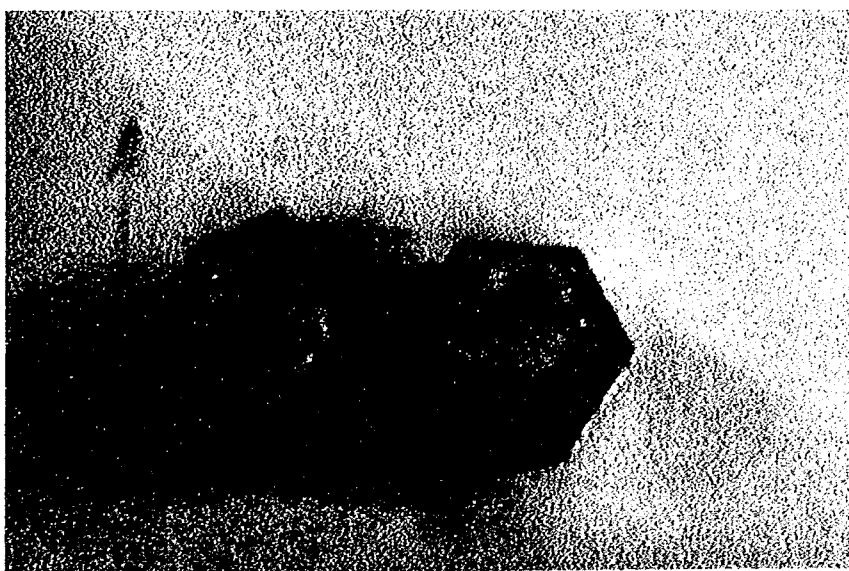
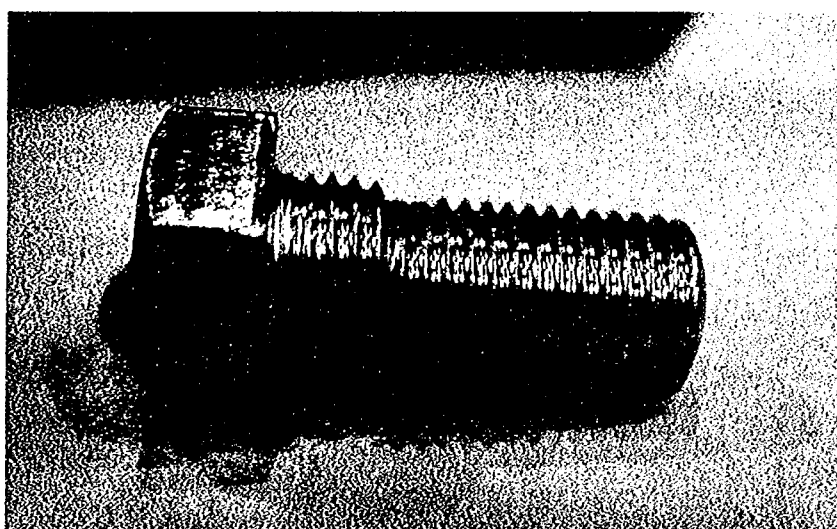
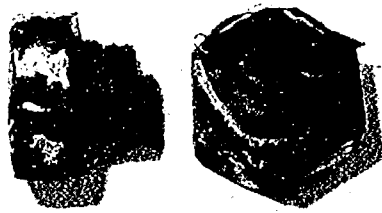


写真-3. 13 新しいボルトの単純せん断による破断性状



P₃G₃-7

写真- 3. 14 疲労破断させたボルトの破断性状 (P 3 G 3 のボルト 7)

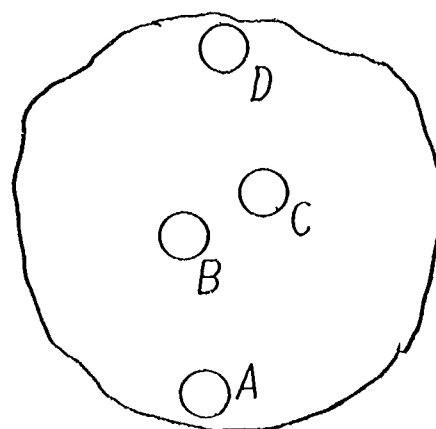


写真- 3. 15 静的に破壊させた P 1 G 2 のボルト 2

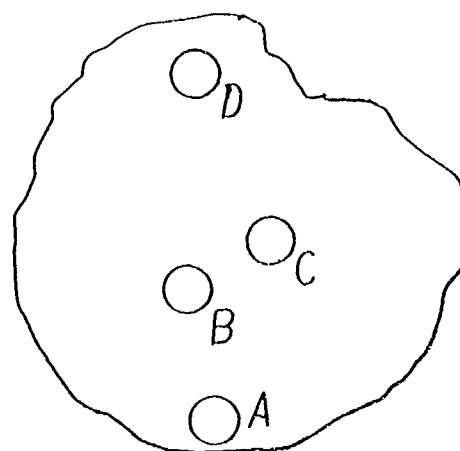
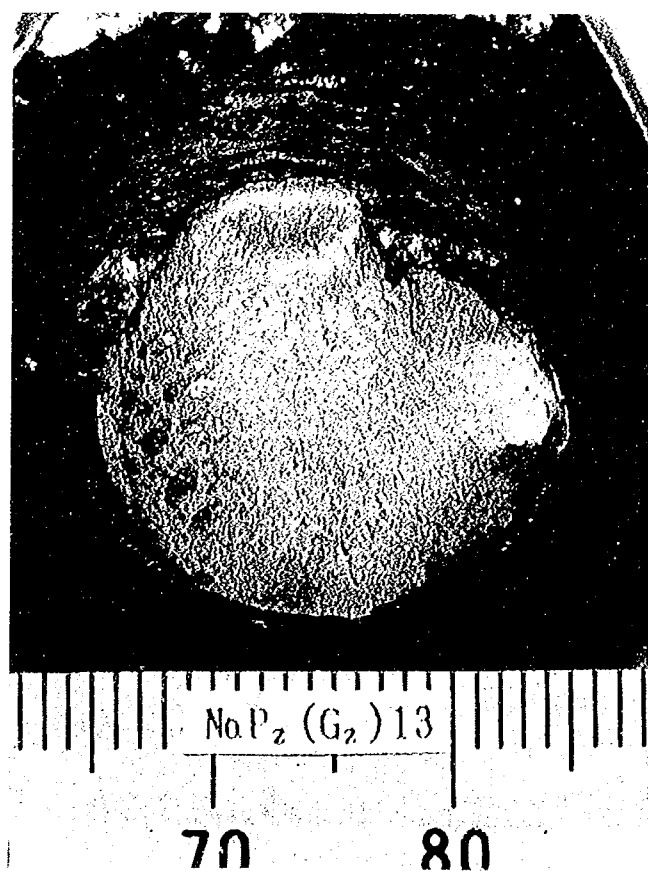
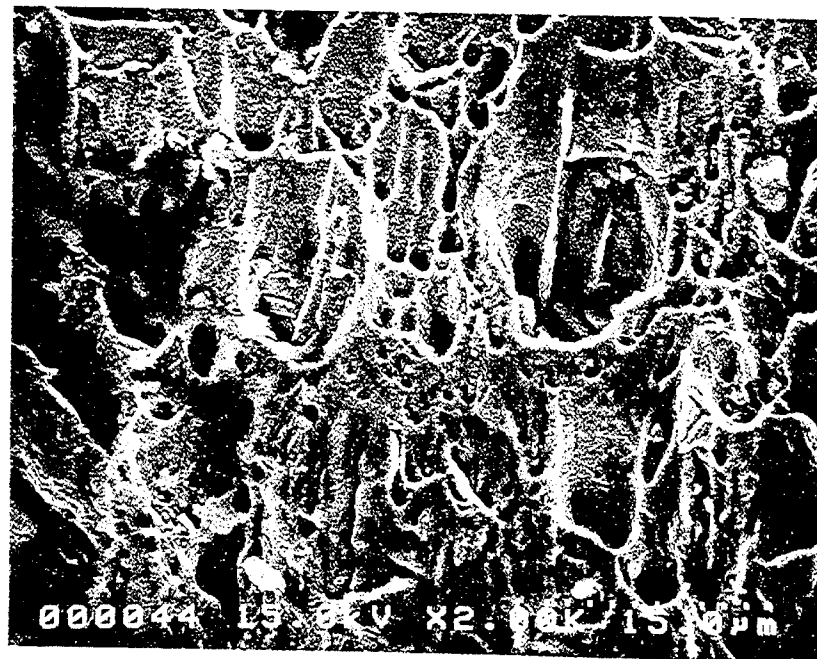
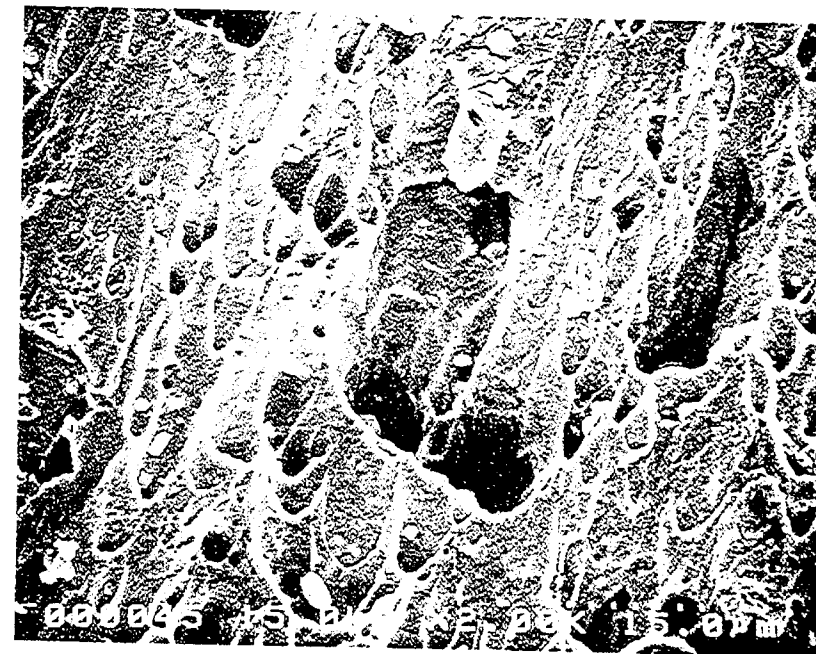


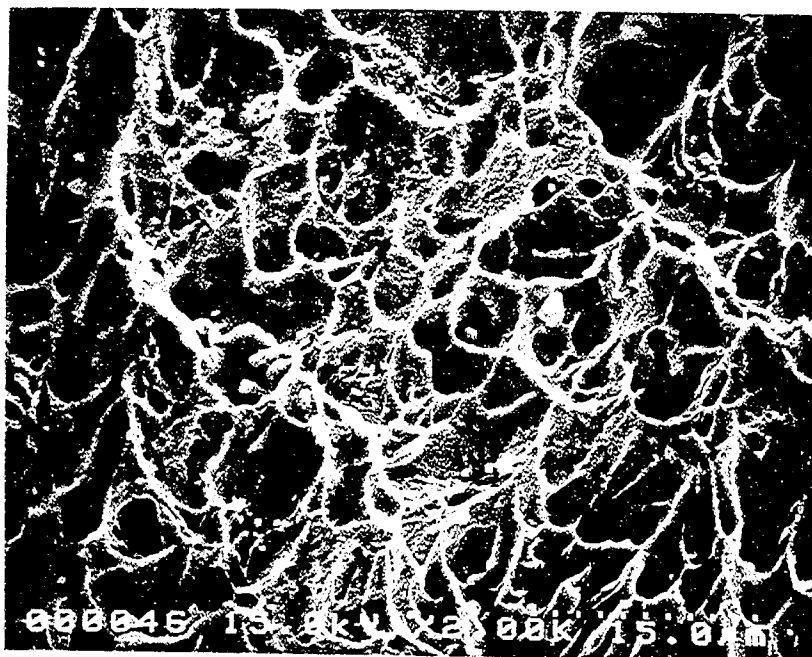
写真- 3. 17 疲労破壊させた P 2 G 2 のボルト 1 3



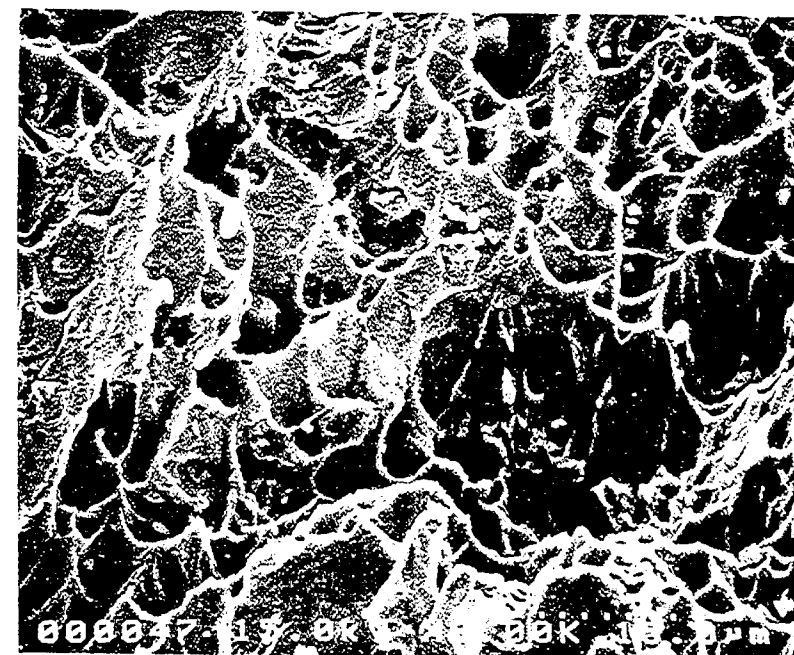
(1) A位置



(2) B位置

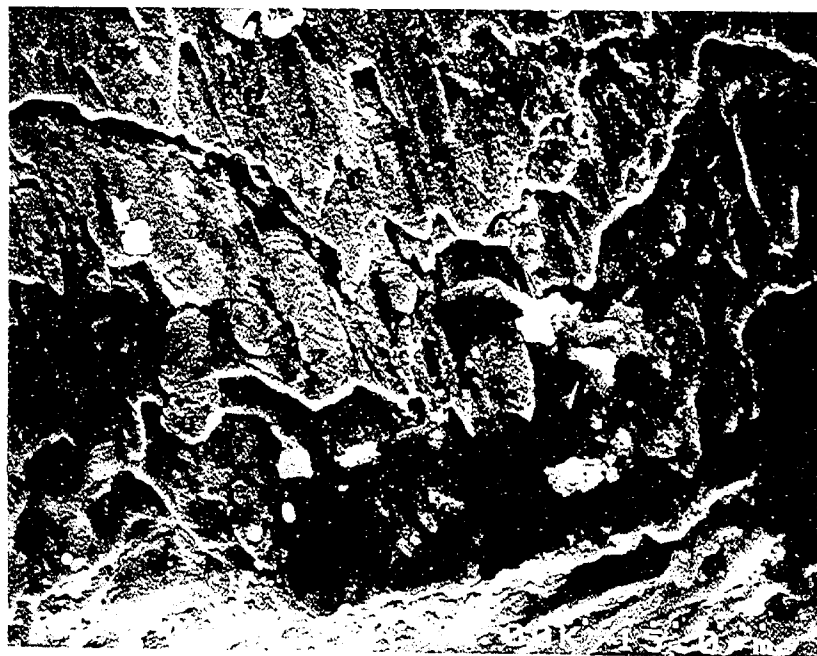


(3) C位置

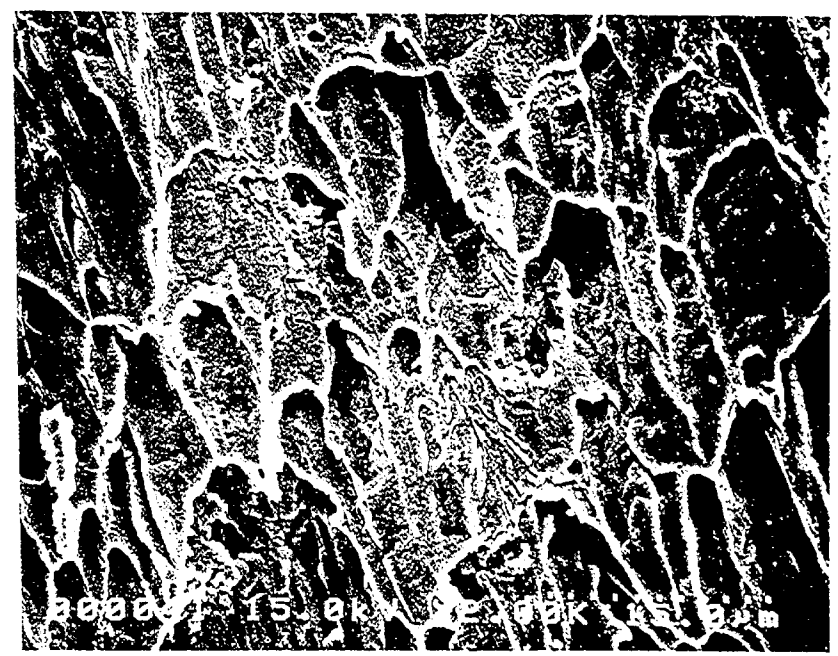


(4) D位置

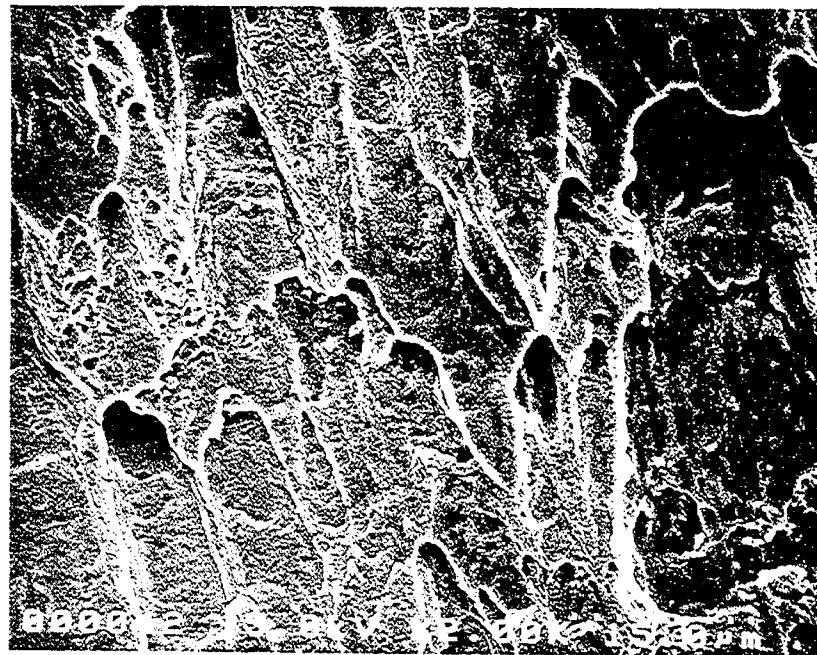
写真-3.16 静的に破壊させたP1G2のボルト2の頭微鏡写真



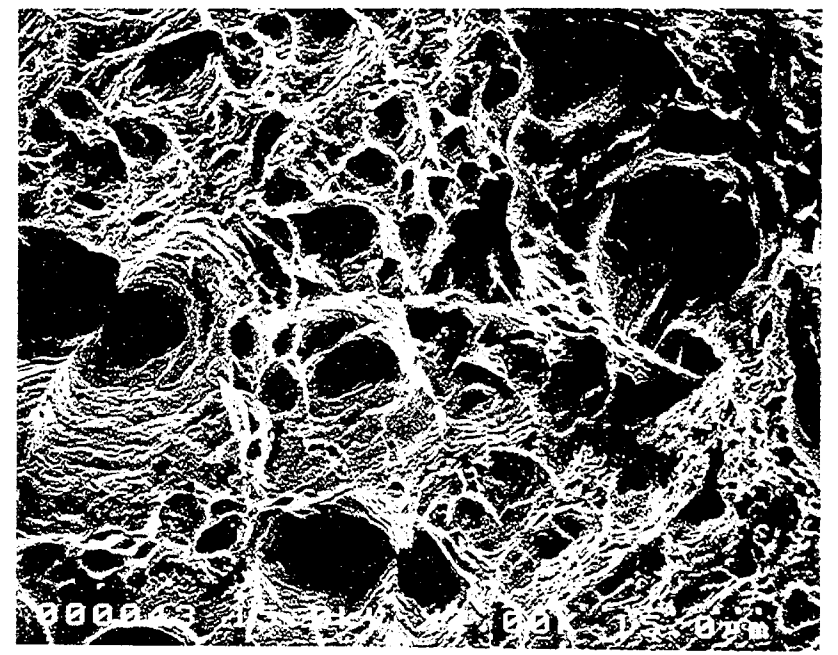
(1) A位置



(2) B位置



(3) C位置



(4) D位置

写真-3. 18 疲労破壊させたP2G2のボルト13の顕微鏡写真

4. 結論

平成5年釧路沖地震により初音橋で生じた桁間連結装置のボルトの破断の原因に関して検討した。本検討結果をまとめると以下になる。

- 1) 地震により隣接する主桁間に生じたと考えられる相対移動量とボルトの破断が生じた位置の間には明確な関係は認められなかった。
- 2) 塗装の状況から見ると、P1G1の8～14、P1G3のボルト8、9、P3G1のボルト1～7は地震の時にはボルトは設置されていなかった。ただし、連結板には以前ボルトがついていた形跡が明確にあること、また、連結板の周辺に破断したボルトが散在していたことを考慮すると、地震以前に何らかの理由により破断した。
また、P3G1のボルト14及びP3G3のボルト8の2本については、連結板設置当初から一切付けられた形跡がなかった。この原因は明らかではないが、固定ボルトの孔がどうしても合わない等の理由により設置されなかったものと推定される。
- 3) 平成3年度～平成4年度に行われた床版打ち換え工事の際の工事写真によれば、P1G3、P3G3（ボルト8を除く）、P5G3は、ボルトが全て固定されており、破断していない。ただし、P1G3のボルト8、9は、上記1)のように地震後の調査では塗装面が新しく、地震時にはボルトはついていなかったが、床版打ち換え工事の時にはついていたという矛盾が生じる。かつ、散在していたボルトは破断している。この原因はよくわからない。
- 4) P3橋脚上の桁間連結装置に関しては、いずれもボルトの位置がウェブの孔位置と一致しなかったため、長孔の横に丸孔をガス加工であけたため、両者ともにほぼ固定状態であった。
- 5) ボルトが破断しているのが、丸孔側か長孔側かを比較してみると、P5橋脚のG1及びG3を除いて丸孔側すなわち固定側となっている。地震により桁間連結装置に引張方向あるいは圧縮方向の力が作用して破断したのであれば、どちらもほぼ同じ条件であると考えられる。ここで、丸孔の方が破断が多いのは移動が拘束されるため、活荷重等による振動による原因が考えられる。
- 6) 破断したボルトの破断面はほぼフラットな破断面を呈している。いずれも腐食が著しい。また、いずれのボルトもほぼ全周にわたりねじ山がつぶれており、地震による繰返しというよりも長期にわたる繰返し荷重による磨耗を受けていた可能性が高い。ただし、いくつかのボルトでは一方向の力により生じるボルト側面のへこみ、連結板の厚板部の痕跡が明確に認められ、一方向の作用力に作用したものもある。
- 7) 連結板に残されていた痕跡は、連結板の引張方向に力が作用したことを示すものが多く、圧縮方向は少ない。また、痕跡は圧縮方向よりも引張方向の方が深く、引張方向の荷重が大きかったと考えられる。
- 8) 地震直後に採取したボルトは、その破断面がまだ新鮮で腐食しておらず、別の理由により破断寸前であった可能性はあるが、これは地震により破断したと考えるのが妥当と考えられる。このボルトの破断面の顕微鏡写真によれば、破面の性状が一方向のせん断状況を示しており、地震により一方向に破断したものと推定される。

- 9) 亀裂が生じていたボルトを見ると、P 5 G 2 のボルト 3 を除いて亀裂が水平方向ではなく、主にボルトの上下面にあること、その上下の位置に磨耗と思われる凹凸があることが明らかになった。このため、この亀裂は水平方向の力ではなく、常時の活荷重等による上下方向の繰返し荷重による疲労亀裂と思われる。なお、P 5 G 2 のボルト 3 では、亀裂が左右であること、あまり腐食していないことから、地震時に生じた亀裂の可能性も考えられるが明らかではない。
- 10) 一方向載荷実験と疲労載荷実験による破断ボルトの破断面を調査した結果、両方とも、延性破壊を特徴づけているディンプルパターンを呈している。ただし、静的破壊と疲労破壊では破面の様相に差はなく、本顕微鏡写真からは静的破壊と疲労破壊の破面の違いは特定できなかった。
- 11) 以上の状況証拠から、桁間連結装置のボルトの破断原因を推定すると、大型車の交通量が比較的多いこと、釧路沖地震の時には設置されていなかったボルトの中に破断していたものがあること、ボルトの腐食が著しいこと、亀裂の発生が水平ではなく上下方向に生じているものがあること、引張方向のみが多いという連結板への痕跡等の理由から、常時の活荷重等により疲労損傷を受けており、ほとんどはこれにより疲労破断したものと推定される。さらに、地震直後には破断面が新鮮なものも数本発見されており、一部は地震により破断したものと考えられる。
- 12) 初音橋では、現場の状況から遊間の小さい状態で桁間連結装置が設置されていたため、常時の活荷重による振動により固定ボルトが疲労損傷を受けたことが予想される。このため、桁間連結装置については、地震時に有効に機能するようにするために、常時の活荷重等による変形の影響を受けないようにすることが必要とされる。

謝 辞

地震直後の現地調査およびその後の資料提供等に関し、北海道庁、北海道庁釧路土木現業所の御関係の皆様にも全面的な協力をいただいた。特に、初音橋のボルトの損傷写真の撮影、ボルトの試験体の提供、桁移動量の測定結果等、貴重な資料を提供いただいた。ここに記して厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所：平成5年（1993年）釧路沖地震災害調査報告、土木研究所報告第193号、平成6年1月
- 2) 川島一彦、運上茂樹、杉田秀樹、中島燈：釧路沖地震による道路橋の被害とその特徴、橋梁と基礎、Vol. 27、No. 6、1993年6月
- 3) 川島一彦、運上茂樹、中島燈、星隈順一：最近の地震による道路橋被害の特徴、基礎工、Vol. 21、No. 12、1993年12月
- 4) 建設省道路局、建設省土木研究所、北海道開発局：静内橋震災害調査報告書、1982年12月
- 5) 浅沼秀弥：静内橋地震災害調査、土木技術資料、Vol. 25、No. 11、1983年11月
- 6) 建設省土木研究所：1978年宮城県沖地震災害調査報告、土木研究所報告第159号、1983年3月
- 7) 川島一彦、運上茂樹、飯田寛之：鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋段落し部の耐震性判定法、第45回建設省技術研究会報告（平成3年度）、1991年10月
- 8) 日本道路協会：道路震災対策便覧－震災復旧編－、1988年2月
- 9) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針、昭和47年1月
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、昭和55年5月
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、平成2年2月
- 12) 吉田亨：金属破断面の見方、日刊工業新聞社
- 13) 日本鋼構造協会：高力ボルトの遅れ破壊、－暴露試験最終報告－、J S S C、Vol. 15、No. 158、1979年3月
- 14) 山木崇志：高力ボルトの遅れ破壊、橋梁と基礎、Vol. 4、No. 10、1970年10月

ボルトの破断特性に関する実験的研究 I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3296号

平成6年11月 (1994)

川島 一彦 大塚 久哲
運上 茂樹 向 秀毅

要 旨

平成5年1月15日の釧路沖地震(M=7.8)は、釧路市周辺を中心とする北海道南東部地域に大きな影響を及ぼした。道路橋に関しては、軽微な被害を含めると合計63橋に何らかの被害を及ぼした。この中の一般道道本流音別停車場線の初音橋では、落橋を防止するために設けられていた隣接する主桁ウェブ間を凍結する桁間連結装置の固定ボルトが破断するという損傷を受けた。

本資料は、初音橋の桁間連結装置の損傷原因を検討するために、損傷を受けた桁間連結装置の損傷特性を調査するとともに、ボルトの載荷実験を行い、その破断特性及び損傷特性を検討した結果をまとめたものである。

キーワード：釧路沖地震、道路橋、地震被害、初音橋、落橋防止装置、桁間連結装置、ボルト

郵便はがき

切手を
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部・耐震研究室行

No. 003

No. 003

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3296号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印