

48年経過による錦帯橋の木部材の強度低下に関する推定

Estimation on strength decrease of wood materials of Kintaikyo Bridge by progress in 48 years

○本田秀行* 大澤雄司**
HONDA Hideyuki and OHSAWA Yuji

*工博 金沢工業大学環境・建築学部環境土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

**金沢工業大学大学院修士課程環境土木工学専攻(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

ABSTRACT For the third bridge of Kintaikyo Bridge which constructed in 1953 and dismantled in 2001, this study was investigated analytically the change of Young's modulus of wood materials based on the experimental values of natural frequency over 48 years measured in every 5 years. The wood species of primary member are zelkova, pine and cypress. In addition, the lowering of future Young's modulus for the wood of Kintaikyo Bridge reconstructed in 2002 was also estimated in this study. When it was estimated Young's modulus of wood materials from the natural frequency, it was obtained the result which that modulus decreased 42% during 48 years. In addition, it was also estimated the result which Young's modulus would decrease 52% for 48 years in future on Kintaikyo Bridge reconstructed in 2002.

Keywords: 錦帯橋, ヤング係数, 経年変化, 固有振動数

Kintaikyo, Young's modulus, secular change, natural frequency

1. まえがき

昭和28年に再建され平成13年に架け替えられるまでの錦帯橋の第3橋目を対象として、東京大学によって5年ごとに測定された48年間に亘る固有振動数の実験値¹⁾を基に、主要部材の樹種である榎、松、檜の木材の強度に関するヤング係数の経年変化を解析的に検討した。さらに、平成16年に架設が完成した平成架橋の錦帯橋に対するヤング係数の低下も推定した。その結果、固有振動数から推定した場合、48年間で昭和28年架橋の錦帯橋ではヤング係数が42%低下したこと、さらに、その解析結果を基に平成架橋の錦帯橋では今後48年間で52%のヤング係数が低下することなどを推定し、今後の維持管理に対する基礎データを得たので以下に報告する。

2. 錦帯橋の概要と使用樹種

対象橋梁は、山口県の錦川に延宝元年(1673年)に岩国3代藩主吉川広嘉によって創建されてから12回の架替えの後、昭和28年に再建された5連ある錦帯橋の内の第3橋目である。本橋の一般図を図-1に、主要部材の名称を図-2に示す。構造として、錦帯橋の第3橋目は独特の景観を表現しており、径間36.98m、そり高5.018m、幅員4.180mの肘木橋である。また、高欄の高さは1.393mとなっている。錦帯橋の主要部材の名称および樹種として、敷梁はケヤキ、桁はマツとケヤキ、助木はマツ、鞍木はマツ、楔はケヤキ、後詰木はケヤキ、平均木はヒノキ、梁はマツ、敷板はヒノキ、高欄はヒノキ材となっている。なお、鞍木は創建時に設置されていなく、供用中に例えばせん断力に対する補強部材として後に追加されたものと思われる。

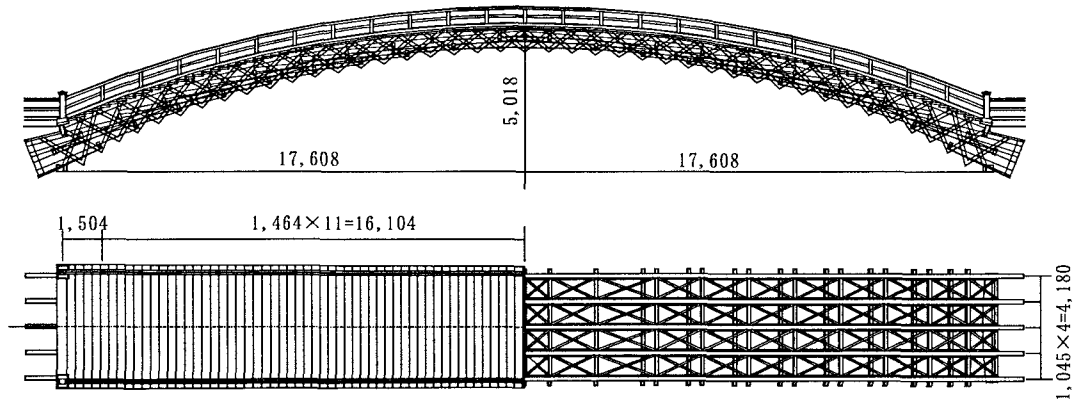


図-1 錦帯橋の一般図

錦帯橋は非常に厳しい環境にさらされており、用材の仕様は大変厳しく総て赤身材を使用している。また、岩国市政 50 周年の平成 3 年には、市民からの浄財を募りケヤキの苗木 2 千本を高照寺山に植樹するなど将来の架け替えにも備え、架け替え用材の調達に当たっても新たな立木の伐採は極力控え、備蓄されている材からの調達を基本姿勢として取り組んでいるようである¹⁾。その調達された用材を表-1 に示す。

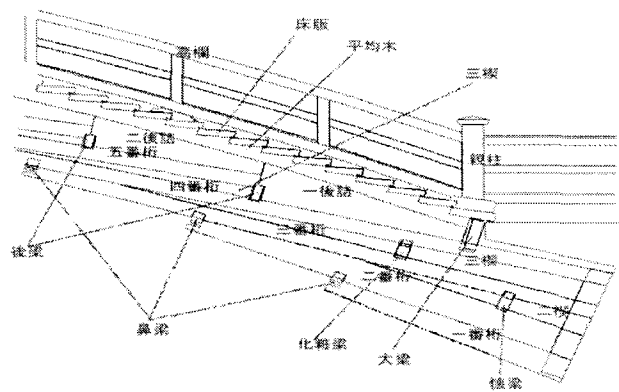


図-2 錦帯橋の主要部材名称

3. 昭和架橋の錦帯橋

昭和 28 年架設錦帯橋に使用された木材のヤング係数の経年変化を解析的に検討する前に、錦帯橋の構造解析結果を検証するために静解析および固有値解析を事前に行った。

MSC/NASTRAN を用いて作成した錦帯橋の 3 次元構造解析モデル²⁾を図-3 に示す。設計図面と CAD データから各部材の座標点を読み取り、桁・楔・後詰・平均木・横梁(鼻梁、後梁など)は Shell 要素(一部三角形面要素)、鞍木・助木・振留・対傾構・高欄は Bar 要素を用いた。その結果、節点数 10952、要素数 9096 となった。

3.1 静的解析

参考文献 1) に東京大学が行った実験内容と測定データが記述されている。静的実験は分布荷重試験と集中荷重試験の二つである。たわみの計測は変位計(111ヶ所)と歪みゲージ(152箇所)で行なわれた。分布荷重試験は

表-1 錦帯橋に用いられている樹種と調達先¹⁾

樹種	使用量	使用箇所	調達先
マツ	156.4 m ³	橋桁, 梁	新潟, 山形, 福島, 広島, 山口
ヒノキ	151.8 m ³	敷板, 段板, 高欄	長野
ケヤキ	66.0 m ³	橋桁, 敷梁	岐阜, 島根, 山口, 広島, 鹿児島
ヒバ	29.8 m ³	橋杭	青森
クリ	5.9 m ³	桁・梁の雨覆い	新潟, 山口
カシ	0.8 m ³	太柄	山口
合計	410.7 m ³ (仕上げ寸法での数量)		

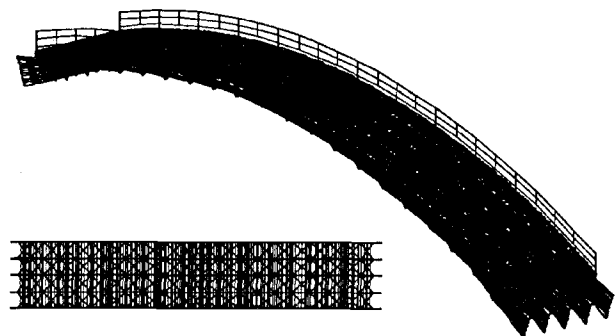


図-3 錦帯橋の 3 次元構造解析モデル

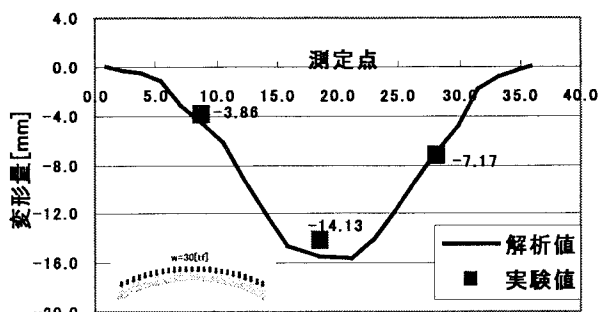


図-4 全等分布荷重 30 tf 载荷時の静たわみ

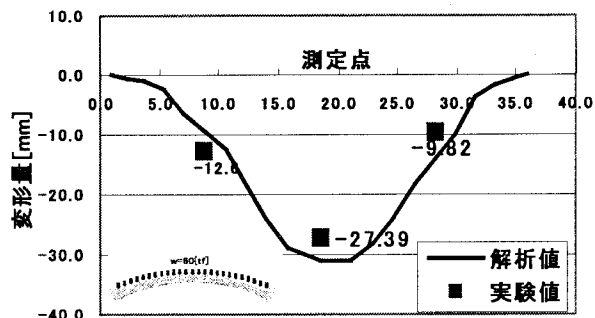


図-5 全等分布荷重 60 tf 载荷時の静たわみ

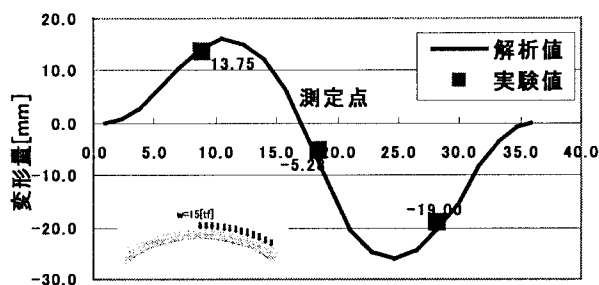


図-6 偏等分布荷重 15 tf 载荷時の静たわみ

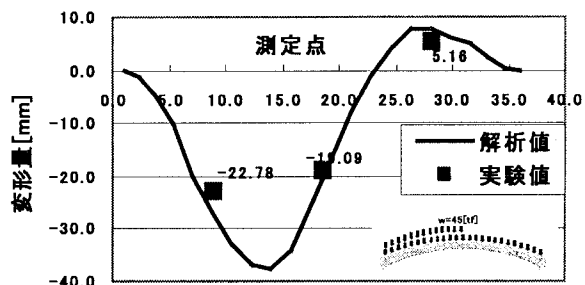


図-7 偏等分布荷重 45 tf 载荷時の静たわみ

表-2 各箇所での静的たわみの実験値と解析値 (mm)

全等分布载荷を 30tf と 60tf の 2 通り、偏分布载荷 (長さ方向) を 15tf と 45tf、偏分布载荷 (幅方向) を同じく 15tf と 45tf の合計 6 通りの試験内容である。

図-4～図-7 に、各種静的実験で測定された実験たわみ値とその実験に対応する解析で得た解析たわみ値を示す。全等分布载荷と偏分布载荷での実験値と解析値はほぼ一致している傾向を示している。

しかし、荷重強度が大きくなるほど実験値と解析値に差異が生じている傾向も見られる。これは、荷重強度が大きくなると木部材間に摩擦やすべりが生じているものと考えられ、解析では木部材間の摩擦力を考慮していないことに起因していると思われる。この木部材間の摩擦力を解析で考慮する場合、木部材モデルの接点間に摩擦力を想定したせん断ばねを挿入する必要があり、せん断ばね定数の評価と決定を含めて非常に困難な解析を要することになる。

表-2 は、各箇所での静的たわみの実験値と解析値を示している。一般的に解析値は実験値によく一致していることから、本解析で用いられた木材の単位体積当たりの重量やヤング係数などの物性値が実際に保有している値に近いものであることが判断される。このことから、以下の固有値解析においては、静的解析に用いられた木材の物性値を基準に検討することにした。

なお、静的解析を行なった際、錦帯橋がアーチ形式か否かの検討も行なった。その結果、桁は曲げの部材となっていることから、1, 4, 6, 9 番桁で負の曲げモーメントが発生し、その他は正の曲げモーメントとなった。錦帯橋は桁を巻金で締め、鞍木で桁全体を合成し、後詰めで桁の反

実験内容	载荷量	実験値/解析値	5 番桁	中央	5 番桁
全等分布载荷	30 tf	実験値	-7.17	-14.13	-3.86
		解析値	-7.01	-15.50	-4.64
	60 tf	実験値	-9.82	-27.39	-12.60
		解析値	-9.28	-30.94	-14.02
偏等分布载荷	15 tf	実験値	-19.00	-5.28	13.75
		解析値	-20.54	-6.98	14.09
	45 tf	実験値	5.16	-19.09	-22.78
		解析値	7.60	-20.82	-27.12

力を吸収するなどして桁全体がアーチ面の構造になっていることによって、アーチ橋の静的特性を示している。しかし、桁には正・負のモーメントも生じていることから、純粋はアーチ橋でなく、「肘木形式アーチ橋」と命名することが妥当であると思われる。

3.2 経年変化による木材物性値

(1) 実験値と解析値

東京大学が行った振動実験の結果¹⁾を表-3に示し、実験年と経過年による固有振動数の変化を図-8に示す。図-8に示した固有振動数の変化に着目すると、供用経年によって徐々に値が下がっていることが認められる。建設当初(1953年)は、4.50Hzの値が48年後(2001年)には2.90Hzまで低下している。この傾向を $(2.90/4.50)^2 = 0.41$ で換算すると、約60%が低下していることになる。

なお、1963年の3.55 Hzから1967年の3.70 Hzに固有振動数が増加しているのは、敷板の張替え補修が行なわれたことによって橋体全体の剛性が増加したことを意味していると思われる。このような固有振動数の増加は、1973年の2.85 Hzから1978年の3.35 Hz、1988年の3.20 Hzから1998年の3.45 Hzにも見られ、ほぼ5年周期に何らかの補修が行なわれたように思えるが、各実験日での

様々な気象条件の違いによって木材含水率の変化などが実験値に影響していることも考えられる。

経年変化による固有振動数の実験値に対応させた解析の固有振動数を図-9に示す。この逆解析によって、1953年の測定で得た固有振動数の実験値4.5 Hzに対応する解析値4.49 Hzの有する

表-3 錦帯橋の測定された固有振動数¹⁾

実験年	1953	1963	1967	1973	1978	1983	1988	1993	1998	2001
経過年	0	10	14	20	25	30	35	40	45	48
振動数 (Hz)	4.5	3.55	3.70	2.85	3.35	3.25	3.20	3.45	3.05	2.90

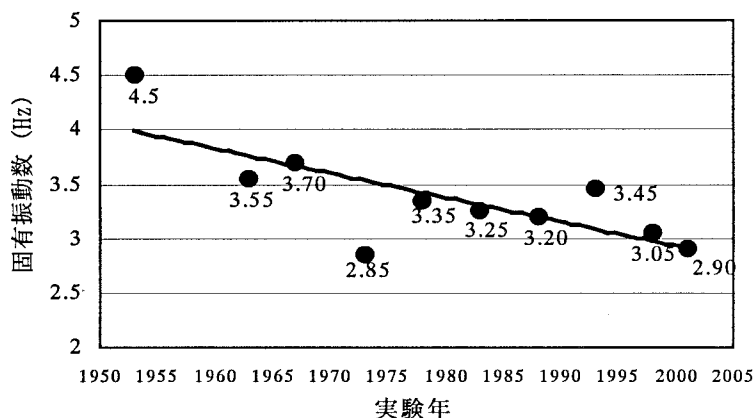


図-8 錦帯橋の48年間で測定された固有振動数

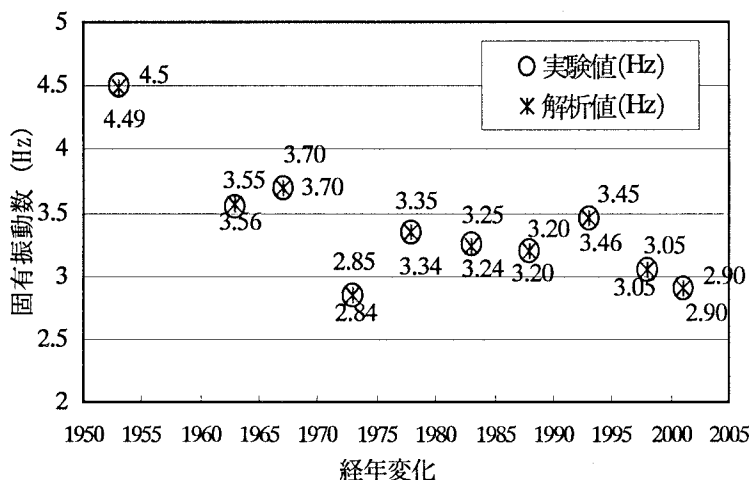


図-9 経年変化による固有振動数の実験値と解析値

表-4 建設当初(1953年)における木材物性値の推定

部材	樹種	物性値				
		ヤング係数 E_x (tf/m ²)	ヤング係数 E_y (tf/m ²)	ポアソン比 μ	せん断弾性係数 G (tf/m ²)	単位体積重量 γ (tf/m ³)
1番桁～3番桁, 10, 11番桁	ケヤキ	1.3×10^6	6.5×10^4	0.4	2.3×10^5	0.047
4番桁～9番桁	マツ	1.2×10^6	6.0×10^4	0.4	2.1×10^5	0.042
平均木, 床版	ヒノキ	1.1×10^6	5.5×10^4	0.4	2.1×10^5	0.030

表-5 建設から48年経過後（2001年）における木材物性値の推定

部材	樹種	物性値				
		ヤング係数 E_x (tf/m ²)	ヤング係数 E_y (tf/m ²)	ポアソン 比 μ	せん断弾性係数 G (tf/m ²)	単位体積重量 γ (tf/m ³)
1番桁～3番桁, 10, 11番桁	ケヤキ	5.5×10^5	2.8×10^4	0.4	1.0×10^5	0.047
4番桁～9番桁	マツ	5.0×10^5	2.5×10^4	0.4	9.4×10^4	0.042
平均木, 床版	ヒノキ	4.6×10^5	2.3×10^4	0.4	8.6×10^4	0.030

木材の物性値が推定されたことになる。以上に記述した逆解析で、1963年、1967年、1973年、1978年、1983年、1988年、1993年、1998年、2001年に測定された実験値の固有振動数に対応する木材の物性値を解析的に検討して固有値解析を行った。図-9にその解析値を示す。

図中の各解析値は、固有値解析を行った時、ポアソン比 μ を0.4として各実験値の固有振動数に対応するように主要部材であるケヤキ、マツ、ヒノキ材の物性値（ヤング係数 E_x 、 E_y 、せん断弾性係数 G 、単位体積重量 γ ）を解析的に検討して得た木材の物性値である。その得られた建設当初の具体的な木材物性値の推定を表-4に、また建設から48年経過後（2001年）における木材物性値の推定を表-5に示す。

図-9に示した解析値の各固有振動数は、図-10に示すように、アーチ橋として完全な振動形状にならないが、鉛直曲げ逆対称1次振動モードである。従って、東京大学が行った実験値の固有振動数は、鉛直曲げ逆対称1次振動モードであると思われる。

(2) 経年変化による木材の強度低減

図-9の固有振動数の解析解で推定された物性値の内、経年変化による各樹種（ケヤキ、マツ、ヒノキ）ごとのヤング係数 E_x の変化を図-11に示す。図中の実線、一点鎖線、破線は経年変化に対する回帰曲線である。

まず、経年によってヤング係数が低下していることが認められる。そして、1967年と1973年時のヤング係数は、他の値と比較すると極端に変化している。さらに、建設当初から1973年頃までの近似曲線は傾きが大きく、ヤング係数の差異が見られる。逆に、1973年以降の曲線はなだらかになっており、ヤング係数の差異があまり見られない。これは両者とも、図-8に述べた実験値である固有振動数の変化に起因していることによる。

図-11に記述した各樹種に対するヤング係数の回帰曲線を見ると、その低減傾向が同じであることを示している。このことから、ケヤキ材の

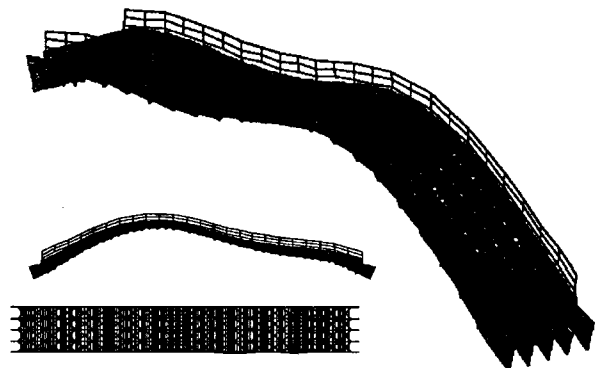


図-10 解析での鉛直曲げ1次逆対称振動モード

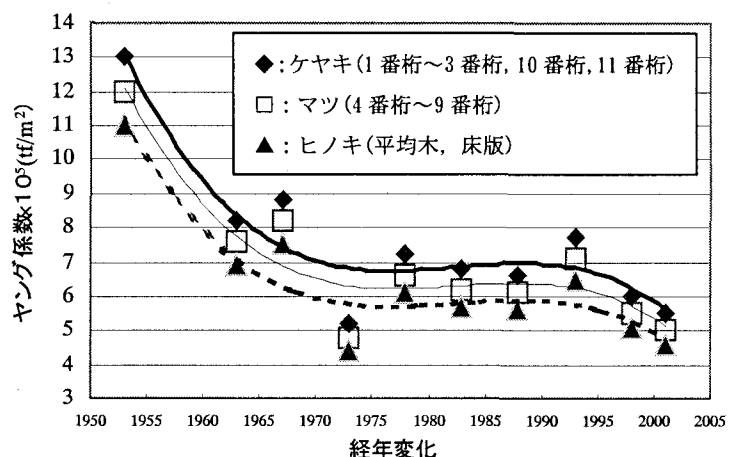


図-11 経年変化による樹種ごとのヤング係数 E_x

ような固有の樹種でなく、ケヤキ、マツ、ヒノキ材を含めた木材の経年に対するヤング係数 E_x を1953年の建設当初を基準の100%として低減率(%)を検討した結果を図-12に示す。すなわち、木材が経年によってヤング係数の低減がどの程度あるかを割合で検討したものである。この図から、1953年の建設当初を100%とした場合、48年経過後の2001年には42%のヤング係数の低下が推定される。すなわち、本解析ではポアソン比と単位体積重量を経年による変化を考慮せずに一定値としているため厳密な解析でないかも知れないが、ヤング係数は強度に対する重要な評価指標であることから、48年の経過後には木材の強度が58%低下することが解析的に推定される。

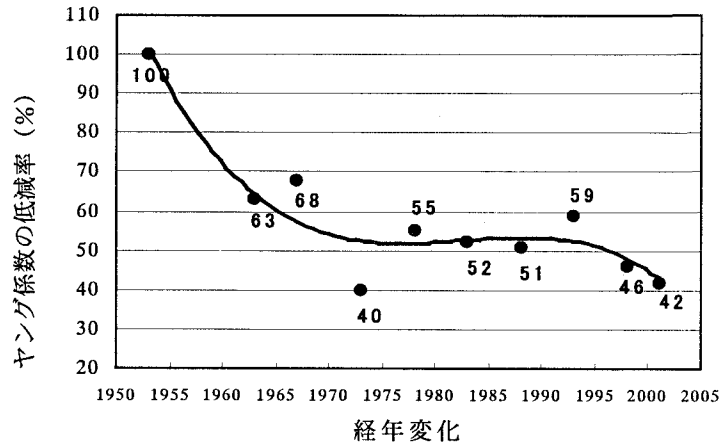


図-12 建設当初を基準としたヤング係数 E_x の低減率

4. 平成架橋の錦帯橋

(1) 経過年による固有振動数と各樹種のヤング係数の予測

対象橋梁は、平成13年(2001年)から平成16年(2004年)にかけて架け替えられた5連ある錦帯橋の内、昭和の錦帯橋と同じ第3橋目(以下に平成の錦帯橋と言う)である。平成の錦帯橋は、昭和に建設された錦帯橋(以下に昭和の錦帯橋と言う)とほぼ同じ構造となっている。このことから、解析では図-3に示した昭和の錦帯橋で作成した構造解析モデルを用いて、今後の経過年に対する平成の錦帯橋の木材強度の低減を予測する。

平成の錦帯橋(第3橋目)に対して平成16年8月に強度試験が行われ、その際に振動実験も実施された。その結果、4.03 Hzの固有振動数が実験結果¹⁾として得られている。この値は、昭和の錦帯橋が建設された当初の値である4.50 Hzと比較すると、0.5 Hzほど低い値となっている。そこで、平成の錦帯橋の実験値を用いて48年経過後のヤング係数の変化を予測するために、昭和の錦帯橋に対する解析内容と同様に固有値解析を行った。架け替え10年以降の実験値については、平成の錦帯橋に実験値はないため、昭和の錦帯橋の実験値を用いて予測を行った。その結果として、平成の錦帯橋の経過年による固有振動数の変化を図-13に示す。当然ながら、予測の実験値と解析値はほぼ一致している。このことから、予測の実験値と解析値は同様の剛性を持った橋梁であると解析的に認められることから、木材の物性値に対する経過年の変化を検討することにする。

なお、振動モードに関しては、実験値が一つよりなかったため他の振動次数との比較検討を行うことができなかったが、昭和の錦帯橋で検討して図-10に示した鉛直曲げ逆対称1次振動モードであると考えられる。

平成の錦帯橋に対する経過年による各樹種のヤング係数 E_x の変化予

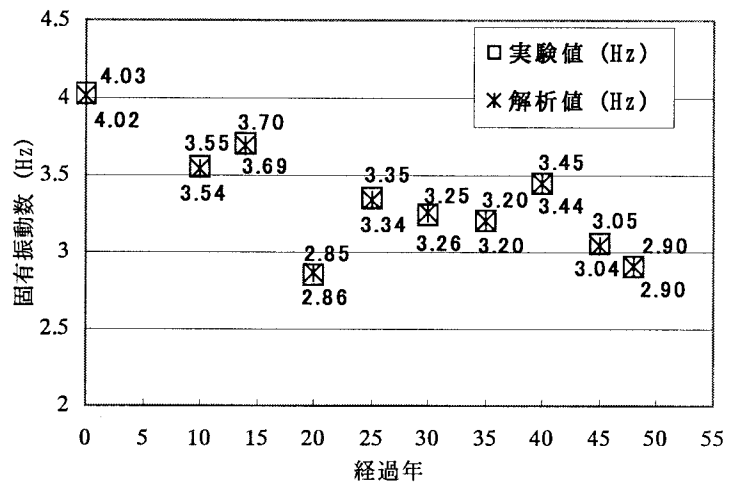


図-13 経過年と固有振動数の変化(予測)

測を図-14に示す。図-9に比べると近似曲線の傾きがなだらかになっている。これは、建設当初の実験値が小さくヤング係数も同様な結果になったことによる。また、昭和の錦帯橋を基に解析的に検討した内容と同様に、建設当初のヤング係数を基準として経年によるヤング係数の変化を算出したことから当然ではあるが、経過年による樹種のヤング係数は一対となって変化している。

昭和の錦帯橋と同様、平成の錦帯橋の木材に関する物性値を検討した結果が表-6、7である。表-6は建設当初における木材の物性値を、表-7は48年経過後の木材物性値の予測を示している。表-7に示した48年経過後のヤング係数を参照すると、昭和の錦帯橋のヤング係数と非常に近い値になった。なお、ポアソン比 μ と単位体積重量 γ は、昭和の錦帯橋に対する解析と同様に一定値を用いた。

平成の錦帯橋に対する経過年とヤング係数 E_x の逓減率予測を示したのが図-15である。昭和の錦帯橋と同様に、建設当初のヤング係数値を100%とすると、48年の経過後には52%の値になると予測される。すなわち、48年の経過後には木材の強度が48%低下することが解析的に予測される。

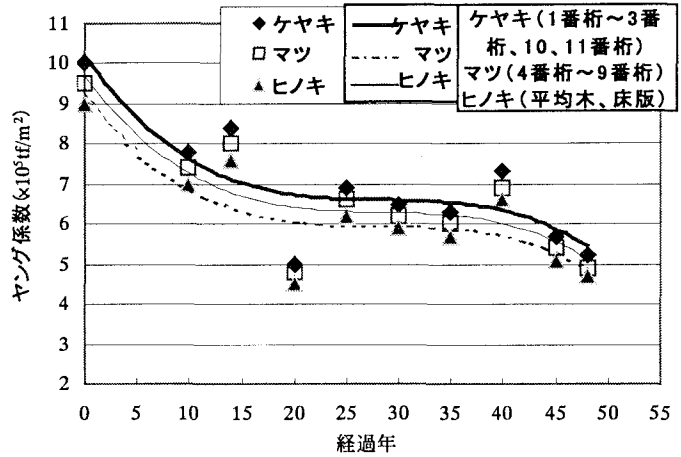


図-14 各樹種の経過年とヤング係数 E_x の変化予測

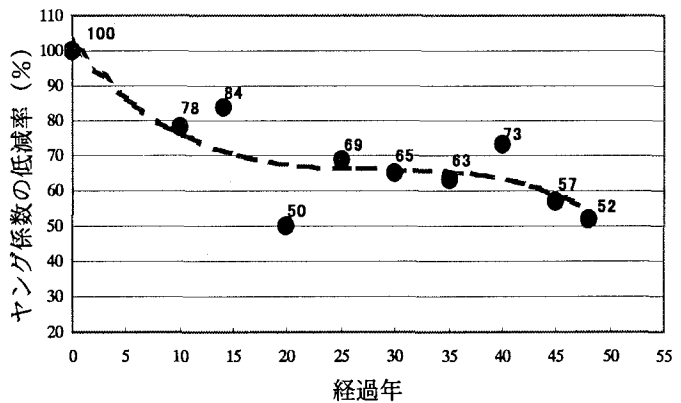


図-15 経過年によるヤング係数 E_x の低減率予測

表-6 建設当初における木材物性値の推定 (平成の錦帯橋)

部材	樹種	物性値				
		ヤング係数 E_x (tf/m ²)	ヤング係数 E_y (tf/m ²)	ポアソン 比 μ	せん断弾性係 数 G (tf/m ²)	単位体積重量 γ (tf/m ³)
1 番桁～3 番 桁, 10, 11 番桁	ケヤキ	1.0×10^6	5.0×10^4	0.4	1.9×10^5	0.047
4 番桁～9 番桁	マツ	9.5×10^5	4.8×10^4	0.4	1.8×10^5	0.042
平均木, 床版	ヒノキ	9.0×10^5	4.5×10^4	0.4	1.7×10^5	0.030

表-7 建設から48年経過後における木材物性値の予測 (平成の錦帯橋)

部材	樹種	物性値				
		ヤング係数 E_x (tf/m ²)	ヤング係数 E_y (tf/m ²)	ポアソン 比 μ	せん断弾性係 数 G (tf/m ²)	単位体積重量 γ (tf/m ³)
1 番桁～3 番 桁, 10, 11 番桁	ケヤキ	5.2×10^5	2.6×10^4	0.4	9.8×10^4	0.047
4 番桁～9 番桁	マツ	4.9×10^5	2.5×10^4	0.4	9.2×10^4	0.042
平均木, 床版	ヒノキ	4.7×10^5	2.4×10^4	0.4	8.8×10^4	0.030

本解析での結果は、あくまで予測であり、このような結果となるとは限らないが、48年後には約50%程度の強度が低下するのではないかとと思われる。なお、昭和の錦帯橋に比べると木材の強度低下は一般的に低い傾向が予測された。

(2) 昭和と平成の錦帯橋比較

経過年による樹種ごとのヤング係数 E_y の変化を図-16 に示す。昭和の錦帯橋のヤング係数値の方が経過年0年においても大きく、樹種ごとのヤング係数の算出結果も差異が大きくなった。平成の錦帯橋の実験値が建設当初以外になく、昭和の錦帯橋の実験値を用いた解析での推定であるから当然ではあるが、建設当初は大きな差があったにも関わらず、48年後にはほぼ同じような値となっている。

昭和と平成の錦帯橋に対する経過年と木材の強度の低減率予測を示したのが図-17 である。平成の錦帯橋の方は強度低減率の傾きがなだらかであることが両者の比較によって認められる。昭和と平成の錦帯橋では、10%の強度低下の差が見られる結果となり、経過年ごとに両者を比較しても約10%の差異が推定される。

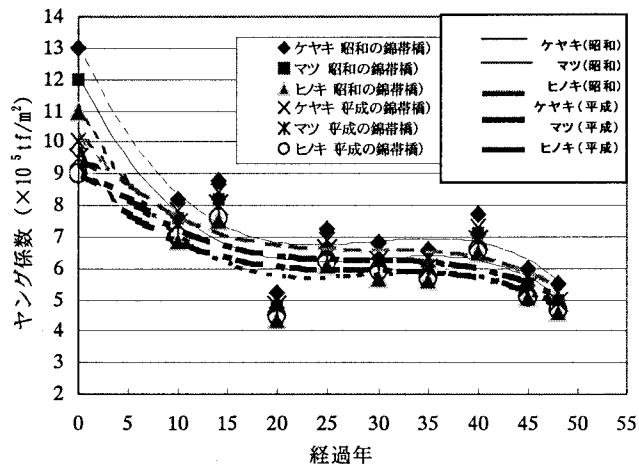


図-16 経過年による各樹種のヤング係数 E_y の変化

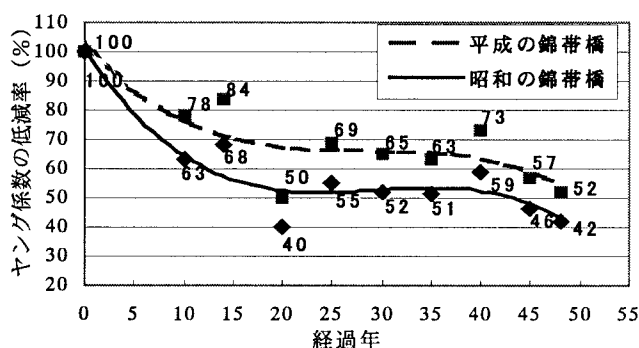


図-17 経過年による木材強度の低減率予測

5. あとがき

本研究では、昭和の錦帯橋に対する3次元構造解析モデルを作成して構造解析を行った。まず、昭和の錦帯橋に関しては、建設当初から48年経過後の実験値である固有振動数を基に、経年による固有振動数、それに対応する主要部材の各樹種の物性値、および経年による木材の強度低減率を推定した。さらに、平成の錦帯橋に対しても、昭和の錦帯橋で実施した構造解析の内容を踏襲し、経過年による固有振動数、主要部材の各樹種の物性値、木材の強度低減率を予測した。この結果、昭和の錦帯橋は48年経過後に木材の強度が58%低下していること、平成の錦帯橋では今後48年経過した場合に48%ほど木材の強度が低下する予測となった。なお、平成の錦帯橋で得た結果は解析的な検討内容であり、今後の気象条件や補修工事等で異なる結果になり得る。

錦帯橋がアーチ構造として力学特性を検討した結果、アーチ構造の特性は認められるが、純粋な力学特性を示していないことから、錦帯橋をアーチ橋と言わず、「肘木形式アーチ橋」するのが妥当であると思われる。最後に、本解析とデータ整理にご協力を頂いた当時の金沢工業大学・本田研究室の学部4年生の若林晃一氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 第5回 木の建築フォーラム 岩国：現在に生きる伝統技術・錦帯橋架替工事のすべて、NP0木の建築フォーラム、2004年1月。
- 2) 佐成屋孝之・原 弘行・本田秀行：錦帯橋の3次元構造解析モデル化と構造特性、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、I-730, pp.1459-1460, 2003年9月。