<講演>

平成の築城 ―石垣の復元―

Construction of the Kanazawa castle in the Heisei

– Restoration of stone masonry wall –

池本敏和

金沢大学工学部土木建設工学科*

Toshikazu Ikemoto Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University

1 はじめに

平成6年,石川県は金沢城址を都市公園として整備することを決めた.戦中は陸軍第9師団が,戦後は金沢大学がキャンパスとして使用し,十分な手入れがなされていなかったため,石垣等はかなり傷んでいる状態にあった.加賀100万石の偉功を後世に残すためにも,県は本格的な伝統的木造城郭を築造するとともに,昔ながらの石積みによる復元工事を開始した.一般に石積みの構造は複雑であり,石同士の力の伝播を力学的に解明することは難しい.そこで,古来から伝承されてきた石積みの経験的技術の有効性を検証するために,石垣の耐震調査を行うとともに,城郭の一部の復元に伴う建物の常時微動及び振動観測を行った.

2 金沢城 1)-3)

2.1 沿革

金沢城の沿革を Tab.1 に示す.

天文 15 年 (1546) に創建された金沢御堂は,地元の大坊主衆や本願寺の坊官たちが取り仕切っていた.この金沢御堂を制圧し入城したのが佐久間盛政である.佐久間は天正 $8\sim11$ 年 $(1580\sim83)$ の間在城し,尾山八町(初期の城下町)の整備や百間堀の開削など,後の基礎を築いた.佐久間の後,前田利家が能登から金沢城へ入城した.利家は豊臣秀吉の重臣として京・大坂にいることが多く,

Tab.1 金沢城の沿革

	10011 <u> </u>
1546	尾山御坊建立
1580	佐久間盛政入城(尾山城)
1583	前田利家入城(金沢城)
1592	大修築 (百間堀 , いもり堀 , 白鳥堀)
1602	落雷により天守,本丸焼失
	度重なる火災,焼失
1799	寛政地震 城石垣崩壊
1809	二の丸 , 橋爪門 , 五十間長屋完成
1858	安政地震 城石垣崩壊
	三十間長屋完成
1881	二の丸 , 橋爪門 , 五十間長屋焼失
	明治 5 陸軍省管轄
1950	金沢大学
2001	菱櫓,橋爪門続櫓,五十間長屋完成

慶長 4 年 (1599) に没するまで留守にしていることがほとんどであった.その後,宝暦や文化の火災,寛政や安政の地震を経て明治維新まで,利家から数えて 14 代の藩主が金沢城主となった.

金沢城といえば,石川門,菱櫓,五十間長屋,橋爪門 続櫓が代表的である.石川門は別名「白門」といい,美 しい白が基調である.門は本来「黒」であったが,敵の攻 撃に備え,短期間に完成させる必要があり,漆喰を塗っ て壁を乾かす時間はなかったが,戦乱の世が終わって余 裕が生まれ,美しい白壁が権力の象徴となったのである. また代表的な枡形門として有名な石川門は,一の門をく ぐると右折して二の門がある.築城初期(1596)の頃は本 丸の方向(左折)に二の門があった.攻め込んできた敵 が左折した方が迎え打ちやすいという利点を考慮したも のである.兵士に右利きが多いことを考えれば,左折さ せることで敵が正面に向けて鉄砲や矢を放ちにくくなる.

^{*〒 920-8667} 石川県金沢市小立野 2-40-20 TEL:076-234-4656 FAX:076-234-4644 E-mail:tikemoto@t.kanazawa-u.ac.jp

その後,右折りにしたのは侵入者を本丸から遠ざける狙いや,敵の迎撃を意識しなくなったからであろう.現在の石川門は1759年に焼失したものを再建したものである.

石川門の石垣は,正面を加工して積んだ「切り込み八ギ」なのに対して,左の石川門菱櫓は粗く加工しただけの石を積んだ「打ち込み八ギ」である.江戸の後期に石川門の改修に携わった石垣の技術者「穴太(アノウ)」が積み方が違うことに疑問を抱いたという記録が残っている.石川門は裏門であり,金沢城の正面玄関は大手門である.大手門には巨石を用いた石垣が築かれている.この門は東北の方角に位置し,当時,東北は鬼門といわれていた.この方向を避けるのが日本建築では一般的であるが,関が原の戦いの直前に高山右近が建造を指揮したことを考えると納得がいく.キリシタン大名・右近にとっては,戦争の危機前に鬼門など意味を待たなかったと考えられている.

利家時代のものと見られる石垣は百間堀に面した丑虎櫓の下にある.ここは,自然石を積み上げた「野面積み」である.石垣で変わったものとしては二の丸北側の土橋門にある亀甲石が挙げられる.江戸後期に防火の願いを込めて作られたものだ.

2.2 平成の築城

平成6年(1994)都市公園として,総面積は28.5ha(東 京ドーム6倍の広さ),兼六園を一体として計画された. 建物は江戸時代後期を基に本格的木造軸組工法によって, 1809年明治初期に撮影された写真とほぼ一致するように 復元された、復元された建造物は菱櫓,五十間長屋,橋 爪門続櫓,橋爪一の門,鶴の丸土塀,内堀であり,平成 13年7月に完成した.延べ床面積1894.23平方mの復元 建物で、石川門や三十間長屋と同様、鉛瓦や海鼠塀が外 観の特徴である.明治以降に建てられた木造城郭建築物 としては全国最大規模で,大径木の事前調達や土台石垣 の解体,修築を含め,平成10年3月から実に3年4ヶ月 をかけて造られた.3層3階の菱櫓と橋爪門続櫓を2層 2階の五十間長屋でつないでいる.これらの建物は,戦 の際に二の丸を守るための施設で,石落しや鉄砲狭間と なる格子窓,白塗漆喰壁や海鼠壁で防火構造になってい る外壁がその強固さを示している.菱櫓は大手と搦手を 見張る物見櫓,橋爪門続櫓は二の丸大手の橋爪門枡形を 見張る物見櫓,五十間長屋は武器等の倉庫であった.

建物平面は菱形で,四隅の内角は 80 度と 100 度になっている $(\mathbf{Fig.1})$. 櫓内に立っている 4 本の長さ $14\mathrm{m}$,太さ $33\mathrm{cm}$ の桧の「通し柱」を始め,使われている 100 本

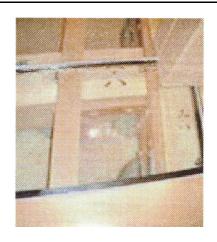


Fig.1 菱櫓の組み方

の柱も菱形で,これらを使っての建築には大変な技術を要する.このようにすることで,内部から外を見たときに視界が広くなる上,外からその建物を見たときは,実際よりも大きく見えると考えられている.

2.3 築城における伝統的技術

城郭建築は,基本的には木と土で造られている(Fig.2).



Fig.2 外観

木や土は雨・風にはそれほど強くはなく,城郭の外側は 木材の上には銅板や鉛板が,また土壁の上には漆喰や瓦 が張り付けられ,直接,雨風にさらされるところはない.

Fig.3 の壁内部は空洞にして小石が積めてある.このような塀を「太鼓塀」という.小石により鉄砲の弾が貫通することもなく,また塀に穴を開けられても上から小石が落ちて来てすぐに穴をふさぎ,防御に効果を発揮する.

壁に隠れているが、柱と柱の間には「貫(ヌキ)」という木が横に通してある(Fig.4)、柱に彫った溝の中と

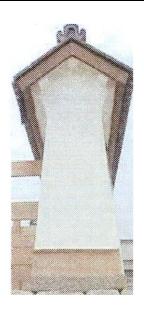


Fig.3 太鼓塀

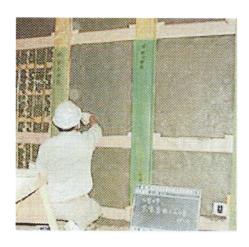


Fig.4 貫工法

貫にはそれぞれ凹凸が彫ってあり、それが柱の中で組み合わさり、それをクサビで止め、しっかりと固定されている、従って、建物の周囲にある柱、つまり壁に接している柱は貫とつないで固定されており、建物の構造を一体化して、地震時には耐力を発揮するように工夫されている。

建物の屋根は普通の瓦ではなく、鉛の板で葺いてある、まず木で屋根を作り、その上に、厚さ $1.8 \mathrm{mm}$ の鉛板を張り付ける、この鉛瓦の鉛には、少量 $(0.06 \sim 0.08\%)$ の銅を添加し、強さや硬さ、それに酸に腐食されないための耐酸性を高めてある、鉛瓦は江戸城にも使われており、江戸時代の古文書には「鉛瓦を使用したのは名城の姿を壮美にするため」と書かれている.

金沢城は五代藩主綱紀の時代に改修されたとき ,屋根瓦が鉛瓦に葺き替えられた . 鉛瓦と言っても ,全てが鉛で出来ているわけではなく , 瓦の形をした木に ,厚さ 4~8mmの鉛板を貼りつけたものである . 他の城でも鉛瓦は一部用いられているが ,金沢城のように櫓や門 ,塀の全てに用いられた例はない .

2.4 辰巳用水

辰巳用水は犀川上流右岸,上辰巳町の東岩地点から取水され,兼六園の曲水の主要な水源として利用されている.金沢市の中心部から見て辰巳(東南)の方角にあることからそう呼ばれるようになった辰巳用水は,約4キロメートルの隧道,開水路を経て兼六園に引水されている.全長12キロメートル,金沢市の歴史的文化遺産とも言える手掘りの水路は,今から370年前に作られた貴重なものである.その開削は寛永8年(1631年),城下町6,000戸,金沢城までもが焼失した「法船寺焼き」と言われる大火事がきっかけと言われており,三代藩主・前田利常が町の再建と同時に,新しい町づくりと今後の防火体制を確立するためにこの用水を建設した.この他にも城の防御強化,用水を利用した積極的な新田開発といった目的もあったと言われている.

辰巳用水は,現在でも極めて高い測量技術が要求され る導水隧道を誇り,軟弱地盤を避けて造られたため屈曲 しているが,その勾配は正確無比で,必要な水量や流速 を得るために水路構造まで細やかな計算・工夫が随所に 見られる. そして何よりも, 現役の水路ということがそ の技術水準の高さを証明している.構造の特徴としては, 水位差を利用して水を高い位置まで引き上げる伏越(逆 サイフォン)の手法が取り入れられており,当時,日本 で初めてといえる大がかりなものであった、そして驚く べきことに、この偉業はわずか1年でなし遂げられたと 記録されており、これは板屋兵四郎という人物の天才的 技術によるものが大きいとされている. 当時の伏越(サ イフォン)は木管であったが,後に石管に代えられ,今も 兼六園にある日本最古の噴水にも利用されている. その 石管の一部が掘り出され、石川県立歴史博物館、金沢神 社や金沢大学工学部に置かれている.大正期には,水路 の一部に水力発電施設を設けて発電したり,大正・昭和 初期にかけては,小立野地区の民家・商家では水車を設 けて,野菜を洗ったり精米したりしていた.この用水を 造る時に培われた高度な技術が、各地の用水事業に与え た影響は大きかったと思われ、その難度や規模から、長 野県の五郎兵衛新田用水,江戸の玉川上水,芦ノ湖から



Fig.5 城下を流れる用水



Fig.6 辰巳用水の石管

導水した箱根用水と並んで"日本四大用水"の一つにもなっている.

3 石垣

3.1 石垣の積み方

城郭建築の基礎は石垣である.金沢城の復元工事では,元の石垣を一旦,取り除き,地中の発掘調査を行い,再び積み直された4).金沢城では石垣や礎石など,使われている石の殆どが,8km ほど東にある戸室山から切り出され,運ばれてきた.戸室石には2種類あり,赤味を帯びた石が「赤戸室」,青味を帯びたものが「青戸室」と呼ばれ,青戸室の方が赤戸室より石質が緻密で堅く,少し重い.今回の復元工事も戸室石を使って行われた.

金沢城ほど多種多様の石垣が存在する城は全国に例がない.石垣技術の変遷の中で江戸時代を通じて修築が繰り返されてきたことと,石垣技術者(穴生)が高さ等の技術的側面だけでなく,陰陽五行思想により場や方位で多くの種類の石垣を築き分けたのがその理由だ.これらは

金沢城石垣の歴史や秘伝技術を書いた「後藤家文書」によって知ることができる 5). 現地には当時の石切り場や石引き道が今も一部残っている. 本格的な石垣は文禄元年 (1592) 本丸東側の高石垣に始まり,慶長・元和期の外郭整備,大火を契機とした寛永8年 (1631)の城内再整備により現在の縄張り・石垣の母体が完成した. 修築が目立つのは災害復興に関わる寛文期,宝暦~安永期,享和・文化期等である「打込ハギ,切込ハギ」は技術進歩による時期差のようにとらえられがちだが,寛永期以降同時に存在し場所により使い分けられていた.

3.2 過去の地震災害履歴 ⁶)

1799 (寛政 11) 年 5 月 26 日に M6.4 の地震が発生した(寛政地震).この地震では上下動が激しく,城下町の屋根石が1 尺(30cm),石灯籠が6 尺(1.8m)も飛び上がったと報告されている.この地震による城内の石垣のはらみ数は 22 箇所,石垣崩壊は 6 箇所,城下の家屋倒壊は26 棟,家屋損壊は 4,169 棟,土蔵損壊は 992 棟であった.また,1858 (安政 5) 年 2 月 26 日には M6.9 の地震が発生し(安政地震),多数の石垣の損壊が見られた.これらのことから,城郭石垣の地震強度は震度 5 以上で石垣の所々が損壊すると考えられ,これを加速度に換算すると約 $80\sim250$ cm/ s^2 となる.

4 石垣の耐震調査

4.1 菱櫓, 五十間長屋における調査概要

歴史的構造物の保存が叫ばれて久しいが,城郭の石垣など数百年経つ歴史的構造物の中には改修の必要性が出てきているものがある.これらの遺跡(土木遺産)を保存し,周辺環境を整備して人々に開放するためには,石垣の安全性を正しく評価し,修復の是非を判断する方法を確立することが重要である.

石造の保存に関しては,地盤工学会が講座として取り上げ,種々の構造物を対象に修景・保存を行っている 7)。また田中・新谷らは,石垣に関する研究を長年行っており,石垣の安全性について多数の興味ある成果をまとめている 8 , 9)。ここでは,築後 4 00年を経過した城郭の石垣を対象に種々の調査を行い,現地盤における諸定数を求め,対象地における石垣の静的載荷試験を行うとともに,そのモデル化を考え,剛体ばねモデルを用いて石垣の挙動を解析する.

具体的な調査項目を以下に示す.

Tab.2 石垣の積み方

切り込みハギ積み	打ち込みハギ積み	野面積み			
石同士の接合部分を隙間なく	形や大きさをそろえた割石を	ほとんど加工のない自然石を			
加工して積み上げる技法	用いて積み上げる技法	積み上げる技法.古い時代の			
		石垣にみられる .			

- 1) 石垣の基礎地盤調査
- 2) 赤外線調査
- 3) 石垣の微動観測
- 4) 静的荷重載荷試験
- 5) 水平地震動入力による動的解析

4.2 調査場所

調査対象は二の丸の石垣であり,その場所を ${f Fig.7}$ に示す.石垣の調査については,ほぼ原形をとどめている 1-1' 断面と石垣中腹が多少はらみ出している 2-2' 断面の 2 箇所を考えた.

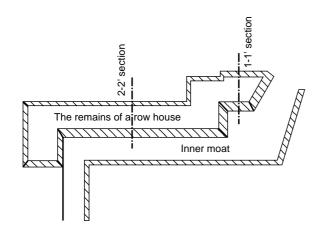


Fig.7 調查対象地点

4.3 構内載荷試験

実施した坑内の機械ボーリング結果から,露頭の状況, 地形,地質概要を総合的に調査し,土質断面図を作成した.これを対象に,PS速度検層を行い,P波,S波の速 度を深度毎に調べた、その結果を Tab.3 にまとめる、

石垣の存在する部分では深さに対して,全体的に速度が大きくなっている.また,石垣に使用されている石の圧縮強度試験を万能試験機(島津製作所製 RH-50. T. V.)を用いて行った.供試体の寸法は 5cm 角である.試験に用いた石は地元で産出する戸室石(角閃石安山岩)であり,この石の特徴は,石にしては強度が弱く,経年変化による強度低下の影響を受けやすい.反面,施工性が良いため江戸時代より水道暗渠などに利用されている.石自身の圧縮強度は最も大きなもので 110MPa,小さいもので 30MPa であった.

以上の結果から, Tab.3 に示した各地層区間におけるポアソン比, せん断定数など, 解析に用いた諸定数を求めることができた.

4.4 石垣の荷重載荷実験

本実験では,静的荷重を石垣に作用させ,石垣の変位 挙動を把えるとともに,対象箇所における荷重-変位特 性を知ることを目的とする.実験概要図を Fig.8 に示す.

現地調査等により、石垣背後地盤は水はけが良好であり、地下水位が低いため、水圧については特に考慮する必要がないと判断した。荷重を石垣に伝えるため、反力壁として建設重機(バックホー)を用いた。この理由は、高い位置に荷重載荷点があること、本実験と並行して行われている埋蔵文化財発掘調査を推進するためには、本実験後、すみやかに原 地盤に復帰する必要があったからである。石垣の石自身の強度を考え、載荷点における荷重は 24.5kN までとする。バックホーの油圧を上げた状態において、バックホーと石垣の間にある油圧ジャッキによって段階的に荷重を載荷した。また、石垣とは独立

Section	Soil type	Depth	N-value	V_p	V_s	ν	G	E	γ	c	ϕ
		(m)		(m/s)	(m/s)		(Mpa)	(Mpa)	(kN/m^3)	(kpa^2)	(°)
1-1'	B_1	$0 \sim 2$	31	520	160	0.45	51	148	19.6	0	40
	B_{d1}	$2\sim4$	13	1,160	200	0.49	80	238	19.6	0	40
	B_{d1}	$4 \sim 9.45$	79	1,610	400	0.47	320	939	19.6	0	40
	D_{c2}	$9.45 \sim 10.15$		1,300	260	0.48	122	360	17.6	500	0
	D_{g2}	$10.15 \sim 12.6$	40	1,300	260	0.48	142	420	20.6	0.0	40
	D_s	$12.6 \sim 13.45$	31	1,300	260	0.48	142	420	19.6	0.0	32
	D_{g22}	$13.45 \sim 17.85$	44	1,690	360	0.48	272	901	20.6	0.0	39
	U_g	$17.85 \sim 20.00$	19	1,470	320	0.48	178	526	16.7	432	36
	B_2	$0 \sim 2.60$	4	750	160	0.48	49	144	18.6	0	30
	B_{d2}	$2.60 \sim 8.40$	15	1,270	310	0.47	192	564	19.6	0	30
	D_{c2}	$8.40 \sim 10.00$	3	1,190	210	0.48	79	236	17.6	500	0
2-2'	D_{g2}	$10.00 \sim 12.80$	57	1,720	400	0.47	336	989	20.6	0.0	40
	D_s	$12.80 \sim 14.50$	15	1,430	320	0.48	204	604	19.6	0.0	32
	D_{g22}	$14.50 \sim 16.80$	22	1,540	360	0.47	272	801	20.6	0.0	39
	U_g	$16.80 \sim 20.00$	28	1,540	360	0.47	272	801	16.7	432	36

Tab.3 地盤諸定数

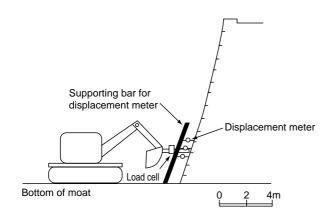


Fig.8 静的載荷試験の様子

のパイプを組み立て,所定の位置にダイヤルゲージを取り付け,各点の変位を測定した.両断面における荷重ー変位曲線を ${f Fig.9}$ に示す.

1-1' 断面における荷重一変位量の傾きは 2-2' 断面におけるそれよりも大きいことがわかる.静的荷重(25kN)では 1-1' 断面には問題がない程度の変位しか生じない.これは,石垣が石を積み上げただけの構造であるにもかかわらず,構造物として,ある程度の水平荷重に耐えるように造られていることを示唆している.なお,載荷点における石垣の変位量が必ずしも大きくなく,載荷点以外の石垣の変位量が大きくなる場合がある.特に 2-2' 断面においては荷重 14.7kN に対して 0.8mm の変位が記録されており,図中には記録されていないが,除荷による変位の戻りがなかったことを考えると,石垣の石個々の極めて非線形的な挙動が現れており,それらは周辺の石に対して影響を与えていると言える.

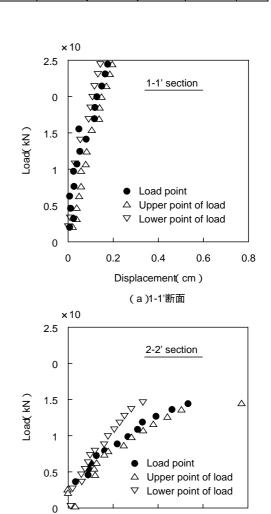


Fig.9 静的載荷時の荷重と変位の関係

0.4

Displacement(cm)

(b)2-2'断面

0.6

8.0

0.2

5 石垣の解析

5.1 剛体ばねモデル

解析には、剛体ばねモデル(川井モデル)を用いる 10). このモデルでは要素自身を剛体と仮定し、各要素境界面上にばねを設ける、要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いて、エネルギーが評価される、その結果、破壊線が得られ、不連続体に対する解析が可能となる、変位パラメータは重心に設定し、自由度は3である、解くべき方程式は、

静的
$$F = Ku$$
 (1) 動的
$$F = Ku + C\dot{u} + M\ddot{u}$$
 (2)

となる.ここで,F は荷重項,K はばね剛性マトリックス,u は要素重心の剛体変位,C は減衰マトリックス,M は質量マトリックスである.

5.2 破壊基準

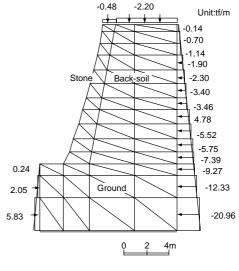
破壊条件にはモール・クーロンの条件を用い,材料要素の異なる境界では,境界から重心までの距離で重みをつけた材料定数の平均値を用いて解析を行う.せん断すべりに対する条件から,引っ張り領域については考えず,圧縮方向は考える.以上の仮定のもとで,静的解析では,変位の荷重増分解析を行う.せん断応力に対しては,すべての要素間において降伏条件をチェックする.

5.3 石垣モデル

地盤定数の結果に加え,常時微動測定から求めた地盤の動的定数(固有振動数)を参考に,石垣の安定解析を行う.例えば,1-1'断面のモデルを ${f Fig.10}$ (a)に示す.

総節点数は 64, 要素数は 114, ばねの数は 142 である. 2-2' 断面の総節点数は 68, 要素数は 121, ばねの数は 150 である.石垣の高さはほぼ $12\mathrm{m}$ である.1-1' 断面の石垣の方が 2-2' 断面より, $1\mathrm{m}$ ほど高いモデルとなっている.

図中には,3角形要素の他に,線要素が存在する.本解析法では,有限要素法のように各節点に荷重を作用させることができないことから,このような線要素を考え,この要素に荷重を載荷する.また,モデル最下部の線要





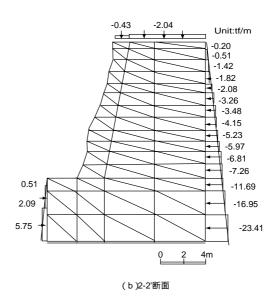


Fig.10 解析モデルと土圧

素は境界条件のために必要である.静的解析では,横方向からの土圧分布荷重を境界要素ごとに 集中して作用させる.このような状態を標準載荷荷重とする.動的解析の入力地震波として,大崎の方法により 11) 実際の断層から想定地震波を作成した (Fig.11).

このとき,近距離地震タイプで(森本・富樫断層),震央距離が $10{
m km}$,マグニチュード 7.0 の地震を仮定した.想定地震動の最大加速度は $770{
m gal}~({
m cm/s^2})$ である.また解析における増分時間は $\Delta t=0.02$ 秒であり,40 秒間入力とした.

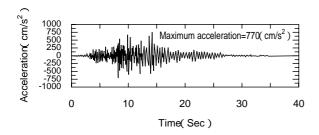


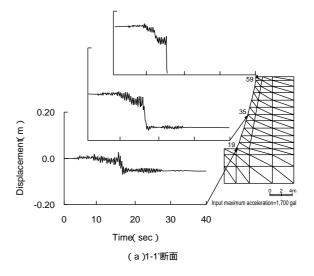
Fig.11 入力加速度波形

5.4 動的解析結果

ここでは,入力の最大加速度値が $100 \mathrm{gal}$ づつ大きくなるように波形の最大値を変化させ,石垣が破壊するまで解析を行った.なお,想定される地震動の最大加速度が $770 \mathrm{gal}$ であるので,この値の解析のみ追加して行っている.1-1' 断面に対して,法尻要素 19,中腹要素 35,法肩要素 59 における相対変位の応答を $\mathbf{Fig.12}(\mathbf{a})$ に示す.

石垣の応答を見ると,15秒付近で大きく変位している ことがわかる、その傾向は上層ほど強く現れる、上部要 素番号 59 の石の挙動に注目すると,8 秒後に変位波形が ドリフトを始め,15秒後に大きな変化が現れている.中 部 35・下部 19 の波形では中部の要素 35 の方がドリフト 量が大きいものの,上部59ほどには変化せず,ドリフト 後も振動していることがわかる.また,応答波形の振動 数は常時微動のそれよりも低くなっており, 地震入力後 に要素間のばねが降伏することにより,石垣の剛性が低 下したものと考えられる.一方,入力加速度が異なるた めに 1-1' 断面の結果と比較できないが , 2-2' における結 果に注目してみると,同様な挙動を呈している.ただし 2-2′断面の方が低い最大加速度において,このような現 象になっていることは,静的解析の結果のみならず,動 的解析の変位波形からも 2-2'では耐震的に不利な条件に あると言える. したがって今後の耐震対策強化のために は、まず石垣の法勾配の処置が重要であることが考えら れ,これを施すことによって,安全性が大幅に向上する ことが考えられる.

ここで想定した地震動の大きさ($770 \mathrm{gal}$)の範囲内では 1-1' 断面の石垣が崩壊することはなかった.解析では,入力の最大加速度を $1,700 \mathrm{gal}$ と考えたときに石垣が崩壊した.一方,2-2' 断面では $700 \mathrm{gal}$ の最大加速度時に石垣は崩壊した.



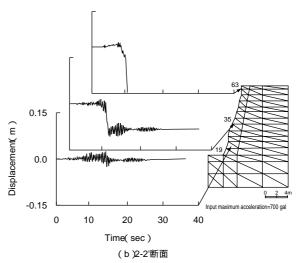


Fig.12 動的応答解析結果

6 建物の振動測定

築城された菱櫓,五十間長屋,橋爪門続櫓に対して,常時微動観測や人力による加振実験を行い,建物の振動特性を調べた.建物を長辺方向と短辺方向にそれぞれ揺った.測定は振動が比較的安定している夜間に行った.振動波形からスペクトルを算出し,固有振動数を求めてみると,長辺方向には2~6Hz,短辺方向には2~3Hzの振動特性を有していることがわかった.金沢における想定地震動の固有1次振動数は建物の短辺方向の振動数とほぼ合致している.短辺方向については石垣のはらみ出す方向とも一致していることから,十分注意する必要がある.なお,石垣が崩れても建物自身は倒壊しないように基礎部分に工夫,補強して建造されている.

7 おわりに

金沢城の沿革,平成の築城,その伝統的技法や城内を流れる辰巳用水を紹介した.また,築後 400 年を経過した城郭の石垣を対象に2つの断面を選定し,種々の耐震調査を行い,原地盤における諸定数を求めたり,それぞれの石垣に対して静的な載荷実験を行った.さらには,動的な解析を通じて,石垣の状態を把握するとともに,積み替えの必要性について述べた.また,築城された菱櫓,五十間長屋,橋爪門続櫓に対して,常時微動観測や人力による加振実験の結果と動的解析の結果,石垣が崩れても建物自身は倒壊しないような工夫がなされたことは興味深い.

本復元工事は金沢城再現の第1次段階である.石川県は他に,二の丸御殿,乾櫓・丑寅櫓,いもり堀の復元,石垣の回廊整備など,さらなる復元を計画中である.その中で,石垣の裏込めにはコンクリートを採用するなどの技術を使用せず,あくまでも伝統工法を貫き,場合によっては先端技術と伝統技術の融合を試みながら,平成の本格的築城を目指している.金沢城が100年後の国宝となることを期待したい.

最後に本調査を実施するにあたり,石川県公園緑地課, (株)ホクコク地水を始めとする関係機関に感謝の意を表 します.

[参考文献]

- 1) 石川県:ホームページ, http://www.pref.ishikawa.jp/kouen/map/park/kanazawa/(2003)
- 2) 石川県:金沢城址公園整備懇話会資料 (1998)
- 3) 北國新聞社: 名所に残る築城 (2003)
- 4) ホクコク地水:金沢城址公園整備工事石垣安定度調査業務(1997)
- 5) 喜内敏:加賀藩穴太方後藤家文書,金沢城郭史料,日本海文化叢書(1976)
- 6) 前田育徳会:加賀藩資料,金沢市史・下 (1981)
- 7) 関陽太郎,他8名:石造文化財の保存,講座,土と基礎,44 巻8号-45巻9号(1996-1997)
- 8) 田中邦熙,新谷洋二,山田清臣:石積みの安定性に関する各種の判定手法の比較検討,土木史研究,第18号,pp.139-152 (1998)
- 9) 田中邦熙,新谷洋二,山田清臣:石積み断面解析に FEM を 適用するための間詰部の考え方と解析事例,土木史研究,第 18号,pp.491-501 (1998)
- 10) 川井忠彦・竹内則雄:離散化極限解析プログラミング,倍 風館 (1990)
- 11) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, pp.167-214, 鹿島出版会 (1994)