

(105) AASHTOの新設計法(LRFD)に依るプレストレストコンクリート橋の試設計

ピーシー橋梁(株) 正会員 ○中村定明

はじめに

American Association of State Highway and Transportation Officials (以下 AASHTO)は、1993年5月橋梁設計基準として、許容応力度法および終局強度設計法による AASHTO WSD/LFD (Working Stress Design/Load Factor Design) から、限界状態設計法による AASHTO LRFD (Load and Resistance Factor Design)の採用を決定した。ワシントン州交通局(以下、WSDOT)は、1994年6月 AASHTO LRFD による新設計基準の発効後、新設計法への移行作業を開始した。著者は、1995年9月から1996年3月まで WSDOT Bridge & Structures Office において、AASHTO LRFD によるプレストレストコンクリート(以下、PC)橋の設計を行う機会を得た。

本報告は、AASHTO LRFD によるPC橋の設計に関する概要について述べ、AASHTO WSD/LFD および我国の設計基準に基づく設計法と2、3の比較検討を行った結果を報告する。

1. AASHTO LRFD の設計概念¹⁾

AASHTO LRFD は、以下の4つの限界状態を規定している。

- (1)使用限界状態 : 通常の使用状態において、応力・変形およびひび割れ幅を制限する。
(Service Limit State)
- (2)疲労および破壊限界状態 : 活荷重(トラック1台を考慮)による応力の変動幅を制限し、橋梁
(Fatigue and Fracture L. S.) 設計耐用年数内での破壊に対し、必要なじん性を確保する。
- (3)終局限界状態 : 橋梁が、設計耐用年数内で経験すると考えられる荷重の組合せに
(Strength Limit State) 抵抗する耐力および安定性を保証する。
- (4)非常事態限界状態 : 大地震、洪水あるいは船舶の衝突等の非常時に構造物が崩壊しない事
(Extreme Event Limit State) を保証する。

AASHTO LRFD の基本式は次式で表され、各々の限界状態に対して満足しなければならない。

$$\eta \sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\eta = \eta_D \eta_R \eta_I \geq 0.95$ Load Modifier (以下、荷重補正係数)

- η_D ダクティリティ(じん性)に関する係数 Q_i 荷重による断面力
- η_R リダダンシー(余裕量)に関する係数 ϕ 抵抗係数
- η_I 構造物の重要度に関する係数 R_n 公称設計耐力
- γ_i 荷重係数 R_r 設計耐力

各限界状態の荷重補正係数を表-1に示す。

表-1 荷重補正係数

	使用限界状態	疲労限界状態	終局限界状態	非常事態限界状態
η_D	1.00	1.00	0.95~1.05	1.00
η_R	1.00	1.00	0.95~1.05	1.00
η_I	1.00	1.00	0.95~1.05	0.95~1.05

また、抵抗係数については、使用限界状態および非常事態限界状態に対して $\phi=1.0$ であり、終局限界状態に対して以下のように規定されている。

- $\phi=0.90$: 鉄筋コンクリート部材の曲げおよび引張りの設計に用いる値
- $\phi=1.00$: PC部材の曲げおよび引張りの設計に用いる値
- $\phi=0.90$: 普通コンクリート部材のせん断およびねじりの設計に用いる値

$\phi=0.75$: スパイラル筋あるいは帯筋で補強された部材の軸圧縮力の設計に用いる値
 $\phi=0.70$: 支承の設計に用いられる値

2. AASHTO LRFD の主な変更点

AASHTO LRFD では、AASHTO WSD/LFD から最近の設計および解析法の発展を反映し、多くの点で変更された。主な変更点は、以下の通りである。

- ・ 安全性に対する新しい概念の導入
- ・ 4つの限界状態に対する設計の導入
- ・ 新しい荷重係数および抵抗係数の導入
- ・ 新しい活荷重のモデルおよび衝撃係数
- ・ 荷重分配係数の計算方法の修正
- ・ 耐震設計法の一部変更

3. AASHTO LRFD, AASHTO WSD/LFD および我国の設計基準との比較検討

3.1 主桁配置および断面形状

図-1に、WSDOTで用いられる支間長35mクラスのプレテンション方式PC桁（以下、プレテン桁）の主桁配置の1例を示す。WSDOTでは、高速道路橋の80%以上がプレテン桁を使用し、主桁架設後、上床版を場所打ちする合成桁タイプを採用している。図-2に各種プレテン桁の断面形状を、表-2に諸数値を示す。WSDOTでは、支間長約18mから43mの単純桁および連続桁橋に対して、この標準桁が適宜使用され、最大長さ約45m、重量510kNのプレテン桁を架設したとの報告²⁾がある。

図-3に、WSDOTのプレテンI桁（以下、WSDOT桁）、JISのプレテンT桁（以下、JIS桁）および建設省タイプのポステンT桁（以下、ポステンT桁）について、支間長および構造高（桁高+床版厚）の関係を示す。ここで、WSDOT桁には、床版厚として190mmを桁高に加えた。同支間長に対する構造高が最も小さいのは、JIS桁で、ついでWSDOT桁、ポステンT桁の順になっている。WSDOTでは、プレテン桁に設計基準強度41MPa~48MPaのコンクリートを用いるが、一般には41MPaで設計を行っている。図-3より、ポステンT桁の構造高は、WSDOT桁の構造高に比べ、支間長が長くなるに従い次第に、大きくなり、支間長25m程度では約1.05、支間長40m程度で約1.2倍となっている。

また、図-2よりWSDOT桁では、腹部厚を薄くする事で自重による断面力を軽減できる形状となっている。

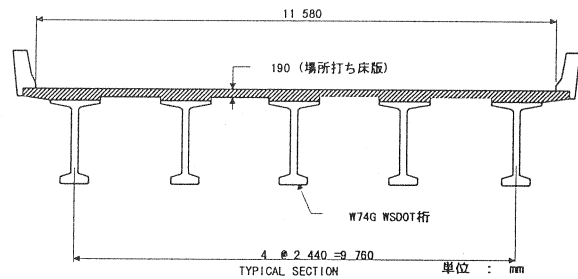


図-1 WSDOT プレテン桁の配置例

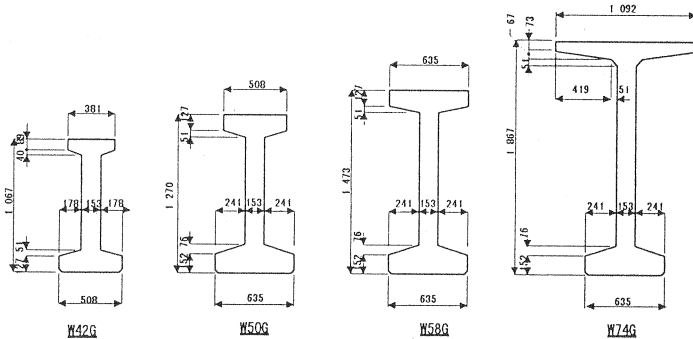


図-2 WSDOT プレテン桁の形状

表-2 断面諸数値

桁シリーズ	桁高 (m)	断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)	公称適用支間長 (m)
W42G	1.067	0.2415	0.031815	18
W50G	1.270	0.3397	0.068867	24
W58G	1.473	0.3900	0.110450	30
W74G	1.880	0.4824	0.227838	43

一方、JIS桁およびポステンT桁は、腹部厚を一定とした事により、より施工性を考慮した形状となっている³⁾。

3.2 コンクリート応力の限界値（許容応力度）および特性値の比較

表-3に、AASHTO LRFD¹⁾、AASHTO WSD/LFD⁴⁾および我国の道路橋示方書⁵⁾で規定されているコンクリートの応力度の限界値（許容応力度）および設計で用いる特性値を比較する。ここでは、プレテン桁を対象とし、設計基準強度 49 MPa の場合を示す。WSDOT

Bridge Design Manual⁶⁾（以下、WSDOT B. D. M.）では、プレストレス導入時圧縮強度を 34~41MPa とし、我国の基準と同程度あるいは、それ以上としている。設計荷重作用時およびプレストレス導入時における圧縮応力の限界値（許容圧縮応力度）については、AASHTO LRFD の基準では、道路橋示方書の基準に比べ約 1.3 倍、AASHTO WSD/LFD で約 1.2 倍となっている。一方、引張強度の限界値（許容引張応力度）については、各基準ともほぼ同じ値 (1.8MPa) となっている。ただし、WSDOT B. D. M. では、プレテン桁の設計に関して、コンクリートの引張応力を許容して

いない。また、設計計算に用いるヤング係数については、AASHTO の基準では道路橋示方書の約 1.15 倍となっている。

3.3 活荷重および衝撃係数の比較

AASHTO LRFD の活荷重は、橋梁の平均寿命 75 年¹⁾ を基本に定めている。実測された、最大重量の車両により発生するモーメントおよびせん断力は、AASHTO WSD/LFD の活荷重 HS-20 により計算されたモーメントおよびせん断力の 1.5~1.8 倍⁹⁾ であると報告されている。図-4 に AASHTO LRFD の活荷重 HL-93 の載荷モデルを示す。HL-93 は、トラック荷重 HS-20 と車線荷重 (9.3N/mm) との組合せ、および車軸荷重と車線荷重との組合せとして定めている。中間支点上の負モーメントの算出には、図-4 に示すように、2 台のトラックを各径間で 15m 以上離して載荷し、最大負曲げモーメントを算出する。この曲げモーメントと車線荷重による曲げモーメントの合計の 90% を中間支点上の設計曲げモーメントとする。

表-4 に、AASHTO LRFD の衝撃係数を示す。主桁の設計に用いられる衝撃係数 IM は 0.33 の一定値であり、

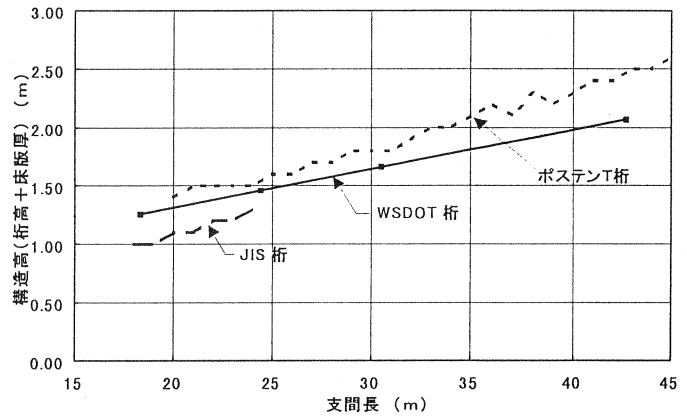


図-3 支間長と構造高の関係

表-3 コンクリート応力度の限界値（許容応力度）および特性値の比較

	(単位: MPa)		
	AASHTO LRFD	AASHTO WSD/LFD	道路橋示方書
設計基準強度 f_c	49.1	49.1	49.1
導入時圧縮強度 f_{ci}	34~41 ^{*1)}	34~41 ^{*1)}	34.3 ^{*2)}
応力度の限界値			
プレ導入直後			
圧縮 f_{cia}	$0.6 \times f_{ci} = 20.4 \sim 24.6$	$0.6 \times f_{ci} = 20.4 \sim 24.6$	19.6
引張 f_{tia}	$0.25 \times \sqrt{f_{ci}} \leq 1.38$	適用なし	1.77
設計荷重時			
圧縮 f_{ca}	$0.45 \times f_c = 22.1$	$0.40 \times f_c = 19.6$	16.7
圧縮 f_{ca1}	$0.60 \times f_c = 29.5$	適用なし	$1.25 \times f_{ca} = 20.9$
(運搬・架設時)			
引張 f_{ta}	$0.25 \times \sqrt{f_c} = 1.75$ 0.0 ^{*1)}	$0.25 \times \sqrt{f_c} = 1.75$ 0.0 ^{*1)}	1.77
ひび割れ係数 f_r	$0.63 \times \sqrt{f_c} = 4.41$	$0.63 \times \sqrt{f_c} = 4.41$	適用なし
ヤング係数 E_c	$0.043 \times y_c^{1.5} \times \sqrt{f_c} =$ 3.72×10^4 ^{*3)}	$0.043 \times y_c^{1.5} \times \sqrt{f_c} =$ 3.72×10^4 ^{*3)}	3.24×10^4

*1) WSDOT Bridge Design Manual (参考文献6) より引用。
 *2) JIS橋げたによるPC道路橋 設計・製造便覧 JIS A 5313¹⁹⁹⁵⁾ (参考文献7) より引用。
 *3) y_c : コンクリートの単位重量(kg/m³) (ワシントン州では $y_c = 2480$ kg/m³ を使用)

この係数はトラック荷重および車軸荷重による断面力に適用されるが、車線荷重には適用されない。図-5に AASHTO WSD/LFD および我国の道路橋示方書（L 荷重の場合）による衝撃係数の比較を示す。支間長が10m以上では、AASHTO LRFD の衝撃係数が最も大きく、AASHTO WSD/LFD、道路橋示方書の順であった。

また、図-6に、単純桁の支間中央位置での、車両占有幅当り（3.0m）の各活荷重による曲げモーメントを示す。ここで、図中のB活荷重による曲げモーメントは、2車線道路（車線幅7.5m）を仮定し、所定の荷重による、曲げモーメントを車両占有幅当りに換算した結果を示している。HL-93 による曲げモーメントは、他の活荷重による曲げモーメントより大きく、支間長が約35mで、B活荷重およびHS-25の約1.3倍、HS-20の約1.6倍となっている。また、支間長30mまでは、HS-25による曲げモーメントは、B活荷重による曲げモーメントとよく一致している。

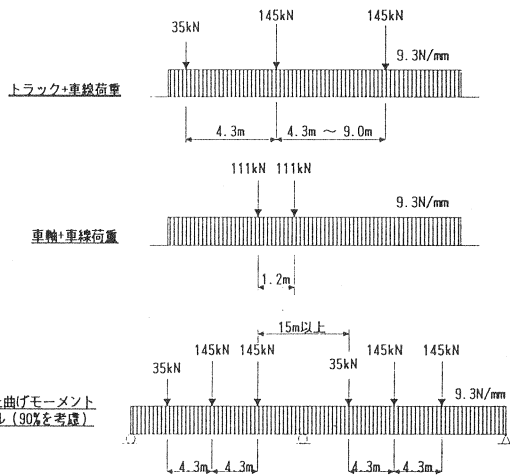


図-4 活荷重 HL-93 モデル

表-4 AASHTO LRFD の衝撃係数

構成部材	適用される限界状態	衝撃係数, IM
伸縮装置	全限界状態	75%
その他の部材	疲労および破壊限界状態	15%
〃	全限界状態	33%

3.4 プレストレスの減少量の比較

Lwin らは、AASHTO LRFD で定めるプレストレスの減少量について検討を行った⁷⁾。ここでは、AASHTO LRFD の方法、Lwin らの方法および我国の道路橋示方書による方法について比較検討を行う。

AASHTO LRFD では、プレテン桁のプレストレスの減少量の計算を以下のように定めている。

$$\Delta f_{pt} = \Delta f_{PES} + \Delta f_{PSR} + \Delta f_{PCR} + \Delta f_{PR} \dots (2)$$

- ここで、 Δf_{PES} : 弾性変形による減少量
- Δf_{PSR} : 乾燥収縮による減少量
- Δf_{PCR} : クリープによる減少量
- Δf_{PR} : リラクセーションによる減少量

プレストレスの導入後生じる乾燥収縮、クリープおよびリラクセーションによるプレストレスの減少量について AASHTO LRFD、Lwin らおよび道路橋示方書では以下のように説明している。なお、WSDOT では PC 鋼材に低リラクセーション鋼材の使用を定めており、以下に示す計算式は全て低リラクセーション鋼材に対するものである。また、図-7は計算に用いた断面および鋼材配置を示す。

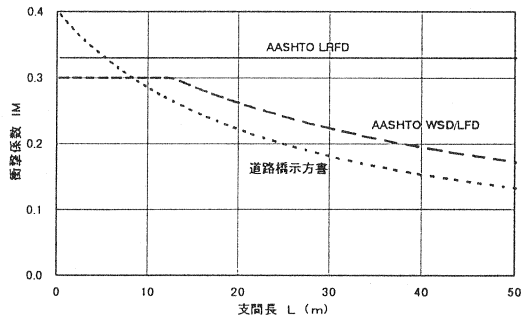


図-5 衝撃係数の比較

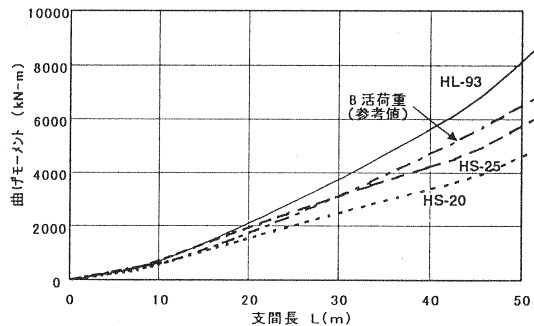


図-6 活荷重による曲げモーメントの比較（衝撃含む）

① AASHTO LRFD による概略計算

1桁、T桁、2主版桁およびボロースラブ桁の乾燥収縮、クリープおよびリラクセーションによるプレストレスの減少量の概算値は次式で算出される。

$$Loss = 230 \left[1 - 0.15 \frac{f'c - 41}{41} \right] + 41 \cdot PPR - 41 \quad \dots(3)$$

ここで、

Loss : クリープ、乾燥収縮およびリラクセーションによるプレストレスの減少量の概算値 (MPa)

$f'c$: コンクリートの設計基準強度 (MPa)

PPR : パーシャルプレストレス率

$$PPR = \frac{A_{ps} \cdot f_{py}}{A_{ps} \cdot f_{py} + A_s \cdot f_y} \quad \dots(4)$$

A_s : 鉄筋の断面積 (mm²) f_y : 鉄筋の降伏応力度 (MPa)

A_{ps} : 鋼材の断面積 (mm²) f_{ps} : 鋼材の降伏応力度 (MPa)

② AASHTO LRFD による詳細計算

- ・ プレテン部材の乾燥収縮によるプレストレスの減少量 (Δf_{PSR})

$$\Delta f_{PSR} = (117 - 1.03H) \quad (\text{MPa}) \quad \dots(5)$$

ここで、H : 年平均相対湿度 (%)

- ・ クリープによるプレストレスの減少量 (Δf_{PCR})

$$\Delta f_{PCR} = 12.0 f_{cgp} - 7.0 \Delta f_{cdp} \quad (\text{MPa}) \quad \dots(6)$$

ここで、 f_{cgp} : 鋼材図心位置でのプレストレスおよび自重によるコンクリートの応力度 (MPa)

Δf_{cdp} : 鋼材図心位置での後死荷重によるコンクリートの応力度 (MPa)

- ・ プレストレス導入後のリラクセーションによるプレストレスの減少量 (Δf_{PR})

$$\Delta f_{PR} = 30\% [138 - 0.4 \cdot \Delta f_{PES} - 0.2 (\Delta f_{PSR} + \Delta f_{PCR})] \quad (\text{MPa}) \quad \dots(7)$$

③ 修正された AASHTO LRFD の詳細計算

Lwin らは⁸⁾、式(6)のうち f_{cgp} について、クリープ、乾燥収縮およびリラクセーションによるプレストレスの減少量を考慮し、 f_{cgp} の平均値を繰り返し計算により求め、プレストレスの減少量を算出した。

④ Time Step Analysis によるプレストレスの減少量の計算

Lwin らは⁸⁾、時間の経過と共に変化するプレストレスの減少量を、次式よりさらに詳細に計算し検討した。

$$\Delta f_{pt} = \Delta f_{PES} + \Delta f_{PSR} + \Delta f_{PCR1} + \Delta f_{PCR2} + \Delta f_{PR} - \Delta f_{EG} - \Delta f_{CRG} \quad \dots(8)$$

ここで、 Δf_{PCR1} : 床版打設前のコンクリートのクリープによるプレストレスの減少量 (MPa)

Δf_{PCR2} : 床版打設後のコンクリートのクリープによるプレストレスの減少量 (MPa)

Δf_{EG} : 後死荷重によるコンクリートの弾性変形による鋼材応力度の増加量 (MPa)

Δf_{CRG} : 後死荷重によるコンクリートのクリープによる鋼材応力度の増加量 (MPa)

⑤ 道路橋示方書によるプレストレスの減少量の計算

- ・ リラクセーションによる減少量 ($\Delta \sigma_{pt}$)

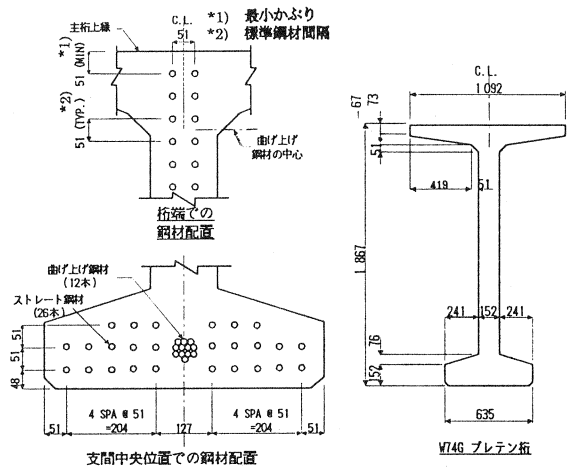


図-7 プレストレスの計算に用いた断面および鋼材配置

$$\Delta\sigma_{pt} = \sigma_{pt} \cdot \gamma \quad \dots(9)$$

ここで、 σ_{pt} : 導入直後のPC鋼材応力度 (MPa)

γ : リラクゼーション率(1.5%)

・ クリープ・乾燥収縮による減少量

$$\Delta\sigma_{\phi\epsilon} = \frac{n \cdot \phi \cdot (\sigma_{opt} + \sigma_{dg}) + E_p \cdot \epsilon_s}{1 + n \cdot \frac{\sigma_{opt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad \dots(10)$$

ここで、 n : ヤング係数比 (E_p/E_c)

ϕ : クリープ係数 (=3.0)

ϵ_s : 乾燥収縮度 ($=20 \times 10^{-5}$)

表-5に①～⑤の計算結果およびWSDOT B.D.M.で規定されている概算値を示す。我国の道路橋示方書による計算結果は、AASHTO LRFD 計算結果①および②とほぼ等しい値となった。計算法③および④と比較した場合、減少量を約8%(30MPa)多く見積もる結果となった。また、WSDOT B.D.M.で定める減少量は、計算法③および④とほぼ等しい値を示した。

4. まとめ

本報告は、AASHTOの新しい設計法であるLRFDによるプレストレストコンクリート橋の試設計を行い、AASHTO WSD/LFD および日本の設計基準との比較検討を行ったものである。以下に検討結果を示す。

- ・ AASHTO LRFD のコンクリート応力度の限界値は、圧縮強度に関して、我国の設計基準が定める許容応力度より大きく、引張強度に関しては、ほぼ同じ値となっている。
- ・ AASHTO LRFD の活荷重 HL-93 による曲げモーメントは、AASHTO の HS20、HS25 および我国の道路橋示方書の B 活荷重に比べ大きく、支間長約 35m で HS25 および B 活荷重の約 1.3 倍、HS20 の約 1.6 倍となった。
- ・ プレストレスの減少量について、AASHTO LRFD による計算結果は、我国の道路橋示方書による計算結果とほぼ等しい値となった。

おわりに

本報告中の諸検討については、WSDOT の Lwin 氏の指導の下で行われたものであり、氏に心から感謝致します。

参考文献

- 1) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, Washington D. C., 1994.
- 2) Lwin M. M. and Khaleghi B., "Design of Washington State Prestressed Concrete I-girders using the new AASHTO LRFD Specifications", Third NCMEC, 1995.
- 3) 建設省制定 土木構造物標準設計 解説書 (ボーステンション方式 PC 単純Tげた橋), 建設省, 1994.
- 4) AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, Fifteenth Edition, AASHTO, Washington D. C., 1992.
- 5) 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編, 日本道路協会, 1994.
- 6) WSDOT Bridge Design Manual, WSDOT, 1994.
- 7) JIS 橋げたによる PC 道路橋 設計・製造便覧, プレストレスト・コンクリート建設業協会, 1995.
- 8) Lwin M. M. and Khaleghi B., "Impact of New AASHTO-LRFD Specifications on Pressers Losses and Girder Deflection", Western Bridge Engineer Seminar. Sacramento, 1995.
- 9) NHI Course No. 13061 Load and Resistance Factor Design for Highway Bridges Participant Notebook, FHWA, 1995.

表-5 プレストレスの減少量の比較

	AASHTO LRFD				WSDOT 概略計算	道路橋 示方書(5)
	計算法1)	計算法2)	計算法3)	Time Step Analysis(4)		
弾性変形	128.4	128.4	128.4	128.4	331.0	128.4
乾燥収縮	230.0	34.6	34.6	62.9		209.5
クリープ		183.9	150.0	154.9		
リラクゼーション		12.9	14.9	15.1		17.6
応力増加分	適用なし	適用なし	適用なし	-36.1	適用なし	適用なし
合計	358.4	359.8	327.9	325.2	331.0	355.5